修士論文

超伝導積層配線を用いたTES型X線 マイクロカロリメータの製作プロセスの開発

首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻 博士前期課程 宇宙物理実験研究室

大石 詩穂子

指導教員: 大橋 隆哉

平成24年2月20日

概要

宇宙における通常の物質 (バリオン)の大部分は、温度が数百万度程度の中高温ガス (WHIM; Warm-Hot Intergalactic Medium) として存在することが理論的にも観測的にも分かって来た。しかし、この宇宙の熱的・化学的進化や大規模構造の形成に深く関わる中高温ガスは観測的に未検出であり、ダークバリオンと呼ばれる。我々はダークバリオン探査を目的とした次世代X線天文衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) 搭載へ向けた、X線撮像分光器 TES (Transition Edge Sensor) 型マイクロカロリメータの開発を行っている。TES カロリメータは入射した X線光子のエネルギーによる素子の微小な温度上昇を、超伝導遷移端における急激な抵抗変化を利用して測る検出器である。これまでの CCD などの半導体検出器に比べ1桁以上優れた分光能力を持ち、100 mK 程度の極低温下で動作させることで数 eV という高いエネルギー分解能を達成することが可能である。TES の遷移温度は、冷凍機の能力内で良いエネルギー分解能を得るために 100~120 mK の範囲が望ましく、我々のグループでは TES 温度計に超伝導金属 (Ti)と常伝導金属 (Au)の二層薄膜を使用することで、近接効果を利用して遷移温度をコントロールしている。これまでにチーム内で自作した 200 μ m 角の単素子で 5.9 keV (Mn-K_α)の X線に対して分解能 2.8 eV を達成している。

DIOS 計画ではダークバリオンからの空間的に広がった酸素輝線を検出するために TES アレイ全体で 有効面積 1 cm2 を実現しつつ、ピクセル当たりの分解能は 5 eV 以下を達成する必要がある。我々は従来 の TES 製作の経験から、面積とエネルギー分解能の要求を満たすアレイ設計を行い、200 µm 角の TES 温度計の上に 500 µm 角の吸収体の付いた 20×20 アレイの実現を目指している。しかしこのような大規 模ピクセルの実現には、基板上の配線スペースや、ピクセル間のクロストークが問題となってくる。密 集化へ進むと線幅が細くなり配線数が増えてしまい製作が困難になる。さらに配線数が増えると配線間 隔が狭まり配線電流やピクセルから発生する磁場が他配線や素子に対して誘導起電力を発生させ、余分 な電流を流してしまいエネルギー分解能の悪化へとつながる。

本研究では、このような問題を解決するため ~10 μm 幅の Al や Nb の配線を SiO2 の絶縁膜を挟ん で重ね合わせた超伝導積層配線を開発した。ホットとリターンの配線を重ね合わせることで配線スペー スが削減され、より充填率の高い素子構造を形成できる。また配線自身で磁場がキャンセルされるため、 クロストークを十分小さく抑えることができる。下部配線には Al (厚み 100 nm)、上部配線に Nb また は Al (厚み 50 nm または 100 nm) を使用し、3.5 cm 角の基板上に 500 µm ピッチで 400 ピクセル分の 配線を形成することに成功した。まず配線のみの歩留まりや超伝導状態を確かめるため、TES 部分を短 絡させた配線を用いて配線の評価を行った。上部配線の種類と厚さを変えた4種類の配線について常温 で抵抗を測定したところ、歩留まりは95~97%と良好であった。さらに希釈冷凍機に組み込み、それぞ れ超伝導転移を確認したところ、上部・下部配線ともに Al の場合は、~1.2 K 付近で比較的シャープな 転移が見られた。一方で上部配線が Nb の場合は、Nb および Al の転移は見られたものの、十数 mΩ の 残留抵抗が見られ、臨界電流も ~1 μA と小さく、問題があることがわかった。要求値は残留抵抗が数 mΩ以下、臨界電流が 100 μA 以上である。そこで Al-Al 配線を採用し、TES カロリメータの製作へと 私は Al-Al 積層配線を使用して、配線上に TES 膜を形成するプロセスの確認をおこなった。 進んだ。 そして配線上に TES を形成するにあたり TES 膜の加工 (特に Au) に使用する金属エッチング液に Al 配線が腐食されるという問題があることがわかった。そこでエッチング液に対する Au と Al のエッチン グ選択比を高める溶液を独自に作成することで、Al 配線が腐食されることなく TES を加工するプロセ ス条件を確立した。TESの超伝導転移へと進んだところ、残留抵抗が ≥50 mΩ と大きく、臨界電流が $\leq 6 muA$ と小さいことがわかった。また TES の常伝導時の抵抗が数百 mΩ 程度のところ、測定結果で は ~9 Ω と大きいなどといった問題が生じた。そこで TES 膜と配線の境界部の観察をし、①TES 膜と配 線間の自然酸化膜の存在、②配線に対する TES の被覆性が低い (TES 膜の段切れ)、③コンタクトホー ル (ホットとリターン配線が接する箇所)の被覆性が低い、という 3 つの問題点を明らかにし、単層配 線を用いた最適プロセスの条件出しを行った。①に対しては TES 膜成膜前に行う逆スパッタの印可電力 を強め、酸化膜の除去する条件を出した。また②の問題では、配線の厚さと TES の転移温度を考慮し、 TES の被覆性を高め、さらに確実に転移するような膜厚パラメータを導きだした。③で問題であったコ ンタクトホール部分を補強するように加工した。結果として試作素子では残留抵抗が~2 mΩ、臨界電流 が > 30 μ A、そして常伝導時の抵抗が~200 mΩ と問題点が全て改善されたことを確認した。

このように私は 20×20 アレイ用の超伝導積層配線を製作することに成功した。さらに配線上に TES 膜を形成する製作プロセスを確立した。

目 次

概要

第1章		1
1.1	1 X線天文学	1
	1.1.1 X線天文学の展開	1
	1.1.2 X 線観測の意義	2
1.2	2 放射線検出器	2
	1.2.1 エネルギー分解能	3
1.3	3 X線検出器	4
	1.3.1 ガス検出器	4
	1.3.2 マイクロチャンネルプレート	6
	1.3.3 半導体検出器	6
	1.3.4 CCD カメラ	7
	1.3.5 超伝導トンネル接合検出器	7
	1.3.6 回折格子	8
	1.3.7 X線マイクロカロリメータ	8
1.4	4 次世代の X 線分光器に要求される性能	10
	1.4.1 ミッシングバリオン問題	12
	1.4.2 DIOS $\exists \gamma \rangle \exists \rangle$	13
第2章	章 TES 型 X 線マイクロカロリメータ	15
2.1	L X線マイクロカロリメータの構造	15
	2.1.1 吸収体	15
	2.1.2 温度計	16
2.2	2 X 線マイクロカロリメータの原理	16
2.5	3 超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor)	18
2.4	4 ノイズとエネルギー分解能	18
2.5	5 雷埶フィードバック (ETF: Electro-Thermal Feedback)	20
2.0	951 雷熱フィードバック下の温度変化に対する応答	20
26	2.0.1 「電流シー」「レーシシーンmicのにに対ク 5.2.6 「・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
2.0	261 de SOUID	22 22
2 7	7 田因の開発状況	22 93
2.1	9.7.1 開発の歴中	20 93
	2.1.1 開光の歴史	20 94
	2.1.2 世外の開光状況	24
第3章	章 これまでの日本の開発状況	29
3.1	1 単素子の開発	29
	3.1.1 TES に用いる金属の選定	29
	3.1.2 自作した素子の最高性能	29

 $\mathbf{2}$

0	
3.2	多素子の開発
	3.2.1 自作した素子の最高性能
3.3	素子の製作方法
	3.3.1 プロセスフロー
	3.3.2 TES (Ti/Au) 成膜
	3.3.3 裏面 Si ₃ N ₄ 膜の裏彫り
	3.3.4 TES パターニング
	3.3.5 Al 配線加工
	3.3.6 Au 吸収体形成
	3.3.7 メンブレン構造形成
3.4	製作現場
3.5	アレイ化に向けた技術課題...................................
3.6	本修士論文の目的....................................
第4章	超伝導積層配線の開発
4.1	アレイ化の必要性....................................
4.2	<i>DIOS</i> 衛星搭載へ向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータ
	4.2.1 XSA (<i>DIOS</i> 用素子) に要求される性能
	4.2.2 <i>DIOS</i> 用素子のデザイン
4.3	単層配線 (従来の配線) の課題
4.4	超伝導積層配線
	4.4.1 配線デザイン
4.5	超伝導積層配線の製作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	4.5.1 配線の種類
	4.5.2 配線の製作方法
	4.5.3 試作した積層配線
4.6	積層配線の歩留まり試験....................................
	4.6.1 測定箇所
	4.6.2 測定方法
	4.6.3 結果と考察
4.7	積層配線の超伝導転移試験....................................
	4.7.1 実験装置
	4.7.2 測定方法

31

31

32

32

32

34

36

38

39

39

41

41

42

 $\mathbf{43}$ 43

44

44

44

46

49

49

54

5454

55

58

58

58

58

60

60 62

62

66

66

66

69

70

	4.9.1	Al-Al 積層配線の結果と考察............................	70
	4.9.2	Nb-Al 積層配線の結果と考察	70
第5章	超伝導	^算 積層配線を用いた TES 型 X 線マイクロカロリーメータ素子のプロセスの確立	71
5.1	TES 腹	莫の形成プロセス	71
	5.1.1	製作方法	71
	5.1.2	製作における課題.................................	71

4.8 Nb/Al 膜の断面・界面調査.....

4.7.3

4.8.1

4.8.2

4.8.3

4.9

5.2	TES エッチャントによる超伝導積層配線の耐性試験	71
	5.2.1 Ti エッチャントによる耐性テスト	73
	5.2.2 Au エッチャントによる耐性テスト	74
	5.2.3 TES 加工プロセスによる耐性テスト	74
5.3	Au エッチャントに対する Au と Al のエッチング選択比向上の条件出し	75
	5.3.1 Au エッチャントの種類	77
	5.3.2 Au エッチャントの見直し	79
	5.3.3 AURUM-101、302 を使用した Al の腐食耐性テスト	79
	5.3.4 新しい Au エッチャントの製作	80
	5.3.5 新エッチャントを用いた TES 加工プロセスによる耐性テスト	83
5.4	製作した素子と超伝導転移試験 (<i>R – T</i> 測定)	85
	5.4.1 TMU245 素子	85
	5.4.2 TMU249 素子	87
	5.4.3 TES 膜と配線間の断面観察	90
	5.4.4 TMU251 素子	92
5.5	逆スパッタによる自然酸化膜除去の条件出し	97
	5.5.1 積層配線基板を用いた逆スパッタ条件出し	97
	5.5.2 Al ベタ膜基板を用いた逆スパッタ条件出し	98
	5.5.3 TMU259素子	102
5.6	成膜厚増による段切れ改善の条件出し	107
0.0	5.6.1 単層配線を用いて TES 加工した素子	107
	5.6.2 TMU261-264の超伝導転移試験	110
	5.6.3 TMU276 素子 (積層配線)	112
	5.6.4 TMU276 素子の導通チェック	112
	565 SEM によるコンタクトホール部の観察	116
	566 TMU276素子の超伝導転移試験	116
5.7	コンタクトホール部分の強化	120
0.1	571 TMU284 素子	120
	572 TMU284 素子の超伝導転移試験	123
5.8	ドライエッチングによるメンブレンの形成プロセス	125
0.0	581 方法	125
	582 結果と考察	126
59	TMI1284 素子の完成	132
5.10	本意のまとめと考察	134
0.10	5 10 1 Au エッチャントによる Al 配線の腐食について	134
	5 10 2 TES 膜と配線間の自然酸化膜の存在	134
	510.3 配線に対する TES の段切れ問題	134
	510.4 コンタクトホールの被覆性問題	135
	510.5 メンブレン形成について	135
	5.10.6 TMU984 について	135
		100
第6章	まとめと今後の課題	137
6.1		137
6.2	今後の課題	138
	6.2.1 TES 膜厚と転移温度の最適化	138

	6.2.2	400 アレイ素子の完成と X 線評価測定	138
	6.2.3	マッシュルーム吸収体の製作	138
付録 A			139
付録 B			147
参考文南	ť		151
謝辞			151

第1章 序論

1.1 X 線天文学

1.1.1 X線天文学の展開

宇宙からX線がやってくることは、1962年にアメリカのB. RossiやR. Giacconiらによる観測ロケットにより、全天で最も明るいX線源である Sco X-1が偶然発見されたものである。この時代になって初めて観測された理由は、宇宙からのX線は地上に届かないからである。地上に100%近く到達する可視光に対し、宇宙から地球にやって来るX線は地球大気に吸収され地上に届くことはなく、上空ないし大気圏外に出なければ観測できないが、20世紀半ばからは気球やロケット、人工衛星等の技術の向上によりそれが可能になった(図 1.1)。



図 1.1: 宇宙空間からの電磁波が到達できる高度。

これを受けて、1960年代には小型の観測ロケットにより X 線天体について断片的な知識が集められ 始めたが、1970年に世界初の X 線天文衛星 Uhuru (米) が登場し、全天走査の結果約 400 個の X 線天体 をリストアップすることで研究は大きく飛躍した。その後は各国のそれぞれ特徴を持った観測器が次々 に打ち上げられ、それらの幅広い活躍により X 線という波長は宇宙物理学にとって不可欠な窓として確 立されてきた。

日本のX線観測は小田稔が考案した「すだれコリメータ」によって、さそり座X1の位置を同定する ことに成功したことから始まった。このコリメータは、2層のすだれ状のコリメータを検出器の上に置く ことで、入射X線の角度による強度変化を感知し、方向を知るという仕組みであり、X線撮像の難しい > 10 keV以上の太陽X線観測でもこの原理に基づく装置が今も使われている。すだれコリメータは1979 年に打ち上げられた日本の第1機目のX線天文衛星「はくちょう」に世界で初めて搭載され、次々と新 しいX線源の位置を決定することに貢献した。「はくちょう」を皮切りに、1983年に「てんま」、1987 年に「ぎんが」、1993年に「あすか」と続き、2005年に5機目のX線衛星である「すざく (ASTRO-E2) 」の打ち上げに成功した (図 1.2)。現在「すざく」に続く新たな宇宙X線天文衛星「ASTRO-H」の開



図 1.2: 世界の宇宙 X 線観測衛星の歴史。

発が進行中であり、2014年に打ち上げ予定である。

1.1.2 X線観測の意義

今日の宇宙観測は主に電磁波を用いて行われている。宇宙に存在する物質や現象は、ミクロからマク ロまで、低温から高温までと実に幅広い。そのため、電波・赤外線・可視光・X 線・ γ 線を用いた多波長 による複合的な観測により宇宙の本質を探る研究がなされている。その中で宇宙における X 線や γ 線領 域の放射は非常に多く、銀河間に存在する超高温ガスからの熱放射、超相対論的電子による逆コンプト ン散乱、超新星残骸や γ 線バーストからのシンクロトロン放射、X 線パルサーからのサイクロトロン共 鳴などが挙げられる。また 10 keV 以上のエネルギーをもつ硬 X 線・ γ 線領域では、高エネルギー天体 から放出される非熱的な放射や高温の熱放射を観測することが可能である。従って、宇宙における高エ ネルギー、高温現象を捉えるのに適した電磁波である。また、0.1 ~ 10 keV の X 線エネルギー帯 (軟 X 線帯)には、炭素、窒素、酸素、ネオン、マグネシウム、シリコン、硫黄、アルゴン、カルシウム、鉄、 ニッケル等の宇宙に存在する主要な重元素の K、L 輝線が存在する。X 線・ γ 線による天体観測は、宇 宙におけるこれらの重元素の量や物理状態を知る上でも重要な手段のひとつである。

X線を放射する天体は多岐に渡り、それぞれ異なった特徴のX線を放射している。例えば、白色矮星、 中性子星、活動銀河核のブラックホール等の高密度天体と恒星(伴星)との連星系では、伴星からの質量 降着によって高温の降着円盤が形成され、そこからの黒体放射や熱制動放射によるX線が観測される。 中心星の自転や伴星の公転によってX線強度が周期的に変化するX線パルスが観測されることもある。 また、銀河や銀河団からはそれらに付随する高温プラズマによる熱制動放射のX線が見られる。最近で は、太陽系惑星周辺の中性原子と太陽風の電離プラズマによる電荷交換反応によってX線輝線が放射さ れることも分かってきた。X線を通して見ると宇宙は高エネルギー、高温現象で満ちあふれていること が分かる。こういった情報をより正確に捉えるために、X線検出器の撮像能力やエネルギー分解能、時 間分解能等を向上させることは重要である。

1.2 放射線検出器

放射線の検出器には様々なものが存在する。そのどれもが、放射線により物質中に与えられたエネル ギーが電子・原子・分子の相互作用の多数回の繰り返しを通じて、多くの原子・分子に分配されていく



図 1.3: おおぐま座の渦巻き型銀河の各波長でのイメージ (青: X線 (*Chandra*衛星)、黄:可視光 (*Hubble*宇宙望遠鏡)、赤:赤 外線 (*Spitzer*宇宙望遠鏡)。

物理過程、または結果を利用して放射線を検出するものである。以下に主な検出方法と検出器の種類を 分類する (表 1.1)。

表	1.1:	放射線の検出方法と測定器の種類。
1	T.T.	成功が少人田乃居と開た品・戸臣系。

検出方法	検出器
気体の電離を利用	電離箱、比例計数管、GM計数管
固体の電離を利用	半導体検出器
蛍光作用を利用	シンチレーション検出器、熱ルミネセンス線量計
写真作用を利用	ガラスバッチ

一般に 40 eV~20 keV (30~0.05 nm) のエネルギー (波長) 領域における X 線の検出には光電効果が 利用され、硬 X 線から γ 線の領域ではコンプトン効果や電子対生成が有効となる。上に挙げたような検 出器の中から、X 線の検出に適したものを選択する必要がある。また、天体からの X 線を観測する際に は地球大気による X 線の吸収があるために地上での観測は不可能である。そのため人工衛星に搭載して の観測が現在では主流であり、これらの検出器には、大きさ・寿命・耐久性などの制限が与えられること となる。また、X 線以外の成分 (バックグラウンド)、例えば紫外線、荷電粒子、宇宙線にも感度を持っ ているため微弱な X 線を検出する場合には、これらの除去も重要な機能となる。

1.2.1 エネルギー分解能

ここでエネルギー分解能について一般論を述べる。エネルギー分解能とはX線光子のエネルギーの決 定精度のことで、決定したX線光子のエネルギーの頻度分布をX線エネルギースペクトルと呼ぶ。エ ネルギー E₀の単色のX線が入射した際に得られるエネルギースペクトルを図1.4に示す。キャリアの 揺らぎや読み出しシステムによるノイズなどの影響により、単色X線を入射した場合であっても得ら れるエネルギースペクトルは必ず有限の幅を有する。この分布の高さが半分になるところの幅を半値幅 (FWHM: Full Width Half Maximum)とよび、検出器のエネルギー分解能の指標として用いられる。半



図 1.4: 単色 X 線入射時の計測スペクトル。

値幅が小さいほど分解能は高い。一般に X 線検出器では、X 線入射時の検出器との相互作用によって生 じる電子、イオン、正孔、フォノンなどのキャリアを収集して入射エネルギーを測定する。検出器に 1 つの光子が入射し、生成した情報キャリアが N 個であったとする。ここで、キャリアの生成は ポアソン (Poisson)統計に従うとし、情報キャリア生成に必要なエネルギーは入射 X 線光子のエネルギー E_0 に比 べて充分に小さく、情報キャリア数 N が充分に大きい場合には、図 1.4 に示す応答関数はガウス (Gauss) 分布となる。その標準偏差は $\sigma = \sqrt{N}$ であり、半値幅は FWHM = $2.35\sqrt{N}$ で表されることとなる。こ れより、情報キャリア数の統計揺らぎによって決まるエネルギー分解能 ΔE は、

$$\Delta E_{\rm FWHM} = \frac{2.35E_0}{\sqrt{N}} \tag{1.1}$$

と表される。しかし、実際には情報キャリアの生成はポアソン分布に完全には従わないので、実際のエ ネルギー分解能の限界は、

$$\Delta E_{\rm real} = 2.35 E_0 \sqrt{\frac{F}{N}} \tag{1.2}$$

と表される。ここで *F* は Fano 因子と呼ばれるポアソン統計からのずれを定量化するために導入された 係数であり一般に *F* \leq 1 である。

1.3 X線検出器

X線は物質との相互作用等を利用して検出することができる。これまで様々な種類のX線検出器が開発され、X線天文学の発展に貢献してきた。ここでは、代表的なX線検出器を紹介し、その原理や特徴等について簡単に述べる。

1.3.1 ガス検出器

比例係数管 (PC: Propotional Counter) は円筒または角筒を陰極とし、細い芯線を陽極として高電圧 を印加し前置増幅器を通してパルス信号を取り出す検出器である。放射線がガス中を通過する際に、ガ スを電離して一次電子とイオンを生成する。それぞれ電場により加速されるが、質量の違いから電子の 方がより速く移動する。加速を受けた一次電子がガスのイオン化ポテンシャルを超えるエネルギーを得 ると、一次電子によるガスののイオン化が生じ二次電子をイオンの対ができる。これを繰り返すことで 入射エネルギーに比例した個数の電子が生成され、電極へ達することとなる。この電子増幅過程を電子 なだれと呼ぶ。筒の中には希ガスと有機ガスの混合ガスを流すか密封する。筒の一部を切り取りX線透 過率の高い薄膜を取り付けてX線の入射窓にする。芯線には直径 20 ~ 100 μ mのタングステン線が主 に用いられ、混合ガスとしては Ar 90% + CH₄ 10% の PR(P-10) ガスがよく使用される。X線入射窓 の膜には Be、Al、Ti の金属薄膜やポリプロピレン、マイラー、カプトン等のプラスチック薄膜が用い られる。検出効率は窓膜の透過率とガスの吸収率によって決まる。エネルギー分解能は一次電子と二次 電子の数の揺らぎで決まる。比例係数管では特に二次電子の数の揺らぎが大きく、入射X線エネルギー を E_0 、一つの中性ガスを電離しイオン対を生成するのに必要なエネルギーをWとし、二次電子の数の 揺らぎの影響を加味し、式 1.2 を書き換えると、エネルギー分解能 ΔE は、

$$\Delta E = 2.35\sqrt{E_0 W(F+b)} \tag{1.3}$$

と表される。ここでりは電子なだれの理論的予想から導かれる定数であり、0.4 < b < 0.7程度の値を持つ。比例係数管での典型的な値としては、W = 35 eV、F = 0.20、b = 0.6である。これを上の式に代入すると、6 keV に対するエネルギー分解能は 960 eV となる。比例計数管に似た X 線検出器で X 線 天文学の初期に使用された Geiger-Muller 計数管は、電子増幅が飽和するほど高い電圧を印可するものであり、エネルギー測定よりも X 線の計数に特化した検出器である (図 1.5)。世界初の X 線天文衛星 *Uhuru* 衛星 (米) に搭載されて以来、これまで多くの衛星に搭載されてきた。中でも *Einstein* 衛星 (米) や *ROSAT* 衛星 (独) には、位置検出機能を備えた比例計数管が搭載され、X 線撮像分光検出器として X 線望遠鏡の焦点面に配置された。日本の衛星「ぎんが」にも非 X 線バックグラウンドを低減する反同時計数機能を持った比例計数管が搭載された。



図 1.5: Geiger-Muller 計数管。

一方、ガス蛍光比例係数管 (GSPC: Gas Scintillation Propotioanl Counter) では一次電子で中性ガス を励気させ、これが基底状態に戻る際に放出する光子を利用したもので、電子なだれを生じることがな いため比例係数管よりも高いエネルギー分解能を達成することが可能である。代表的なガス蛍光比例係 数管での値 W = 35 eV、F = 0.20 を用いると、6 keV に対するエネルギー分解能は 480 eV となる。こ の値は X 線天文衛星「あすか」に搭載されていた GIS (Gas Imaging Spectrometer) のエネルギー分解 能にほぼ一致する。

1.3.2 マイクロチャンネルプレート

マイクロチャンネルプレートはX線検出器の中では最も高い位置分解能を得ることができる検出器の 一つである。図1.6に示すように、細管を多数束ねて平板状にした検出器である。細管の両端には電圧 が印可されている。細管はそれぞれ光電子増倍管の役割を果たし、X線が細管の内壁に入射した際に発 生する光電子を増倍する。この過程で増倍された電子を信号として取り出すとX線エネルギーの情報 は得ることができないが、入射X線の位置の情報を得ることができる。そのため、X線望遠鏡の焦点面 に配置することでX線画像を得ることができ、X線撮像検出器として用いることができる。これまで *Einstein* 衛星(米)や*EXOSAT* 衛星(欧州)、*ROSAT* 衛星(独)、*Chandra* 衛星(米)等に搭載され、銀 河や銀河団の高温プラズマの空間分布の研究等に大きな貢献をした。



図 1.6: マイクロチャンネルプレート。

1.3.3 半導体検出器

半導体検出器 (SSD: Solid State Disk) は比例計数管とは異なり、アルゴンガスではなくシリコンやゲ ルマニウムなどの半導体と使用するものである。この検出器の基本的情報キャリアは X 線から変換され た一次電子であり、入射 X 線にそって電子・正孔対が生じる。これを検出器内部に印加した電圧によって 収集して電気信号として読み出すのが基本的な検出原理である。次に述べる X 線 CCD も広義では半導 体検出器であるが、ここでは放射線検出器として比較的歴史のあるリチウムドリフト型シリコン Si (Li) 検出器について簡単に述べる。

半導体検出器の構造を図 1.7 に示す。pn 接合に逆バイアスをかけると空乏領域が形成され、この領域 にて X 線が吸収され電子・正孔対がその行路に沿って生じる。Si の場合この領域の厚みは数 mm まで可 能であり、通常ここに数 100~数 1000 V のバイアスをかけて用いる。半導体検出器の時間分解能は、有 感領域を電子または正孔が移動する速さで決まり、2 mm 厚を例にとれば 10~100 nm 程度になる。一つ の情報キャリアを生じるのに必要なエネルギー W は、半導体検出器では Si で平均 3.65 eV、Ge で平均 2.96 eV とガス検出器に比べ 1/10 であり高いエネルギー分解能が期待される。Si を用いた半導体検出器 のファノ因子 F の典型的な値は 0.1 である。従って式 1.3 を用いると 5.9 keV に対するエネルギー分解 能は 120 eV という値を得る。しかしながら実際は、半導体検出器の場合はガス検出器に比べて読み出 し回路系に入力される電子の数が少ないため、読み出し回路系の雑音が無視できなくなり、エネルギー



図 1.7: 半導体検出器の測定原理。

分解能の劣化をもたらす。「すざく」に搭載されている HXD (Hard X-ray Detector) による観測帯域の うち低エネルギー側を受け持つ PIN 型シリコン半導体検出器では、2 mm 厚のシリコン PIN フォトダイ オード素子を2枚重ねにし、有効厚みを4 mm として用いる。読み出し回路系の雑音を抑えるため低温 に冷却して用いる。*Einstein* 衛星 (米) 等ではX線分光検出器としてX線望遠鏡の焦点面に配置された。

1.3.4 CCD カメラ

ビデオカメラやデジタルカメラ等としても多用される CCD (Charge Coupled Device) は X 線検出器 としても有用である。X 線 CCD カメラは、一つ一つの小さな半導体検出器をモザイク状に並べること により、前置増幅器からみた静電容量を小さくし、増幅器の雑音レベルを下げることに成功した検出器 である。典型的に 5.9keV の X 線に対して $\Delta E_{\rm FWHM}$ = ~120 eV 程度となる。長所はメガピクセルの精 細撮像能力を持っていることである。多画素の情報を読み出すための仕組みとして、ある画素に入射し た X 線光子が生成する電子群を電場によって電荷転送領域に移動させて蓄積し、電極に加える電圧を規 則的に変化させることで蓄積された電子群をバケツリレー方式で読み出し口まで転送する。この方法を 用いることで画素毎の信号を順番に取り出し、位置情報を再構築することができるが、時間分解能は数 sec 程度と低くなってしまう。現在軌道上で観測を行っている日本の衛星「すざく」には、XIS (X-ray Imaging Spectrometer) として X 線 CCD カメラが搭載されている (図 1.8)。

1.3.5 超伝導トンネル接合検出器

超伝導トンネル接合検出器 (STJ: Superconducting Tunnel Junction) は、2枚の超伝導対で薄い絶 縁膜を挟んだ構造をしている。STJ 素子にて X 線が光電吸収される際に生成された光電子がクーパー (Cooper) 対を破壊して準粒子 (単独の電子) を作る。STJ ではトンネル効果で絶縁体を通過した準粒子 を信号として検出する。超伝導現象を利用するため、~4 K の極低温にて動作させる必要がある。超伝 導状態にある電子が常伝導状態となるのに必要なエネルギー、すなわちクーパー対を一つ破壊するのに 必要なエネルギーは数 meV である。エネルギー分解能の限界は情報キャリア数の統計揺らぎによって 決まるので、STJ の分解能は半導体検出器に比べ数十倍も良くなると考えられ、原理的には~4 eV の エネルギー分解能を達成することが可能である。



図 1.8: 「ずさく」に搭載されている X 線 CCD カメラ。

1.3.6 回折格子

回折格子は X 線検出器の中では最も高いエネルギー分解能を得ることができる検出器の一つである。 ただし、分散型分光器である回折格子は分散された光だけがエネルギー情報を持つため、非分散型分光 器に比べて X 線検出効率が低い。また、分散角が入射 X 線の波長に比例するため、波長の短い (エネ ルギーの高い) X 線に対しても高いエネルギー分解能を得ることができない。さらに、分散型分光器で あるため、空間的に広がった天体に対しては高いエネルギー分解能を得ることができない。つまり、回 折格子を用いた観測に適した対象は、軟 X 線で明るい点状の X 線源に制限される。回折格子は X 線望 遠鏡とその焦点面の間に配置され、エネルギー分解能は望遠鏡の角度分解能や X 線エネルギー等に依 存する。具体的には $\Delta E_{\rm FWHM} \propto E^2$ であり、典型的に 1 keV の X 線に対して $\Delta E_{\rm FWHM}$ は数 eV 程度 となる。現在軌道上で観測を行っている *Chandra* 衛星 (米) には透過型回折格子 (HETG: High Energy Transmission Grating、LETG: Low Energy Transmission Grating)、XMM-Newton 衛星 (欧州) には 反射型回折格子 (RGS: Reflection Grating Spectrometer) が搭載されている。

1.3.7 X線マイクロカロリメータ

X線マイクロカロリメータは、100% に近い検出効率と半値幅約 10 eV のエネルギー分解能を実現し、 さらに空間的に広がった X線源も観測可能にする。X線 CCD などほとんどの X線検出器は X線によ る物質のイオン化現象を利用し、イオン化で作られた電子などの電荷を電気信号として取り出す。一方、 X線マイクロカロリメータはこれと全く異なる原理に基づいている。物質に X線光子が吸収されると、 そのエネルギーが熱に変換される。その熱量を測定するのが X線マイクロカロリメータである。詳しく は次章で述べる。

現在、X線分光検出器として動作しているマイクロカロリメータには、使用する温度計の違いによっていくつかの種類が存在する。以下に4種類のマイクロカロリメータを紹介する。

1.3.7.1 半導体サーミスタ型 X 線マイクロカロリメータ

半導体サーミスタ型 X 線マイクロカロリメータは、半導体素子の電気抵抗の温度依存性を温度計として用いる。例えば、シリコンに $10^{18} \sim 10^{19}$ cm⁻³ 程度の不純物をドープすることにより ~ 100 mK で

大きな感度を持つようになる。温度計の絶対感度 α_R は、半導体素子の抵抗をRとすると、

$$\alpha_R = \frac{d \, \log R}{d \, \log T} \tag{1.4}$$

のように表すことができ、典型的に $\alpha_R \sim -6$ 程度を実現することができる。そして、これまでに実験室 では 5.9 keV の X 線に対して $\Delta E_{\rm FWHM}$ = 3.2 eV というエネルギー分解能が得られている。日本の X 線 天文衛星「すざく」の XRS (X-Ray Spectrometer) として 6×6素子の半導体サーミスタ型 X 線マイク ロカロリメータが搭載され、最初期の観測で $\Delta E_{\rm FWHM}$ = 6.7 eV のエネルギー分解能を達成した実績が ある。2014 年に打ち上げ予定の X 線天文衛星「ASTRO-H」の SXS (Soft X-ray Spectrometer) として も搭載される予定である。

1.3.7.2 超伝導遷移型 X 線マイクロカロリメータ



図 1.9: 超伝導薄膜の相転移端。

超伝導遷移 (TES: Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータは、超伝導体を素子として 用い、X 線の入射、吸収による温度上昇を超伝導遷移端における急激な電気抵抗の変化として測定する。 つまり、超伝導体の臨界温度付近の電気抵抗の急激な温度依存性を温度計として用いる (図 1.9)。この タイプの温度計を TES という。TES は X 線マイクロカロリメータだけではなく、赤外線や電波 (マイ クロ波、サブミリ波等)のボロメータとしても用いられている。TES 温度計の絶対感度 α_R は、超伝導 体素子の電気抵抗を R とすると、式 1.4 によって表すことができ、 $\alpha_R \sim 1000$ という半導体サーミスタ 型の 100 倍以上の感度を実現することができる。TES に用いる超伝導体は、Ti/Au や Mo/Cu の 2 層薄 膜などが主流である。温度計の感度が向上したことによって、半導体マイクロカロリーメータと比べて 応答時間が 100 倍程度速くなり、エネルギー分解能は数倍程度増加する。これまでに 5.9 keV の X 線に 対して $\Delta E_{\rm FWHM}$ = 1.6 eV というエネルギー分解能が GSFC/NASA により報告されている。TES 型 X 線マイクロカロリメータは 2012 年に打ち上げ予定のロケット実験「*Micro-X* (米)」に搭載され、初の X 線分光観測が行われる予定である。その後、2016 年に打ち上げ目標の日本の衛星「*DIOS*」にも搭載 され、WHIM 探査に利用される予定である。また地上の分析装置として、SEM などの EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer) としての研究もすすめられている。

1.3.7.3 金属磁気型 X 線マイクロカロリメータ

金属磁気マイクロカロリメータ (MMC: Metallic Magnetic Calorimeter) は素子の温度上昇を電気抵抗の変化として読み取る代わりに、強磁性体の磁化の変化として読み出す (図 1.10)。常伝導金属中に磁性原子 (エルビウム Er が主流) をドープした金属磁気温度計に、磁場を印加し磁化量の温度変化を測定する。磁気カロリーメータのエネルギー分解能は、素子のフォノンノイズと SQUID 読み出し系のノイズによって決まる。ドイツのハイデルベルグ大学とアメリカのブラウン大学の共同研究により開発が進められており、エルビウム-金の素子による金属磁気型 X 線マイクロカロリメータでは、5.9 keV の X線に対して $\Delta E_{\rm FWHM}$ = 2.7 eV というエネルギー分解能が得られている。



図 1.10: 金属磁気マイクロカロリメータ (MMC)の概要図。

1.3.7.4 動インダクタンス検出器

動インダクタンス検出器 (KID: Kinetic Inductance Detector) は、光子の入射による温度変化によっ て Cooper 対の密度が変化することで生じる超伝導体のインダクタンス (動インダクタンス) の変化を温 度計として用いる。動インダクタンスの変化は高周波 (GHz) 帯の LC 共振回路を用いて共振周波数の 変化を測定することで読み出す。この方法を用いることで、LC 共振回路の並列という簡単な仕組みに よって数千もの多素子アレイを実現することができる。最近ではマイクロ波の高感度イメージング検出 器としての開発に重点が置かれている (図 1.11)。

1.4 次世代のX線分光器に要求される性能

1.12 に近年開発が進められている X 線分光検出器のエネルギー分解能の変遷を示す。X 線天文学初期 から X 線検出器の性能は向上し続けており、エネルギー分解能に至っては 3 桁も改善されていることが 分かる。これまで宇宙 線の観測に用いられてきた X 線検出器としては、撮像に特化したマイクロチャン ネルプレートや X 線 CCD カメラ、分光に特化した回折格子等があるが、次世代の X 線検出器としては 広視野に渡って精細な X 線画像が得られる撮像性能と同時に高いエネルギー分解能を合わせ持つ総合的 な検出器が必要とされる。



図 1.11: 動インダクタンス検出器 (KID)。



図 1.12: X 線分光検出器のエネルギー分解能の変遷。

1.4.1 ミッシングバリオン問題

現在の宇宙のエネルギー密度は、ダークエネルギーが約7割、物質が3割である。さらに物質全体の8 割は暗黒物質 (ダークマター) と呼ばれる未知の粒子であり、直接観測が可能な通常物質 (バリオン) は物 質全体の2割、宇宙のエネルギー密度の4% にすぎない。しかし、現在存在しているバリオンのうち観測 にかかるほど高密度で高温度のものは、バリオン総量のたった10% 程度でしかない。他の波長域での観 測を合わせても半分程度が直接観測されていないのである。現在の宇宙に存在するバリオンの半分が未 だ検出されていないこの問題を「missing baryon 問題」といい、これらのバリオンを総じて dark baryon ないしは missing baryon と呼ぶ。missing baryon は宇宙流体シミュレーションによって、密度が小さい 領域については銀河団同士をフィラメント状につなぐ 10⁵-10⁷ 程度のガスとなって分布していることが 示唆された。この希薄なガスを総じて中高温銀河間物質 (WHIM: Warm-Hot intergalactic Medium) と いう。

WHIM は他の温度帯のガスよりも最もダークマターの分布をトレースしていることが のシミューレ ションによって言われており、WHIM を広視野で観測することがダークマターの構造を解明することに つながるのである (図 1.13)。10⁵-10⁷ 程度のガスは電離酸素のアバンダンスが最も大きく、これらの輝 線吸収線が卓越する。WHIM は X 線で明るく輝く銀河団に比べると、温度が低く密度が希薄であるた め、熱制動輻射の強度は極めて低く観測することが難しい。明るい活動銀河核を背景光として、WHIM による紫外線や X 線の吸収線の観測も行われているが、この方法で検出できるのは特定の方向にある ガスだけであり、WHIM の広がりや構造を見ることはできない。そこで OVII、OVIII の輝線吸収線を X 線でダイレクトに観測することができれば WHIM の空間分布を明らかにすることができる。現在の X 線検出器では WHIM を観測するに十分なエネルギー分解能と視野を備えていない。そのため missing baryon 問題解決のためには次世代の X 線望遠鏡とよりよい検出器が求められている。



図 1.13: 流体シミュレーションによる銀河団周辺の物質 分布。

1.4.2 DIOS ミッション



図 1.15: *DIOS*の 10 万秒の観測で期待される WHIM からのエネルギースペクトル。

WHIM 検出のため、我々は軟 X 線精密分光ミッション「DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) 」を進めている(図 1.14)。DIOS ミッションは、宇宙に広がる電離した銀河間物質からの酸素輝線検出 を通じて missing baryon の存在とその物理的諸性質を探ることを主目的としたものである。酸素輝線 -OVII (561 eV、568 eV、574 eV)、OVIII (653 eV) - を精密 X 線分光することで赤方偏移 0 < z < 0.3 の範囲の10⁵-10⁷のWHIMを直接検出する。これによって可視光での銀河の赤方偏移サーベイ、X線の 銀河団観測と相補的な新しい宇宙の窓が開かれることが期待できる。それと同時に、 OVII と OVIII の 輝線吸収線強度比、輝線の微細構造と輝線幅から、ガスの加熱機構、ガスの運動状態等も明らかにする。 宇宙の構造形成により一部の物質は銀河や星へとフィードバックし、その一方で余剰なエネルギーは物 質と共に銀河空間に放出されたはずである。WHIM はこれらの構造をトレースしている。DIOS はこれ を明かにし宇宙の構造形成史にも迫る。図 1.15 に DIOS の 10 万秒の観測で期待される WHIM からのエ ネルギースペクトルを示す。視線内に存在する WHIM からいろいろな赤方偏移の輝線が見えることが わかる。シミュレーション結果から、輝線に対する感度として約 1011 /erg/cm²/sr があれば、全バリオ ンの 20~30% が検出できると言われている (図 1.16)。ここから観測時間として 1 Msec 程度を仮定すれ ば、WHIM 検出のために検出器に要求される性能は $S\Omega \sim 100 \text{ cm}^2 \text{deg}^2$ となる。また、図 1.17 は DIOS の視野×面積、エネルギー分解能を他の衛星と比較したものである。DIOSは視野×面積が非常に大き くまたエネルギー分解能にも優れているため、空間的に広がった輝線に対する検出感度はすざく衛星の 40倍以上を持つことができる。

このように *DIOS*は大きく広がった天体に対する X 線分光に特化した観測装置である。*DIOS*に搭載 する検出器として以下に示す TES 型マイクロカロリメータを極低温下 (50 mK) で用いる必要がある。 さらに望遠鏡との兼ね合いから決まる有効面積を広げるために、TES カロリメータを 16×16 素子以上 のアレイ化にしなければならない。現在、首都大、宇宙研をはじめとした我々の研究グループではカロ リメータ素子のアレイ化に向けた研究がなされている。



図 1.16: 2 種類の酸素輝線を使って検出できる近傍宇宙のダークバリオンの割合 (横軸: 検出器の検出限界、緑の縦線: *DIOS*の典型的な検出限界)。



図 1.17: いろいろなミッションの広がった輝線放射に対する観 測能力の比較 (縦軸: 視野 × 面積、横軸: エネルギー分解能)。

第2章 TES型X線マイクロカロリメータ

超伝導遷移端の急激な抵抗変化を利用する TES 型 X 線マイクロカロリメータ (以下、TES カロリメー タ)を開発するにあたって、その超伝導の性質を理解することが重要である。この章では TES カロリ メータの原理と世界の開発状況について述べる。

2.1 X線マイクロカロリメータの構造

X線マイクロカロリメータ (以下、マイクロカロリメータ) は、入射 X線光子の1つ1つのエネルギー を素子の温度上昇として測る検出器である。入射する X線の温度上昇は極めて小さいものであるが (~ 数 mK) 、素子を~100 mK と極低温下で動作させ、さらに高感度の温度計を用いることで、微小な温 度上昇を計測できる。マイクロカロリメータは図 2.1 に示すように、温度 T に冷やされた熱容量 C の吸 収体と温度計からなる構造をしており、適度に悪い熱伝導度 G を持つサーマルリンクを通じて、より低 温の熱浴と接続され、定常状態に保たれている。各構成要素の役割を表 2.1 に示す。



図 2.1: マイクロカロリメータの構造

マイクロカロリメータの素子は、入射 X 線のエネルギーを高い効率で光電吸収する X 線吸収体として の能力と素子の温度上昇を高い精度で測定する温度計としての能力を持ち合わせている必要がある。ま た、X 線が入射した際に素早く熱化し、十分熱化した後に素早く熱拡散する必要性もある。

2.1.1 吸収体

素子に入射した X 線は光電吸収によってエネルギーを失う。マイクロカロリメータでは高い確率で吸 収体中で X 線を止め、そのエネルギーを完全に熱エネルギーに変える必要がある。吸収体には原子番号 の大きい物質を用い、その面積と厚さを増すことで検出効率を高くすることが可能である。しかし、素

構成要素	役割
X 線吸収体	光子を吸収し、入射エネルギーを熱に変換する
	発生した熱を全て温度計に入力する
温度計	吸収体にて生じた温度変化を電気信号に変換する
熱リンク	発生した熱をヒートシンクに排出する
熱浴 (ヒートシンク)	系の温度を初期値に保つ

表 2.1: マイクロカロリメータを構成する要素の役割。

子が大きくなるとその分熱容量が大きくなるので、エネルギー分解能が悪くなる。また、熱化にかかる 時間が遅いと吸収した熱が逃げてしまうので、エネルギー分解能が悪化する。以上より、吸収体として 用いる物質には高い吸収効率、小さい熱容量、速い熱化という条件を同時にクリア可能な物質が適して いる。

以下に物質の種類に応じた特徴を挙げる。

絶縁体と半導体

絶縁体や半導体はバンドギャップの不純物準位に電子がトラップされ、準安定な状態を形成する。 そのため熱化が不完全であったり、安定性に欠ける。

• 準金属

ビスマス、水銀テルルなどの準金属は熱化が比較的速いが、デバイ温度が低く格子比熱が大きい。 すざく衛星に搭載された XRS では水銀テルルを用いている。

- 常伝導金属
 純粋な常伝導金属は熱化が非常に速いが、電子比熱が大きいため検出器のサイズが限られる。
- 超伝導金属

超伝導金属は超伝導遷移温度よりも充分に低温に於いて、電子比熱が小さくなる。従って、原子 番号が大きく、デバイ温度の高いものを用いれば比熱を押えつつ高い検出効率を実現できる。し かし、超伝導遷移温度よりも充分な低温では準粒子を生成する。再結合をするまでの時間、つま り準粒子の寿命が長い影響で熱化が非常に遅くなる。

2.1.2 温度計

半導体や金属の温度に依存した抵抗変化を測定することで、X線フォトン入射時の温度変化を調べる ことができる。温度計の感度を表すパラメータ α を、

$$\alpha \equiv \frac{\mathrm{d}\,\ln R}{\mathrm{d}\,\ln T} = \frac{R}{T}\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}T} \tag{2.1}$$

として定義する。この値は無次元量であり、αが大きい程温度変化に対する感度が高く、小さい温度変 化でも精密に測定することができる。

2.2 X線マイクロカロリメータの原理

マイクロカロリメータを用いた X 線観測では、素子は極低温に冷却され、一定の温度に保たれる。この時の温度を動作点と呼ぶことにする。吸収体に入射した X 線光子は光電吸収され、即座にそのエネル ギーのほとんどが熱に変わる。この際に生じる温度上昇 ΔT は

$$\Delta T = \frac{E}{C} \tag{2.2}$$



図 2.2: X 線入射によるマイクロカロリメータの温度変化。

となる (図 2.2)。厳密には入射 X 線による素子の温度上昇で C も変化するので、エネルギーと温度上 昇の関係には非線形性がある。吸収体で生じた熱はサーマルリンクを介して低温熱浴へとゆっくりと流 れ、再び定常状態へと戻る。素子が定常状態に戻るまでの時定数 τ は、C と G で決まる。典型的に数 100 μ sec 程度である。ここで C と G はそれぞれ温度計を含めたカロリメータ素子の熱容量と熱リンク の熱伝導度である。従って温度上昇 ΔT を測れば光子のエネルギーを測定できる。

$$\tau = \frac{C}{G} \tag{2.3}$$

この時、温度測定の精度は熱リンクを通してランダムに熱が出入りすることによって生じる素子の温度揺らぎ (Phonon ノイズ) で原理的に決まってしまう。その大きさは直感的に見積もることができる。 温度 T の物質中のフォノンの平均のエネルギー ε は

$$\varepsilon = k_B T \tag{2.4}$$

である。一方、熱容量 C の物質の持つ全エネルギーは CT であるので、平均のフォノンの数 N は以下のようになる。

$$N = \frac{CT}{k_B T} \tag{2.5}$$

フォノンの数の統計的な揺らぎはポアッソン分布に従うので、その分散は

$$\sigma(N) = \sqrt{\frac{CT}{k_B T}} \tag{2.6}$$

となる。これから、温度の分散は

$$\sigma(T) = \frac{\sigma(N)k_BT}{C} \tag{2.7}$$

となり、フォノン数の揺らぎによる素子のエネルギー分解能は

$$\sigma(E) = \sigma(N)k_BT = \sqrt{\frac{CT}{k_BT}}k_BT = \sqrt{k_BT^2C}$$
(2.8)

と見積もられる。マイクロカロリメータにおいて高いエネルギー決定精度 (エネルギー分解能) を実 現するためには、信号雑音比をできるだけ大きくして、素子の温度上昇を精密に測定する必要がある。 信号量を大きくするためには、X線エネルギーを大きな温度上昇に変えてそれを高感度の温度計で測定 すればよい。また、素子の熱容量 C が低温では温度に強く依存することがわかる。ここで、C として格 子比熱および電子比熱を考える。フェルミ (Fermi) 温度とデバイ (Debye) 温度よりもはるかに低い温度 に於いては、金属の定積比熱 c はフォノンに起因する格子比熱 c₁ と伝導電子に起因する電子比熱 c_e と の和として、

$$c = c_{\rm l} + c_{\rm e} = \alpha T^3 + \gamma T \tag{2.9}$$

と書ける。これよりそれぞれ温度の3 乗および1 乗に比例し、エネルギー分解は温度の5/2 から3/2 乗に比例する。よって、素子の動作温度を可能な限り低くすることも重要である。現実的に T は冷凍機 によって安定に保持することができる~100 mK が主流である。典型的に C は最小 pJ/K オーダーとな り、結局、keV オーダーの X 線エネルギーを最大 mK オーダーという微小な温度上昇として測定するこ とになる。これを精密に測定するためには高感度の温度計とノイズの抑制が必要となる。

2.3 超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor)

私たちのグループでは、温度計に超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensors) を採用してい る。この温度計に超伝導物質を用い、超伝導-常伝導相転移端の急激な抵抗-温度変化により素子の温度 上昇を計測する仕組みである。遷移幅は典型的には数 mK という非常に狭い温度範囲で起こるため、温 度計の感度 α は従来使用されてきた半導体温度計より遥かに高い感度を有する。典型的に α~1000 程度 が可能であり、半導体マイクロカロリーメータにと比較すると 100 倍程度向上する。これにより応答速 度、分解能を著しく改善する事が可能になる。以下に相転移点付近での温度に対する抵抗の変化の様子 を示す。



図 2.3: 相転移点付近での温度に対する抵抗の変化。

2.4 ノイズとエネルギー分解能

TES カロリメータにはいくつかのノイズが存在しており、これらがエネルギー分解能に制限を与えて いる。熱リンクを通して熱がランダムに流れ発生する温度揺らぎ (Phonon ノイズ) や温度計の抵抗に発 生する電気的な熱雑音 (Johnson ノイズ) などである。この他にも測定系セットアップに起因した外来ノ イズ (読み出しノイズ) や、吸収体-TES 間の熱揺らぎなど製作方法に依存した内因的ノイズ、原因不明 の超過ノイズ (Excess ノイズ) が存在する。図 2.4 は理想的な TES カロリメータの典型的な Phonon ノ イズと Johnson ノイズ、読み出し回路系のノイズを仮定した場合の X 線信号の電力スペクトルとノイズ の電力スペクトル密度である。phonon ノイズのスペクトル密度は,信号の周波数応答と同じ形をしてい て,回路系が応答できない周波数帯では急激に小さくなる。これに対して、Johnson ノイズはのフィー ドバックループを回った成分と直接出力に現れる成分が互いに打ち消しあうので回路系が応答する周波 数帯域では逆に小さくなる。読み出し装置として低雑音の SQUID (2.6 節) を用いると読み出しノイズ は、Phonon ノイズと Johnson ノイズの和よりも図 2.4 に示すように小さくすることが可能である。



図 2.4: 理想的な TES 型 X 線マイクロカロリメータの X 線信 号の電力スペクトルとノイズの電力スペクトル密度。

Phonon ノイズを考慮した原理的なエネルギー分解能は

$$\Delta E \simeq 2.35 \sqrt{\frac{4k_B T^2 C}{\alpha} \sqrt{\frac{n}{2}}}$$
(2.10)

と一般的に表される。ここで。 ΔE は検出器のエネルギー分解能を半値幅で定義したもので (1.2.1 節)、 $\Delta E = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma(E) = 2.35 \sigma(E)$ である。 α は温度計の感度 (式 2.1) であり、n は熱伝導度の温度依存性に よる項である。式 2.10 に TES カロリメータの典型的な値を代入すると、

$$\Delta E \simeq 1.3 \text{eV} \left(\frac{T}{100 \text{mK}}\right) \left(\frac{C}{1 \text{pJ/K}}\right)^{1/2} \left(\frac{\alpha}{100}\right)^{-1/2}$$
(2.11)

と理想的な TES カロリメータのエネルギー分解能を見積もることができる。n は電子-フォノン相互 作用により5を代入している。式2.10より、より高いエネルギー分解能を実現させるには『動作温度 T を下げ、素子の熱容量 C を抑え、温度計感度 α を大きくすること』が必要である。しかし、ある程度の 制限も存在する。X 線光子のエネルギーが大きいと温度変化によって遷移端から外れてしまい、エネル ギー分解能は式で得られた理論値より悪くなってしまう。よって入射 X 線の最大エネルギー Emax は

$$\Delta E_{max} \simeq \frac{CT}{\alpha} = 6.3 \text{keV} \left(\frac{T}{100 \text{mK}}\right) \left(\frac{C}{1 \text{pJ/K}}\right) \left(\frac{\alpha}{100}\right)^{-1}$$
(2.12)

と制限される。つまり、目標とするエネルギーバンドとエネルギー分解能を考慮した上で、最適な α と C を見積もる必要がある。Johnson ノイズも考慮すると式 2.10 は

$$\Delta E \simeq 2.35 \sqrt{\frac{4k_B T^2 C}{\alpha}} \sqrt{\frac{n}{2}(1+2\beta)(1+M^2)}$$
(2.13)

となり、式 2.12 を代入すると

$$\Delta E \simeq 2.35 \sqrt{4k_B T \sqrt{\frac{n}{2}(1+2\beta)(1+M^2)E_{max}}}$$
(2.14)

と表すことができる。ここで、 β は TES の電流感度であり、 β =dlnR/dlnIで表される。また M は Excess ノイズのファイクターである。

2.5 電熱フィードバック (ETF: Electro-Thermal Feedback)

TES は温度計として非常に高い感度を持っているが、感度を持つ温度域、つまり超伝導遷移幅が非常 に狭い (~ 1mK)。この狭い温度範囲に動作点を制御するには、TES を定電圧バイアスで動作させ、強 いフィードバックをかけることで実現する。

2.5.1 電熱フィードバック下の温度変化に対する応答

図 2.5 左に示すような定電圧バイアスで TES を動作させた場合を考える。熱入力によって温度が上昇 すると、TES の抵抗値は急激に増加する。定電圧なので電流は減少し、ジュール発熱も減少する。この ように、熱入力を打ち消す方向にジュール発熱量が急激に変化して負のフィードバックが働くので、素 子の温度も安定に保たれる。



図 2.5: 左図: 定電圧バイアス 右図: シャント抵抗を使って疑 似的に作る定電圧バイアス

実際には TES と並列にシャント抵抗をつないで、疑似的に定電圧バイアスを実現する (図 2.5 右)。以 下では理想的な定電圧バイアスで動作しているものとする。 熱伝導度は

$$G \equiv dP/dT \tag{2.15}$$

で定義される。一般的に熱伝導度は温度依存性を持ち、

$$G = G_0 T^{n-1} (2.16)$$

と温度に対するべき n を用いて表され、3~5 程度である。熱浴と TES との間の熱伝導度を考える。一 般に T≫T_{bath} であるので、熱浴との熱伝導度による熱の流れは

$$P = \int_{T_{bath}}^{T} G dT = \frac{G_0}{n} \left(T^n - T_{bath}^n \right)$$
(2.17)

と式 (2.15) を積分して計算できる。

平衡状態では、TESの温度を T_0 として、TESにおけるジュール発熱 $P_b \equiv V_b^2/R_0$ とカロリメータピ クセルから熱浴へ流れる熱量とがつり合っているので、

$$P_{\rm b} = \frac{G_0}{n} \left(T_0^n - T_{bath}^n \right) \tag{2.18}$$

と書ける。ただし、 V_b はバイアス電圧、 G_0 は $G = G_0 T^{n-1}$ を満たす定数 (G は熱伝導度)、 R_0 は動作 点での TES の抵抗値、 T_{bath} は熱浴の温度である。

微小な温度上昇 $\Delta T \equiv T - T_0$ によって素子の温度が *T* になった場合、内部エネルギーの変化は熱の 収支に等しいので、

$$C\frac{dT}{dt} = \frac{V_{\rm b}^2}{R(T)} - \frac{G_0}{n} \left(T^n - T_{bath}^n\right)$$
(2.19)

が成り立つ。温度上昇 ΔT は1次の近似で、

$$C\frac{d\Delta T}{dt} \simeq -\frac{V_{\rm b}^2}{R_0^2}\Delta R - G_0 T^{n-1}\Delta T \qquad (2.20)$$

$$= \frac{P_{\rm b}\alpha}{T}\Delta T - G\Delta T \tag{2.21}$$

となる。最後の項の G は TES の温度 T での熱伝導度 G(T) を表す。以後単に G と書いた場合は TES の 温度 T での熱伝導度を表すこととする。式 (2.20)の解は、

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}}\right) \tag{2.22}$$

と書ける。ただし、

$$\tau_{\rm eff} \equiv \frac{C/G}{1 + \frac{P_{\rm b}\alpha}{GT}} \tag{2.23}$$

$$= \frac{\tau_0}{1 + \frac{P_{\rm b}\alpha}{GT}} \tag{2.24}$$

は有効時定数である。式 (2.18)、(2.24) より、_{てeff} は

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{1 + \frac{\alpha}{n} \left(1 - \left(\frac{T_{bath}}{T}\right)^n\right)}$$
(2.25)

のように書ける。さらに、熱浴の温度が TES の温度よりも十分に低い場合 $(T^n_{bath} \ll T^n)$ は、

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{1 + \frac{\alpha}{n}} \tag{2.26}$$

$$\approx \frac{n}{\alpha} \tau_0$$
 (2.27)

と近似できる。ただし、式 (2.27) は α/n ≫ 1 の場合である。このように、α が大きい場合は、電熱フィー ドバックによって応答速度が非常に速くなることがわかる。また、X 線のエネルギーは電流値の変化と して読み出され、

$$\Delta I = \frac{V_{\rm b}}{R(T_0 + \Delta T)} - \frac{V_{\rm b}}{R(T_0)}$$
(2.28)

$$\simeq -\frac{\Delta R}{R}I \tag{2.29}$$

$$\simeq -\alpha \frac{E}{CT} I \tag{2.30}$$

となる。

2.6 SQUID を用いた読み出し系

TES の電流変化を読み出すには、低ノイズ、低インピーダンスの電流計が必要である。その点で、 SQUID は最良の電流計である。

2.6.1 dc-SQUID



図 2.6: dc-SQUID の模式図

SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) とはジョセフソン効果を利用した素子で、 図 2.6 のように 2 つのジョセフソン接合を並列に持つリングである。2 つの接合の位相差とリングを貫く 磁束との間には

$$\theta_2 - \theta_1 = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \tag{2.31}$$

という関係がある。ただし、 $\theta_1 \ge \theta_2$ はそれぞれのジョセフソン接合での位相差、 Φ はリングを貫く磁 束、 Φ_0 は磁束量子で、

$$\Phi_0 \equiv h/2e = 2.06 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$
(2.32)

という定数である。ジョセフソン接合が超伝導状態のとき、バイアス電流 IB は

$$I_{\rm B} = I_0 \cos\left(\pi \frac{\Phi_{\rm exp}}{\Phi_0}\right) \sin\left(\theta_1 - \pi \frac{\Phi_{\rm exp}}{\Phi_0}\right)$$
(2.33)

となる。ただし、 I_0 は接合の臨界電流、 $\Phi_{\text{ext}} \equiv \Phi - LJ$ は外部磁束、 $L \ge J$ はリングの自己インダク タンスとリングを循環する電流である。したがって、SQUID が超伝導でいられる最大の電流、すなわち SQUID の臨界電流は

$$I_{\max} = 2I_0 \left| \cos \left(\pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0} \right) \right|$$
(2.34)

となる。このように、SQUID の臨界電流は外部磁束によって変化する。2*I*₀より大きなバイアス電流で SQUID を動作させると、臨界電流が変化することにより、外部磁束の変化に対して出力電圧が変化する ようになる。したがって、SQUID の隣にコイルを置くことによって、SQUID を非常に感度の高い電流 計として扱うことが可能になる。カロリメータの読み出し系として SQUID を用いた場合の摸式図を図 2.7 に示す。



図 2.7: SQUID を用いたカロリメータの読み出し系

2.7 世界の開発状況

2.7.1 開発の歴史

1941 年、Andrews は 3.2 K の超伝導遷移端中のタンタル細線を流れる電流を利用し、温度変化による 抵抗の変化から赤外線の信号を検出した。これは TES を利用した史上初のボロメータである。また彼は 1949 年に 15 K の遷移端中にある窒化ニオブのストリップを流れる電流を利用し、アルファ粒子の崩壊 に伴う電圧パルスを計測することに成功した。これも史上初となる TES 型カロリメータの検出実証で ある。

だが上記の発明から半世紀の間、TES 型検出器の応用はあまり行われてこなかった。開発を阻む顕著な 障害となったのは、FET アンプに対して TES のノイズをマッチングさせることが難しい点である (TES の典型的な常伝導状態の抵抗は数 Ω か、それ以下である)。近年では低抵抗な TES 型検出器に対して、 容易にインピーダンスマッチングが取りやすい超伝導量子干渉計 (SQUID: Superconducting Quantum Interference Device)を用いた電流増幅によって、この問題は解決された。SQUID 系による電流読み出 しと電圧バイアスの動作制御を導入した ことで、過去十年の間に TES 型検出器は飛躍的な進歩を遂げ た。TES カロリメータは、多素子サブミリ観測器として天文観測に応用されている。X 線分光器とし ては、提案段階であり、まだ観測は行われていない。MIT が中心となって計画されているロケット実験 *Micro-X* が最初の観測となる可能性が高い。

2.7.2 世界の開発状況

TES カロリメータの開発は、世界最高性能を出し続けているアメリカの NASA/GSFS をはじめ、様々 な機関で行われている。NASA/GSFC では、TES である超伝導金属に Mo、常伝導金属に Au を使用し た二層薄膜の構造を採用している。多くのミッションへ向けた素子開発をしており、中でも太陽フレア からの X 線ジェット観測に向けた TES カロリメータで ΔE_{FWHM} =1.6 eV@5.9 keV という世界最高性能 を達成している。デザインは 32×32 ピクセルのアレイ素子で、35 μ m 角の TES の上に Au のマッシュ ルーム吸収体が 4.5 μ m の厚さで形成されている。図 2.8 に最高性能を出した素子の写真を示す。また図 2.9 が 5.9 keV の X 線を照射した際のエネルギースペクトルである。



図 2.8: 世界最高のエネルギー分解能を持つ GCSF/NASA の TES カロリメー タ。(a) 32×32 ピクセルアレイの全体像。 (b) TES カロリメータの SEM イ メージ。 (c) (b) の拡大イメージ。

アメリカの NIST (National Institute of Standards and Technology) でも TES カロリメータの開発が なされており、こちらでは TES に Mo と Cu の 2 層薄膜を採用している。400 μ m 角の TES に 5.9 keV の X 線を照射したところ、 ΔE_{FWHM} =2.4 eV という高性能を達成している。また、こちらではより高い エネルギー帯域である y 線を測る TES カロリメータも開発されている。構造は Mo/Cu の TES の上に 1 mm 角の Sn が吸収体として形成されている。こちらは 103 keV の y 線を照射し、 ΔE_{FWHM} =42 eV を 達成している。図 2.10 に NIST の中で最高性能である TES カロリメータの写真とエネルギースペクト ルを示す。図 2.11 には y 線カロリメータの写真とスペクトルを示す。

このように他機関においても TES カロリメータの開発は活発である。高性能な単素子の基礎開発は もちろんのこと、多素子化へ向けた開発を日本でも行われてきた。次章では日本のこれまでの開発状況 と製作方法などを詳しく説明する。



図 2.9: GCSF/NASAの TES カロリメータに X 線を照射した際に得られたエ ネルギースペクトル。



図 2.10: (a) NIST の TES カロリメータ。(b) X 線を照射した際に得られたエネル ギースペクトル。



図 2.11: (a) TES 型 y 線カロリメータの1 ピクセルの写真。 (b) y 線カロリメータ の全体像。 (c) y 線を照射した際に得られたエネルギースペクトル。
第3章 これまでの日本の開発状況

2006 年から TES カロリメータ素子の製作、測定を全てグループ内 (主に首都大学東京 (以下、首都 大)、宇宙科学研究本部 (以下、宇宙研) の2機関) で行える環境を整えている。この章ではこれまでに 製作し評価してきた単ピクセル素子、多ピクセル素子の開発結果を述べる。

3.1 単素子の開発

TES カロリメータ素子の基礎研究として、まず 4×4の 16 ピクセル素子を製作し、単素子の性能評価 をおこなってきた。TES 温度計には超伝導金属 (Ti) と常伝導金属 (Au) の二層薄膜を採用している。前 章で述べたように、他機関では超伝導金属に Mo、常伝導金属には Cu を使用するなど TES に用いる金 属はさまざまである。次小節では TES に使用している金属の選定について述べる。

3.1.1 TES に用いる金属の選定

TES カロリメータは~100 mK という極低温下で能力を発揮する検出器である。温度計に超伝導金属 を用いることでこれを満たすことが可能である。合金や化合物の超伝導体でも転移特性を急峻にするこ とは可能であるが、現実的には α の高い超伝導転移特性を得るための手段として、単体の超伝導体を用 いたほうがよい。これは合金や化合物では、分散や結晶構造の不均一によって超伝導転移がなだらかに なり、2 段階以上の転移や α の低下を引き起こしやすいからである。また、1 K 以下で超伝導転移を起 こすような材料もまた、単体金属に多い。

上記に理由で、TESの材料としてTiを選択した。Tiは非常に酸化しやすい金属である。このため、 Auを保護層としてTi上に形成する二層薄膜にしている。バルクTiの超伝導転移温度Tcは390mKで あり、要求される~100mKよりも高いが、薄膜のTcがバルクのTcと異なる場合があることはよく 知られている。これは薄膜がコヒーレンス長や磁界侵入長を無視できない厚さになったとき、電子間引 力相互作用の変化によってTcが変動するためである。このような効果は一般に「薄膜効果」と呼ばれ ている。また、超伝導薄膜と常伝導薄膜を積層すると、クーパー対が常伝導体に入り込むため、両者の 膜厚比に依存して転移温度が下がる効果がある。この効果は「近接効果」と呼ばれている。この2つの 効果を用いることによって、Tcをコントロールすることが可能になる。また変質しやすい金属であって も、その上に安定な金属を常伝導層を重ねることにより、超伝導層の保護膜としての効果を得ること可 能である。保護膜はTESの経時劣化を防ぐだけでなく、プロセス中にTESが受けるダメージを防ぐ効 果もある。

3.1.2 自作した素子の最高性能

これまでに自作した 200 μ m 角の TES カロリメータ素子 (TMU146-4d) では、5.9keV の X 線に対 して ΔE_{FWHM} =2.8 eV という最高性能を達成している。これは世界最高性能である NASA/GSFC の ΔE_{FWHM} =1.6 eV に迫る高いエネルギー分解能である。以下に最高性能素子とエネルギースペクトルを 示す (図 3.1)。200 μ m 角の TES (Ti/Au) の上に 120 μ m 角の Au の吸収体がのっている。



図 3.1: 自作した最高性能素子 (TMU146-4d)。(a) 16 ピクセル全体。(b) 1 ピクセルの拡大写 真。(c) Mn-Ka を照射した際に得られたエネルギースペクトル。

3.2 多素子の開発

3.2.1 自作した素子の最高性能

衛星搭載を目的とし、 $16 \times 16 \circ 256$ ピクセルアレイ素子も開発もおこなってきた。こちらは三菱重工業 株式会社 (MHI: Mitsubishi Heavy Industries) と共同で開発を進め、構造は 200 μ m 角の TES (Ti/Au) のみで吸収体はのっていない。この 256 ピクセル素子に 5.9keV の X 線を照射し、 ΔE_{FWHM} =4.4 eV の 分解能を得ている。以下に最高性能素子とエネルギースペクトルを示す (図 3.2)。



図 3.2: MHI 素子。(a) 基板全体図。(b) 1 ピクセルの拡大写真。 (c) Mn-Kα を照射した際に 得られたエネルギースペクトル。

3.3素子の製作方法

上記の性能を出した素子の製作には MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を利用してい る。MEMS はシリコンプロセス技術を用いることにより、デバイスの小型化はもちろんのこと、多数の マイクロデバイスをサブミクロンの精度で製作することが可能であり、医療・バイオ分野、各種センサ 分野など幅広い分野への研究開発が活発に行われている。

ここでは精密加工性に優れた MEMS 技術を用いた素子の製作過程を述べる。

3.3.1 プロセスフロー

TES カロリメータ素子の製作工程は以下のような6段階で構成されている。



3.3.2 TES (Ti/Au) 成膜

TES カロリメータ素子製作では、両面窒化膜 (Si₃N₄ 膜) 付きの Si (110) 基板を使用しており、窒化膜 は主にオランダの C2V 社に依頼し 4inch の Si ウエハー上に成膜してもらっている。Si 基板の厚さは 300 μ m 、窒化膜は 400 nm となっている (図 3.4)。素子製作にはこの 4inch の窒化膜付き Si 基板を ISAS に あるダイサーで 2 cm 角にダイシングし利用する (図 3.5)。

まず、この2 cm 角の Si 基板上に TES 部分となる Ti と Au をスパッタリング法により成膜する。ス パッタリング法とは高エネルギー粒子をターゲット材料に衝突させ、気相中に放出されたターゲット材 料粒子を基板上に堆積させる方法である。装置は首都大が所有する ULVAC 社製の超伝導薄膜成膜装置 を使用する (図 3.6)。~ 10⁻⁶ Pa 程度に保たれた高真空のチャンバー内に不活性ガス (Ar ガス)を導入



図 3.4: 4inch Si 基板。

図 3.5: Ti/Au成膜前の2 cm角 Si 基板。

し、向かい合う基板とターゲットの電極間に直流高電圧を印加させてグロー放電を発生させる。このグ ロー放電によりイオン化した Ar のプラズマをターゲットに衝突させ、たたき出された原子を基板上に 堆積させる仕組みである。この装置は DC マグネトロンスパッタによって Ti と Au の薄膜を成膜するこ とが出来、準備室と成膜室の2つで構成されている。成膜室の真空度は~1×10⁻⁸ Pa まで到達可能で あるが、経年劣化等により現在は~10⁻⁷ Pa 程度となっている。スパッタ装置の仕様は表 3.1 に示す。 前章で述べたように、この TES の転移温度がカロリメータの動作温度に効いてくるので、最適な動作 温度である~100 - 150 mK で TES が転移温度するように、Ti/Au の膜厚を最適化しなくてはいけな い。図 3.6 は使用したスパッタ装置である。準備室と成膜室と分かれており、準備室では板を交換した



図 3.6: Ti/Au スパッタ装置。

図 3.7: Ti/Au が成膜された Si 基板。

表 3.1: Ti/Au スパッタ装置の仕様。

準備室 到達真空度	$\sim 1\times 10^{-6}$ Pa
準備室 基板収容枚数	φ2インチが3枚
成膜室 到達真空度	$\sim 1\times 10^{-8}$ Pa
成膜室 基板収容枚数	φ2インチが1枚
ターゲット-基板距離	60 mm
スパッタ時の Ar 圧力	11.7 sccm
成膜速度	Ti 59.5 nm/min
	Au 191.3 nm/min
膜厚分布	± 5 %以内

り逆スパッタを行い、成膜室では Ti と Au をスパッタする。準備室と成膜室はゲートバルブを挟んでつ

ながっており、成膜室を大気にさらすことなく準備室を開けて基板の交換を行う事が出来る。この為、 成膜室は高真空対応となっており~1×10⁻⁷ Paまで到達し、不純物の少ないクリーンな環境で成膜す る事が出来る。なお、このスパッタ装置はクリーンブースの中に置かれ、基板交換で準備室を開ける時 に入るダストの量を最小限に抑えてある。

3.3.3 裏面 Si₃N₄ 膜の裏彫り

次に、Si 基板の裏面にある Si₃N₄ 膜を DRIE (Deep Reactive Ion Etching) という方法で除去する。

これはメンブレン構造形成のための1プロセスである。TESカ ロリメータでは入射 X 線によって生じた吸収体の熱を熱浴へ 排熱するために、Si₃N₄ 膜のみのメンブレン構造をサーマルリ ンクとして採用している。Si₃N₄ 膜のみにするためには、基板 の Si 部分を除去しなくてはならないが、この工程は一番最後 の KOH によるウェットエッチングで行う。だが、Si₃N₄ 膜は KOH にはほとんど腐食されないので、予め除去しておかなけ ればならない。

そこで登場するのが RIE (反応性イオンエッチング) 法である。 RIE 法では、イオンの物理的なスパッタ効果と、ラジカルの化 学的なエッチング効果の相乗効果によって、異方性に優れたドラ イエッチングを行うことが可能である。装置は宇宙研のクリー ンルーム内にある三菱重機製の誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma:ICP) 式 RIE 装置を使用しており、エッチン グガスは C_4F_8 、 SF_6 の2種類である (図 3.8)。

図 3.9: スピンコーター。



図 3.8: ICP 式 RIE 装置。

DRIE 法で裏彫りをする前に、まず Si₃N₄ 膜上に裏彫りする形にパターニングを行う必要がある。裏 側の Si₃N₄ 膜にスピンコーター (図 3.9) でポジ型レジスト S1818G を薄膜状かつ均一に塗布し、さらに 基板との密着性を高めるために 115 °Cに熱せられたベーキングオーブン (図 3.10) で 2 分半ベークを行 う。この際、TES を DRIE のエッチングガスから保護する為に TES 側にもレジスト S1818G を塗布し ておく。レジストには ROHM & HAAS 社製のポジ型レジスト Shipley series S1818G を使用しており、 感光性を持ち、フォトリソグラフィー工程で使用されるフォトレジストである。この疎水性のフォトレ ジストは基板との密着性が悪いため、予めプライマーとよばれる親和剤 HMDS (ヘキサメチレジシラザ ン)を基板に塗布しておき、その後レジストを塗布する (図 3.11)。



図 3.10: ベーキングオーブン。 図 3.11: HMDS とレジスト。

次に、レジストを均一に塗布した基板に、フォトマスクと呼ば れる遮光パターンを通して露光し、フォトレジストに DRIEを 施すデザインを転写する。装置は宇宙研にあるミカサ社製マス クアライナー MA-101 (紫外線露光)を使用している (図 3.12) 。その後、基板を東京応化社製現像液 NMD-3 (ポジ型レジス ト用現像液) に浸し、現像する。感光されたレジストが溶解性 となって現像液の樹脂と共に溶失し、パターンができる仕組み である。

以下にレジスト S1818G のフォトリソグラフィーの条件をまと める。



図 3.12: アライナー。



表 3.2: レジスト S1818G のリソの条件。

スピンコーター	$3000~\mathrm{rpm}$, $30~\mathrm{s}$
ベーキング	115 °C , 150 s
アライナー露光時間	$5 \mathrm{s}$
現像時間	\sim 180 s



このパターニングされた基板を RIE 装置 (図 3.8) に組み込み、ドライエッチングによって Si₃N₄ 膜を 堀り、最後にアセトンでレジストを除去すれば裏彫り終了である。

図 3.14: 裏面 Si₃N₄ 膜 除去プロセスフロー。

3.3.4 TES パターニング

次は TES のピクセル加工である。こちらも裏彫りと同様に、フォトリソグラフィーによってパターニ ングし、ウェットエッチングによって Ti と Au を加工する。フォトリソグラフィーによるパターニング の方法は DRIE 法による裏彫り時と同様で、HMDM・レジスト S1818G を Si 基板の TES 側に塗布し、 ベーキングオーブンで固化させ、マスクアライナーで露光する。現像液 (NMD-3) に浸し、余分なレジ ストを除去、レジスト上に TES のパターンを転写させる。フォトリソグラフィーの各工程のレシピは表 3.2 の通りである。

TES のウェットエッチングではエッチング液 (エッチャント) に、Ti は 60 ℃に加熱した 35 %の過酸化 水素水、Au は関東化学社製の AURUM-101 というヨウ素系溶液を使用している。それぞれのエッチン グ反応とレートは表 3.3 に示す。まず Au のエッチングを数十秒ほど行い (膜厚に準ずる)、次に Ti エッ チングを約 3 時間行う。Ti のエッチングが長丁場である理由は、サイドのオーバーエッチングに時間が かかるためである。Ti のサイドをエッチングし、Au のオーバーハング構造にすることによって、超伝 導金属の Ti が常伝導金属である Au に上から覆われ、側壁を流れる電流が超伝導転移特性に寄与する影 響を打ち消す効果を示すのである (図 3.16)。最後にレジストをアセトンで除去し、TES のパターニン グは完了する。

Ti etchant	$60 \degree C$, H_2O_2
Ti etching rate	13 nm/min
Ti chemical eq.	$\mathrm{Ti} + 2\mathrm{H}_2\mathrm{O}_2 + 4\mathrm{H}^+ \rightarrow 4\mathrm{H}_2\mathrm{O} + \mathrm{Ti}^{4+}$
Au etchant	常温,AURUM-101
Au etching rate	500 nm/min
Au chemical eq.	$2\mathrm{Au} + 3\mathrm{KI}_3 \rightarrow \mathrm{KI} + 2\mathrm{AuI} \cdot \mathrm{KI}_3$

表 3.3: Ti/Au エッチャント。



図 3.15: TES パターニングのプロセスフロー。



図 3.16: Ti/Auのオーバーハング構造。

3.3.5 Al 配線加工

TES カロリメータでは、TES と SUQUID 間の配線は超伝導で電気抵抗がゼロになることが必要である。 そこで、転移温度が 1.2 K である Al を配線に使用し、宇宙研にある CANON-ANELVA 社製 L-210S-FH 装置 により RF マグネトロンスパッタリングを施し、Al 配線を形成する。

表 3.4: Al スパッタ装置の仕様。

成膜室 到達真空度	$\sim 10^{-5}~{\rm Pa}$
スパッタ時の Ar 圧力	11.7 sccm
成膜速度	$200~\mathrm{nm}/\mathrm{min}$

スパッタ原理は Ti/Au スパッタと同じであるが、こちらではプロセスプラズマにおける電界付与の方 法として、周波数が 13.56MH_Z の高周波電界を利用している。高周波放電は電極が絶縁体であっても放 電が持続されるので、成膜レートが比較的速く、安定した成膜ができる。スパッタ装置の仕様は表 3.4 に 記す。手順としては、TES のパターニングと同様に、フォトリソグラフィーにより Al 配線のパターン をレジストに転写し、その後 Al をスパッタで ~ 200 nm 堆積させ、アセトンによるリフトオフ法でレ ジストと共に不要な場所の Al を除去し TES の配線が形成される。



図 3.17: Al 配線形成プロセスフロー。

3.3.6 Au 吸収体形成

表 3.5: 電子ビーム蒸着装置の仕様

成膜室 到達真空度	$\sim 10^{-5}$ Pa
成膜速度	数 $10 \sim$ 数 100 nm/min

TES カロリメータでは、X 線の検出効率を上げるために吸収体として TES の上に Au を成膜している。成膜方法は宇宙研にある SANYU 電子 製 EB 蒸着装置 SVC-700LEB による電子ビーム (EB) 真空蒸着法であ る (図 3.18)。EB 蒸着法とは高真空中で電子ビームをターゲット (蒸着物 質) に照射して加熱、気化し、これを基板上に堆積する方法である。汎 用される抵抗加熱と比べ、ターゲットのみを局所的に加熱するので、高 真空度を保ちつつ、高蒸着レートで膜質の良い金属薄膜が堆積可能であ る。EB 蒸着装置の仕様は表 3.5 に記す。手順としては、TES や配線のパ ターニングと同じで、フォトリソグラフィーにより吸収体のパターンを レジストに転写し、その後 Au を EB 蒸着でお好みの膜厚分堆積させ、ア セトンによるリフトオフ法でレジストと共に不要な場所の Au を除去し、 吸収体が形成される。



図 3.18: EB 蒸着機

3.3.7 メンブレン構造形成

最後は吸収体の熱を熱浴へ排熱するサーマルリンク部分となるメンブレンを形成する。メンブレンは Si₃N₄ 膜のみの構造であるため、基板の Si の部分を KOH 33 wt-% 溶液を用いてウェットエッチングを 行う。単結晶 Si をアルカリ水溶液でエッチングすると常に一定の形状が得られる事が知られており、Si の結晶異方性エッチングと呼ばれている。結晶異方性エッチングは、結晶面の原子密度の違いや、各面 方位における Si 原子が有している不対電子の数の違いによって結晶面のエッチングの速度の違いを利用 した技術である。Si 結晶は、薬品の種類と濃度などのエッチング条件を選ぶと (111) 面のエッチング速 度を (100) 面のエッチング速度に比べて非常に小さくすることができるので、この違いを利用して (111) 面だけを残すことが可能である。本研究で利用している Si 基板は結晶面が (110) 面であるので、(111) 面が 90°傾斜しており、垂直な側壁をもつ溝を形成でき、33 %の KOH 水溶液を 80 °Cに加熱してエッ チングを 3 ~ 4 時間行う。

手順としては、TESを保護するためにレジスト S1818Gを TES 側にスピンコートしてから KOH エッ チングに臨む。しかし KOH は強アルカリでほとんどの金属やレジストなど溶かしてしまうので、エッチ ングする際は基板の TES やアルミ配線が付いている表面を KOH から守る必要がある。そこでシュノー ケル形をした治具に基板表面を密閉するようにセットし、350 rpm で対流した KOH 水溶液内に浸す (図 3.20)。Si と水酸化イオンの半反応式は以下の通りである。

$$Si + 4OH \rightarrow Si(OH)_4 + 4e^-$$

$$(3.1)$$

$$4\mathrm{H}_{2}\mathrm{O} + 4e^{-} \to 4\mathrm{OH} + 2\mathrm{H}_{2}\uparrow\tag{3.2}$$



図 3.19: Au 吸収体形成プロセスフロー。



■ Si ■ Si₃N₄ ● Au ■ Ti ■ Al ■ レジスト

図 3.21: メンブレン形成プロセス。



図 3.20: KOH エッチングのセットアップ。

3.4 製作現場

精密機器を製作するにあたって、塵埃などが存在する空間では、回路の短絡や欠損、また質の良いものを作ることができない。そこで、クリーンルームという空気清浄度が確保されてた部屋で作業している。空気清浄度は、1 立方フィートあたりの空気に粒径 0.5 µm 以上の塵埃がいくつあるか表すものであり、実際に使用している宇宙研のクリーンルームはクラス 100 である。クラス 100 は、100 個/cf であり、非常に高いクリーン度が保たれている。



図 3.22: 実際に使用している宇宙研クリーンルーム。

3.5 アレイ化に向けた技術課題

これまでの製作プロセスを経て自作した素子でも十分高性能ではあるが、衛星に搭載するには撮像能 力が不十分である。衛星搭載を目指すためには、素子をたくさん並べてアレイ化し、X線の受光面積を 拡大する必要がある。このような大規模な TES カロリーメータアレイの実現には製作面でいくつかの技 術課題が挙げられる。具体的には「アレイ化に適したデザインと製作プロセスの確立」と「アレイ化に 伴った読み出し配線の形成」である。また、1 ピクセルあたりの受光面積の拡大も要求される。この方 法には「マッシュルーム型吸収体 (TES 上に張り出しオーバーハング構造)」が採用されており、現在 チーム内で開発中である。また、読み出しシステムの開発も必要である。TES カロリメータは極低温で 動作するため、アレイ化では配線からの熱流入、またシステムが複雑になることが問題となる。これら の問題を解決するために、極低温で複数の信号をまとめて読み出す「信号多重化技術」が必要不可欠で あり、こちらもチーム内で開発している。

私は、この技術課題の中でアレイ化に適した製作プロセスの確立と、それに伴う読み出し配線の開発 をおこなった。次節に本修士論文の目的をまとめる。

3.6 本修士論文の目的

X線検出器の撮像性能、エネルギー分解能の向上はX線天文学を発展させるための重要な課題である。 我々の研究グループはX線マイクロカロリメータの開発によってこの課題に取り組んできた。我々はこ れまでに自作した 200 µm 角の単素子で 5.9 keV のX線に対して、分解能 2.8 eV を達成している。また 16×16 アレイを試作し、4.4 eV の分解能を達成した。本修士論文では、*DIOS* 衛星をはじめとする次世 代のX線天文衛星への搭載を目指した TES 型X線マイクロカロリメータの開発を述べる。衛星搭載を 実現するためには、16×16 ピクセル以上のアレイデザインで、5 eV 以下の高い分光性能を持つ素子が 必要である。このような密集した大規模ピクセルの実現には、基板上の配線スペースや、ピクセル間の クロストークが問題となる。そこで我々は ~10 µm 幅の Al や Nb の配線を SiO₂ の絶縁膜を挟んで重ね 合わせた超伝導積層配線 (折り返し配線)の開発を行った。本論文では、超伝導積層配線の開発と、それ を用いた TES 型X線マイクロカロリメータの製作プロセスについて詳しく述べる。

第4章 超伝導積層配線の開発

今回私が取り組んだテーマが TES カロリメータのアレイ化である。前章にも述べた通り、これまでグ ループ内で自作した 200 µm 角の単素子で 5.9 keV (Mn-Ka)のX線に対して、分解能 2.8 eV (半値幅) を達成した。また 16×16 アレイを試作し、4.4 eV の分解能を達成してきた。しかし DIOS 衛星など将 来の衛星搭載を実現するためには、16×16 ピクセル以上の巨大 TES アレイで、かつ数 eV 以下の高い分 光性能を持つ素子が必要である。そしてこの密集した大規模ピクセルの実現には、これまた密集した配 線の実現が不可欠となる。そこで私は従来とは異なる配線の開発を試み、超伝導積層配線という折り返 し配線の試作を行った。この章では DIOS 衛星搭載用の TES カロリメータのデザインから超伝導積層配 線の試作、評価試験についてを詳しく述べる。

4.1 アレイ化の必要性

イメージセンサでは画素の数が多くなればより高い空間分解能に対応できるようになる。また、元素 分析などの地上で使う装置でも、アレイ化によって受光部の面積を拡大できれば、信号のX線をより効 率的に検出できるようになる。一方、同じ面積のアレイなら、小型のピクセルを数多く配列すれば単位 時間当たりに一つのピクセルに入射するX線は少なくなるので、より高い計数率にも対応可能である。



図 4.1: 光源と検出器の関係。

図4.1のように、空間的に広がっている領域 A'B'C'D'を、領域 ABCD からなる1ピクセルの検 出器で観測する場合を考える。領域 A'、B'、C'、D'を一つの検出器 ABCD を用いて別々に観測す ると領域 A'B'C'D'は2×2の画素に分解できる。ここで飛来する X 線のうち領域 S を通過したも のだけを観測対象とする。この場合、1 つの領域 (例えば A') 観測している間、他の領域 (B'、C'、 D')を観察することはできない。つまり、実効的な観測時間は 1/4 である。これは、暗い光源を観測す る場合など、飛来する光子の密度が極めて小さい場合に不利である。ABCD に計 4 つの検出器を備え、 それぞれで A'B'C'D'の領域を別々に観測すれば、高速に撮像できる。検出器をさらにたくさん並 べて同じ領域を細分化すれば、同じ領域をより詳細に解像することが可能となる。また、実効的な検出 効率も犠牲にならない。このように、TES カロリメータをアレイ化することは、空間的な分解能を向上 させ高速に撮像できるというメリットがある。

4.2 DIOS衛星搭載へ向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータ

1章で述べたが、*DIOS*衛星は宇宙に広がる電離した銀河間物質からの酸素輝線検出を通じて missing baryon の存在とその物理的諸性質を探ることを主目的とした X 線ミッション衛星である。搭載機器は、 広視野 4 回反射 X 線望遠鏡 (FXT: Four-reflection X-Ray Telescope)、TES 型 X 線マイクロカロリメー タをアレイ化した X 線撮像分光検出器 (XSA: X-ray Spectrometer Array)、および冷却装置からなる。

4.2.1 XSA (DIOS 用素子) に要求される性能

DIOS ミッションで観測する銀河間物質からの軟 X 線放射は、極めて低輝度の拡散放射であり、その 検出には大きな有効面積と広い視野が要求される。シミュレーション等による予想強度から、有効面積 と視野の立体角の積に対し SΩ~100 cm²deg² をミッション要求とする。以下に XSA に要求される性能 をまとめる (表 4.1)。

表 4.1: XSA への性能要求 (望遠鏡の焦点距離を 70 cm と仮定)。

エネルギー範囲	0.3 - $1.5~{\rm keV}$
エネルギー分解能	2 eV
検出効率@0.6 keV	50% 以上
アレイ全面積	$10~\mathrm{mm}$ \times $10~\mathrm{mm}$
アレイフォーマット	$\geq 16 \times 16$

表 4.1 の性能を満たすと、*DIOS* の空間的に広がった天体からの酸素輝線の検出感度はすざく衛星に 搭載されている XRS の約 1000 倍となる。

4.2.2 *DIOS*用素子のデザイン

上記の要求を満たす素子を開発するにあたり、TES や吸収体の熱容量などから TES のピクセル数、サ イズ、デザインを考える。また製作可能かどうかも考慮しなくてはならない。2章の式 2.14 にノイズを 考慮した原理的なエネルギー分解能を示した。 E_{max} と T を一定と仮定した場合、 α が小さいほどエネ ルギー分解能は向上する。しかし、 α を極端に小さくすると、熱容量 C も小さくなり、アレイピクセル 数が増えてしまう。すると読み出し配線の熱容量も無視できなくなり、エネルギー分解能が悪化してし まう。そこで、 E_{max} =1.5 keV、と T=0.1 K と仮定し、*DIOS* の要求を満たす最適な α を見積もった。

表 4.2: E_{max}=1.5 keV、と T=0.1 K を式 2.14 に代入した時の α と C。

α	10	100	1000
$C \; [pJ/24K]$	0.024	0.24	2.4

図 4.2 は E_{max} =1.5 keV、と T=0.1 K と仮定したときのエネルギー分解能と α の相関図である。これ より、*DIOS* の要求値である 2 eV 以下を満たすためには α が 200 以下であればよいことがわかる。



図 4.2: E_{max} =1.5 keV、と T=0.1 K と仮定したときのエネルギー分解能と α の相 関図。

TES の熱容量を考える。1 ピクセルの TES サイズを 100 μm 角、Ti/Au 膜厚を 40/100 nm とする。 また転移温度を 100 mK と仮定する。比熱は電子比熱と格子比熱の和で表される。T=100 mK 時の Ti と Au の比熱は

$$C_{\rm Ti} = 9.88 \times 10^{-4} T^3 + 0.126T \simeq 1.3 \times 10^{-2} [\rm pJ/K/(100 cm)^2]$$
 (4.1)

$$C_{\rm Au} = 4.25 \times 10^{-2} T^3 + 6.78 \times 10^{-2} T \simeq 6.9 \times 10^{-3} [\rm pJ/K/(100 cm)^2]$$
(4.2)

となり、TES 全体の熱容量 C_{TES} は

$$C_{\rm TES} = C_{\rm Ti} + C_{\rm Au} \simeq 0.02 [\rm pJ/K] \tag{4.3}$$

となる。

次に吸収体の熱容量を考える。1.5 keV での X 線の吸収効率が 90%以上を満たすように吸収体の厚さを決める。従来と同じ Au 吸収体の場合では厚さが 0.5 μ m、Bi 吸収体では 0.9 μ m の厚さが必要となる。吸収体の大きさを TES の 2 倍の 200 μ m 角とすると、Au、Bi それぞれに対する熱容量は $C_{absAu}=0.17$ [pJ/K]、 $C_{absai}=0.13\times10^{-2}$ [pJ/K] となる。

ここで、1 ピクセルあたりの受光面積を拡大させるために、吸収体の形をマッシュルーム吸収体という TES 上に吸収体が張り出しているオーバーハング構造を考える (図 4.3)。

マッシュルーム吸収体の傘部分の厚さは 1.5 keV での X 線の吸収効率が 90%となるように、傘を支える茎部分の厚さは傘の半分となるような構造を考える。材質は (i) 傘も茎も Au のみ場合、(ii)Bi のみ場合、そして (iii) 傘は Bi t0.9 μ m、茎は Au t0.2 μ m の場合の 3 パターンを考え、それぞれの素子の熱容量を見積もった。吸収体を Bi と Au の二層薄膜構造にする利点は、X 線の吸収効率と熱化に関係する。Bi は吸収効率が高く、比熱も小さい。しかし、熱化が遅いことが欠点である。そこで、比熱は大きいが熱拡散が早い Au を導入することにより、吸収効率が高く、熱化も早い吸収体ができあがる。図 4.4 に素



図 4.3: マッシュルーム吸収体付きの TES カロリメー タの模式図。

子の熱容量と TES サイズの相関図を示した。表 4.3 は各 α ごとに見積もった素子の熱容量と TES サイズの一覧である。

表 4.3: マッシュルーム吸収体付き TES カロリメータのサイズと αの関係。

α	100	200	1000
$C \; [\mathrm{pJ/24K}]$	0.24	0.48	2.4
$\Delta E [eV]$	1.4	2.1	7.0
(i) の TES サイズ [μm]	100	130	320
(ii) の TES サイズ [μm]	180	250	550
(iii) の TES サイズ [μm]	330	470	1050

ここから、*DIOS* の要求値である 2 eV 以下を満たす α が 200 以下では、TES サイズが 180-250 μm 角が要求される。従って、吸収体は 2 倍サイズの 360-500 μm となる。さらに *DIOS* で要求されている アレイ面積 10 mm×10 mm を満たすアレイ数を見積もると表 4.4 になる。

表 4.4: α=100、200の時のアレイ数。

α	吸収体 (傘) のサイズ [μm 角]	アレイ数
100	360	28×28
200	500	20×20

製作面を考慮し、20×20 アレイであれば実現可能であると見積もった (表 4.5)。

4.3 単層配線 (従来の配線)の課題

DIOS 用素子のピクセル数は 400 ピクセルと、これまでチーム内で製作してきた素子よりも遥かに多い。ピクセル数が増えるとそれを読み出す配線の形成が難しくなってくる。従来は TES の両端から延ば す配線デザイン (単層配線)を使用しており、一番多いアレイで 16×16 であった。この従来の形の配線 でさらに密集したアレイ化を目指すには大きく 3 つの課題が生まれる。



図 4.4:素子の熱容量 (TES+吸収体) と TES のサイズの相関図。

表 4.5: DIOS 衛星に搭載する TES カロリメータのパラメータ。

TES サイズ [µm 角]	250
吸収体 (傘) サイズ [µm 角]	500
アレイ数	20×20



図 4.5: (a) 密集した読み出し単層配線の構造。(b) 従来配線を使用した 16×16 ピクセルの全体写真と拡 大写真。

1. 密集、アレイ化に伴う配線スペースの問題

単層配線を利用してのアレイ化はこれでに製作した 16×16 の 256 ピクセルが限界である。これ以 上密集させると、線幅を細くして配線数が増えてしまい、製作面でも困難である。配線の表面形 状による影響が顕在化することで、完全に超伝導転移できずに残留抵抗を示してしまう可能性が ある。

2. ピクセル間のクロストーク

配線数が増える事により、配線間隔が狭まり、配線電流やピクセルから発生する磁場が他配線や素 子に対して誘導起電力を発生させてしまい、余分な電流を流してしまう (クロストーク)。

3. 配線のループによる自己インダクタンスによる影響

単層配線はループ構造をしていて、コイルのような形になっている。よって配線電流の大きさが 変わったときに、磁場の変化を打ち消す方向に逆起電力が発生してしまう。

これらの問題を解決すべくアレイ素子の読み出し配線のデザインには、単層配線ではなく配線を絶縁 膜を挟んで重ね合わせた「折り返し配線 (超伝導積層配線)」の開発に取り組んだ。

4.4 超伝導積層配線

超伝導積層配線とは、ホットとリターン側の配線の絶縁膜を挟んで重ね合わせ折り返した配線である。 図??に1ピクセルを読み出すための超伝導積層配線の断面図である。ホットとリターン側の配線を重ね 合わせることで配線スペースが削減され、より充填率の高い素子構造を形成できる。また配線自身で磁 場がキャンセルされるため、クロストークを十分小さく抑えることができる(要求値よりも0.1%小さく なる)。上部配線 (ホット側) と下部配線 (リターン側)の間には絶縁膜を挟み込んでおり、SiO₂ を使用 している。またコンタクトホールと呼ばれる地点で上部と下部の配線が接触し、折り返す構造になって いる。

4.4.1 配線デザイン

積層配線には TES カロリメータ用の TES 付け配線 (図 4.7(a)) と配線評価用の導通配線 (図 4.7(b)) の2種類を製作した。評価用は TES 部分を短絡させた構造となっている。

1 cm²角に400 ピクセルアレイを形成するため TES や吸収体の大きさとピッチ間隔から、配線の幅を 決めた。TES サイズを 200 μ m 角、マッシュルーム吸収体の傘部分が 500 μ m 角でピッチ 520 μ m とす ると、配線幅を 10 μ m、配線のピッチを 10 μ m にすれば一辺に 28 個並べることが可能である。実際は 一辺に 20 個を並べること、上部配線と下部配線のアライメント精度をあげるために下部配線の幅を上部 配線より広くしなければならない。また吸収した熱を熱浴へ排熱するサーマルリンク部分となるメンブ レンの大きさも考慮すると、1 辺に 20 アレイを並べるためには表 4.6 のような配線パラメータであれば 可能であると見積もった。

この配線デザインをもとに、実際に超伝導積層配線の製作に進んだ。製作では 20×20 アレイの他に、 8×8、4×4 アレイの配線も製作した。これは積層配線を使用した TES カロリメータを製作するにあた り、まずはアレイ数の少ない基板で試作素子をつくるためである。



図 4.6:1ピクセル用の超伝導積層配線の断面図。

表 4.6: 400 ピクセル用積層配線の幅とピッチ。

上部配線の幅 [µm]	15
下部配線の幅 [µm]	10
上部配線ピッチ [µm]	10
下部配線のピッチ [μm]	15



図 4.7: (a) 1 ピクセル TES カロリメータ用の積層配線の模式図 (上図:上から見た図、下図:断面図)。 (b) 配線評価用に TES 部分を短絡させた積層配線の模式図 (上図,下図: (a) と同じ)。



図 4.8: (a) 20×20 ピクセル用積層配線基板の全体図。(b) 配線拡大図。



図 4.9:5インチフォトマスク上の配線パターン。

4.5 超伝導積層配線の製作

積層配線の製作はセイコーインスツル株式会社 (SII) とエスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社 (SIINT) に依頼した。SII や SIINT では地上応用のための TES 型マイクロカロリメータの開発を行って おり、長年共同で研究開発を進めている。積層配線の製作で実績があるので、配線部分の製作担当をお願いをした。

4.5.1 配線の種類

配線は Al と Nb の 2 種類の超伝導金属を使用して試作をした。下部配線には Al を、上部配線には Al または Nb それぞれのパターンを用意した。Al は製作工程が比較的容易であり、表面が酸化して Al₂O₃ の不動態を形成し、安定な構造をとることが利点である。ほとんどの金属は安定せずにイオンを発生させ、配線を包む絶縁膜の中に拡散し、絶縁破壊やショートを引き起こしてしまうという問題があるが Al ならば心配はない。しかし溶媒に腐食しやすいという欠点がある。一方 Nb はスパッタリングにより容易に低抵抗薄膜が形成でき、耐薬品性も優れた材料であるため、配線材料として用いられてきた歴史がある。下部配線に Nb を使用しなかった理由は表面の粗さを考慮したからである。Nb は Al より粒径が大きいので、表面が粗くなってしまう。凸凹と粗い表面の上に何層も重ねると、素子全体に影響がでてしまうことを防ぐために Nb は使用しなかった。下記に製作した積層配線基板のロットをまとめる (表 4.7)。

表 4.7: 試作した積層配線の種類。

No.	上部配線	下部配線
MLR#1	Al (t 100 nm)	Al (t 100 nm)
$\mathrm{MLR}\#2$	Al (t 50 nm)	Al (t 100 nm)
MLR#3	Nb (t 50 nm)	Al (t 100 nm)
MLR#4	Nb (t 100 nm)	Al (t 100 nm)

4.5.2 配線の製作方法

配線の製作では薄膜製作技術として MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を利用している。ここで大まかな配線の製作の流れを示す。

- まず、Si 基板両面にシリコン酸化膜とシリコン窒化膜を成膜する (図 4.10 (i), (ii))。これが、吸収体の熱を熱浴へ排熱するサーマルリンク部分となるメンブレン層である。酸化膜は熱酸化膜プロセスによって形成した。熱酸化膜プロセスは酸化炉と呼ばれる電気炉で温度を上げて、酸素の混じったガスを流して酸化膜を成長させるものであり、もっとも簡単で良質な膜が得られる方法である。窒化膜は LP-CVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 法を使用した。低圧下において、気相での化学反応による薄膜成長法で、このプロセスによる膜の成長では、700 800 ℃の温度でジクロロシランとアンモニアによる反応が一般的に用いられ、膜の均一性が良いことが利点として挙げられる。
- 次に Al 配線の構造形成である。始めに下部配線となる Al 膜を成膜した (図 4.10 (iii))。成膜には スパッタリング法を採用し、厚さ 100 nm の薄膜を形成した。スパッタリング法は高エネルギー粒 子をターゲット材料に衝突させ、気相中に放出されたターゲット材料粒子を基板上に堆積させる





方法である。その後、混酸アルミ液という酢酸、硝酸、リン酸が混ざっている Al のエッチング液 により、下部配線のパターニングを行った。

- 絶縁膜にはシリコン酸化膜を採用した (図 4.10 (iv))。シリコン酸化膜の形成には P-CVD (Pressure Chemical Vapor Deposition) 法を使用した。コンタクトホール部分となる箇所は反応性イオンエッ チング (RIE: Reactive Ion Etching) 法を用いて膜の除去を行った。150 nm 成膜している。
- 上部 Al 配線の形成は下部配線と同様にスパッタリング法と混酸アルミエッチング液によるウェットエッチングにより形成した (図 4.10 (v))。また、上部 Nb 配線ではスパッタリング法と、リフトオフ法 (不要部分を保護し、その上に金属を成膜。保護膜を除去するとパターンが残る方法)でパターニングしている。膜厚は 50 nm または 100 nm である。
- 最後にコンタクトホール部分の強化である (図 4.10 (vi))。絶縁膜の厚さ 150 nm に対して、上部 配線の厚さが 50 または 100 nm と薄いため、被覆性悪く上部配線と下部配線がうまく繋がらない。 そこで、コンタクト部分に 150 nm の Nb を堆積させることで被覆性の悪化を防ぐ。形成方法は上 部の Nb 配線と同様である。

4.5.3 試作した積層配線

実際に製作した積層配線が以下となる。図 4.11 は上部・下部配線共に Al を使用している MLR^{#1} 基 板で、20×20 ピクセルアレイ用の積層配線である。20×20 ピクセルアレイ用の場合、配線の幅は上部が 10 μm、下部側が 15 μm となっている。光学顕微鏡で基板全体を確認したところ、基板全体は綺麗であ り、さらに配線のアライメント精度は ~1 μm とかなり良かった。

図 4.12 は上部配線に Nb を、下部配線には Al を使用している MLR^{#4} 基板で、20×20 ピクセルアレ イ用の積層配線である。こちらも光学顕微鏡で基板全体を確認したところ、配線のアライメント精度は ~1 µm とかなり良かったが、基板全体は汚かった。これは、Nb 膜を加工する際に使用したリフトオフ 法によるものではないかと考えられる。



図 4.11: MLR#1の 20×20 ピクセルアレイ用の積層配線。(a) 400 ピクセル部分。(b) ピクセル部分の拡大写真。(c) 上部・下部配線の重なり部分の拡大写真。



図 4.12: MLR#4の 20×20 ピクセルアレイ用の積層配線。(a) 400 ピクセル部分。(b) ピクセル部分の拡大写真。(c) 上部・下部配線の重なり部分の拡大写真。

4.6 積層配線の歩留まり試験

まず配線のみの評価をおこなうため、TES部分を短絡させた配線基板を用いることにした。製作した 配線が導通しているのかを確かめるため、常温で抵抗チェックをおこなった。

4.6.1 測定箇所

MLR#1~MLR#4の全種類の基板で、400 ピクセルを読み出す配線全てを測定した。どの基板も上部 配線の幅 10µm、下部配線の幅 15µm である。歩留まり調査は理論抵抗の式、から得られた値と実測値 とを見比べて行なった。

$$R = \rho \frac{L}{A} + \rho \frac{L}{B}$$

R:抵抗値 [Ω] ρ :電気抵抗率 [Ωm] L:配線の長さ [m] A:上部配線の断面積 (配線幅 x 配線厚み)[m²] B:下部配線の断面積 (配線幅 x 配線厚み)[m²]

4.6.2 測定方法

抵抗測定には宇宙研にあるマイクロプローバーを使用し、配線のパッドに針をあて測定した。



図 4.13: マイクロプローバー。

4.6.3 結果と考察

基板の種類によらずほぼ全ての抵抗値が、理論値より1.5倍前後大きくなっていた。これは配線の膜質 や厚さが原因していると考えられる。しかし配線の長さと抵抗値の関係は一致しており、これは大きな 問題ではないと考えた。抵抗値異常をいくつか示した配線があり、光学顕微鏡で配線やピクセルをチェッ クしたところ、上部配線切れ (図 4.15) や下部配線切れ (図 4.16)、絶縁膜剥離 (図 4.17)、ゴミの付着 (図 4.18) などがみられた。

以上の結果、全ての配線が正常とはいかなかったが歩留まりが 5~97 %と高く、精度良くで積層配線 が製作できることがわかった。次に配線の超伝導転移状態を調べるため、TES 部分を短絡させた導通基 板を用いて、超伝導転移試験をおこなった。



図 4.14: MLR#4 20×20 ピクセル配線 抵抗値。



図 4.15: MLR#1 20×20 ピクセル配線の上部 図 4.16: MLR#1 20×20 ピクセル配線の下部 配線の断線写真。 配線の断線写真。



図 4.17: MLR#1 20×20 ピクセル基板で絶縁 図 4.18: MLR#1 20×20 ピクセル基板上にゴ 膜が剥離している箇所。 ミが付着している箇所。

4.7 積層配線の超伝導転移試験

次に積層配線の超伝導転移を確認する冷却試験をおこなった。製作した TES 型マイクロカロリメータ 素子の RT 特性評価や X 線照射実験などは首都大学東京の実験室ですべておこなっている。

4.7.1 実験装置

カロリメータの性能を引き出すには、極低温で動作させることが必須であり、~ 100 mK 以下の冷 凍能力をもつ冷凍機が必要である。この冷凍機として、希釈冷凍機を使用した。希釈冷凍機は、冷却能 力が大きく、液体 He が無くならない限り一定の温度を保ち続けることが可能である。³He-⁴He 希釈冷 凍機の冷却は、液体 ³He と液体 ⁴He と の混合希釈によってなされる。³He-⁴He 混合液 (mixture) は、 0.87 K 以下で超流動性を示さない二層に分かれる。冷却は、³He-濃厚相と ³He-希薄相中の ³He のエン トロピーの違いを利用するもので、³He-濃厚相から ³He-希薄相へ ³He が混ざる際に吸熱がおこる。こ の混合液は蒸気圧の違いを利用し、 ³He のみを蒸発させ、冷却し液化して ³He の濃厚な層へと戻る循 環運転をしている。

使用した希釈冷凍機は、OXFORD Kelvinox25 型希釈冷凍機であり、高さ 124 cm、直径 39.4 cm の 円柱形をしている。この希釈冷凍機の模式図を 図 4.19 に示す。液体 He を 50 *l* 使用することにより約 50 時間連続で循環運転が可能である。冷却能力は ~ 25μ W、最低到達温度は、~ 60 mK である。



図 4.20 に IVC (Inner Vacuum Chamber) の内部構造の概略図を示す。IVC 内部は ~ 10^{-5} Torr まで真空引きされ、カロリメータと SQUID はこの中に組み込まれる。³He を液化する 1K pot と呼んでいる箇所は液体 He の減圧によって冷却されるが、本実験においては実際には 1 K まで到達はせず、典

型的な温度として 1.5 K である。SQUID はこの 1Kpot により冷却された 1K ステージに接着させて いる。³He-濃厚相から ³He-希薄相 への希釈混合は M/C (Mixing Chamber) 内でなされ、M/C は最 終的にこの冷凍機の最低到達温度 (~ 30 mK) に達する。TES カロリメータは、この M/C に真鍮で熱 リンクをとった E/P (Experimental Plate) の台座として渡した真鍮の板にねじ止めされる。台座には E/P の温度ゆらぎがカロリメータに直接伝わらないように、熱伝導度が銅より悪い真鍮を選んだ。M/C と 1 K pot、 E/P には、酸化ルテニウム (RuO₂) 温度計が取り付けられている。E/P の温度制御には Picowatto 社 AVS47 Resistance Bridge/TS-530 Temperature Controller を用いて M/C のヒーターに 流す電流値を制御することで行っており、~ 0.1 mK の精度で制御することが可能である。自作したカ ロリメータを希釈冷凍機に組み込んだときの写真を図 4.21 に示す。

また、測定される温度は、熱浴の温度となるので TES と熱浴との間で温度差ができないように流す電流は極微小でなければならない。

定電流を流す方法では、サンプルの温度測定にはホルダ上に固定した RuO₂ 温度計を使用し、LTC-21 で読み出している。抵抗値の測定には Linear Research 社 LR-700 を使用し、4 端子法を用いて約 16 Hz の交流電流をサンプルに流して抵抗値を測定している。ここでは、20 μ V-20 Ω (1 μ A)、20 μ V-2 Ω (10 μ A) のレンジで測定を行っている。

希釈冷凍機内部の配線は外部との熱接触を抑えるために、熱伝導度が悪く径の細いマンガニン線を用いている。これらの配線はノイズ対策として信号往復のペア同士 2 本づつツイストしており、4 ポート 各 12 対の配線が使用可能となっている。それぞれの配線の往復での抵抗値は、希釈冷凍機の大きさの都 合上、配線を長く取らなければならないために、常温で ~ 230 Ω 、冷却実験中においては温度 \leq 4 K で ~ 180 Ω と大きいものである。



図 4.21: 左:希釈冷凍機全体像。右:カロリメータ組み込み 写真。

4.7.2 測定方法

以下では配線の特性評価のために温度 T と電気抵抗 R の関係 (R-T 特性) を測定した。素子の評価の際にも、まずはじめに行うのがこの R-T 測定である。素子の転移温度 T_c 、転移幅、転移の様子などからカロリメータとして動作させることが可能かどうか調べることが必要である。R-T 特性を測定する方法として、定電流の下で抵抗を直接測定する方法と定電圧バイアスの下で TES に流れる電流変化から抵抗に換算する方法の2つがある。どちらの方法に対しても温度コントロールには、Picowatto 社 AVS 47/TS-530 を使っている。また、測定される温度は、熱浴の温度となるので TES と熱浴との間で温度差ができないように流す電流は極微小でなければならない。

定電流を流す方法では、サンプルの温度測定にはホルダ上に固定した RuO₂ 温度計を使用し、LTC-21 で読み出している。抵抗値の測定には Linear Research 社 LR-700 を使用し、4 端子法を用いて約 16 Hz の交流電流をサンプルに流して抵抗値を測定している。ここでは、20 μ V-20 Ω (1 μ A)、20 μ V-2 Ω (10 μ A) のレンジで測定を行っている。定電圧の方法では、SUQID の出力レベルの変化を測定する。 SQUID 出力 V_{out} と TES に流れる電流 I の間には、SQUID アンプの電流電圧換算係数 Ξ を用いて、

$$I = \frac{V_{\text{out}}}{\Xi} \tag{4.4}$$

という関係がある。また、 I には TES の抵抗 R、シャント抵抗 R_s 、パラシティック抵抗 R_p を用いて、

$$I = \frac{R_{\rm s}}{R + R_{\rm s} + R_{\rm p}} I_{\rm b} \tag{4.5}$$

ここで、 *I*_b は、バイアス電流である。この式より、素子の抵抗値を計算することが出来る。 素子の転移温度は、

$$f(R_0, T_c, T_1, T_2, R_c) = \frac{R_0}{(1 + \exp(-(T - T_c)/T_1))(1 + \exp(-(T - T_c)/T_2)))} + R_c$$
(4.6)

という関数でフィットした時のTc で定義している。

4.7.3 結果と考察

測定した基板はマイクロプローバーで測定した基板と同じ 20×20 素子用の配線基板である。それぞれ の測定結果を以下にまとめる (表 4.8)。

1. MLR#1(上部 Al t 100 nm / 下部 Al t 100 nm)の結果

図 4.22 は得られた転移カーブである。結果より、転移そのものはシャープだったが、1.05 K 付近 と 1.2 K 付近で 2 段転移が見られる。おそらく上部配線と下部配線のコンタクトホールもしくは、 ボンディングワイヤ (素材は Al) が原因と思われる。しかし 1.1 K で残留抵抗も小さく超伝導状態 になっているため、素子にした際には特に問題はないと考えた。

2. MLR#2(上部 Al t 50 nm / 下部 Al t 100 nm) の結果

図 4.23 は得られた転移カーブである。こちらも転移そのものはシャープだったが、1.1 K 付近と 1.25 K 付近の両方で転移が見られる。MLR#1 と同様、残留抵抗も小さく超伝導状態になってい るため、素子にした際には特に問題はないと考えた。

MLR#1 20×20	基板 ID	ID:0810
	上部 A1 配線	t100 nm, w10 μ m
	下部 Al 配線	t100 nm, w15 μ m
R-T測定 (@1 µA)	Tc [K]	1.2
	$R@2.5 \text{ K}[\Omega]$	260
	転移後の R@50 mK [Ω]	3×10^{-3}
臨界電流測定	バイアス電流 [µA]	抵抗值 [mΩ]
	1	3
MLR#2 20×20	基板 ID	ID:0503
	上部 A1 配線	t50 nm, w10 μ m
	下部 Al 配線	t100 nm, w15 μ m
<i>R-T</i> 測定 (@1 µA)	Tc [K]	1.3
	$R@1.7 \text{ K}[\Omega]$	432
	転移後の R@84 mK [Ω]	2×10^{-3}
臨界電流測定	バイアス電流 [μA]	抵抗值 [mΩ]
	1	2
	6	2
	10	2
	100	2
MLR#3 20×20	基板 ID	ID:0101
	上部 Nb 配線	t50 nm, w10 μ m
	下部 A1 配線	t100 nm, w15 μ m
R-T測定 (@1 µA)	Tc [K]	1.3
	$R@4.2 \text{ K}[\Omega]$	87
	転移後の R@84 mK [Ω]	2×10^{-3}
臨界電流測定	バイアス電流 [µA]	抵抗值 [mΩ]
	1	2
	6	3×10^3
	10	5×10^{3}
	100	6×10^{3}
MLR#4 20×20	基板 ID	ID:0507
	上部 Nb 配線	t100 nm, w10 μ m
	下部 Al 配線	t100 nm, w15 μ m
R-T測定 (@1 µA)	Tc [K]	1.3
	$R@4.2 \ { m K}[\Omega]$	105
	転移後の R@84 mK [Ω]	2×10^{-3}
臨界電流測定	バイアス電流 [µA]	抵抗值 [mΩ]
	1	2
	6	2×10^3
	10	11×10^{3}
	100	20×10^{3}

表 4.8: 測定した各積層配線基板の測定結果。



図 4.22: 得られた MLR#1 ID:0810 の R - T カーブ。横軸: 温度 T (K) 縦軸: 抵抗値 R (m Ω)。左図は 縦軸が対数表示となっている。



図 4.23:得られた得られた MLR#2 ID:0503の R-Tカーブ。軸表示は図 4.22 と同じ。


図 4.24: 得られた得られた MLR#3 ID:0101 の R – T カーブ。軸表示は図 4.22 と同じ。



図 4.25: 得られた得られた MLR#4 ID:0507の R-Tカーブ。軸表示は図 4.22 と同じ。

3. MLR#3(上部 Nb t 50 nm / 下部 Al t 100 nm)の結果

図 4.24 は得られた転移カーブである。Nb (~7 K)、Al (~1.2 K) の転移は確認できた。しかし 0.5 K~1.0 K の間でダラダラと抵抗値が下がっており、また臨界電流も要求値の >100 μA より小さい <6 μA であった。

おそらく Nb と Al の界面 (コンタクトホール部分) に問題があると思われる。これはカロリーメー タの動作に影響を与える恐れがある。

4. MLR#4(上部 Nb t 100 nm / 下部 Al t 100 nm)の結果

図 4.25 は得られた転移カーブである。Nb (~7 K)、Al (~1.3 K) の転移は確認できた。しかしこ ちらも MLR# 3 同様 0.5K~1.0K の間でダラダラと下がっており、転移幅が広い。臨界電流も <6 µA と小さい。

以上、配線の超伝導転移試験の結果から、Al-Al 配線は素子の配線として使用できると判断した。一 方で Nb-Al 配線は転移に問題があったため、このまま TES カロリメータの配線として使用はできない。 そこで、次に Nb-Al 配線の膜の界面調査を行った。

4.8 Nb/Al膜の断面・界面調査

配線やコンタクトホール部分の断面調査には走査電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) と集積イオンビーム (FIB: Focused Ion Beam) を使用した。SEM は試料表面の平面形状を観察する電 子顕微鏡で、細い電子線で試料を走査し、電子線を当てた座標の情報から像を構築し表示するものであ る。FIB 加工では集束イオンビームを当てて試料表面の原子をはじきとばすこと (スパッタリング現象) によって試料を削ることができる。この FIB と SEM とを一つの装置にした FIB-SEM を用いることで、 断続的に加工と観察を繰り返し、3 次元的な構造解析を行うことができる。

また、界面の観察には透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope) とエネルギー分 散型 X 線分光器 (EDS: Energy Dispersive x-ray Spectrometer) による分析をおこなった。TEM は観 察したい試料に対して電子ビームを照射して、透過してきた電子を結像して観察を行う電子顕微鏡であ る。試料に電子線を照射し、その内部構造を主に観察することから、試料の形状や表面構造に加え試料 内部の情報である凝集度合い、結晶パターン、格子欠陥の存在及び結晶の配向方位などについて知るこ とができる。EDS 分析は特性 X 線エネルギーを測定することによりスペクトルを得るものである。 各観察部の結果を以下にまとめる。

4.8.1 配線根元部

観察結果を図 4.26 に示す。Nb の段切れは確認できなかった。Al エッジ部の SiO₂ 膜厚低下による Nb-Al ショートもみられなかった。

4.8.2 コンタクトホール部分

観察結果を図 4.27 に示す。Nb/Al 膜のコンタクトは良好であり、特に問題は見られなかった。



図 4.26: 配線根元部分の断面。(a) 観察エリア。(b)(c) Nb と Al が重なり合う部分。



図 4.27: Nb/Al コンタクトホール部分の断面。(a) 観察エリア。(b) 観察結果。



図 4.28: Nb/Al 界面の TEM 写真。



図 4.29: Nb/Al 界面の EDS マッピング。

4.8.3 Nb/Al界面

TEM 観察結果を図 4.28 に示す。界面近傍で Al (4 nm~5 nm)の構造が崩れていることが判明した。 また、EDS 分析により界面で酸素とアルゴンの残留ガス (不純物)を確認した (図 4.29)。これら、界面の状況が転移状態に影響を与えているのではないかと考えた。

4.9 本章のまとめと考察

本章では、*DIOS* 衛星搭載用の素子に必要な技術課題の1つである配線の開発をおこなった。DIOS の要求値である検出器の有効面積1 cm₂ を満たすためには、素子をより密集してアレイ化しなくてはな らない。従来の TES 製作の経験から、面積とエネルギー分解能の要求を満たすアレイ設計を行い、200 µm 角の TES の上に 500 µm 角の吸収体の付いた 20×20 アレイの実現が可能であると見積もった。しか し、こうしたアレイ化をおこなうにあたって、基板上の配線スペースやピクセル間のクロストークが問 題となる。

そこで、私はホットとリターンの配線を絶縁膜を破産で重ね合わせたサンドイッチ構造の積層配線 (折 り返し配線)の開発をおこなった。ホットとリターンの配線を重ね合わせることで配線スペースが削減さ れ、より充填率の高い素子構造を形成でき、また配線自身で磁場がキャンセルされるため、クロストー クを十分小さく抑えることができる。下部配線には Al (厚み 100 nm)、上部配線に Nb または Al (厚み 50 nm または 100 nm)を使用し、3.5 cm 角の基板上に 500 µm ピッチで 400 ピクセル分の配線を形成 することに成功した。製作の結果より、上部・下部ともに Al を使用した積層配線が最適であることがわ かった。そして Al-Al 積層配線上に TES を形成し、TES カロリメータを製作する工程に進んだ。試作 した Al-Al 配線のまとめを以下に示す。

4.9.1 Al-Al 積層配線の結果と考察

試作した上部・下部ともにAlの積層配線の歩留まりをマイクロプローバーで調査したところ、95~97%と 非常に高く、また光学顕微鏡や SEM 等でコンタクトホール部分や配線のアライメントを確認したとこ ろ、アライメント精度が1 μm と非常に高い位置合わせ精度で重ねることができた。実際には 100 mK 付近の極低温下で動作させるため、Al 配線自身の転移状況も確認した。結果として、1.2 K で転移は見 られ非常にシャープな転移カーブであったが、さらに 1.1 K 付近でも転移するという 2 段階に分かれて 転移していた (2 段転移)。Al のバルクの転移温度は 1.2 K なので理論値と合う。2 段目の転移は測定の 際に使用する Al のボンディングワイヤの転移だと考えられる。しかし TES カロリメータの典型的な動 作域の抵抗値は 100 mK であるので、2 段転移している箇所は動作域外であり、カロリメータとしては 問題にならないと考えた。臨界電流も 100 μA 以上と高く問題は見られなかった。

4.9.2 Nb-Al 積層配線の結果と考察

試作した上部がNb、下部がAllの積層配線の歩留まりもAl-Al 配線同様にマイクロプローバーで調査 し、~97%と非常に高く製作できた。またアライメント精度も1 μm と高く、質のよい配線を形成した ことを確認した。Nb-Al 配線の転移状態を確認したところ、~7 K、~1.2 K、~0.8 K 付近で転移がみら れた。7 K は Nb のバルクでの転移温度と同じであり、1.2 K と 0.8 K も Al 配線と Al のボンディング ワイヤの転移温度と考えられる。TES カロリメータの典型的な動作域の抵抗値は 100 mK であるので、 2 段転移している箇所は動作域外であるが、転移幅が ~700 mK と広く、温度計感度 α が小さい。また、 臨界電流も 6 μA と、TES カロリメータの動作の要求値 (100 μA 以上) より遥かに小さく、TES カロリ メータの配線に使用するには問題があると判明した。

そこで、Nb-Al の界面を TEM-EDS などを用いて観察したところ、Nb との界面にある Al (4 nm~5 nm)の構造が崩れていることが判明した。さらに界面で酸素とアルゴンの残留ガス (不純物)を確認した。これらは、配線の膜を形成するスパッタリングの際に使用する不活性ガスであると考えられる。界面構造の崩れ、そして不純物の混入が Nb-Al 配線の転移状態の悪化に起因していると考えた。

第5章 超伝導積層配線を用いたTES型X線マイク ロカロリーメータ素子のプロセスの確立

前章では、新たに開発した積層配線の製作、超伝導転移試験などを述べた。転移試験より、TES カロ リメータに使用する配線には Al-Al 積層配線 (上部、下部ともに Al を用いた配線) が好ましいことがわ かった。

この章では、試作した Al-Al 積層配線を用いた TES カロリメータの製作プロセスについて詳しく述べる。

5.1 TES 膜の形成プロセス

5.1.1 製作方法

積層配線を用いた TES カロリメータの製作方法は、従来と同様 MEMS 技術を利用している。図 5.1 に積層配線上に TES 膜を形成するプロセスフローを示す。シリコン加工技術、使用装置は従来と変わ らないが、製作工程の順序が若干異なる。装置については3章に詳しく述べているのでここでは省略す る。図 5.2 に従来の TES カロリメータのプロセスフローと、積層配線を用いた新たなプロセスフローを 示す。従来のプロセスフローは3章で述べている製作過程のことである。図 5.2 から従来との違いを比 較すると、配線と TES の形成の順番が逆になっていることがわかる。4章で述べたように、はじめに基 板上に積層配線を形成しているためである。従来では TES 膜の上に配線が構築されていたが、積層配線 を用いると配線の上に TES が乗っかる構造になる。一見、配線と TES の順番が逆になっても問題がな いように思えるが、ここで製作面において注意すべき事がある。

5.1.2 製作における課題

積層配線を使用した TES カロリメータの製作面において注意すべきことは、TES を加工する過程で Al 配線に影響を及ぼさないかということである。TES を成膜しピクセル加工するウェットエッチングの 過程で、Ti と Au のエッチャントを使用する。このエッチャントに対する Al 配線の反応を見ておく必要 がある。

そこで、まず TES カロリメータを製作する前に、TES のエッチャントに対する Al 配線の耐性試験を 行った。

5.2 TESエッチャントによる超伝導積層配線の耐性試験

エッチャント耐性試験に使用した基板は積層配線が形成されている基板ではく、Si 基板上に Al 膜が 100 nm の厚さで全面に成膜されているベタ膜基板を使用した。Al の成膜は配線と同様 SII にお願いした。



図 5.1: 積層配線を用いた TES 膜の形成プロセスフロー。





5.2.1 Tiエッチャントによる耐性テスト

3章で述べたように、Tiのウェットエッチングではエッチャントに 60 ℃に加熱した 35%の過酸化水素 水を使用している。エッチャントに浸す時間は、従来おこなっていた典型的なエッチング時間と同じ 3 時間にした (表 5.1)。3時間浸し様子をみた結果、全く変化が見られなかった (図 5.3)。光学顕微鏡で確 認をしたが、剥がれている箇所や腐食している部分は見受けられなかった。よって、Al 配線は Ti の加 工に使用する過酸化水素水に耐性があると確認できた。

表 5.1: Ti エッチャント耐性試験条件。

Ti etchant	$60\ensuremath{^\circ C}$, $\mathrm{H_2O_2}$
Ti etching rate	13 nm/min
Ti etching time	3 hr



図 5.3: 過酸化水素水に 3 時間浸した後の Al ベタ膜基板。

5.2.2 Au エッチャントによる耐性テスト

74

膜の構造を見ると、上部 Al 配線の上に Ti が成膜されており、Au のエッチャントに触れることがない はずだが、念のため Ti のエッチャントだけではなく、Au のエッチャントの耐性も確認することにした。 耐性試験の条件は表 5.2 に示す。こちらも従来と同様、関東化学株式会社製の AURUM-101 というヨウ 素系溶液を Au のエッチャントとして使用した。エッチャントに浸す時間は、従来の典型的な Au の膜厚 ~100 nm と仮定しエッチングレートから 20 秒浸した。ピンセットで基板をつまみエッチャントに浸し 様子を見たが、特に変化が見られなかった。そこで、さらに 10 分間 (計 10 分 20 秒) と長時間浸し Al の 耐性を確認したところ、基板の淵の Al が剥がれ Si がむき出しになっていた (図 5.4(a))。AURUM-101 に対する Au と Al の選択比を見るため、別の Al ベタ膜基板を用いてもう一度耐性を見た。先程と同様 20 秒では基板に変化は見られなかったが、さらに 1 分間 (計 1 分 20 秒) 浸したところ、基板の淵の Al が剥がれた (図 5.4(b))。

以上の結果から、Al は AURUM-101 に対して容易に剥がれてしまうことがわかった。また Au と Al のエッチング選択比はおよそ 7:1 であることがわかった。ただ、実際の素子製作では数十秒で Au のエッ チングが完了できること、また膜の密着性がベタ膜基板と配線基板とでは異なることなどを考え、Al 配 線上に TES を加工し、実際に素子製作を行った上で、最終的な耐性の判断をすることにした。

表 5.2: Au エッチャント耐性試験条件。

Au エッチャント	常温,AURUM-101
Au エッチングレート	500 nm/min
Au エッチング時間	20s, $1m20s$, $10m20s$



図 5.4: (a) 10 分 20 秒間 AURUM-101 に浸した Al ベタ膜基板。(b) 1 分 20 秒後の基板 の様子。

5.2.3 TES 加工プロセスによる耐性テスト

上記の通り、Al ベタ膜を使用したの耐性試験より、Al は Au エッチャントに弱いことが判明したが、 実際に TES を配線上に形成し、エッチャントに対する最終的な耐性試験を行った。表 5.3 に使用した基 板、成膜した TES の膜厚、エッチング条件などのパラメタをまとめた。今回は加工テストのため、基板 には TES 付け用ではなく、TES 部分を短絡させた配線導通基板を用いた。また、Ti と Au は従来の素 子製作で典型的な膜厚にし成膜した。

使用基板	MLR#1 4×4 ピクセル用 導通基板
基板 ID	TMU241
TES 膜厚	Ti/Au: 40/80 nm
Au エッチャント	常温,AURUM-101
Au エッチング時間	20 s
Ti エッチャント	$60 \degree C$, H_2O_2
Ti エッチング時間	3 hr

表 5.3: Au エッチャント耐性試験条件。

図 5.5 に TES 加工した後の基板全体の様子を示す。(a) は基板のデザイン図であり、赤い○が示すエ リアが腐食し、Al が剥がれていた箇所である。(b) は実際の基板である。この結果を見ると、ベタ膜で の耐性試験では Au エッチャントに 20 秒間は耐えていたが、実際に配線加工された Al では、20 秒も耐 える事ができず腐食されてしまった。また、基板の端にある pad 部分が一番ダメージを受けている。こ れは図 5.6 に示すように、基板の端にある Al pad がむき出し状態になっているため、サイドエッチング されやすいことが原因である。また、基板にダストなどがある場合、成膜した TES 面にホールができ てしまうことがある。ここからエッチャントが入り込み、基板の中心部分の Al 配線も腐食されてしま う。図 5.7 にサイドにある Al bonding pad の拡大図を示す。(a) は Au エッチング後の pad、(b) はさら に Ti エッチングした後の pad の写真である。Au エッチャントにより腐食され皺がよった部分は、次の Ti エッチングの工程で完全に剥離されてしまった。

以上の結果から、Al が全く腐食されないようなエッチャントを使用する必要があることがわかった。 そこで、Au と Al のエッチング選択比が高い Au のエッチャントを作り出すことにした (1.3 節)。



図 5.5: (a) 基板の全体デザイン図。赤丸: 腐食したエリア。(b) Ti/Au エッチング後の基全体像。

5.3 Auエッチャントに対するAuとAlのエッチング選択比向上の条件出し

Alが腐食がおこらないよう、エッチャント自体の見直しとエッチング方法の条件出しを行った。



図 5.6: (a) TES スパッタ後の基板全体の模式図。赤破線: Al bonding pad がむき出し状態の エリア。(b) TES がスパッタされた実際の 2 cm 角基板。



図 5.7: Al 配線の bonding pad。(a) Au エッチング後の腐食した様子。(b) Ti エッチング後の 剥離した様子。

5.3.1 Au エッチャントの種類

始めに Au のエッチングに使用されるされる溶液の種類を調べた。金属のウェットエッチングは、金属 を酸化溶解させる強制的な腐食現象である。ただし単に金属を溶解除去させればよいわけではなく、溶 解後の寸法制限や表面形状などが重要視されるいわば条件を厳しく制限された腐食現象である。金属の 腐食反応は金属が水和イオンとして溶解するアノード酸化反応によるものである。式 5.2 に典型的な金 属 M のアノード酸化反応式を示す。

$$\mathbf{M} \to \mathbf{M}^{n+} + n\mathbf{e}^{-} \tag{5.1}$$

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{a} \tag{5.2}$$

この反応が進行するためには溶液中の酸化剤 Ox のカソード還元反応が同時に生じる必要がある (式 5.4)。ここで Ox は酸化体、Red は還元体を意味する。

$$Ox + me^- \rightarrow Red$$
 (5.3)

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{b} \tag{5.4}$$

腐食反応はこのアノード反応とカソード反応の組み合わせで起こり、アノード反応の標準酸化還元電 位のほうがカソード反応の標準酸化還元電位より卑 (a < b) であれば腐食反応は進行することになる。 しかし、Auをはじめ Ag、Pd などの貴金属 (a > b) では自発的に腐食 (酸化) は起こりにくい。これら 貴金属のエッチングには、より貴な電位で還元する還元する強力な酸化剤を用いることや、溶解を容易 にする錯形成にしやすい配位子を組み合わせるなどの対策が必要である。図 5.8 に Au が関係する酸化 還元反応およびその標準酸化還元電位の一覧を示す。Au は全ての金属の中で最も貴、つまり酸化しにく い金属である。しかし配位子として CN、SCN やハロゲンが存在すれば卑な電位においても酸化する。

これより、Auをエッチングする溶液にはいくつかの系統に分けられる。単純に金を溶解可能にする液 を広義にAuエッチング液をすると、めっき不良品の修復や完全な金の回収除去を目的とした剥離液と しては、水酸化アルカリとシアン化アルカリ、塩酸などを用いて強制的に溶解させる電解型が多い。一 方で微細加工を目的とした浸漬型のエッチング液としては「シアン系」、「王水系」、「ヨウ素系」の3種 類は主流である。図 5.9 は Auのエッチング液の一覧である。以下にそれぞれの特徴を示す。

「シアン系」

Auとシアンイオンが極めて安定な錯体を形成するため、適切な酸化剤は共存する条件で容易にAu をエッチングできる。しかし、浸漬型、電離型を問わず溶液が強アルカリ性で毒物であるシアン を用いるという扱いにくさが難点である。そのため、Auの剥離液としては使用されるが、電子部 品のエッチング微細加工ではあまり用いられない。

• 「王水系」

AuやPtなどの貴金属を溶解できる強力な酸化力をもつ混酸としてよく知られている。実用面で も半導体基板のエッチング加工に使用されている。しかし、液自体が不安定で取り扱いにくいと いう問題がある。

「ヨウ素系」

ヨウ素系はヨウ素やヨウ化物からなり、液体が中性で扱い易く成分濃度によってエッチング速度を 制御できるため、半導体基板における Au 薄膜の微細加工用エッチング液として広く使用されてき た。ヨウ素系では微細加工パターンに対応できるよう低級アルコールや脂肪族カルボン酸などの

Auの酸化還元反応	E°,V	酸化剤として可能性のある反応	E°,V
$Au^+ + e^- = Au$	+1.69	$S_2O_8^{2^-} + 2e^- = 2SO_4^{2^-}$	+2.01
$Au^{3^+} + 3e^- = Au$	+1.49	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- = 2H_2O$	+1.77
$Au(OH)_3 + 3H^+ + 3e^- = Au + 3H_2O$	+1.45	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- = Mn^{2^+} + 4H_2O +$	+1.51
$Au^{3^+} + 2e^- = Au^+$	+1.29	$Cr_2O_7^-$ + 14H ⁺ + 6e ⁻ = 2Cr ³⁺ + 7H ₂ O	+1.33
$AuCl_2^- + e^- = Au + 2Cl^-$	+1.13	$2HNO_2 + 4H^+ + 4e^- = N_2O + 3H_2O$	+1.29
$AuCl_i^- + 3e^- = Au + 4Cl^-$	+1.00	$\mathrm{HNO}_2 + \mathrm{H}^+ + \mathrm{e}^- = \mathrm{NO} + \mathrm{H}_2\mathrm{O}$	+1.00
$AuCl_1^- + 2e^- = AuCl_2^- + 2Cl^-$	+0.96	$NO_{3}^{-}+4H^{+}+3e^{-}=NO+2H_{2}O$	+0.96
$AuBr_4^- + 2e^- = AuBr_2^- + 2Br^-$	+0.96	$NO_{3}^{-} + 3H^{+} + 2e^{-} = HNO_{2} + H_{2}O$	+0.94
$AuBr_4^- + 3e^- = Au + 4Br^-$	+0.87	$\text{ClO}^- + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	+0.89
$AuBr_4^- + 2e^- = AuBr_2^- + 2Br^-$	+0.82	$2HNO_2 + H^+ + 4e^- = H_2N_2O_2 + 2H_2O$	+0.86
$Au(SCN)_2^- + e^- = Au + 2SCN^-$	+0.69	$HNO_2 + 7H^+ + 6e^- = NH_4^+ + 2H_2O$	+0.86
$Au(SCN)_4^- + 3e^- = Au + 4SCN^-$	+0.65	$2NO_3^- + 4H^+ + 2e^- = N_2O_4 + 2H_2O$	+0.80
$Au(SCN)_{4}^{-} + 2e^{-} = Au(SCN)_{2}^{-} + 2SCN^{-}$	+0.65	$C_6H_4O_2 + 2H^+ + 2e^- = C_6H_6O_2$	+0.70
$AuO_2^- + 2H_2O + 3e^- = Au + 4OH^-$	+0.50	$I_2 \ (aq) \ + \ 2e^- = 2I^-$	+0.62
$AuI + e^- = Au + I^-$	+0.50	$I_{2}\left(s\right)+2e^{-}=2I^{-}$	+0.54
$Au(CN)_{2}^{-} + e^{-} = Au + 2CN^{-}$	+0.60	$I_3^- + 2e^- = 3I^-$	+0.53

図 5.8: 金およびエッチングに利用可能性のある化学種の反応および標準酸化還元 電位。

	No.	組成物	使用条件	備考	
	1	32g/L NaCN, 65ml/L 過酸化水素水	加熱浸漬		
シマ	2	5~30g/L NaCN, 30~70g/L 酸化剂	40~80℃、浸漬	Ni上の金剥離	
, ン	3	90g/L NaCN, 15g/L NaOH	電解6V	銅素地上の電解剥離	
系	4	50g/L K ₃ Fe(CN) ₆ , 20g/L KCN 10g/L Na ₂ CO ₃ , KH ₂ PO ₄ (pH9調整用)	電解,40-50℃、2-6V	電解剥離液	
	5	66mL 32%塩酸 + 34mL 65%硝酸	数秒~数分	マクロ腐食用	
土水	6	60mL 32%塩酸 + 20mL 65%硝酸	数秒~数分	ミクロ腐食用	
•	 7 5% 塩酸 		陽極電解	電解剥離液	
酸系	8	32% 塩酸	電解5V、1~2分	電解腐食	
	9	32%塩酸100mL、酸化クロム(VI)1~5g	数秒~数分	ミクロ腐食用	
よ	10	よう素+よう化アルカリ(又はアンモニウム)	室温	微細加工用	
う 素	11	よう素+よう化アルカリ+有機溶媒	室温	"	
系	12	ハロゲン単体+ハロゲン化塩+有機溶媒	加温(30~80°C)	貴金属回収用	

図 5.9: 金の剥離液、エッチング液。

有機溶剤、様々な有機添加剤を用いられている。ただ、低級アルコールなどの溶剤系では、揮発に より組成変形してしまいエッチング速度の変化が大きくなってしまう。

ここで、ヨウ素系 Au エッチング液の溶解反応を示す。古くから使用されているヨウ素系溶液では あるが、反応メカニズムの詳細は実は知られていない。反応報告例のうち代表的なものをとして、 錯形成を含めたアノード反応とカソード反応を以下に示す (式 5.5、式 5.6)。

$$2\operatorname{Au}_{(metal)} + 2\operatorname{KI}_{3(aq.)} + 2\operatorname{I}_{(aq.)}^2 \to 2\operatorname{AuI} \cdot \operatorname{KI}_{3(aq.)} + 2e^-$$
(5.5)

$$\mathrm{KI}_{3(aq.)} + 2\mathrm{e}^{-} \to \mathrm{KI}_{(aq.)} + 2\mathrm{I}^{-} \tag{5.6}$$

式 5.5、式 5.6 をまとめた全反応式は式 5.7 と表され、実際には AuI_4^- の形態で溶解していると考えられている。

$$2\operatorname{Au}_{(metal)} + 3\operatorname{KI}_{3(aq.)} \to \operatorname{KI}_{(aq.)} + 2\operatorname{AuI} \cdot \operatorname{KI}_{3(aq.)}$$

$$(5.7)$$

以上の Au エッチング液の特徴より、改めてプロセスに使用する溶液の見直しをおこなった。

5.3.2 Au エッチャントの見直し

上記のように、微細加工に適した Au エッチャントには「シアン系」「王水系」「ヨウ素系」が挙げられ る。この中で Al と Au のエッチング選択比が高い溶液を国内外から探した。そのうちイギリスの Transene 社製の Gold Etchant TFAC という商品は、エッチング選択比が Au:Al が 10:1 と従来のものとさほど変 わらない点や何よりもシアン系であるということから、使用にあまりにも危険すぎるので断念した。ま た王水系は、Au を効率よく容易にエッチングできるものの、余計に Al をエッチングしてしまうので論外 である。そこで、従来から使用してきたヨウ素系のエッチャントで、より選択比の高い溶液の選定を行っ た。従来から使用している関東化学株式会社製の AURUM-101 にはヨウ素とヨウ化カリウムが含まれて いる。このヨウ素とヨウ化カリウムにさらに有機溶剤を含んだ関東化学株式会社製の「AURUM-302」と いうエッチャントに注目した。この AURUM-302 は従来に比べ、ヨウ素濃度が少ないため Au のエッチン グレートが低く他の金属への影響も少ないと言われている。関東化学社調べでは、弱撹拌(ビーカーに粒 を入れて 200rpm 回転させる)をしながらエッチングすると 30 ℃ではエッチングレートが約 100 nm/min であった。また常温では約 3 割程度レートが落ち、60-70 nm/min であるという結果が出ている。私は従 来と同じく撹拌せずに常温でのエッチングレートを調べたところ、約 50 nm/min という結果が出た。以 下に実際に使用した 101 と 302 の写真とエッチングレートと含有物をまとめて示す (図 5.10、表 5.4)。

エッチャント含有物エッチングレートAURUM-101ヨウ素、ヨウ化カリウム500 nm/minAURUM-302ヨウ素、ヨウ化カリウム、有機溶剤50 nm/min

表 5.4: ヨウ素系エッチャント AURUM-101 と 302 の比較。

この2つのエッチャントを使用し、エッチング方法を工夫して Al の耐性テストを行った。

5.3.3 AURUM-101、302 を使用した Al の腐食耐性テスト

それぞれのエッチャントに対して、4つの方法で Al の腐食耐性試験をおこなった。使用した基板は Si 基板上に Al 膜が 50 nm の厚さで全面に成膜されているベタ膜基板を使用した。Al の成膜は配線と同様 SII にお願いした。以下に 4 パターンのエッチング方法を示す。



図 5.10: (a) 従来使用していた AURUM-101。(b) 新しく導入 した AURUM-302。

- 方法 1: 基板を 20 秒間エッチャントに浸す。
- 方法 2: 基板をエタノールに1分浸け、その後エッチャントに 20 秒間浸す。
- 方法 3: エッチャントにアルミ箔を 10 分浸け、その後基板をエッチャントに 20 秒間浸す。
- 方法 4: エッチャントにアルミ箔を 10 分浸け、次に基板をエタノールに1 分浸した後エッチャント に 20 秒間浸ける。

方法1は従来と変わらないエッチング方法であるが、他の方法と比較するためおこなった。方法2に あるエタノールに基板を浸す方法は、Alのエッチングを妨げる手段のひとつである。Alのエッチングが 促進される理由に OH イオンによるものが挙げられる。これは薬液と水が混合した際に出てくるものだ が、プロセスの途中にエタノールをかませることでエッチングの促進を防げるという効果がある。また 方法3ではアルミ箔をエッチャントにあらかじめ漬けた。薬液にあらかじめアルミを大量溶かして飽和 させることで、基板上の Alが溶けるのを防ごうというもである。方法4 は方法2 と3 を合体させたエッ チング方法である。

図 5.11 にエッチング結果を示す。結果から一目瞭然のように、エッチャントや方法に関わらず Alの 腐食はが見られた。図 5.12 は Si が腐食したエリアを触針式膜厚計で測り、本当に Al 50 nm が剥がれ腐 食したのかを確認したものである。これより、腐食エリアは確かに 50 nm の Al が剥がれていることが 伺える。AURUM-101 よりも 302 の方が腐食エリアが少ないものの、結果的に Al 腐食を抑えることは できなかった。エタノールを導入した基板は、余計に腐食エリアが増大してしまっており、またアルミ 箔の効果も皆無であった。その証拠に、AURUM に金属単体で浸した際のエッチングレートの資料を参 照したところ、Al は 0 nm/min と金属バルクでは全く腐食されないことがわかった。なので、アルミ箔 をエッチャントに 10 分間浸けて、飽和状態どころか何の反応も起こっていなかったと考えられる。

そこで、次のステップとして従来のエッチング液に添加剤を加えることで、Alの腐食を抑制すること を試みた。

5.3.4 新しい Au エッチャントの製作

K.C. Su et al. から Au エッチングにおける添加剤としてリン酸塩が有効であることがわかった (図 5.13)。図 5.13 をみると、リン酸塩の添加量をふやす程 Al のエッチングを抑えることができ、また Au の エッチングには全く影響を及ぼさないことがわかる。また関東化学株式会社の特許資料からも、ハロゲ ン類を除く硫酸類やリン酸類の無機酸のアンモニウム塩が Al の腐食に効果があるとわかった (図 5.14)。 これは、表面に不溶性のリン酸塩皮膜を作り表面の腐食の進行を抑制されるためと考えられる。



○はもともとSiがむき出しになっていた部分

図 5.11: Au エッチャントによる Al ベタ膜の腐食結果。



図 5.12: 腐食エリアの膜厚結果。

Chemistry	Inhibitor	Au Etch	Al Etch	Au:Al
	(wt%)	rate	rate	Etch
		(Å/min)	(Å/min)	Selectivity
Reference	0	1200	70	17:1
Phosphate	2%	819	24	34:1
acid	5%	891	34	26:1
	7.5%	829	34	24:1
Citrate	2%	933	24	39:1
	5%	780	24	32:1
	7.5%	840	24	35:1
Phosphate	2%	840	14	61:1
	5%	840	10	82:1
	7.5%	840	3	245:1
Pyrolle	1%	663	21	32:1
	7.5%	210	3	70:1
	1.570	210	5	70.1

図 5.13: K.C. Su et al. により抜粋した Au と Al のエッチング レートおよびエッチング選択比。



図 5.14: (a) 関東化学株式会社特許資料より抜粋した添加剤別 Au と Al のエッチングレート およびエッチング選択比。(b) 実際に使用したリン酸二水素アンモニウム。

そこで私はリン酸塩にリン酸二水素アンモニウム (NH₄H₂PO₄ = 115.03) を採用し、Al が腐食しない 条件出しを行った。使用した基板は Si 基板上に Al 膜が 50 nm の厚さで全面に成膜されているベタ膜基 板、エッチャントには AURUM-101 を使用した。この基板を特許資料と同じく 2 mol/l分 (11.5 g) のリ ン酸二水素アンモニウムを添加した溶液に 20 秒浸し腐食度合いを確認した。添加した際には 35 ℃程度 溶液を熱しながら溶かした。また、リン酸塩を飽和状態になるまで溶かした溶液 (3mol/l分=17.25 g) も作り腐食具合を比較した。図 5.15 が結果である。まだ腐食している部分はあるものの、リン酸塩を加 えたことにより確実に Al の腐食を軽減することに成功した。特に飽和状態になるまで溶かしたエッチャ ントを使用した場合は、ほとんど腐食が見られなかった (図 5.14 (b))。Al の腐食を防ぐ Au エッチャン トが確立できたとえる。

そこで次に Al の積層配線基板用いて TES 膜の加工を行い、Al 配線に影響がないか調べた。



図 5.15: (a) 2 mol/lの NH₄H₂PO₄ を溶解したエッチャントに浸した基板。(b) 飽和状態 (3 mol/l) のエッチャントに浸した基板。

5.3.5 新エッチャントを用いた TES 加工プロセスによる耐性テスト

上記の Al ベタ膜を使用したの耐性試験の結果より、従来使用してきた AURUM-101 にリン酸二水素 アンモニウムを添加することで、Al の腐食をほぼ防げることがわかった。実際に TES を配線上に形成 し、新エッチャントに対する最終的な腐食状態をみた。Au のエッチング時間は 20 秒、Ti のエッチング 時間は 3 時間である。

図5.16がTES加工した後の基板の様子である。(a) は基板全体、(b) は Au エッチング後の Al の bonding pad、(c) はさらに Ti エッチングした後の pad の写真である。Al 配線が腐食することなく TES を加工 できていることがわかる。以前は Al の pad 部分が腐食され、剥がれていたエリアが目立っていたが (図 5.7)、リン酸塩を加えた Au エッチャントを使用する事で Al 配線や pad 部分の腐食を完全に抑えること ができた。図 5.17 に TES 加工後のピクセル部分の拡大写真を示す。ここからも配線が腐食されている 様子は伺えない。

Al 配線腐食することなく配線上に TES 加工を施すことに成功し、プロセス条件が確立された。次の ステップとして、TES 加工をした配線基板の超伝導転移試験を行った。



図 5.16: 新 Au エッチャントを使用して TES 加工を施した積層配線基板。(a) 基板の全体像。 (b) Au エッチング後の Al bonbing pad。(c) Ti エッチング後の pad。



図 5.17: 新 Au エッチャントを使用して TES 加工を施したピクセル。

5.4 製作した素子と超伝導転移試験 (R – T 測定)

これまでの TES 加工における条件出しにより、TES をピクセル加工する際の製作方法が確立できた。 実際に積層配線上に TES を成膜、加工した素子の様子と超伝導転移試験の結果を述べる。

5.4.1 TMU245素子

表 5.5 に TMU245 の製作条件を示す。使用した基板は積層配線 MLR#2 の 16 ピクセル用基板である。 図 5.18 は TES 加工した基板の様子である。(a) は Au エッチング後、(b) は Ti エッチング後の基板の 様子である。リン酸塩を加えた Au エッチャントによつものか、レジスト部分に皺が見られた。その後 の TI エッチングでは、皺が寄っていたレジストが変質し、焦げ付いてしまった。(c) はレジストを除去 し、TES 加工を完了した際のピクセル部分の様子である。一見問題なく加工できているように伺えるが、 TES 表面を拡大してみるとぶつぶつとしたものが全面についている。これはアセトンによるレジスト除 去後も、焦げ付いたレジストがこびり付いて残ってしまったと考えられる。

使用基板	基板 ID	MLR#2 4×4
	上部 Al 配線	t50 nm, w20 μm
	下部 Al 配線	t100 nm, w30 $\mu {\rm m}$
TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au: 40/80 nm
	逆スパ前準備室真空度	$1.7 \mathrm{x} 10^{-5}$ Pa
	逆スパッタ条件	$100 \le 1 \min$
	成膜室真空度	$2.03 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Ti プレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	428 V
	Au プレスパッタ	1 min
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.151 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	$525 \mathrm{V}$
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM302 50 ml
	NH ₄ H ₂ PO ₄ 添加量	11.5 g (2 mol/l)
	エッチャント温度	40 °C
	エッチング時間	150 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	エッチング時間	3 hr

表 5.5: TMU245 の製作条件。

次に加工した素子の超伝導転移試験 (*R – T* 測定) を行った。測定装置や方法は 4.7 節に述べた通りで ある。測定結果であるが、TES が転移することはなかった。希釈冷凍機により 65 mK まで冷却したも のの、超伝導状態には至らなかった。加工時にできた TES 上の突起物が影響して、TES 膜質が転移へ 影響したのではないかと考えた。

そこで、TES 加工のプロセスを見直し、再度 TES 加工をおこなった。



図 5.18: (a) Au エッチング後のピクセル部分。(b) Ti エッチング後。(c) レジスト除去後。

5.4.2 TMU249素子

TMU245の加工結果より、Tiエッチングによるレジストの付着を防ぐため、レジストを除去するタイ ミングを変更した。これまではTiエッチングの後に保護膜として使用していたレジストを除去していた が、ここではTiエッチング前にレジストを除去した。レジストがなくとも、Auが保護膜の代わりにな るので加工には問題がないと判断した。

表 5.6 に TMU249 の製作条件を示す。使用した基板は積層配線 MLR#1 の 16 ピクセル用基板である。 図 5.19 はエッチング前の様子と Au エッチング後の基板の様子である。TMU245 と同様、Au エッチン グ後にレジスト部分に皺などの変質がみられた。また、配線部分の一部に黒く析出物がみられた。これ はリン酸二水素カリウム (KH₂PO₄) が析出しているものと推測される (式 5.8)。

$$\mathrm{NH}_{4}\mathrm{H}_{2}\mathrm{PO}_{4} + \mathrm{KI} \to \mathrm{KH}_{2}\mathrm{PO}_{4} + \mathrm{NH}_{4}\mathrm{I}$$

$$(5.8)$$

図 5.20 はレジスト除、さらに最後の工程として Ti エッチングをした後の様子である。エッチングと レジストを除去する工程を変更したことで、TMU245 で見られた TES 膜上のレジストの残骸はなくな り綺麗に加工することができた。

使用基板	基板 ID	MLR#1 4×4
	上部 Al 配線	t100 nm, w20 $\mu {\rm m}$
	下部 Al 配線	t100 nm, w30 $\mu {\rm m}$
TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=40/80 nm
	逆スパ前準備室真空度	$3.2 \mathrm{x} 10^{-5}$ Pa
	逆スパッタ条件	$100 \ \mathrm{W} \ 1 \ \mathrm{min}$
	成膜室真空度	$2.06 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Ti プレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.153 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	$427 \mathrm{V}$
	Au プレスパッタ	$1 \min$
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	$525 \mathrm{V}$
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM302 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	14.5 g (2.5 mol/l)
	エッチャント温度	40 °C
	エッチング時間	150 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	エッチング時間	3 hr

表 5.6: TMU249 の製作条件。

次に、TESの超伝導転移試験をおこない、転移状況を確認した。表 5.7 に測定で得られたパラメタをま とめた。16 ピクセル中2 ピクセルを測定した。図 5.21 は ID:0304 で得られた転移カーブである。ID:0101 は超伝導状態への転移が確認できなかった。ID:0304 の結果より、110 mK で転移が確認されたが、常 伝導時の抵抗値が 8 Ω と大きく、また残留抵抗も \geq 50 m Ω と大きかった。理論値では TES 膜の大きさ と厚さから常伝導時の抵抗値が 340 mK であるが、測定値はオーダーで大きくなっている。また、臨界 電流の測定もおこなった。超伝導体は一般的に、ある一定値以上の電流が流れると内部に生じる磁場の 影響で常伝導状態が破られ、常伝導に転移するという性質を有する。この時の値を臨界電流 I_c と称し、



図 5.19: (a) エッチング前のピクセル部分。(b) Au エッチング後。



図 5.20: (c) レジスト除去後。(d) Ti エッチング後。

TES の温度 T と外部磁場 B に依存する物理量である。測定は熱浴温度 T_{bath} を転移温度 T_c より低く保 ち、TES を超伝導状態に留める。ここから電流を徐々に大きく流し、常伝導へと転じて急激に抵抗変化 した値を臨界電流としている。表 5.8 は ID:0304 の臨界電流測定で得られた結果である。測定結果より 6 μ A で超伝導状態が破れてしまっており、臨界電流が小さい。これより磁場に対する耐性が非常に弱い ことが判明した。要求値として \geq 100 μ A であり、少なくとも \geq 30 μ A は欲しい。

以上の結果より、積層配線上に TES と配線間などに問題があると考え、配線と TES 間を詳細に調べた。

配線 ID	$Tc \; [mK]$	R @常温 $[\Omega]$	$R@1.2 \text{ K} [\Omega]$	$R@0.4 \text{ K}[\Omega]$	転移後の R@50 mK [Ω]
0304	110	134	10	8	5×10^{-2}
0101	-	171	13	7	2

表 5.7: 1 μA 定電流バイアスから得られた R – T 測定結果。



図 5.21: 得られた *R* – *T* カーブ。横軸: 温度 *T* (K) 縦軸: 抵抗値 *R* (mΩ)。左図は縦軸が対数表示となっている。

表 5.8: 50 mK 時での ID:0304 の臨界電流測定結果。

バイアス電流 [µA]	1	6	10	100
抵抗值 $[m\Omega]$	5	$5{ imes}10^3$	$8{ imes}10^3$	$11{\times}10^3$

5.4.3 TES 膜と配線間の断面観察

積層配線上の TES 加工の結果 (TMU245、TMU249) からいくつか問題があることがわかった。常伝 導時の抵抗が大きすぎることや残留抵抗が 50 mΩ と大きいこと、臨界電流が小さいことである。これら の問題と膜構造との相関を調べるため、SEM/FIB 複合機を用いた断面観察と STEM-EDS 分析を実施

した。

各装置の目的を以下にまとめる。

- SEM/FIB 複合機 (XVision300): 広い視野 (ミクロレベル)の Au/Ti と *SiO*₂ 間、または Au と Ti 間の膜剥がれの有無
- STEM-EDS (JEM-2010F-EDS): Au/Ti と Al 接触部の詳細なデバイス構造と Al 膜上の *AlO_x* 膜 の有無確認



図 5.22: TES 膜の断面 SEM 像。

図 5.22 は TES 膜と Al 配線のコンタクト部の断面 SEM 写真である。TES 膜と Al コンタクト部を除 き、Au と Ti は均一な膜厚となっていることがわかる。また Al 膜よりも Ti 膜厚が薄いため、Ti は段 切れ状態となっている。一方、Au が Ti の段切れ部をカバーしている様子も見られた。TES 膜と Al 間、 また Au と Ti 間の膜剥がれは観察されなかったが、Au 表面の一部には Au が薄くなっており、これが2 段転移や転移幅を広くさせる原因となっている可能性がある。

また図 5.23 は Ti/Au と Al 境界部の STEM-EDS 像である。Ti の段切れ状態が明瞭に確認された。また Al 表面上には数 nm の自然酸化膜があった。マップ像をみると Au の領域で色がついていますが、こ



図 5.23: TES と Al 配線境界部の STEM-EDS 像。

れは Au-Mz 線が Si-K 線と近いため、Si-K 線の ROI (Region of Interesting) 設定内に Au-Mz 線が含ま れたことが原因と考えられる。

以上の結果から、大きく2つの問題があることがわかった。1つ目は「TES 膜の段切れ状態」、2つ目 は「TES 膜と配線間の自然酸化膜の存在」である。これらが TES の転移状態の悪化に直接つながって いると考えられる。

そこで、まず1つ目の問題に着目し新たに TES 加工をおこなった。

5.4.4 TMU251素子

TES 膜の段切れ問題は、上部の Al 配線の膜厚よりも TES (特に Ti) の膜厚が薄いことが原因である。 そこで上部配線の厚さ 50 nm に対して Ti の厚さを厚くし、加工することにした (TMU251 素子)。

下記に新たに追加製作した積層配線基板のロットをまとめる (表 5.9)。TMU251の製作条件を表 5.10 に示す。TMU251 では TES の膜厚は変えずに上部配線が薄い基板を使用した。

表 5.9: 追加製作した積層配線の種類。

No.	上部配線	下部配線
MLR#5	Al (t 30 nm)	Al (t 100 nm)
MLR#6	Al (t 50 nm)	Al (t 100 nm)

使用した基板は積層配線 MLR#1の16 ピクセル用基板である。図5.24、図5.25 は製作した TMU251 素子である。上部配線の厚さが Ti の膜厚 40 nm よりも薄い 30 nm のものを使用し加工した。加工によ る腐食等は見られなかった。そこで超伝導転移試験をおこなった。測定したピクセルは 16 ピクセル中 1 ピクセルである。図 5.26 は ID:0204 で得られた転移カーブである。ID:0204 の結果より、210 mK と転

表 5.10: TMU251 の製作条件。

使用基板	基板 ID	MLR#5 4×4
	上部 Al 配線	t 30 nm, w 20 $\mu \rm m$
	下部 Al 配線	t100 nm, w30 $\mu {\rm m}$
TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=40/80 nm
	逆スパ前準備室真空度	$1.5 \mathrm{x} 10^{-5}$ Pa
	逆スパッタ条件	$100 \le 1 \min$
	成膜室真空度	$4.26 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Ti プレスパッタ	$5 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.151 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	$426 \mathrm{V}$
	Au プレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.151 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	$526 \mathrm{V}$
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM101 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	17.25 g (3 mol/l)
	エッチャント温度	40 °C
	エッチング時間	$50 \mathrm{s}$
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	エッチング時間	3 hr



図 5.24: (a) TMU251 のエッチング前のピクセル部分。(b) Au エッチング後。



図 5.25: (c) レジスト除去後。(d) Ti エッチング後。

移温度が狙い (~150 mK) より高かった。また今回も転移が確認された常伝導時の抵抗値が9 Ω と大き く、また残留抵抗も \geq 160 m Ω と大きかった。理論値では TES 膜の大きさと厚さから常伝導時の抵抗値 が 340 mK であるが、測定値はオーダーで大きくなっている。また、臨界電流の測定もおこなった。表 5.12 は ID:0204 の臨界電流測定で得られた結果である。TMU249 と同じく、測定結果より 6 μ A で超伝 導状態が破れてしまっており、臨界電流が小さかった。

これらの結果より、Tiの厚さより上部配線の厚さを10 nm 薄くしたが、転移の問題が解決されていな かったと考えられる。そこで、2つ目の問題である「TES 膜と配線間の自然酸化膜」の除去に焦点を当 て、条件出しをおこなった。



表 5.11: 1 μA 定電流バイアスから得られた R – T 測定結果。

図 5.26: 得られた R - T カーブ。横軸: 温度 T (K) 縦軸: 抵抗値 R (m Ω)。左図は縦軸が対数表示となっている。

表	5.12:	48	mΚ	時て	う の	ID	:0204	0))臨界	電流測	」定結果。

バイアス電流 [µA]	1	6	10	100
抵抗值 [mΩ]	1	$3{\times}10^3$	$9{ imes}10^3$	$17{ imes}10^3$

5.5 逆スパッタによる自然酸化膜除去の条件出し

TES 膜と上部 Al 配線との間に自然酸化膜が生成されていることは、断面観察から明らかになった (図 5.23)。これはプロセスの工程で Al 配線を始めに製作するので、Al が酸化してしまい、その上から TES を成膜することにより起こってしまう現象である。そこで、この Al 配線上の酸化膜を TES を成膜する 前に逆スパッタにより取り除くことにした。

逆スパッタとは基板に TES をスパッタする際、あらかじめ基板についたゴミを取り除くために行う作 業である。通常のスパッタは Ar プラズマを Ti や Au などのターゲットに衝突させ原子をはじき飛ばし ているが、逆スパッタはその名の通り Ar プラズマを基板に衝突させてゴミを取り除いている。従来こ の逆スパッタを 100 W、1 分の強さでかけてきた。今回はこの逆スパッタの条件を最適化することによ り、Al 上の自然酸化膜を十分に取り除くことを試みた。図 5.27 に条件出しをした全基板の写真をまと めた。積層配線基板を用いては 2 回条件出しをした。また Al のベタ膜基板では 5 回条件出しをおこな い、触針式表面形状測定器 (DEKTAK) を使って表面の様子を調べ、総合的にベストな逆スパッタの条 件を出した。

	150₩ , <u>15min</u>	I 50₩ , <u>20min</u>			
積層基板					
	I 50₩ , <u>5min</u>	I 50₩ , <u>8min</u>	150₩ , <u>9min</u>	150₩ , <u>10min</u>	150₩ , <u>15min</u>
A ^ベ タ 膜基 板					

*上部AI配線 & AIベタ膜はt 50 nm

図 5.27: 条件出しした全基板。

5.5.1 積層配線基板を用いた逆スパッタ条件出し

まず逆スパッタによってどのくらい Al が削られるのかを調べた。使用した基板は MLR#6 (上部/下 部: t50/t100 nm) の 16 ピクセル用の導通基板である。逆スパッタパワーを 150 W と従来の 100 W よ り高め、逆スパッタ時間を変化させながら Al の削れ具合を調べた。積層基板を使用した条件出しでは、 15 分、20 分と時間を変えた。以下にそれぞれの条件出しの結果をまとめる。

150 W,15 min の結果と考察

図 5.28 は 150 W で 15 分間逆スパッタした基板の結果である。(a) は逆スパッタする前の 1 ピク セル全体の膜厚、(b) は逆スパッタ後の膜厚である。(a) と (b) を比べると、逆スパッタにより上 部配線部分の厚さが 50 nm から 120 nm に増加している。これは、上部配線の真下にある絶縁膜 SiO₂ 以外の部分が削れていることの証拠である。この 120 nm というのは SiO₂ の 100 nm と上部 配線の 20 nm の合計だと考えられる。つまり、削られたエリアは SiO₂100 nm と上部配線 30 nm (本来の膜厚 50 nm - 残った膜厚 20 nm) である。ここから Al と SiO₂ のエッチングレートが見積 もれる。以下にそれぞれのエッチングレートとエッチング選択比を示す。

表 5.13: 逆スパッタによる Al と SiO2 のエッチングレート

Al エッチングレート	1.4 nm/min
SiO ₂ エッチングレート	7.0 nm/min
AlとSiO ₂ のエッチング選択比	1:5

これらの結果から、大まかな酸化膜のレート (7 nm/min) は見積もれたが、上部の Al 配線の 50 nm 分の厚さが完全に削られる状態まで逆スパッタをかけ、より正確な Al のエッチングレート出 すことにした。そこで、さらに逆スパッタ時間を 20 分と長くし膜厚を評価した。

150 W,20 min の結果と考察

図 5.29 は 150 W で 30 分間逆スパッタした基板の結果である。(a) は逆スパッタする前の 1 ピクセ ル全体の膜厚、(b) は逆スパッタ後の膜厚である。(a) と (b) を比べると、逆スパッタにより上部 配線部分の厚さが 50 nm から 200 nm に増加している。Al の上部配線は完全に削られたが、Al 膜、 酸化膜、窒化膜と多層膜になっているため、200 nm の内訳を詳細に分類することが困難であった。 推測すると 200 nm 中、絶縁膜 SiO₂ が 100nm、下部 Al 配線が ~70 nm、その他が 30 nm である。 下部配線の 70 nm は 150 W、15min の条件出しより見積もった Al のエッチングレートから推測 した値である。1.4 nm/min から 20 分間逆スパッタすると、約 30 nm の Al が削られる。よって 残った下部 Al 配線の膜厚は 70 nm と考えた。しかし、どうしても 30 nm 分がどの膜のものなの かがわからなかった。よって、積層配線基板を用いると膜が多く重なっているため、より正確な Al のエッチングレートがわからないことが判明した。

そこで、次に膜厚 50 nm の Al を成膜したベタ膜基板を使用し、Al の逆スパッタにおけるエッチ ングレートを調べた。

5.5.2 Al ベタ膜基板を用いた逆スパッタ条件出し

使用した基板はベア Si の上に膜厚 50 nm の Al が全面に成膜されているベタ膜基板を使用した。この 基板であると Al 膜しか成膜されていないので、正確な Al の逆スパッタエッチングレートが測定できる。 逆スパッタパワーを 150 W とし、逆スパッタ時間を 5 分、8 分、9 分、10 分、15 分と変化させ Al 膜の 状態を観察した。

図 5.30 は 8 分後と 9 分後の逆スパッタした基板の結果である。(a) の逆スパッタ時間が 8 分では、Al 膜に大きく亀裂がはいり、パーツごとに Al が剥離している様子がわかる。(b) の 9 分後には完全に Al が消失している。ここから、Al 膜の逆スパッタエッチングレートがわかるが、エッチング時間によって エッチングレートが異なる。さらに言うと積層配線の Al 膜とのエッチングレートと大幅に異なる結果と なった。

積層配線基板とベタ膜基板を用いた逆スパッタの条件出し結果を図 5.14 にまとめる。これより、積層 配線基板と Al ベタ膜基板での Al の剥がれ方の違いから、逆スパッタによるエッチングレートが大幅に



図 5.28: 150W、15min の条件出し結果。(a) 積層配線の逆スパッタ前の膜厚。(b) 逆スパッタ 後の膜厚。



図 5.29: 150W、20min の条件出し結果。(a) 積層配線の逆スパッタ前の膜厚。(b) 逆スパッタ 後の膜厚。


図 5.30: 逆スパッタ後のベタ膜基板。(a) 150 W、8min 後の基板と膜厚測定結果。(b) 150 W、9min 後。

異なることがわかった。つまり、Al ベタ膜基板によって出た条件をそのまま積層配線基板に当てはめる ことはできない。以上の結果から、積層配線を用いた場合に出たエッチングレートが最も確からしいと 考えた。この酸化膜のレート (7 nm/min) から Al 配線上の自然酸化膜が十分に除去できるようにと、最 終的に逆スパッタの条件を「150 W、3 分間」と決め TES の加工を試した。

表 5.14: 積層配線基板とベタ膜基板を用いた逆スパッタの条件出し結果のまとめ。

積層配線基板	逆スパッタ時間	$15 \min$
	エッチングされた Al の膜厚	20 nm
	Al 膜のエッチングレート	1.4 nm/min
Alベタ膜基板	逆スパッタ時間	8 min
	エッチングされた Al の膜厚	30 nm
	Al 膜のエッチングレート	3.8 nm/min
Alベタ膜基板	逆スパッタ時間	9 min
	エッチングされた Al の膜厚	50 nm
	Al 膜のエッチングレート	5.6 nm/min

5.5.3 TMU259素子

逆スパッタ条件出し後に製作したものである。表 5.15 に TMU259 の製作条件を示す。

使用した基板は積層配線 MLR#6の16ピクセル用基板である。このTES加工でプロセス上で変更した点は2点である。

• 逆スパッタの条件の変更。

条件出しより100 W、1分間から150W、3分間に変更した。

• TES 膜厚の変更。

上部配線の厚さ 50 nm に対して 1.5 倍になるように Ti を 70 nm、Au を 140 nm 成膜した。

図 5.31 はエッチング前の様子と Au エッチング後の基板の様子である。図 5.32 はレジスト除、さらに 最後の工程として Ti エッチングをした後の様子である。加工は腐食等も見られず、問題なく綺麗にで きた。

次に超伝導転移試験をおこなった。測定したピクセルは 16 ピクセル中 2 ピクセルである。図 5.33 は 得られた転移カーブである。2 ピクセルとも転移はしたものの、転移幅が 70 mK と広くダラダラとした 転移カーブとなっている。また今回も転移が確認された常伝導時の抵抗値が 2.5 - 3.5 Ω と大きく、改善 が見られなかった。しかし、残留抵抗は前回までは ≥160 mΩ と大きかったが、今回は ~ 4 mΩ と軽減 された。これは逆スパッタの条件を変え、TES 膜と Al 配線の間に存在した自然酸化膜を除去できたこ とによる成果である。

また、臨界電流の測定もおこなった。表 5.17 は 2 ピクセルの臨界電流測定で得られた結果である。測 定結果より 10 μA で超伝導状態が破れてしまっており、臨界電流の改善には至らなかった。

結果をまとめると、逆スパッタの条件を変え自然酸化膜を除去したことにより、残留抵抗を小さくすることができた。しかし常伝導時の抵抗値が大きいことや、臨界電流が低いことが未だに解決できていない。

そこで、積層配線ではなく、従来と同じ形の配線 (単層配線と名付ける) を用いて、TES 膜厚の最適 化をおこなった。

使用基板	基板 ID	MLR#6 4×4
	上部 Al 配線	t50 nm, w20 $\mu {\rm m}$
	下部 Al 配線	t100 nm, w30 $\mu {\rm m}$
TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=70/140 nm
	逆スパ前準備室真空度	$5.8 \text{x} 10^{-5} \text{Pa}$
	逆スパッタ条件	$150~{\rm W}$ 3 min
	成膜室真空度	$2.25 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Ti プレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.153 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	$425 \mathrm{V}$
	Au プレスパッタ	1min
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	$523 \mathrm{V}$
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM101 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	17.25 g (3 mol/l)
	エッチャント温度	35 °C
	エッチング時間	110 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	エッチング時間	3 hr

表 5.15: TMU259 の製作条件。

表 5.16: 1 μA 定電流バイアスから得られた R – T 測定結果。

配線 ID	Tc [mK]		R@4 K [O]	$R \otimes 1 K[\Omega]$	 転移後の B@60 mK [0]
		10⊗ttamr [26]			
0103	175	235	71	3	2×10^{-3}
0404	175	271	81	2	4×10^{-3}

表 5.17:60 mK 時での ID:0103、ID:0404 の臨界電流測定結果。

バイアス電流 [µA]	1	3	10	30	100
ID:0103 の抵抗値 [mΩ]	2	2	3×10^{3}	4×10^{3}	3×10^{3}
ID:0404 の抵抗値 [mΩ]	4	4	$2{\times}10^3$	$3{\times}10^3$	$2{\times}10^3$



図 5.31: (a) TMU259 のエッチング前のピクセル部分。(b) Au エッチング後。



図 5.32: (c) レジスト除去後。(d) Ti エッチング後。



図 5.33: 得られた R - T カーブ。横軸: 温度 T (K) 縦軸: 抵抗値 R (m Ω)。左図は縦軸が対数表示となっている。

5.6 成膜厚増による段切れ改善の条件出し

逆スパッタによる条件出しより、TES 膜と配線間の自然酸化膜が除去された。しかし超伝導転移状況 を確認すると、常伝導時の抵抗値がオーダーで大きく、臨界電流も小さいのですぐに超伝導状態が破れ てしまう。そこで単層配線 (従来と同じ形の配線)を用いて、TES 膜厚の最適化をおこなった。

5.6.1 単層配線を用いて TES 加工した素子

図 5.34 は単層配線上の TES を加工した素子である。Si 上に厚さ 50 nm の Al 膜が一面に成膜されて いる Al ベタ膜基板を使用した。始めに Al 配線を形成し、その後 TES をスパッタにより成膜、加工し た。条件出しには TMU261-264 の 4 基板を使用した。加工方法は全て同じであるが、TES の膜厚パラ メータを変更し超伝導転移状況を確認した。表 5.18 は 4 基板に成膜した TES 膜厚の一覧である。また、 4 基板それぞれの製作条件も以下に示す。



図 5.34: TES 加工を施した単層配線基板 (TMU261)。

ID	Ti [nm]	Au [nm]
TMU261	100	150
TMU262	70	140
TMU263	90	180
TMU264	100	200

表 5.18: 条件出しに使用した基板の TES 膜厚。

TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=100/150 nm
	逆スパ前準備室真空度	$2.4 \mathrm{x} 10^{-5}$ Pa
	逆スパッタ条件	$150 \le 3 \min$
	成膜室真空度	$3.23 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Tiプレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.151 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	424 V
	Au プレスパッタ	1 min
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.151 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	$524 \mathrm{V}$
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM101 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	17.25 g (3 mol/l)
	エッチャント温度	35 °C
	エッチング時間	80 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	エッチング時間	3 hr

表 5.19: TMU261 の製作条件。

表 5.20: TMU262 の製作条件。

TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=70/140 nm
	逆スパ前準備室真空度	$3.2 \mathrm{x} 10^{-5}$ Pa
	逆スパッタ条件	$150~{\rm W}$ 3 min
	成膜室真空度	$7.58 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Tiプレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	$424 \mathrm{V}$
	Au プレスパッタ	1 min
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.151 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	$523 \mathrm{V}$
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM101 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	17.25 g (3 mol/l)
	エッチャント温度	35 °C
	プロセス時間	80 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	プロセス時間	3 hr

TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=90/180 nm
	逆スパ前準備室真空度	$50 \mathrm{x} 10^{-6}$ Pa
	逆スパッタ条件	$150 \le 3 \min$
	成膜室真空度	$2.48 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Tiプレスパッタ	$5 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	423 V
	Au プレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	$524 \mathrm{V}$
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM101 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	17.25 g (3 mol/l)
	エッチャント温度	35 °C
	プロセス時間	110 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	プロセス時間	3 hr

表 5.21: TMU263 の製作条件。

表	5.22:	TMU264	の製作条件
1	0.22.	1110201	·/ 12 /

TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=100/200 nm
	逆スパ前準備室真空度	$1.2 \mathrm{x} 10^{-5}$ Pa
	逆スパッタ条件	$150 \le 3 \min$
	成膜室真空度	$0.83 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Ti プレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.153 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	$423 \mathrm{V}$
	Au プレスパッタ	1 min
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.153 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	523 V
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM101 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	17.25 g (3 mol/l)
	エッチャント温度	35 °C
	プロセス時間	120 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	プロセス時間	3hr

5.6.2 TMU261-264の超伝導転移試験

• TMU261の*R*-T結果

測定したピクセルは16ピクセル中1ピクセルである。希釈冷凍機で114 mK まで冷却したが、転移を確認することができなかった。

• TMU262の*R*-T結果

こちらも測定したピクセルは 16 ピクセル中 1 ピクセルである。図 5.35 は得られた転移カーブであ る。結果は 146 mK で非常にシャープな転移を示した。残留抵抗は 3 mΩ と低く、常伝導時の抵抗 値も 400 mΩ と改善がみられた。また、臨界電流の測定もおこなった。表 5.24 は臨界電流測定で 得られた結果である。測定結果より 30 μ A で超伝導状態が破れてしまっており、積層配線を用い た TMU259 より少しは改善したが、TES カロリメータとしてはまだ十分ではない。要求値は 100 μ A 以上が望ましく、少なくとも 30 μ A 以上は欲しいところである。

表 5.23: 1 μA 定電流バイアスから得られた TMU262 の R – T 測定結果。



図 5.35: 得られた TMU262 の *R* – *T* カーブ。横軸: 温度 *T* (K) 縦軸: 抵抗値 *R* (mΩ)。左図は縦軸が対 数表示となっている。

- TMU263の R T 結果
 ピクセルは 16 ピクセル中、1 ピクセルを測定した。しかし、55 mK まで冷却しても転移は確認できなかった。
- TMU264の*R*-T結果

表 5.24: 110 mK 時での TMU262 の臨界電流測定結果。

バイアス電流 [µA]	1	3	10	30
ID:0403 の抵抗値 [mΩ]	3	2	4	370

こちらも 16 ピクセル中、1 ピクセルの R - T 測定を行った。図 5.36 は得られた転移カーブである。240 mK と少し高い転移温度であったが、転移状態はシャープな転移が見られた。残留抵抗は 1 mΩ と低く、常伝導時の抵抗値も 130 mΩ と良好であった。また、表 5.26 は臨界電流測定で得られた結果である。臨界電流は 30 μ A 以上であり、TMU263 と比べて改善することができ、TES カロリメータとして動作させる素子の条件は満たす事ができた。

表 5.25: 1 μA 定電流バイアスから得られた TMU264 の R – T 測定結果。

配線 ID	$Tc \; [mK]$	R @常温 $[\Omega]$	$R@4~{ m K}~[\Omega]$	$R@1.2 \text{ K}[\Omega]$	転移後の R@100 mK [Ω]
0102	240	115	37	1×10^{-1}	1×10^{-3}



図 5.36: 得られた TMU264 の *R* – *T* カーブ。横軸: 温度 *T* (K) 縦軸: 抵抗値 *R* (mΩ)。左図は縦軸が対 数表示となっている。

以上の結果をまとめる。単層配線を用いた TES 膜厚の条件出しから、Ti/Au=100/200 nm が最適値 である。上部配線の膜厚 50 nm と逆スパッタによって削れる酸化膜 20 nm の合計膜厚は 70 nm である。 この 70 nm よりも Ti が約 1.5 倍の 100 nm になっているので、被覆性も十分であると考えられる。 単層配線で出した最適条件を積層配線に適用し、再び積層配線上の TES の転移状態を確認した。

表 5.26: 100 mK 時での TMU264 の臨界電流測定結果。

バイアス電流 [µA]	1	3	10	30	100	300
ID:0102 の抵抗値 [mΩ]	1	1	1	1	30	100

5.6.3 TMU276素子 (積層配線)

自然酸化膜除去 (逆スパッタの強化)、TES 膜の被覆性の改善 (TES 膜厚の増加) を経た条件を積層配線 に適応させ TES 加工をおこなった。ここで、さらに積層配線基板を追加製作し配線基板のストックを増 やした。上部配線は 50 nm、下部は 100 nm である。下記に新たに追加製作した積層配線基板 (MLR#7、 MLR#8) を含めた全積層配線基板のロットをまとめる (表 5.27)。また、 表 5.28 に TMU276 の製作条 件を示す。

表 5.27: これまでに製作した全ての積層配線基板。

No.	上部配線	下部配線
MLR#1	Al (t 100 nm)	Al (t 100 nm)
$\mathrm{MLR}\#2$	Al (t 50 nm)	Al (t 100 nm)
$\mathrm{MLR}\#3$	Nb (t 50 nm)	Al (t 100 nm)
MLR#4	Nb (t 100 nm)	Al (t 100 nm)
$\mathrm{MLR}\#5$	Al (t 30 nm)	Al (t 100 nm)
$\mathrm{MLR}\#6$	Al (t 50 nm)	Al (t 100 nm)
$\mathrm{MLR}\#7$	Al (t 50 nm)	Al (t 100 nm)
$\mathrm{MLR}\#8$	Al (t 50 nm)	Al (t 100 nm)

使用した基板は積層配線 MLR#7 の 16 ピクセル用基板である。図 5.37、 図 5.38 は製作した TMU276 素子である。加工による腐食等は見られなかった。しかし、常温で抵抗値を確認したところ、16 ピクセ ル中 15 ピクセルが MΩ と大きい、または非導通であることがわかった。

そこで、マイクロプローバーを用いて TMU276 の TES や配線部分をさらに詳細に抵抗測定し、どの 箇所で非導通になるのかを調べた。

5.6.4 TMU276 素子の導通チェック

TES 加工後の常温での抵抗チェックより、ほとんど導通していないことがわかった。そこで、全16 ピ クセルに対して、1 ピクセルにつき5カ所 (7回)抵抗測定を行い、どの箇所で非導通になってしまったの かを調査した。図 5.39 に測定した箇所を示す。始めに①の通常と同じように上部配線と下部配線の pad に針を当て、全体の導通チェックをおこなった。その後、上部 pad と TES 間の抵抗 (2)を確認し、下 部 pad と TES 間 (3)、上部 pad と TES 側のコンタクトホール (④)、下部 pad と TES 側のコンタクト ホール (⑤、⑥) と次々場所を変更して測定をおこなった。そして、最後にもう一度上部配線と下部配線 の pad に針を当て、全体の導通チェックをおこなった (⑦)。

図 5.41 に測定結果を示す。また図 5.42 は触針前後のコンタクトホールの写真である。結果をみると、 最初に上部配線と下部配線の pad 間を測定した際には 16 ピクセル中 8 ピクセルが非導通、残り 8 ピク セルが MΩ であった。しかし上部または下部 pad と TES 間では問題なく導通しており、pad と TES 側 コンタクトホール間では歩留まりが半々であった。非導通の原因はコンタクトホールにあるのではない かと考え、TES 側のコンタクトホールだけでなく、pad 側のコンタクトホールをプローバーの針で触っ た。最終的に上部配線と下部配線の pad 間で測定すると、16 ピクセル中 13 ピクセルが正常な抵抗値を

表 5.28: TMU276 の製作条件。

使用基板	基板 ID	MLR#7 4×4
	上部 Al 配線	t50 nm, w20 $\mu {\rm m}$
	下部 Al 配線	t100 nm, w30 $\mu{\rm m}$
TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=100/200 nm
	逆スパ前準備室真空度	$1.6 \text{x} 10^{-5} \text{Pa}$
	逆スパッタ条件	$150~{\rm W}$ 3 min
	成膜室真空度	$7.70 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Ti プレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	416 V
	Au プレスパッタ	1min
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	527 V
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM101 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	17.25 g (3 mol/l)
	エッチャント温度	35 °C
	エッチング時間	130 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	エッチング時間	3 hr



図 5.37: (a) TMU274 のエッチング前のピクセル部分。(b) Au エッチング後。



図 5.38: (c) レジスト除去後。(d) Ti エッチング後。



図 5.39:1ピクセルに対して常温で抵抗を測定した箇所。

示した。測定初めでは歩留まり0%であったが、TES 側と pad 側のコンタクトホールを触針することに より歩留まりが80%以上に改善された。コンタクトホール部分の被覆性が悪く、コンタクト部分を針で 押さえることで導通したものと思われる。

そこで、コンタクトホール部を SEM を用いて詳細に調べた。

5.6.5 SEM によるコンタクトホール部の観察

積層配線上に TES を加工後はほとんど導通していなかったが、コンタクトホール部分をプローバー の針で押さえることにより正常に抵抗を示すようになった。これは、コンタクトホール部分の接触が悪 い、つまり被覆性が低いことが原因であると推測した。そこで、SEM を使用して TMU276 のコンタク トホールを観察した。図 5.43 は TMU276 のコンタクトホール部の SEM 写真である。本来ならば、コン タクトホールを補強する役目の Nb 膜が接触しているはずだが SEM 像をみると完全に段切れしている。 そのため下部配線と上部配線の導通が切れたことがわかった。TES 加工前では問題がなかったのだが、 エッチングよって構造的に弱いコンタクト部分にダメージがかかってしまったと考えられる。しかしプ ローバーの針を押し当てたことにより、めくれた Nb がコンタクト部の段切れ部分を埋め、抵抗が回復 したと推測した。

抵抗が回復したので、TMU276の超伝導転移試験に進んだ。

5.6.6 TMU276素子の超伝導転移試験

TMU276 素子の超伝導転移試験をおこなった。測定したピクセルは 16 ピクセル中 3 ピクセルである。 図 5.44 は得られた転移カーブである。3 ピクセル中 2 ピクセルは転移が確認できなかった。また、転移 した 1 ピクセルにおいても転移はしたものの、転移後 100 mK 付近で突如として 100 mΩ 程度に抵抗が

小田	192	生甲
ጉሥ		阳木

pad ID	① 上+下pad	② 上pad+TES	③ 下pad+TES	④ 上pad+con	⑤ ⊤pad+con	⑥ ☆後の⑤	⑦ 再度①
ID 0201	40 MΩ	175 Ω	40 MΩ	74 Ω	58 Ω	-	58 Ω
ID 0302	∞	173 Ω	8	283 Ω	187 Ω	-	26Ι Ω
ID 0301	∞	185 Ω	8	22ΙΩ	∞	9IΩ	234 Ω
ID 0401	∞	210 Ω	8	220 Ω	∞	7 ΜΩ	8 MΩ
ID 0304	6 MΩ	218 Ω	6 MΩ	324 Ω	5 ΜΩ	329 Ω	3II Ω
ID 0203	40 MΩ	214 Ω	38 MΩ	42 Ω	30 MΩ	294 Ω	234 Ω
ID 0204	I8 MΩ	445 Ω	17 MΩ	315 Ω	44 MΩ	564 Ω	35IΩ
ID 0104	∞	390 Ω	8	312 Ω	20 MΩ	64 Ω	343 Ω

図 5.40: 1/2 配線の常温での抵抗測定結果。

*測定結果							
pad ID	① 上+下pad	② 上pad+TES	③ 下pad+TES	④ 上pad+con	⑤ 下pad+con	⑥ ☆後の⑤	⑦ 再度①
ID 0103	12 ΜΩ	-	_	_	_	12 ΜΩ	406 Ω
ID 0202	ιι ΜΩ	_	_	_	_	372 Ω	370 Ω
ID 0102	9 MΩ	_	_	_	_	9 MΩ	872 kΩ
ID 0101	∞	-	_	_	_	20 MΩ	386 Ω
ID 0402	∞	_	_	_	_	8	∞
ID 0303	20 MΩ	_	_	_	_	342 Ω	345 Ω
ID 0403	∞	_	_	_	_	9 MΩ	336 Ω
ID 0404	∞	—	_	_	_	∞	418 Ω

図 5.41: 1/2 配線の常温での抵抗測定結果。



図 5.42: (a) プローバーで接触前のコンタクトホール。(b) 接触後の (a)。



図 5.43: TMU276 のコンタクトホールの SEM 像。

上がるなど問題が見られた。単層配線では改善が見られた常伝導時の抵抗値の問題も、積層配線では4.5 Ωと大きく、改善が見られなかった。

また、臨界電流の測定もおこなった。表 5.30 は転移した ID:0103 ピクセルの臨界電流測定で得られ た結果である。測定結果より 10 μA で超伝導状態が破れてしまっており、臨界電流の改善には至らな かった。



図 5.44: 得られた ID:0103 の *R* – *T* カーブ。横軸: 温度 *T* (K) 縦軸: 抵抗値 *R* (mΩ)。左図は縦軸が対 数表示となっている。

結果をまとめると、単層配線で出したプロセス条件をもとに積層配線上に TES 膜を加工したが、加工 後の導通チェックより、歩留まりが低いことがわかった。原因はコンタクトホール部分に被覆性が悪い ことであると考えられる。プローバーの針でコンタクトホールを触り、無理矢理導通させたものの、や はり TES の転移状態は悪かった。

そこで、次にコンタクトホール部分の補強を試みた。

配線 ID	$Tc \; [mK]$	R @常温 $[\Omega]$	$R@4~{ m K}~[\Omega]$	$R@0.6 \text{ K}[\Omega]$	転移後の R@66 mK [Ω]
0103	175	226	65	9	4×10^{-3}
0101	-	345	170	80	11
0303	-	310	92	35	4

表 5.29: 1 μA 定電流バイアスから得られた R – T 測定結果。

表 5.30:66 mK 時での ID:0103 の臨界電流測定結果。

バイアス電流 [μA]	1	3	10	30
ID:0103 の抵抗値 [mΩ]	3	5	9×10^{3}	10×10^{3}

5.7 コンタクトホール部分の強化

SEM の結果から加工プロセスに耐えうるよう、コンタクトホールを補強する必要性が出た。そこで、 コンタクトホール上にも TES が残るようにフォトマスクのデザインを変更した。図 5.45 は TES を補強 する前と後の1ピクセルの模式図である。TES 膜がコンタクトホールに残ることで、数百 nm の厚みの 膜が上から被さり、コンタクト部分の被覆性が高くなる。

このコンタクトホールを補強する方法で、新たに TES を加工し超伝導転移を調べた。



図 5.45: (a) コンタクトホール補強していない TES 加工後の断面図 (左) と上から みた模式図 (右)。(b) コンタクトホール補強後の模式図。

5.7.1 TMU284 素子

TES 膜でコンタクトホールを補強するように TES 加工をおこなった。表 5.31 に TMU284 の製作条件を示す。使用した基板は積層配線 MLR#8 の 16 ピクセル用基板である。図 5.46 は Ti/Au エッチング後の TES 加工後の基板の様子である。光学顕微鏡で確認したところ、アライメントよく TES 膜をコン タクトホール部分に形成することができた。

表 5.31: TMU284 の製作条件。

使用基板	基板ID	MLR#8 4×4
	上部 Al 配線	t50 nm, w20 $\mu {\rm m}$
	下部 Al 配線	t100 nm, w30 $\mu {\rm m}$
TES 成膜	予定膜厚	Ti/Au=100/200 nm
	逆スパ前準備室真空度	$6.9 \text{x} 10^{-5} \text{Pa}$
	逆スパッタ条件	$150 \le 3 \min$
	成膜室真空度	$2.96 \mathrm{x} 10^{-7}$ Pa
	Ti プレスパッタ	$3 \min$
	Ar 圧 (Ti スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Ti スパッタ)	416 V
	Au プレスパッタ	1min
	Ar 圧 (Au スパッタ)	0.152 Pa
	印加電圧 (Au スパッタ)	$529 \mathrm{V}$
TES pixel 加工	Au エッチャント	AURUM101 50 ml
	リン酸二水素アンモニウム添加量	17.25 g (3 mol/l)
	エッチャント温度	35 °C
	エッチング時間	90 s
	Ti エッチャント	H_2O_2
	エッチャント温度	60 °C
	エッチング時間	3 hr

122



図 5.46: TES 加工後の様子。(a) 光学顕微鏡での像。(b) コンタクトホール部分の SEM 像。

配線 ID	Tc [mK]	R@常温 [Ω]	$R@0.5K [\Omega]$	転移後の R@60 mK [Ω]
0201	281	230	2	1×10^{-3}
0303	270	219	5	1×10^{-3}
0203	280	214	4	1×10^{-3}

表 5.32: 1 μA 定電流バイアスから得られた R – T 測定結果。

また、マイクロプローバーで常温での導通チェックをおこなったところ、16 ピクセル中 15 ピクセルが 正常な抵抗値を示していることを確認した。コンタクトホールを補強することで TES 加工の歩留まりを 90%以上に高めることができた。そこで、超伝導転移試験へと進んだ。

5.7.2 TMU284素子の超伝導転移試験

測定したピクセルは 16 ピクセル中 3 ピクセルである。図 5.47、図 5.48、図 5.49 は得られた転移カー ブである。測定した 3 ピクセル全ての転移を確認できた。残留抵抗も ~1 mΩ と低かったさらに、常伝 導時の抵抗値が ~ 数百 mΩ と正常値を示した。しかし、ピクセルごとに常伝導時の抵抗が異なること、 特に ID:0303 ピクセルは 1.2 Ω と大きい。転移カーブもダラダラと 2 段転移ぎみである。これは、A1 配 線が上手く転移していない可能性が考えられる。

また、臨界電流の測定もおこなった。表 5.33 は転移した 3 ピクセルの臨界電流測定で得られた結果で ある。ID:0303 に関しては 30 μA で超伝導状態が破れてしまっているものの、他 2 ピクセルは最低要求 値の 30 μA 以上であり改善が見られた。



図 5.47: 得られた ID:0201 の *R* – *T* カーブ。横軸: 温度 *T* (K) 縦軸: 抵抗値 *R* (mΩ)。左図は縦軸が対 数表示となっている。

結果をまとめると、コンタクトホールを補強したことにより配線の導通がしっかりとれ、問題であった常伝導時の抵抗値問題が解決できた。転移温度が280 mK と高く、今後は転移温度を考慮した TES 膜厚の最適化を進める予定である。



図 5.48: 得られた ID:0303 の *R* – *T* カーブ。横軸: 温度 *T* (K) 縦軸: 抵抗値 *R* (mΩ)。左図は縦軸が対 数表示となっている。



図 5.49: 得られた ID:0203 の *R* – *T* カーブ。横軸: 温度 *T* (K) 縦軸: 抵抗値 *R* (mΩ)。左図は縦軸が対 数表示となっている。

バイアス電流 [µA]	1	3	10	30	100
ID:0201 の抵抗値 [mΩ]	1	1	1	1	over range
ID:0303 の抵抗値 [mΩ]	1	1	2	7×10^3	over range
ID:0203 の抵抗値 [mΩ]	1	0	1	1	over range

表 5.33: 60 mK 時での 3 ピクセルの臨界電流測定結果。

5.8 ドライエッチングによるメンブレンの形成プロセス

TES 加工の製作プロセスの確立ができたので、製作ステップの最後となるメンブレン構造の製作プロ セスの確立をおこなった。メンブレンとは TES カロリメータの熱リンク部分である。

5.8.1 方法

従来のメンブレン構造は第3章で述べた KOH ウェットエッチングでおこなっていた。しかし、ピクセル数が増えるとピクセル間の間隔が狭まるため、裏面の KOH エッチングの際に生じた斜めの結晶面による無駄な領域 が密集化の邪魔になる。そこでメンブレン化のプロセスは DRIE 法を利用し、反応部分における Si 側面の垂直性を保つ高アスペクトエッチングをおこなった。RIE 法では、イオンの物理的なスパッタ効果と、ラジカルの化学的なエッチング効果の相乗効果によって、異方性に優れたドライエッチングを行うことが可能である。エッチングガス SF₆ と Si 基板側面を抑制する保護用 C₄F₈ ポリマーを数秒単位で交互に供給しながら進めている。この様な手法を Bosch プロセスという。ガスの供給周期ごとに scallop と称される段差構造が生じる問題がある。



図 5.50: Bosch プロセスの概略図。

装置は宇宙研のクリーンルーム内にある三菱重機製の誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma:ICP) 式 RIE 装置を使用しており、エッチングガスは C₄F₈、SF₆の2種類を使用した (3章,図3.8)。一般的 に SF6 と Si の反応速度は Si \geq SiN \gg SiO₂ となっており、予めエッチングのストッパーとして最適である 酸化膜を基板に形成してある。

今回、300 µm 厚の Si を堀きり、SiO₂ と SiN を残すジャストエッチの条件出しをおこなった。使用した基板は積層配線の導通基板を使用した。条件出しでは以下の 2 通りのエッチングモードを使用した。 まず従来の条件出しレシピを参考に 100 µm の Si をそれぞれのモードで掘り、光学顕微鏡で Z 軸方向の 正確な深さを測定した。そこから各レシピのエッチングレートを見積もった。

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~								
レシピ	SF ₆ 時間 (E: エッチング)	C ₄ F ₈ 供給時間 (P: 保護)	サイクル	レート				
high speed	3 s または 6.5 s	3 s	$E \to E \to P$	$4.2 \ \mu m/cycle$				
default	3 s	$2.5 \mathrm{\ s}$	$E \rightarrow P$	$0.4 \ \mu m/cycle$				

表 5.34: 使用したエッチングレシピ。

#### 5.8.2 結果と考察

126

始めに high speed レシピで 280 µm 程度掘り、最後に default レシピで丁寧に掘り切る事にした。図 5.51 に測定したピクセルの箇所を示す。中心エリアと端のエリアの 8ヵ所とアライメントマークの計 10ヵ 所を測定した。



図 5.51: 8×8の導通基板上で深さ測定した箇所。

図 5.52 に各レシピで掘り進め深さを測定した結果をまとめた。8×8 ピクセルであると中心エリアと端 のエリアでのエッチングスピードに ~5 µm 程度の差が見られたが、大きな差はなく、均一に掘られてい る事がわかった。また、default レシピを 25 サイクル後にほぼジャストエッチできていたが、厚さ 200 µm 程度の黒いぶつぶつの残骸が目立った。これはブラックシリコンという柱状の突起物だと考えられ る。ブラックシリコンとは、シリコンのエッチングにより発生した反応生成物である SiO_x 等が被エッチ ング面に堆積し、それがマスクとして作用することによって SiO_x の下のシリコンがエッチングされず にエッチングが進み、結果としてトレンチ内に柱状のシリコンが残ることである。今回の原因としては、 基板を台座に貼付ける際に使用する拡散オイルが原因だと考えられる。拡散オイルはエッチング中の熱 パスを良くするためのものであるが、基板と台座間に塗るオイルがエッチング中に Si 上に飛び散ると、 オイルがマスク代わりとなってしまいその領域は掘られなくなってしまう。

そこでオイルの量を1/3程度減らし、かつ基板を固定するために四隅に張るカプトンテープを1重から2重にし、オイルの漏れを防ぐよう試みた。図5.53が台座に基板を貼付けた様子である。

図 5.54 はエッチング後の表側、裏側からの全体の様子である。5ヵ所黒く見えている部分はメンブレン が破れってしまっている箇所である。これは、台座から基板をはずす際にメンブレンが破れてしまった せいである。ドライエッチングする際に基板を台座に貼付けているのだが、基板をはずす際はシャーレ を用いてアセトン液中に基板を浸し、慎重に剥がしている。しかしメンブレン上にアセトンがたまり圧 がかかって破れてしまう危険性があるので、基板はずしは苦労する。そこでジャーレではなく、図 5.55 のようにビーカーを使用することにした。こうすると、メンブレンにアセトン液に負担がかかりにくい。

					e e construction de la construction
	25 cycles	+25 cycles	+25 cycles	+25 cycles	+60 cycles
alignment mark l	+				
depth	92 um	187 um	279 um	296 um	301 um
No. I			3.0		
depth	97 um	194 um	290 um	298 um	299 um
No.2					
depth	94 um	186 um	291 um	294 um	299 um
No.3					
depth	96 um	185 um	291 um	295 um	299 um
No.4					
depth	96 um	194 um	290 um	296 um	299 um

Red:TES high speed recipe Blue:TES default recipe

### Red:TES high speed recipe Blue:TES default recipe

	25 cycles	+25 cycles	+25 cycles	+25 cycles	+60 cycles
alignment mark 2	┿				
depth	95 um	188 um	283 um	297 um	300 um
No.5					
depth	93 um	1 <b>92</b> um	288 um	298 um	301 um
No.6					
depth	<b>9</b> 4 um	189 um	288 um	295 um	302 um
No.7				1	-17 
depth	<b>92</b> um	189 um	290 um	298 um	299 um
No.8				1	4
depth	<b>97</b> um	191 um	294 um	295 um	300 um

図 5.52: 各エッチングステップごとに測定した結果。



図 5.53: 四隅のテープの止め方の改良。



図 5.54: ジャストエッチ後の結果。



(b)



### 図 5.55: 台座からの基板のはずし方。

裏彫りの結果から、拡散オイルの量、基板の止め方、そしてエッチング後の基板のはずし方などを気 をつけて、再度裏彫りした結果が図 5.56 から図 5.57 である。図 5.56 に測定したピクセルの箇所を示す。 中心エリアと端のエリアの 8ヵ所とアライメントマークの計 10ヵ所の深さを測定した。

図 5.57 にエッチング後の表側、裏側からの全体の様子を示す。基板のをシャーレではなくビーカーを 使って垂直性を保ちながらはずしたため、メンブレンを破ることがなく全て綺麗に形成できた。図 5.58 に各レシピで掘り進め深さを測定した結果をまとめた。 $4\times4$ ピクセルであると中心エリアと端のエリア でのエッチングスピードに ~10 $\mu$ m 程度の差が見られ、端のピクセル側がやや早く掘られており ICP 装 置の指向性が見受けられた。また、先程は default レシピを 25 サイクル後にほぼジャストエッチできて いたが、今回はさらに 24 サイクルをかけて掘り切ることができた。オイルの漏れを防ぐ状態にしたた め、先程見られていたブラックシリコンはなく綺麗に掘り切る事が出来た。メンブレンの大きさも調べ たところ、設計値 300  $\mu$ m×350  $\mu$ m に対し、実測値は ~ 310  $\mu$ m×360  $\mu$ m となっており、大幅にサイド エッチングされていないことがわかった。

他にも基板を変え Si の掘り具合を確認したところ基板により若干のサイクル数の違いがみられたが、 次のような条件で掘れば完全にジャストエッチできることがわかった。

レシピ	high speed 25 cycle×3 回 + default 25 cycle ×2 回 (最後の1回は掘り具合により変更)
基板の固定	カプトンテープを2重にすること
基板の取り外し	ビーカーにアセトンを入れ垂直方向を保ちながらはがすこと

& 0.00: SI ワンヤヘトエッフ 表価リネ	表	5.35: S	のジャ	ストエ	ッチ	·裏掘り	) 条件
--------------------------	---	---------	-----	-----	----	------	------



図 5.56: 4×4 導通基板上で深さ測定した箇所。



図 5.57: ジャストエッチ後の結果。

	25 cycles	+25 cycles	+20 cycles	+25 cycles	+24 cycels
alignment mark l	┿			+	ł
depth	102 um	200 um	285 um	301 um	-
No.1					
depth	104 um	208 um	285 um	304 um	-
No.2					
depth	108 um	209 um	287 um	303 um	
No.3					
depth	99 um	210 um	288 um	302 um	-
No.4					
depth	107 um	205 um	286 um	299 um	2-

Red:TES high speed recipe Blue:TES default recipe

### Red:TES high speed recipe Blue:TES default recipe

	25 cycles	+25 cycles	+20 cycles	+25 cycles	+24 cycels
alignment mark 2	╈			+	
depth	102 um	199 um	289 um	297 um	-
No.5		0	10	•	
depth	95 um	200 um	288 um	301 um	-
No.6					
depth	97 um	207 um	286 um	304 um	-
No.7					
depth	<b>99</b> um	200 um	287 um	300 um	-
No.8					
depth	105 um	203 um	289 um	301 um	-

図 5.58: 各エッチングステップごとに測定した結果。

# 5.9 TMU284 素子の完成

積層配線上に TES 加工し超伝導転移試験済みの TMU284 に吸収体をつけ、メンブレン構造を形成し 積層配線を用いた初めての TES カロリメータを製作した。吸収体は最終目標形であるマッシュルーム型 ではなく、従来デザインの 120 µm 角で厚さ 1.7 µm を形成した。今回は積層配線を使用した初のカロリ メータ製作のため、吸収体を形成したピクセルと吸収体なしのピクセルを同一基板上に形成し、転移状 態を比較しやすいようにした。また、裏彫りは条件出しで出した結果をもとに、基板の様子を見ながら ジャストエッチを行った。今回は high speed が 75 cycle、default が 30 cycle で完成した。

図 5.59 は TMU284 の TES カロリメータの写真である。吸収体の形成では、リフトオフ法を用いた加 工を行ったのだが、Au 吸収体のバリを除去することが困難であった。そこでバリを取り除くために細い 綿棒で軽くピクセル上を掃き、ある程度のバリの除去はできたが、同時に TES 自体にも影響を与えてし まった。TES の Au の部分が少し剥がれてしまったのだ。また、コンタクトホール部分も TES で保護し ていたが、補強していた TES も綿棒によって擦りとられてしまった。



図 5.59: 完成した TMU284 素子。

これらの加工の影響を見るために、16 ピクセル中4 ピクセルのR - T 測定を行い、転移状態を確認 した。図 5.60 は得られた転移カーブである。4 ピクセル中全てのピクセルにおいて転移を確認できた。 残留抵抗は全てのピクセルで1 mΩ と小さかった。吸収体ありとなしのピクセルの転移温度を比べると、 吸収体付きの素子の方が2つとも 280 mK 付近で転移しており安定してる。しかし、吸収体なしのピク セルは 70 mK 近くの差が生じてしまっている。また、390 mK 付近で何段階かに転移が見られた。これ らは、吸収体加工時に TES を削ってしまったことにより TES の厚さが変わってしまったからであると 考えられる。特に、吸収体がついていないピクセルは、綿棒でのリフトオフがもろに受けてしまい、転 移状態に大きく影響したのではないかと推測できる。

また、臨界電流の測定もおこなった。表 5.37 は転移した 4 ピクセルの臨界電流測定で得られた結果で ある。0402 以外の 3 ピクセルに関しては臨界電流が 100 μA 以上と TES カロリメータとしての臨界電 流の要求値を満たしている。0402 は加工時に傷をつけてしまったコンタクトホール部分が関係している のではないかと考えられる。

まとめると、積層配線を用いた初の TES カロリメータが完成した。超伝導転移試験から、ピクセルに よりばらつきがあるものの、3 ピクセルは確実に動作可能な素子を製作できたと言える。次の段階とし て、この TMU284 素子に X 線を照射し、エネルギー分解能などの性能特性を調べることが求められる。



図 5.60:得られた4ピクセルのR-Tカーブ。横軸:温度T(K)縦軸:対数表示の抵抗値R(mΩ)。

配線 ID	$Tc \; [mK]$	$R$ @常温 $[\Omega]$	$R@4~{\rm K}~[\Omega]$	$R@0.8 \text{ K}[\Omega]$	転移後の R@66 mK [Ω]
0201 (吸収体あり)	283	63	1	9	$1 \times 10^{-3}$
0104 (吸収体あり)	280	72	1	80	$1 \times 10^{-3}$
0402 (吸収体なし)	345	64	2	35	$1 \times 10^{-3}$
0103 (吸収体なし)	275	65	1	35	$41 \times 10^{-3}$

表 5.36: 1 μA 定電流バイアスから得られた R – T 測定結果。

表 5.37:4 ピクセルの臨界電流測定結果。

バイアス電流 [µA]	1	3	10	30	100	300
ID:0201 の抵抗値@99 mK [mΩ]	1	1	1	1	1	over range
ID:0104の抵抗値@102 mK [mΩ	1	1	1	1	1	over range
ID:0402の抵抗値@95 mK [mΩ]	1	1	2	50	100	-
ID:0103の抵抗値@86 mK [mΩ]	1	1	1	1	1	over range

## 5.10 本章のまとめと考察

本章では積層配線を用いた TES カロリメータの製作をおこなった。従来の製作方法とは異なり、配線 上に TES 膜を形成することで、大きく4つの問題が明らかになった。製作過程を1つ1つ見直し、最終 的に最適な TES 加工の製作プロセスを確立できた。以下に製作プロセスで明らかになった問題と解決方 法をまとめる。

#### 5.10.1 Au エッチャントによる Al 配線の腐食について

TES を加工する際に使用する Au と Ti のエッチング液に対する Al 配線の耐性試験をおこなった。Ti エッチャントである過酸化水素水には Al は耐性があったが、Au のヨウ素系エッチャント (AURUM-101) には耐性がなく、配線と pad 部分が腐食され、消失してしまった。

そこで、Auエッチャントに対する Al と Auのエッチング選択比を大きくなるような、新たなエッチャントを作成した。リン酸塩にはリン酸二水素アンモニウムを採用した。条件出しから、AURUM-101 に リン酸二水素アンモニウムを添加することで、Al 配線の腐食を抑えることに成功した。これは、表面に 不溶性のリン酸塩皮膜を作り表面の腐食の進行を抑制されたためと考えられる。

そして TES の超伝導転移試験に進んだが、結果から3つの問題が明らかになった。

- ≥50 mΩ と残留抵抗が大きい (要求値: ~数 mΩ)。
- ≤6 µA と臨界電流が小さい (要求値: ≥100 µA。少なくとも 30 µA 以上は欲しい)。
- ~9Ωと常伝導時の抵抗が大きい (要求値: ~ 数百 mΩ)。

そこで TES と配線間の断面、またコンタクトホール部を観察から以下の3つの原因をつきとめた。突 きとめた原因と解決方法をまとめる。

#### 5.10.2 TES 膜と配線間の自然酸化膜の存在

A1の上部配線上に自然酸化膜が生成されており、その上に TES 膜を成膜していたため、TES と配線 間に不純物が挟まれていた。これは、はじめに配線が形成されているので、酸化されやすい A1の上に 酸化膜が形成されたと考えられる。TES を成膜する前におこなう従来の逆スパッタの条件は印可電力が 100 W、逆スパッタ時間が1分であったが、この条件であると配線上の酸化膜が除去されず、残ってし まっていた。そこで、TES 膜成膜前に行う逆スパッタの印可電力を強め、酸化膜の除去する条件出しを おこなった。結果、酸化膜のレート (7 nm/min) から印可電力が 150 W、逆スパッタ時間が3分であれ ば自然酸化膜を十分除去できるというを最適条件を出した。

## 5.10.3 配線に対する TES の段切れ問題

上部配線の膜厚が 50 nm に対し Ti の厚さが 40 nm と薄く、配線に対して TES 膜の被覆性が低く段切 れ状態であった。そこで上部配線の膜厚 (50 nm) と逆スパッタにより削れる絶縁膜の厚さ (20 nm) の 計 70 nm に対して、Ti の膜厚を約 1.5 倍の 100 nm に、Au を Ti の倍の 200 nm に成膜して配線に対し て TES の被覆性を高めた。

### 5.10.4 コンタクトホールの被覆性問題

上部配線と下部配線が接する箇所は間にサンドされている絶縁膜の厚さ 150 nm 分の溝がある。その 上に 50 nm の厚さの上部配線が積層されるが、膜厚の関係から段切れしてしまう。そこで、保護膜とし て厚さ 150 nm の Nb 膜で上から成膜し、上部と下部配線のコンタクトを補強していたが、被覆性があ まりよくなかった。TES 加工すると保護膜がめくれ、段切れをおこしていた。そこで、コンタクトホー ル部分にも TES が残るように加工デザインを変え、Nb 保護膜の上からさらに TES で補強した。

上記の3つの問題を1つ1つ見直し、超伝導転移状態を確認したところ全ての問題点が改善された。

- 残留抵抗は~2 mΩであった。
- ・ 臨界電流は ≥30 µA であった。
- 常伝導時の抵抗は~200Ωであった。

#### 5.10.5 メンブレン形成について

密集したピクセルにより従来の KOH ウェットエッチングではなく、DRIE 法というドライエッチング を導入した。エッチングレシピは high speed と default という 2 つのモードを融合させ、サイドエッチ ングを抑えつつ垂直性のよい裏掘りの条件出しをおこなった。high speed レシピを計 75 サイクルおこな い、その後 default レシピを 25~50 サイクルかけるという、確実にジャストエッチできる条件を出した。

#### 5.10.6 TMU284 について

積層配線を用いた TES カロリメータの第1号である。吸収体の形成時に TES を傷つけてしまったた め、3段転移するなど転移に影響が出た。しかし、転移温度は高いものの、残留抵抗は1mΩ、臨界電流 は100 μA 以上と TES カロリメータとしての要求値を満たす素子が完成した。吸収体の加工法であるリ フトオフ法について見直しが必要だが、最終的にはマッシュルーム型になるので、最優先課題ではない と考えている。今後は、まず完成した素子に X 線を照射し、エネルギー分解能などの素子の特性を調べ ることが最優先事項である。
## 第6章 まとめと今後の課題

#### 6.1 まとめ

私は DIOS 衛星搭載を目的とした TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発をおこなった。DIOS 用 素子には 200  $\mu$ m 角の TES 温度計の上に 500  $\mu$ m 角の吸収体の付いた 20×20 アレイが必要である。し かしこのような大規模ピクセルの実現には、基板上の配線スペースや、ピクセル間のクロストークが問 題となってくるが、これらの問題を解決するため ~10  $\mu$ m 幅の Al や Nb の配線を SiO₂ の絶縁膜を挟ん で重ね合わせた超伝導積層配線を開発した。下部配線には Al (厚み 100 nm)、上部配線に Nb または Al (厚み 50 nm または 100 nm)を使用し、3.5 cm 角の基板上に 500  $\mu$ m ピッチで 400 ピクセル分の配線を 形成することに成功した。まず配線のみの歩留まりや超伝導状態を確かめるため、TES 部分を短絡させ た配線を用いて配線の評価を行った。上部配線の種類と厚さを変えた 4 種類の配線について常温で抵抗 を測定したところ、歩留まりは 95~97%と良好であった。さらに希釈冷凍機に組み込み、それぞれ超伝 導転移を確認したところ、上部・下部配線ともに Al の場合は、~1.2 K 付近で比較的シャープな転移が 見られた。一方で上部配線が Nb の場合は、Nb および Al の転移は見られたものの、十数 mΩ の残留抵 抗が見られ、臨界電流も ~1  $\mu$ A と小さく、問題があることがわかった。要求値は残留抵抗が数 mΩ 以 下、臨界電流が 100  $\mu$ A 以上である。そこで Al-Al 配線を採用し、TES カロリメータの製作へと進んだ。

私は Al-Al 積層配線を使用して、配線上に TES 膜を形成する製作プロセスの構築を試みた。配線上に TES を形成するにあたり TES 膜の加工 (特に Au) に使用する金属エッチング液に Al 配線が腐食される という問題があることがわかった。そこでエッチング液に対する Au と Al のエッチング選択比を高める 溶液を独自に作成することで、Al 配線が腐食されることなく TES を加工するプロセス条件を確立した。 TES の超伝導転移へと進んだところ、残留抵抗が  $\geq$ 50 mΩ と大きく、臨界電流が  $\leq$ 6 muA と小さいこ とがわかった。また TES の常伝導時の抵抗が数百 mΩ 程度のところ、測定結果では  $\sim$ 9 Ω と大きいなど といった問題が生じた。そこで TES 膜と配線の境界部の観察をし、①TES 膜と配線間の自然酸化膜の 存在、②配線に対する TES の被覆性が低い (TES 膜の段切れ)、③コンタクトホール (ホットとリターン 配線が接する箇所) の被覆性が低い、という 3 つの問題点を明らかにし、単層配線を用いた最適プロセスの条件出しを行った。①に対しては TES 膜成膜前に行う逆スパッタの印可電力を強め、酸化膜の除去 する条件を出した。また②の問題では、配線の厚さと TES の転移温度を考慮し、TES の被覆性を高め、さらに確実に転移するような膜厚パラメータを導きだした。③で問題であったコンタクトホール部分を 補強するように加工した。これらの問題を1つ1つ解決した結果、試作素子では残留抵抗が  $\sim$ 2 mΩ、臨 界電流が > 30  $\mu$ A、そして常伝導時の抵抗が  $\sim$ 200 mΩ と問題点が全て改善されたことを確認した。

また、密集したピクセルデザインにおけるメンブレン形成も試みた。従来の KOH ウェットエッチング ではなく、DRIE 法というドライエッチングを導入した。エッチングレシピは high speed と default と いう 2 つのモードを融合させ、サイドエッチングを抑えつつ垂直性のよい裏掘りの条件出しをおこなっ た。high speed レシピを計 75 サイクルおこない、その後 default レシピを 25~50 サイクルかけるとい う、確実にジャストエッチできる条件を出した。これらの条件出しの結果を用いて積層配線を用いた初 の TES カロリメータの製作に取り組み超伝導転移状態を確認した。結果として、DIOS 用素子の要求値 を満たす素子を製作できた。

このように私は 20×20 アレイ用の超伝導積層配線を製作することに成功した。さらに配線上に TES 膜を形成する製作プロセスを確立した。

### 6.2 今後の課題

#### 6.2.1 TES 膜厚と転移温度の最適化

本論文で製作した Ti/Au=100/200 nm の TES は転移温度が 280 mK であり、目標である 100-120 mK よりも倍近く高かった。転移温度が高いとその分エネルギー分解能が悪化する。このエネルギー分解能 は Ti と Au の膜厚比と相関があり、これまでチーム内では Au/Ti=2 がであると 100-150 mK 内で転移 することがわかっていた。またこれまでの結果から、比が大きければ大きいほど転移温度が下がる傾向 にあることがわかっている。しかし、本論文で製作した素子も Ti と Au の比が 2 と最適な膜厚比にして いたが、転移温度は目標温度よりも大幅に高かった。Ti が厚いと Au の近接効果が効きにくいのかもし れない。

今後は Ti の膜厚 100 nm は一定にしたまま Au の厚さを 200 nm 以上に増やし、Ti と Au の比をより 大きくし 100-120 mK 内で転移するような TES 膜厚の条件出しが必要である。

#### 6.2.2 400 アレイ素子の完成と X 線評価測定

本論文では 4×4 の 16 ピクセルアレイの TES カロリメータの製作をおこなった。この 16 ピクセル素 子の製作で得られた製作プロセス条件をもとに、最終デザインである 20×20 の 400 ピクセルアレイの製 作をおこなう。また超伝導転移評価だけではなく、X 線を照射しエネルギー分解能をはじめとするさま ざまなパラメータを測定する必要がある。

#### **6.2.3** マッシュルーム吸収体の製作

アレイ化の課題としては1ピクセルあたりの受光面積の拡大も必須である。この方法には「マッシュ ルーム吸収体」という TES よりも大きい面積をもち、張り出したオーバーハング構造 (傘部分と幹部分) の吸収体が採用されている。X 線吸収体は検出効率が高く、熱容量が小さく、熱伝導度が高いことが要 求される。吸収体が大きい方が検出効率が向上するが、熱容量が大きくなるためエネルギー分解能は劣 化する。グループ内でもこれまでにマッシュルーム吸収体の開発がなされてきたが、TES との密着性が 悪く、さらに膜の応力などの問題から傘部分の吸収体の膜がだれてしまうなど、製作面で苦労してきて いる。

最近ではこの問題を解決するために TES と吸収体のギャップを埋めるように SiO₂ を成膜して吸収体 を支える方法を開発中である。*DIOS* 用素子にはマッシュルーム吸収体が必要不可欠であり、最終的に は積層配線を用いた TES の上にマッシュルーム構造を構築し、素子の評価をおこなう必要がある。

# 付録A:積層配線4基板の全抵抗値

第4章で述べた積層配線の常温時の抵抗測定結果を示す。MLR#1から#4までの全配線の抵抗を測定した結果である。

MLR#1(A	Al 100nm/Al	100nm) 🗆	ェリア①		*	一つの配線は	こつき2回ずつ測定
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[ <b>Ω</b> ]	配線ID	抵抗値[Ω]
ID-0119	807 / 806	ID-0313	780 / 778	ID-0510	773 / 769	ID-0407	842 / 840
ID-0218	870 / 871	ID-0213	725 / 726	ID-0410	731 / 731	ID-0307	805 / 806
ID-0118	804 / 804	ID-0113	674 / 671	ID-0310	692 / 690	ID-0207	768 / 770
ID-0317	951 / 954	ID-0812	982 / 979	ID-0210	663 / 671	ID-0107	708 / 706
ID-0217	868 / 867	ID-0712	925 / 926	ID-0110	610 / 607	ID-0606	950 / 948
ID-0117	802 / 805	ID-0612	884 / 876	ID-0909	933 / 932	ID-0506	932 / 930
ID-0416	894 / 977	ID-0512	828 / 828	ID-0809	897 / 895	ID-0406	882 / 881
ID-0316	920 / 922	ID-0412	777 / 779	ID-0709	859 / 857	ID-0306	846 / 845
ID-0216	850 / 849	ID-0312	731 / 727	ID-0609	828 / 830	ID-0206	805 / 806
ID-0116	783 / 784	ID-0212	34.7 / 32.1	ID-0509	793 / 791	ID-0106	743 / 741
ID-0515	1012 / 1020	ID-0112	∞ / ∞	ID-0409	753 / 754	ID-0505	977 / 978
ID-0415	931 / 934	ID-0911	966 / 968	ID-0309	720 / 718	ID-0405	938 / 937
ID-0315	868 / 866	ID-0811	924 / 923	ID-0209	687 / 684	ID-0305	162 / 160
ID-0215	825 / 827	ID-0711	872 / 874	ID-0109	635 / 631	ID-0205	839 / 837
ID-0115	749 / 747	ID-0611	828 / 827	ID-0808	∞ / ∞	ID-0105	769 / 770
ID-0614	1003 / 1005	ID-0511	784 / 786	ID-0708	906 / 904	ID-0404	376 / 374
ID-0514	945 / 948	ID-0411	741 / 738	ID-0608	867 / 869	ID-0304	899 / 897
ID-0414	885 / 886	ID-0311	697 / 694	ID-0508	829 / 827	ID-0204	858 / 855
ID-0314	824 / 825	ID-0211	661 / 660	ID-0408	797 / 795	ID-0104	798 / 797
ID-0214	771 / 773	ID-0111	605 / 607	ID-0308	759 / 758	ID-0303	906 / 906
ID-0114	720 / 718	ID-1010	974 / 974	ID-0208	728 / 726	ID-0203	865 / 863
ID-0713	1002 / 1001	ID-0910	927 / 925	ID-0108	669 / 667	ID-0103	798 / 798
ID-0613	941 / 942	ID-0810	894 / 893	ID-0707	942 / 940	ID-0202	870 / 870
ID-0513	884 / 882	ID-0710	853 / 848	ID-0607	913/910	ID-0102	∞ / ∞
ID0413	832 / 866	ID-0610	809 / 807	ID-0507	877 / 873	ID-0101	830 / 826
MLR#1(A	Al 100nm/Al	100nm) =	ェリア②		*	一つの配線に	こつき2回ずつ測定
MLR#1(A 配線ID	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω]	100nm) 二 配線ID	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω]	配線ID	» 抵抗值[ <b>Ω</b> ]	一つの配線 記線ID	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω]
MLR#1(A 配線ID ID-0102	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 793 / 793	100nm) 二 配線ID ID-0308	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774	配線ID ID-0511	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776	(一つの配線) 配線ID ID-0414	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 846 / 845
MLR#1(A 配線ID ID-0102 ID-0203	<mark>抵抗值[Ω]</mark> 793 / 793 860 / 858	100nm) 二 配線ID ID-0308 ID-0208	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731	配線ID ID-0511 ID-0411	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740	一つの配線に 配線ID ID-0414 ID-0314	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 846 / 845 813 / 811
MLR#1(A 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797	100nm) 二 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694	(一つの配線に 配線ID ID-0414 ID-0314 ID-0214	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 846 / 845 813 / 811 781 / 780
MLR#1(A 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923	100nm) 二 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211	× 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716
MLR#1(A 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204	<mark>抵抗值[Ω]</mark> 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860	100nm) 二 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0111	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999
MLR#1(A 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0104	私100nm/AI 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞	100nm) 二 記線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709 ID-0609	<b>エリア②</b> 抵抗値[ <u>Ω]</u> 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0111 ID-0912	浙抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940	<ul> <li>一つの配線は</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値(Ω) 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928
MLR#1(A	私100nm/AI 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964	100nm) 日 記線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709 ID-0609 ID-0509	<b>エリア②</b> 抵抗値[ <u>Ω]</u> 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812	抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値(Ω) 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928 896 / 893
MLR#1(A	<mark>抵抗値[Ω]</mark> 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905	100nm) 日 記線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709 ID-0609 ID-0509 ID-0409	<b>Eリア②</b> 抵抗値[ <u>Ω]</u> 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812 ID-0712	浙抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値(Ω) 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928 896 / 893 851 / 854
MLR#1(A 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0405 ID-0305 ID-0305	AI 100nm/AI 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860	100nm) 日 記線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709 ID-0609 ID-0509 ID-0509 ID-0409 ID-0309	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0712</li> <li>ID-0612</li> </ul>	浙抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値(Ω) 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928 896 / 893 851 / 854 818 / 815
MLR#1(A 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785	100nm) 二 記線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709 ID-0609 ID-0509 ID-0509 ID-0409 ID-0309 ID-0209	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812 ID-0812 ID-0612 ID-0512	浙抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928 896 / 893 851 / 854 818 / 815 748 / 751
MLR#1(A 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506	Al 100nm/Al 抵抗值[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998	記線ID           記線ID           ID-0308           ID-0208           ID-0108           ID-0108           ID-0709           ID-0609           ID-0509           ID-0409           ID-0309           ID-0208	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812 ID-0612 ID-0612 ID-0512 ID-0412	浙抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 <u>抵抗値[Ω]</u> 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928 896 / 893 851 / 854 818 / 815 748 / 751 959 / 957
MLR#1(A 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0506 ID-0506 ID-0406	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941	記録ID           記線ID           ID-0308           ID-0208           ID-0108           ID-0709           ID-0609           ID-0509           ID-0309           ID-0309           ID-0109           ID-0109           ID-0109	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0111</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0312</li> </ul>	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 800 / 799 763 / 760 725 / 727	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0416</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 716</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> </ul>
MLR#1(A 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0506 ID-0506 ID-0306	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941 869 / 871	記録ID           記線ID           ID-0308           ID-0408           ID-0108           ID-0709           ID-0609           ID-0509           ID-0409           ID-0308           ID-0209           ID-0209           ID-0910           ID-0910	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0712</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0212</li> </ul>	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0316</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 716</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> <li>890 / 893</li> </ul>
MLR#1(A 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0506 ID-0306 ID-0306 ID-0206	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941 869 / 871 806 / 805	記録ID           記線ID           ID-0308           ID-0108           ID-0108           ID-0709           ID-0609           ID-0509           ID-0308           ID-0309           ID-0409           ID-0309           ID-0309           ID-0109           ID-0910           ID-0910           ID-0810           ID-0710	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0212</li> <li>ID-0212</li> <li>ID-0112</li> </ul>	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 / 473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696 641 / 643	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0216</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 716</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> <li>890 / 893</li> <li>848 / 849</li> </ul>
MLR#1(A 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0103 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0205 ID-0105 ID-0205 ID-0506 ID-0306 ID-0206 ID-0106	Al 100nm/Al           抵抗值[Ω]           793 / 793           860 / 858           795 / 797           920 / 923           857 / 860           ∞ / ∞           966 / 964           905 / 905           857 / 860           786 / 785           999 / 998           944 / 941           869 / 871           806 / 805           745 / 748	記録ID           配線ID           ID-0308           ID-0208           ID-0108           ID-0409           ID-0509           ID-0409           ID-0308           ID-0109           ID-0109           ID-0109           ID-0109           ID-0109           ID-0810           ID-0710           ID-0610	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0712</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0112</li> <li>ID-0112</li> <li>ID-0813</li> </ul>	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696 641 / 643 933 / 931	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0216</li> <li>ID-0116</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 716</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>957 / 921 / 923</li> <li>848 / 849</li> <li>781 / 778</li> </ul>
MLR#1(人 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0103 ID-0204 ID-0204 ID-0405 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0206 ID-0206 ID-0106 ID-0607	AI 100nm/AI 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941 869 / 871 806 / 805 745 / 748 1009 / 1007	ID00nm)         I           ID-0308         I           ID-0308         I           ID-0108         I           ID-0409         I           ID-0309         I           ID-0409         I           ID-0309         I           ID-0409         I           ID-0309         I           ID-0309         I           ID-0409         I           ID-0409         I           ID-0309         I           ID-0409         I           ID-0109         I           ID-010910         I           ID-0710         I           ID-0610         I           ID-0510         I	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831 798 / 799	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0712</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0212</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> </ul>	挑抗值[Ω]     772 / 776     740 / 740     695 / 694     673 / 672     611 / 608     938 / 940     897 / 899     866 / 864     471 /473     801 / 799     763 / 760     725 / 727     689 / 696     641 / 643     933 / 931     912 / 913	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0216</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0417</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 716</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> <li>890 / 893</li> <li>848 / 849</li> <li>781 / 778</li> <li>944 / 947</li> </ul>
MLR#1(人 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0103 ID-0204 ID-0204 ID-0405 ID-0405 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0206 ID-0206 ID-0106 ID-0207 ID-0507	AI 100nm/AI 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941 869 / 871 806 / 805 745 / 748 1009 / 1007 984 / 987	ID0nm)         I           ID-0308         I           ID-0308         I           ID-0409         I           ID-0509         I           ID-0409         I           ID-0309         I           ID-0409         I           ID-0309         I           ID-0409         I           ID-0309         I           ID-0409         I           ID-0410         I           ID-0510         I           ID-0510         I	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831 798 / 799 746 / 744	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0712</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0212</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> </ul>	基抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696 641 / 643 933 / 931 912 / 913 866 / 864	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0216</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0317</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 716</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> <li>890 / 893</li> <li>848 / 849</li> <li>781 / 778</li> <li>944 / 947</li> <li>909 / 907</li> </ul>
MLR#1(/ RikiD ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0405 ID-0405 ID-0105 ID-0105 ID-0506 ID-0206 ID-0106 ID-0106 ID-0107 ID-0507 ID-0407	AI 100nm/AI 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941 869 / 871 806 / 805 745 / 748 1009 / 1007 984 / 987 899 / 898	ID0nm)         I           ID-0308         I           ID-0308         I           ID-0409         I           ID-0509         I           ID-0409         I           ID-0108         I           ID-0309         I           ID-0409         I           ID-0409         I           ID-0309         I           ID-0109         I           ID-0410         I           ID-0410         I           ID-0310         I	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831 798 / 799 746 / 744 704 / 700	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0712</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0212</li> <li>ID-0112</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0813</li> </ul>	挑抗值[Ω]     772 / 776     740 / 740     695 / 694     673 / 672     611 / 608     938 / 940     897 / 899     866 / 864     471 /473     801 / 799     763 / 760     725 / 727     689 / 696     641 / 643     933 / 931     912 / 913     866 / 864     835 / 833	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0317</li> <li>ID-0217</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 716</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> <li>890 / 893</li> <li>848 / 849</li> <li>781 / 778</li> <li>944 / 947</li> <li>909 / 907</li> <li>866 / 868</li> </ul>
MLR#1(/ Rikip ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0405 ID-0405 ID-0405 ID-0105 ID-0105 ID-0506 ID-0106 ID-0106 ID-0106 ID-0107 ID-0507 ID-0507 ID-0507 ID-0307	AI 100nm/AI 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 00 / 00 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941 806 / 805 745 / 748 1009 / 1007 984 / 987 899 / 898 829 / 830	ID00nm)         ID           ID         ID           ID	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 833 / 831 798 / 799 746 / 744 704 / 700 661 / 659	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0112</li> <li>ID-0813</li> </ul>	挑抗值[Ω]     772 / 776     740 / 740     695 / 694     673 / 672     611 / 608     938 / 940     897 / 899     866 / 864     471 /473     801 / 799     763 / 760     725 / 727     689 / 696     641 / 643     933 / 931     912 / 913     866 / 864     835 / 833     801 / 800	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0317</li> <li>ID-0217</li> <li>ID-0117</li> </ul>	<ul> <li>ごうき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>780 / 780</li> <li>718 / 780</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> <li>890 / 893</li> <li>848 / 849</li> <li>781 / 778</li> <li>944 / 947</li> <li>909 / 907</li> <li>866 / 868</li> <li>795 / 792</li> </ul>
MLR#1(人 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0405 ID-0405 ID-0105 ID-0105 ID-0506 ID-0106 ID-0206 ID-0106 ID-0206 ID-0106 ID-0507 ID-0507 ID-0507 ID-0507 ID-0307 ID-0307 ID-0207	Al 100nm/Al 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 00 / 00 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941 806 / 805 745 / 748 1009 / 1007 984 / 987 899 / 898 829 / 830 774 / 773	ID00nm)         ID           ID.40308         ID           ID.00208         ID           ID.0108         ID           ID.00709         ID           ID.00609         ID           ID.00509         ID           ID.0409         ID           ID.0309         ID           ID.0409         ID           ID.0309         ID           ID.0409         ID           ID.0109         ID           ID.0109         ID           ID.0109         ID           ID.0109         ID           ID.0109         ID           ID.0109         ID           ID.01010         ID           ID.0510         ID           ID.0310         ID           ID.0210         ID	<b>Eリア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831 798 / 799 746 / 744 704 / 700 661 / 659 610 / 612	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0813</li> </ul>	港抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696 641 / 643 933 / 931 912 / 913 866 / 864 835 / 833 801 / 800 768 / 769	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0317</li> <li>ID-0217</li> <li>ID-0318</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 780</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> <li>890 / 893</li> <li>848 / 849</li> <li>781 / 778</li> <li>944 / 947</li> <li>909 / 907</li> <li>866 / 868</li> <li>795 / 792</li> <li>1075 / 1066</li> </ul>
MLR#1(A 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0105 ID-0205 ID-0205 ID-0105 ID-0306 ID-0306 ID-0306 ID-0306 ID-0106 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0207 ID-0207 ID-0107	Al 100nm/Al 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 999 / 998 944 / 941 869 / 871 806 / 805 745 / 748 1007 / 1007 984 / 987 897 / 898 829 / 830 774 / 773 713 / 715	記録旧           記線回           ID-0308           ID-0208           ID-0108           ID-0709           ID-0609           ID-0509           ID-0309           ID-0108           ID-0309           ID-0310           ID-0510           ID-0510           ID-0310           ID-0310           ID-01101	<b>E リア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 /675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831 798 / 799 746 / 744 704 / 700 661 / 659 610 / 612 977 / 975	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0111</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0815</li>     &lt;</ul>	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696 641 / 643 933 / 931 912 / 913 866 / 864 835 / 833 801 / 800 768 / 769 733 / 732	<ul> <li>一つの記線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0117</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0218</li> <li>ID-0218</li> </ul>	<ul> <li>つき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値(Ω)</li> <li>846 / 845</li> <li>813 / 811</li> <li>781 / 780</li> <li>718 / 716</li> <li>993 / 999</li> <li>926 / 928</li> <li>896 / 893</li> <li>851 / 854</li> <li>818 / 815</li> <li>748 / 751</li> <li>959 / 957</li> <li>921 / 923</li> <li>890 / 893</li> <li>848 / 849</li> <li>781 / 778</li> <li>944 / 947</li> <li>900 / 907</li> <li>866 / 868</li> <li>795 / 792</li> <li>1075 / 1066</li> <li>873 / 873</li> </ul>
MLR#1(A 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0405 ID-0405 ID-0105 ID-0105 ID-0105 ID-0106 ID-0206 ID-0106 ID-0206 ID-0106 ID-0107 ID-0307 ID-0207 ID-0207 ID-0107 ID-0107 ID-0107	Al 100nm/Al 抵抗値[Ω] 793 / 793 860 / 858 795 / 797 920 / 923 857 / 860 ∞ / ∞ 966 / 964 905 / 905 857 / 860 786 / 785 786 / 785 786 / 785 786 / 785 786 / 785 786 / 785 786 / 785 787 / 800 786 / 785 789 / 871 806 / 805 745 / 748 1009 / 1007 984 / 987 899 / 898 829 / 830 774 / 773 713 / 715 1002 / 1000	記録旧           記線旧           ID-0308           ID-0308           ID-0108           ID-0709           ID-0609           ID-0309           ID-0309           ID-0409           ID-0108           ID-0109           ID-0109           ID-0109           ID-0109           ID-0510           ID-0510           ID-0510           ID-0310           ID-0210           ID-0101           ID-0210           ID-0101	<b>E リア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831 798 / 799 746 / 744 704 / 700 661 / 659 610 / 612 977 / 975 936 / 934	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0111</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0815</li>     &lt;</ul>	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696 641 / 643 933 / 931 912 / 913 866 / 864 835 / 833 801 / 800 768 / 769 733 / 732 676 / 678	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0156</li> <li>ID-0156</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0117</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0218</li> <li>ID-0118</li> <li>ID-0118</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値(Ω) 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928 896 / 893 851 / 854 818 / 815 748 / 751 959 / 957 921 / 923 890 / 893 848 / 849 781 / 778 944 / 947 909 / 907 866 / 868 795 / 792 1075 / 1066 873 / 873 ∞ / ∞
MLR#1(A 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0104 ID-0204 ID-0204 ID-0205 ID-0105 ID-0105 ID-0105 ID-0106 ID-0406 ID-0407 ID-0507 ID-0207 ID-0207 ID-0207 ID-0107 ID-0208 ID-0708 ID-0608	Al 100nm/Al           抵抗値[Ω]           793 / 793           860 / 858           795 / 797           920 / 923           857 / 860           ∞ / ∞           966 / 964           905 / 905           867 / 860           786 / 785           999 / 998           944 / 941           866 / 805           745 / 748           1009 / 1007           984 / 987           829 / 830           774 / 773           713 / 715           1002 / 1000           952 / 952	記録ID           記線ID           ID-0308           ID-0108           ID-0108           ID-0709           ID-0609           ID-0308           ID-0109           ID-0309           ID-0409           ID-0910           ID-0910           ID-0910           ID-0510           ID-0510           ID-0410           ID-0310           ID-0110           ID-0110           ID-0110	<b>E リア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831 798 / 799 746 / 744 704 / 700 661 / 659 610 / 612 977 / 975 936 / 934 892 / 893	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0111</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0815</li>     &lt;</ul>	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696 641 / 643 933 / 931 912 / 913 866 / 864 835 / 833 801 / 800 768 / 769 733 / 732 676 / 678 947 / 944	<ul> <li>一つの記線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0218</li> <li>ID-0218</li> <li>ID-0118</li> <li>ID-0118</li> <li>ID-0219</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値(Ω) 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928 896 / 893 851 / 854 818 / 815 748 / 751 959 / 957 921 / 923 890 / 893 848 / 849 781 / 778 944 / 947 909 / 907 866 / 868 795 / 792 1075 / 1066 873 / 873 ∞ / ∞ 904 / 906
MLR#1(A 記線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0104 ID-0204 ID-0204 ID-0105 ID-0305 ID-0305 ID-0306 ID-0406 ID-0406 ID-0407 ID-0507 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0407 ID-0508 ID-0508	Al 100nm/Al           抵抗値[Ω]           793 / 793           860 / 858           795 / 797           920 / 923           857 / 860           ∞ / ∞           966 / 964           905 / 905           857 / 860           786 / 785           999 / 998           944 / 941           866 / 805           745 / 748           1009 / 1007           984 / 987           899 / 898           829 / 830           774 / 773           713 / 715           1002 / 1000           952 / 952           889 / 891	100nm)         2           記線ID         1D-0308           ID-0108         1D-0409           ID-0409         1D-0409           ID-0509         1D-0409           ID-0409         1D-0409           ID-0910         1D-0910           ID-0910         1D-0910           ID-0410         1D-0610           ID-0410         1D-0410           ID-0410         1D-0410           ID-0101         ID-0111           ID-0911         ID-0911           ID-0911         ID-0911           ID-0911         ID-0911	<b>E リア②</b> 抵抗値[Ω] 778 / 774 733 / 731 678 / 675 984 / 988 938 / 936 886 / 887 832 / 830 789 / 787 733 / 731 694 / 696 639 / 637 988 / 989 923 / 921 880 / 878 834 / 831 798 / 799 746 / 744 704 / 700 661 / 659 610 / 612 977 / 975 936 / 934 892 / 893 860 / 859	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0111</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0614</li> </ul>	※ 抵抗值[Ω] 772 / 776 740 / 740 695 / 694 673 / 672 611 / 608 938 / 940 897 / 899 866 / 864 471 /473 801 / 799 763 / 760 725 / 727 689 / 696 641 / 643 933 / 931 912 / 913 866 / 864 835 / 833 801 / 800 768 / 769 7733 / 732 676 / 678 947 / 944 951 / 913	<ul> <li>一つの記線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0218</li> <li>ID-0218</li> <li>ID-0218</li> <li>ID-0219</li> <li>ID-0119</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値(Ω) 846 / 845 813 / 811 781 / 780 718 / 716 993 / 999 926 / 928 896 / 893 851 / 854 818 / 815 748 / 751 959 / 957 921 / 923 890 / 893 848 / 849 781 / 778 944 / 947 909 / 907 866 / 868 795 / 792 1075 / 1066 873 / 873 ∞ / ∞ 904 / 906 797 / 799

図 6.1: MLR#1の常温時の配線抵抗結果その1。

MLR#1(/	Al 100nm/Al 1	100nm) 🗆	ェリア③		*	一つの配線に	こつき2回ずつ測定
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]
ID-0220	807 / 808	ID-0818	808 / 810	ID-1116	788 / 790	ID-1417	849 / 848
ID-0319	866 / 864	ID-0819	730 / 731	ID-1117	749 / 751	ID-1418	814/815
ID-0320	804 / 803	ID-0820	676 / 675	ID-1118	704 / 705	ID-1419	776 / 774
ID-0418	923 / 922	ID-0913	1009 / 1007	ID-1119	672 / 673	ID-1420	728 / 729
ID-0419	859 / 854	ID-0914	948 / 949	ID-1120	613/611	ID-1515	968 / 967
ID-0420	798 / 799	ID-0915	884 / 882	ID-1212	938 / 940	ID-1516	926 / 923
ID-0517	979 / 978	ID-0916	867 / 869	ID-1213	901 / 903	ID-1517	892 / 894
ID-0518	905 / 905	ID-0917	782 / 780	ID-1214	868 / 870	ID-1518	857 / 856
ID-0519	838 / 836	ID-0918	745 / 745	ID-1215	827 / 829	ID-1519	821/819
ID-0520	790 / 812	ID-0919	688 / 688	ID-1216	793 / 794	ID-1520	753 / 755
ID-0616	999 / 997	ID-0920	637 / 638	ID-1217	759 / 761	ID-1616	∞ / ∞
ID-0617	930 / 931	ID-1012	975 / 976	ID-1218	731 / 732	ID-1617	953 / 954
ID-0618	878 / 877	ID-1013	943 / 940	ID-1219	690 / 691	ID-1618	894 / 893
ID-0619	813/814	ID-1014	886 / 669	ID-1220	638 / 639	ID-1619	852 / 854
ID-0620	757 / 756	ID-1015	846 / 844	ID-1313	936 / 934	ID-1620	783 / 782
ID-0715	1009 / 1007	ID-1016	795 / 796	ID-1314	902 / 901	ID-1717	948 / 949
ID-0716	948 / 950	ID-1017	747 / 745	ID-1315	883 / 839	ID-1718	910/912
ID-0717	884 / 883	ID-1018	708 / 710	ID-1316	837 / 839	ID-1719	874 / 875
ID-0718	828 / 830	ID-1019	664 / 662	ID-1317	801 / 803	ID-1720	796 / 795
ID-0719	769 / 767	ID-1020	611/612	ID-1318	770 / 772	ID-1818	937 / 938
ID-0720	729 / 731	ID-IIII	987 / 986	ID-1319	750 / 752	ID-1819	897 / 899
ID-0814	1001 / 998	ID-1112	935 / 935	ID-1320	674 / 673	ID-1820	801 / 802
ID-0815	942 / 941	ID-1113	894 / 892	ID-1414	952 / 950	ID-1919	874 / 876
ID-0816	884 / 886	ID-1114	852 / 854	ID-1415	926 / 924	ID-1920	796 / 795
ID-0817	841 / 840	ID-1115	813/815	ID-1416	882 / 880	ID-2020	786 / 788
NIL D. #4/4		1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 - 1997 -					
MLK#1(A	Al 100nm/Al 1	100nm) 🗆	エリア(4)		*	一つの配線に	こつき2回ずつ測定
MLR#1(A 配線ID	AI 100nm/AI 抵抗値[Ω]	100nm) 二 配線ID	<b>エリア④</b> 抵抗値[Ω]	配線ID	» 抵抗値[Ω]	⁽ 一つの配線) 配線ID	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω]
MLH#1(A 配線ID ID-1920	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 802 / 804	100nm) 二 配線ID ID-1316	エリア④ 抵抗値[Ω] 786 / 788	配線ID ID-1015	※ 抵抗值[Ω] 816 / 814	一つの配線に 配線ID ID-0717	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860
MLH#1(A 配線ID ID-1920 ID-1820	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875	100nm) 二 配線ID ID-1316 ID-1315	エリア④ 抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751	配線ID ID-1015 ID-1014	× 抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826
MLH#1(A 配線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819	抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809	100nm) 二 配線ID ID-1316 ID-1315 ID-1314	エリア④ 抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686	配線ID ID-1015 ID-1014 ID-1013	× 抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750 713 / 713	一つの配線に 配線ID ID-0717 ID-0716 ID-0715	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791
MLH#1(A 配線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1720	私 100nm/AI 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521	100nm) 配線ID ID-1316 ID-1315 ID-1314 ID-1220	エリア④ 抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003	配線ID ID-1015 ID-1014 ID-1013 ID-1012	抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750 713 / 713 677 / 673	一つの配線に 配線ID ID-0717 ID-0716 ID-0715 ID-0714	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736
MLH#1(A 配線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1720 ID-1719	払 <b>100nm/AI</b> 抵抗値[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865	100nm) 二 配線ID ID-1316 ID-1315 ID-1314 ID-1220 ID-1219	抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951	配線ID ID-1015 ID-1014 ID-1013 ID-1012 ID-1011	抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750 713 / 713 677 / 673 637 / 636	一つの配線に 配線ID ID-0717 ID-0716 ID-0715 ID-0714 ID-0620	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972
MLH#1(A 配線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1720 ID-1719 ID-1718	払 <b>100nm/AI</b> 抵抗値[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804	100nm) 記線ID ID-1316 ID-1315 ID-1314 ID-1220 ID-1219 ID-1218	払抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936	配線ID ID-1015 ID-1014 ID-1013 ID-1012 ID-1011 ID-0920	抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750 713 / 713 677 / 673 637 / 636 955 / 954	つの配線に 配線ID ID-0717 ID-0716 ID-0715 ID-0714 ID-0620 ID-0619	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972 953 / 952
MLH#1(A 配線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1720 ID-1719 ID-1718 ID-1620	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981	100nm) 二 配線ID ID-1316 ID-1315 ID-1314 ID-1220 ID-1219 ID-1218 ID-1217	<b>払抗値[Ω]</b> 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852	配線ID ID-1015 ID-1014 ID-1013 ID-1012 ID-1011 ID-0920 ID-0919	抵抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911	(一つの配線)に 配線)口 ロ-0717 ロ-0716 ロ-0715 ロ-0714 ロ-0620 ロ-0619 ロ-0618	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972 953 / 952 915 / 912
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1718 ID-1620 ID-1619	基抗值[Ω] 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911	記線ID ID-1316 ID-1315 ID-1315 ID-1314 ID-1220 ID-1219 ID-1218 ID-1217 ID-1216	抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794	<ul> <li>配線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> </ul>	抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750 713 / 713 677 / 673 637 / 636 955 / 954 913 / 911 873 / 875	(一つの配線)に 配線)口 ID-0717 ID-0716 ID-0715 ID-0714 ID-0620 ID-0619 ID-0618 ID-0617	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1718 ID-1620 ID-1619 ID-1618	基抗值[Ω] 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911 844 / 843	記線ID ID-1316 ID-1315 ID-1315 ID-1314 ID-1220 ID-1219 ID-1218 ID-1217 ID-1216 ID-1215	抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754	<ul> <li>配線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> </ul>	抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750 713 / 713 677 / 673 637 / 636 955 / 954 913 / 911 873 / 875 847 / 846	(一つの配線) 記線ID ID-0717 ID-0716 ID-0715 ID-0714 ID-0620 ID-0619 ID-0618 ID-0617 ID-0616	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1718 ID-1619 ID-1618 ID-1617	基抗值[Ω] 基抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911 844 / 843 798 / 798	IOOnm)         二           配線ID         ID-1316           ID-1315         ID-1315           ID-1314         ID-1220           ID-1219         ID-1218           ID-1217         ID-1216           ID-1215         ID-1214	<b>払抗値[Ω]</b> 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> </ul>	抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750 713 / 713 677 / 673 637 / 636 955 / 954 913 / 911 873 / 875 847 / 846 817 / 818	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0615</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972 953 / 952 915 / 912 874 / 869 214 / 213 761 / 760
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1520	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911 844 / 843 798 / 798 1014 / 1010	IOOnm)           配線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1220           ID-1218           ID-1218           ID-1215           ID-1214           ID-1213	<b>払抗値[Ω]</b> 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646	<ul> <li>配線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> </ul>	抵抗值[Ω] 816 / 814 749 / 750 713 / 713 677 / 673 637 / 636 955 / 954 913 / 911 873 / 875 847 / 846 817 / 818 772 / 771	(一つの配線): 記線ID ID-0717 ID-0716 ID-0715 ID-0714 ID-0620 ID-0619 ID-0618 ID-0617 ID-0616 ID-0615 ID-0520	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972 953 / 952 915 / 912 874 / 869 214 / 213 761 / 760 974 / 975
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1520 ID-1519	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911 844 / 843 798 / 798 1014 / 1010 943 / 944	IOOnm)         二           記線ID         ID-1316           ID-1315         ID-1314           ID-1220         ID-1218           ID-1218         ID-1217           ID-1216         ID-1215           ID-1214         ID-1213	<b>払抗値[Ω]</b> 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994	<ul> <li>配線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0914</li> </ul>	抵抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738	(一つの配線): 記線ID ID-0717 ID-0716 ID-0715 ID-0714 ID-0620 ID-0619 ID-0618 ID-0617 ID-0616 ID-0615 ID-0520 ID-0519	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972 953 / 952 915 / 912 874 / 869 214 / 213 761 / 760 974 / 975 949 / 946
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1519 ID-1518	AI 100nm/AI 指抗值[Ω] 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911 844 / 843 798 / 798 1014 / 1010 943 / 944 878 / 879	IOOnm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1200           ID-1218           ID-1218           ID-1216           ID-1215           ID-1214           ID-1213           ID-1211	抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936	<ul> <li>配線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0913</li> </ul>	抵抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709   838	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0518</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972 953 / 952 915 / 912 874 / 869 214 / 213 761 / 760 974 / 975 949 / 946 898 / 900
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1620 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1520 ID-1519 ID-1518 ID-1517	AI 100nm/AI 1 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911 844 / 843 798 / 798 1014 / 1010 943 / 944 878 / 879 822 / 840	IOOnm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1200           ID-1218           ID-1217           ID-1216           ID-1215           ID-1214           ID-1213           ID-1214           ID-1213           ID-1119           ID-1118	抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0912</li> </ul>	抵抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709   650 / 648   817	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0517</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972 953 / 952 915 / 912 874 / 869 214 / 213 761 / 760 974 / 975 949 / 946 898 / 900 865 / 864
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1510 ID-1518 ID-1516	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911 844 / 843 798 / 798 1014 / 1010 943 / 944 878 / 879 822 / 840 765 / 763	IOOnm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-120           ID-1218           ID-1218           ID-1216           ID-1215           ID-1214           ID-1215           ID-1214           ID-1215           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1119           ID-1117	抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0820</li> </ul>	抵抗值[Ω]     816 / 814     749 / 750     713 / 713     677 / 673     637 / 636     955 / 954     913 / 911     873 / 875     847 / 846     817 / 818     772 / 771     736 / 738     710 / 709     650 / 648     945 / 943	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 859 / 860 825 / 826 789 / 791 734 / 736 971 / 972 953 / 952 915 / 912 874 / 869 214 / 213 761 / 760 974 / 975 949 / 946 898 / 900 865 / 864 793 / 790
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1617 ID-1617 ID-1510 ID-1518 ID-1516 ID-1516 ID-1420	AI 100nm/AI 抵抗值[Ω] 802 / 804 878 / 875 810 / 809 523 / 521 862 / 865 802 / 804 982 / 981 910 / 911 844 / 843 798 / 798 1014 / 1010 943 / 944 878 / 879 822 / 840 765 / 763 1018 / 1020	IOOnm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-120           ID-1219           ID-1218           ID-1216           ID-1215           ID-1214           ID-1215           ID-1214           ID-1215           ID-1218           ID-1110           ID-1117           ID-1116	抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0820</li> <li>ID-0819</li> </ul>	抵抗值[Ω]     816 / 814     749 / 750     713 / 713     677 / 673     637 / 636     955 / 954     913 / 911     873 / 875     847 / 846     817 / 818     772 / 771     736 / 738     710 / 709     650 / 648     945 / 943     911 / 913	<ul> <li>つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0420</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1618 ID-1617 ID-1518 ID-1518 ID-1516 ID-1516 ID-1420 ID-1419	AI 100nm/AI           抵抗值[Ω]           802 / 804           878 / 875           810 / 809           523 / 521           862 / 865           802 / 804           982 / 981           910 / 911           844 / 843           798 / 798           1014 / 1010           943 / 944           878 / 879           822 / 840           765 / 763           1018 / 1020           959 / 960	IOOnm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1210           ID-1218           ID-1218           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1214           ID-1215           ID-1214           ID-1217           ID-1218           ID-1119           ID-1117           ID-1116           ID-1115	抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798 756 / 754	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0818</li> </ul>	抵抗値[Ω]     816 / 814     749 / 750     713 / 713     677 / 673     637 / 636     955 / 954     913 / 911     873 / 875     847 / 846     817 / 818     772 / 771     736 / 738     710 / 709     650 / 648     945 / 943     911 / 913     879 / 880	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0419</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> <li>925 / 927</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1619 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1510 ID-1518 ID-1517 ID-1516 ID-1419 ID-1418	AI 100nm/AI           抵抗値[Ω]           802 / 804           878 / 875           810 / 809           523 / 521           862 / 865           802 / 804           982 / 981           910 / 911           844 / 843           798 / 798           1014 / 1010           943 / 944           878 / 879           822 / 840           765 / 763           1018 / 1020           959 / 960           895 / 894	IOOnm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1210           ID-1218           ID-1218           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1214           ID-1215           ID-1110           ID-1119           ID-1116           ID-1115           ID-1114	<b>払抗値[Ω]</b> 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798 756 / 754 711 / 706	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0817</li> </ul>	基抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709   650 / 648   945 / 943   911 / 913   879 / 880   851 / 853	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0418</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> <li>925 / 927</li> <li>887 / 890</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1718 ID-1619 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1518 ID-1517 ID-1516 ID-1516 ID-1419 ID-1418 ID-1417	AI 100nm/AI           抵抗值[Ω]           802 / 804           878 / 875           810 / 809           523 / 521           862 / 865           802 / 804           982 / 981           910 / 911           844 / 843           798 / 798           1014 / 1010           943 / 944           878 / 879           822 / 840           765 / 763           1018 / 1020           959 / 960           895 / 894           840 / 848	IOOnm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1210           ID-1218           ID-1218           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1110           ID-1117           ID-1118           ID-1116           ID-1115           ID-1114	<b>生リア(④</b> 抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798 756 / 754 711 / 706 671 / 669	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1015</li> <li>ID-1014</li> <li>ID-1013</li> <li>ID-1012</li> <li>ID-1011</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0816</li> </ul>	基抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709   650 / 648   945 / 943   911 / 913   879 / 880   851 / 853   814 / 812	<ul> <li>つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0417</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> <li>925 / 927</li> <li>887 / 890</li> <li>811 / 817</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1618 ID-1617 ID-1518 ID-1517 ID-1516 ID-1516 ID-1419 ID-1418 ID-1417 ID-1416	AI 100nm/AI           抵抗値[Ω]           802 / 804           878 / 875           810 / 809           523 / 521           862 / 865           802 / 804           982 / 981           910 / 911           844 / 843           798 / 798           1014 / 1010           943 / 944           878 / 879           822 / 840           765 / 763           1018 / 1020           959 / 960           895 / 894           840 / 848           780 / 778	IOOnm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1210           ID-1218           ID-1218           ID-1216           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1216           ID-1217           ID-1110           ID-1119           ID-1118           ID-1116           ID-1115           ID-1114           ID-1113           ID-1112	<b>払抗値[Ω]</b> 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798 756 / 754 711 / 706 671 / 669 622 / 619	配線ID           ID-1015           ID-1014           ID-1012           ID-1011           ID-0920           ID-0918           ID-0918           ID-0916           ID-0915           ID-0913           ID-0912           ID-0818           ID-0818           ID-0816           ID-0815	基抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709    650 / 648   945 / 943   911 / 913   879 / 880   851 / 853   814 / 812   792 / 793	<ul> <li>つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0715</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0320</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> <li>925 / 927</li> <li>887 / 890</li> <li>811 / 817</li> <li>942 / 942</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1719 ID-1718 ID-1718 ID-1619 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1618 ID-1617 ID-1518 ID-1517 ID-1516 ID-1516 ID-1419 ID-1418 ID-1417 ID-1416 ID-1415	AI 100nm/AI           抵抗値[Ω]           802 / 804           878 / 875           810 / 809           523 / 521           862 / 865           802 / 804           982 / 981           910 / 911           844 / 843           798 / 798           1014 / 1010           943 / 944           878 / 879           822 / 840           765 / 763           1018 / 1020           959 / 960           895 / 894           840 / 848           780 / 778           730 / 728	100nm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1216           ID-1217           ID-1110           ID-1119           ID-1118           ID-1116           ID-1115           ID-1112           ID-1112	<b>払抗値[Ω]</b> 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798 756 / 754 711 / 706 671 / 669 622 / 619 993 / 992	配線ID           ID-1015           ID-1014           ID-1013           ID-1012           ID-1011           ID-0920           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0919           ID-0918           ID-0917           ID-0818           ID-0816           ID-0815           ID-0814	基抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709    650 / 648   945 / 943   911 / 913   879 / 880   851 / 853   814 / 812   792 / 793   748 / 746	<ul> <li>つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0320</li> <li>ID-0319</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> <li>925 / 927</li> <li>887 / 890</li> <li>811 / 817</li> <li>942 / 942</li> <li>903 / 935</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1819 ID-1719 ID-1718 ID-1619 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1510 ID-1519 ID-1518 ID-1517 ID-1516 ID-1516 ID-1419 ID-1418 ID-1417 ID-1416 ID-1415 ID-1320	AI 100nm/AI           抵抗値[Ω]           802 / 804           878 / 875           810 / 809           523 / 521           862 / 865           802 / 804           982 / 981           910 / 911           844 / 843           798 / 798           1014 / 1010           943 / 944           878 / 879           822 / 840           765 / 763           1018 / 1020           959 / 960           895 / 894           840 / 848           780 / 778           730 / 728           1015 / 1016	100nm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1218           ID-1218           ID-1218           ID-1110           ID-1118           ID-1118           ID-1116           ID-1115           ID-1114           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112	<b>エリア</b> (4) 抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798 756 / 754 711 / 706 671 / 669 622 / 619 993 / 992 944 / 942	配線D           ID-1015           ID-1014           ID-1013           ID-1012           ID-1011           ID-0920           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0819           ID-0818           ID-0816           ID-0815           ID-0814           ID-0813	基抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709    650 / 648   945 / 943   911 / 913   879 / 880   851 / 853   814 / 812   792 / 793   748 / 746   704 / 706	<ul> <li>つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0320</li> <li>ID-0318</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> <li>925 / 927</li> <li>887 / 890</li> <li>811 / 817</li> <li>942 / 942</li> <li>903 / 935</li> <li>840 / 821</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1720 ID-1719 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1510 ID-1519 ID-1518 ID-1517 ID-1516 ID-1516 ID-1419 ID-1418 ID-1417 ID-1416 ID-1415 ID-1320 ID-1319	AI 100nm/AI           抵抗値[Ω]           802 / 804           878 / 875           810 / 809           523 / 521           862 / 865           802 / 804           982 / 981           910 / 911           844 / 843           798 / 798           1014 / 1010           943 / 944           878 / 879           822 / 840           765 / 763           1018 / 1020           959 / 960           895 / 894           840 / 848           780 / 778           730 / 728           1015 / 1016           963 / 958	100nm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1218           ID-1218           ID-1110           ID-1118           ID-1116           ID-1116           ID-1115           ID-1114           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1018	<b>エリア</b> (4) 抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798 756 / 754 711 / 706 671 / 669 622 / 619 993 / 992 944 / 942 901 / 902	配線D           ID-1015           ID-1013           ID-1012           ID-1011           ID-0920           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0919           ID-0819           ID-0818           ID-0816           ID-0815           ID-0814           ID-0813	基抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709    650 / 648   945 / 943   911 / 913   879 / 880   851 / 853   814 / 812   792 / 793   748 / 746   704 / 706   964 / 962	<ul> <li>つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0320</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0220</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> <li>925 / 927</li> <li>887 / 890</li> <li>811 / 817</li> <li>942 / 942</li> <li>903 / 935</li> <li>840 / 821</li> <li>880 / 882</li> </ul>
MLH#1(A 記線ID ID-1920 ID-1820 ID-1820 ID-1719 ID-1718 ID-1718 ID-1610 ID-1619 ID-1618 ID-1617 ID-1618 ID-1617 ID-1518 ID-1517 ID-1516 ID-1516 ID-1419 ID-1418 ID-1417 ID-1416 ID-1415 ID-1310	AI 100nm/AI           抵抗値[Ω]           802 / 804           878 / 875           810 / 809           523 / 521           862 / 865           802 / 804           982 / 981           910 / 911           844 / 843           798 / 798           1014 / 1010           943 / 944           878 / 879           822 / 840           765 / 763           1018 / 1020           959 / 960           895 / 894           840 / 848           780 / 778           730 / 728           1015 / 1016           963 / 958           919 / 920	100nm)           記線ID           ID-1316           ID-1315           ID-1314           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1217           ID-1218           ID-1218           ID-1218           ID-1110           ID-1118           ID-1116           ID-1116           ID-1117           ID-1118           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1112           ID-1010           ID-10110	<b>エリア</b> (4) 抵抗値[Ω] 786 / 788 749 / 751 690 / 686 1000 / 1003 948 / 951 943 / 936 855 / 852 793 / 794 752 / 754 695 / 697 649 / 646 991 / 994 937 / 936 900 / 901 843 / 846 799 / 798 756 / 754 711 / 706 671 / 669 622 / 619 993 / 992 944 / 942 901 / 902 873 / 871	配線D           ID-1015           ID-1013           ID-1012           ID-1011           ID-0920           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0918           ID-0918           ID-0917           ID-0818           ID-0819           ID-0816           ID-0816           ID-0814           ID-0813           ID-0720           ID-0719	基抗值[Ω]   816 / 814   749 / 750   713 / 713   677 / 673   637 / 636   955 / 954   913 / 911   873 / 875   847 / 846   817 / 818   772 / 771   736 / 738   710 / 709    650 / 648   945 / 943   911 / 913   879 / 880   851 / 853   814 / 812   792 / 793   748 / 746   704 / 706   964 / 962   926 / 928	<ul> <li>つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0716</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0320</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0219</li> <li>ID-0219</li> </ul>	<ul> <li>こつき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>859 / 860</li> <li>825 / 826</li> <li>789 / 791</li> <li>734 / 736</li> <li>971 / 972</li> <li>953 / 952</li> <li>915 / 912</li> <li>874 / 869</li> <li>214 / 213</li> <li>761 / 760</li> <li>974 / 975</li> <li>949 / 946</li> <li>898 / 900</li> <li>865 / 864</li> <li>793 / 790</li> <li>960 / 960</li> <li>925 / 927</li> <li>887 / 890</li> <li>811 / 817</li> <li>942 / 942</li> <li>903 / 935</li> <li>840 / 821</li> <li>880 / 882</li> <li>815 / 812</li> </ul>

図 6.2: MLR#1の常温時の配線抵抗結果その 2。

MLR#2	(Al 50nm/Al	100nm) 🛙	エリア①		*	一つの配線に	こつき2回ずつ測定
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]
ID-0119	1428 / 1426	ID-0313	1416 / 1424	ID-0510	1414/1416	ID-0407	-
ID-0218	1555 / 1554	ID-0213	1324 / 1329	ID-0410	1342 / 1346	ID-0307	-
ID-0118	1443 / 1446	ID-0113	1226 / 1229	ID-0310	1296 / 1293	ID-0207	-
ID-0317	1677 / 1674	ID-0812	427 / 446	ID-0210	1207 / 1208	ID-0107	-
ID-0217	1542 / 1540	ID-0712	00 / 00	ID-0110	1379 / 1387	ID-0606	-
ID-0117	43  /  434	ID-0612	00 / 00	ID-0909		ID-0506	-
ID-0416	1760 / 1759	ID-0512	1514/1516	ID-0809	-	ID-0406	-
ID-0316	1634 / 1637	ID-0412	1420 / 1418	ID-0709		ID-0306	-
ID-0216	1518/1515	ID-0312	1335 /1336	ID-0609	-	ID-0206	-
ID-0116	1412/1415	ID-0212	1249 / 1246	ID-0509	-	ID-0106	-
ID-0515	1817/1812	ID-0112	1164 / 1165	ID-0409		ID-0505	1487/1521
ID-0415	1690 / 1694	ID-0911	1775 / 1772	ID-0309	-	ID-0405	1647/1588
ID-0315	1574 / 1571	ID-0811	1696 / 1698	ID-0209	-	ID-0305	1658/1670
ID-0215	1460 / 1464	ID-0711	1602 / 1606	ID-0109	-	ID-0205	1594/1584
ID-0115	1357 / 1359	ID-0611	1527 / 1520	ID-0808	-	ID-0105	1451/1441
ID-0614	1835 / 1837	ID-0511	1442 /1432	ID-0708	<u> </u>	ID-0404	1776/1767
ID-0514	1715 / 1712	ID-0411	1347 / 1349	ID-0608	-	ID-0304	1684/1683
ID-0414	1668 / 1677	ID-0311	1275 / 1273	ID-0508	-	ID-0204	1601/1608
ID-0314	1502 / 1501	ID-0211	1200 / 1196	ID-0408	1	ID-0104	1471/1472
ID-0214	1392 / 1395	ID-0111	1117/1109	ID-0308	<b>-</b>	ID-0303	1701/1698
ID-0114	1297 / 1305	ID-1010	1762 / 1765	ID-0208	->	ID-0203	1441/1441
ID-0713	1822 / 1830	ID-0910	1687 / 1683	ID-0108	-	ID-0103	1477/1475
ID-0613	1721 / 1717	ID-0810	1610/1613	ID-0707		ID-0202	1605/1609
ID-0513	1637 / 1636	ID-0710	1545 / 1543	ID-0607	1	ID-0102	1462/1461
ID0413	1517/1512	ID-0610	1472 / 1473	ID-0507	-	ID-0101	1427/1433
MLR#2	(Al 50nm/Al	100nm) :	エリア②		*	一つの配線に	こつき2回ずつ測定
MLR#2 配線ID	(Al 50nm/Al 抵抗値[Ω]	<b>100nm)</b> 配線ID	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω]	配線ID	» 抵抗值[ <b>Ω</b> ]	(一つの配線) 配線ID	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω]
MLR#2 配線ID ID-0102	<b>(AI 50nm/AI</b> 抵抗值[Ω] 2367/2367	100nm) 配線ID ID-0308	エリア② 抵抗値[Ω]  4 2/ 408	配線ID ID-0511	» 抵抗值[Ω] I36I/I362	(一つの配線) 配線ID ID-0414	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203	(AI 50nm/AI 抵抗值[Ω] 2367/2367 1590/1580	100nm) 配線ID ID-0308 ID-0208	エリア② 抵抗値[Ω]  4 2/ 408  307/ 302	配線ID ID-0511 ID-0411	※ 抵抗值[Ω] I361/I362 I311/I312	一つの配線に 配線ID ID-0414 ID-0314	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω]  487/1519  441/1448
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103	(AI 50nm/AI 抵抗值[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470	100nm) 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108	エリア② 抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957	一つの配線に 配線ID ID-0414 ID-0314 ID-0214	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304	(AI 50nm/AI 抵抗值[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693	100nm) 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158	(一つの配線) 配線ID ID-0414 ID-0314 ID-0214 ID-0114	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237
<b>MLR#2</b> 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0304 ID-0204	(AI 50nm/AI 抵抗值[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570	100nm) 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - -	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0111	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0104	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450	100nm) - 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709 ID-0609	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - -	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0111</li> <li>ID-0912</li> </ul>	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 -	<ul> <li>一つの配線は</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - ∞/∞
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778	100nm) 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709 ID-0609 ID-0509	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - -	(一つの配線) 配線ID ID-0414 ID-0314 ID-0214 ID-0214 ID-0615 ID-0615 ID-0515 ID-0415	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - 。 。 (∞)(∞ 1543/1541
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0304 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664	100nm) 配線ID ID-0308 ID-0208 ID-0108 ID-0809 ID-0709 ID-0609 ID-0509 ID-0409	<b>エリア②</b> 抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484 1391/1398	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812 ID-0712	※ 抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - -	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0114</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0205	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0709 D-0609 D-0509 D-0509 D-0409 D-0309	<b> 抵抗値[Ω]</b> 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0912 ID-0812 ID-0612	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - - - -	(一つの配線) 配線ID ID-0414 ID-0314 ID-0214 ID-0214 ID-0615 ID-0615 ID-0515 ID-0415 ID-0315 ID-0215	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0709 D-0609 D-0509 D-0509 D-0409 D-0309 D-0209	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0912 ID-0812 ID-0612 ID-0612 ID-0512	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - - 5.93M/5.94M	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0709 D-0609 D-0509 D-0509 D-0409 D-0309 D-0309 D-0209 D-0109	玉リア② 抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0912 ID-0812 ID-0612 ID-0612 ID-0512 ID-0412	抵抗値[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - 5.93M/5.94M 1337/1327	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0615</li> <li>D-0515</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0406	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0709 D-0609 D-0509 D-0409 D-0309 D-0309 D-0209 D-0109 D-0109	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 11146/1140	配線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0912 ID-0812 ID-0612 ID-0612 ID-0512 ID-0412 ID-0312	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - - - - - - - - - - -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0416</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0306	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0609 D-0609 D-0509 D-0409 D-0409 D-0309 D-0309 D-0209 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 11146/1140	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812 ID-0812 ID-0612 ID-0612 ID-0512 ID-0412 ID-0312 ID-0212	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - - - - - - - - - - -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0316</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0506 ID-0306 ID-0306 ID-0206	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0609 D-0509 D-0409 D-0409 D-0309 D-0309 D-0209 D-0109 D-0109 D-0109 D-0101 D-0810	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 11146/1140	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-0511</li> <li>ID-0411</li> <li>ID-0311</li> <li>ID-0211</li> <li>ID-0111</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0812</li> <li>ID-0712</li> <li>ID-0612</li> <li>ID-0512</li> <li>ID-0412</li> <li>ID-0312</li> <li>ID-0212</li> <li>ID-0212</li> <li>ID-0112</li> </ul>	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - 5.93M/5.94M 1337/1327 1266/1269 1206/1205 1111/1117	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0216</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530 1462/1465
MLR#2	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0609 D-0509 D-0409 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0308 D-0308 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-0409 D-04	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812 ID-0612 ID-0612 ID-0612 ID-0412 ID-0312 ID-0212 ID-0112 ID-0813	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - 5.93M/5.94M 1337/1327 1266/1269 1206/1205 1111/1117 -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0615</li> <li>D-0515</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> <li>D-0316</li> <li>D-0216</li> <li>D-0116</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0203 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0406 ID-0306 ID-0306 ID-0206 ID-0106 ID-0607	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0609 D-0509 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0209 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0109 D-0409 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0108 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0109 D-0010 D-0109 D-0010 D-0109 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010 D-0010	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 11146/1140	記線ID ID-0511 ID-0411 ID-0311 ID-0211 ID-0211 ID-0912 ID-0812 ID-0612 ID-0612 ID-0512 ID-0412 ID-0312 ID-0212 ID-0212 ID-0112 ID-0813 ID-0713	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - - - - - - -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0615</li> <li>D-0515</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> <li>D-0316</li> <li>D-0216</li> <li>D-0116</li> <li>D-0417</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530 1462/1465 1337/1331 1628/1633
MLR#2	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360	100nm) 記線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0609 D-0509 D-0409 D-0309 D-0409 D-0309 D-0209 D-0109 D-0109 D-0109 D-0100 D-0810 D-0810 D-0510 D-0510 D-0410	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140 - - - 1443/1440 1321/1320	<ul> <li>記線ID</li> <li>記令目</li> <li>日-0511</li> <li>日-0411</li> <li>日-0311</li> <li>日-0211</li> <li>日-0111</li> <li>日-0912</li> <li>日-0912</li> <li>日-0812</li> <li>日-0612</li> <li>日-0512</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0312</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0413</li> <li>日-0713</li> <li>日-0613</li> </ul>	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - 5.93M/5.94M 1337/1327 1266/1269 1206/1205 1111/1117 - - - - - - - - -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0615</li> <li>D-0515</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> <li>D-0316</li> <li>D-0216</li> <li>D-0116</li> <li>D-0317</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530 1462/1465 1337/1331 1628/1633 1564/1567
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0306 ID-0306 ID-0306 ID-0306 ID-0206 ID-0106 ID-0207 ID-0407	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360	100nm) 配線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0609 D-0509 D-0409 D-0309 D-0209 D-0109 D-0109 D-0109 D-0100 D-0810 D-0810 D-0510 D-0510 D-0410 D-0310	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140 - - - 1443/1440 1321/1320 1252/11250	<ul> <li>記線ID</li> <li>記令目</li> <li>日-0511</li> <li>日-0411</li> <li>日-0311</li> <li>日-0211</li> <li>日-0912</li> <li>日-0912</li> <li>日-0812</li> <li>日-0712</li> <li>日-0612</li> <li>日-0512</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0412</li> <li>日-0413</li> <li>日-0713</li> <li>日-0613</li> <li>日-0613</li> <li>日-0513</li> </ul>	抵抗值[Ω] 1361/1362 1311/1312 1002/957 1153/1158 1077/1071 - - - 5.93M/5.94M 1337/1327 1266/1269 1206/1205 1111/1117 - - 1472/1475	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0515</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> <li>D-0316</li> <li>D-0216</li> <li>D-0417</li> <li>D-0317</li> <li>D-0217</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - ∞/∞ 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530 1462/1465 1337/1331 1628/1633 1564/1567 1489/1487
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0104 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0306 ID-0306 ID-0206 ID-0106 ID-0206 ID-0106 ID-0207 ID-0407 ID-0307	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360 - 629/655 1603/1604 1500/1499	100nm) 記線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0609 D-0509 D-0409 D-0309 D-0209 D-0109 D-0109 D-0109 D-0100 D-0810 D-0610 D-0510 D-0510 D-0410 D-0310 D-0210	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140 - - - 1443/1440 1321/1320 1252/11250 1161/1160	<ul> <li>記線ID</li> <li>記令目</li> <li>日-0511</li> <li>日-0411</li> <li>日-0311</li> <li>日-0211</li> <li>日-0211</li> <li>日-0912</li> <li>日-0912</li> <li>日-0812</li> <li>日-0612</li> <li>日-0612</li> <li>日-0512</li> <li>日-0412</li> <li>日-0312</li> <li>日-0412</li> <li>日-0112</li> <li>日-0813</li> <li>日-0713</li> <li>日-0613</li> <li>日-0513</li> <li>日-0513</li> <li>日-0413</li> </ul>	抵抗值[Ω]     1361/1362     1311/1312     1002/957     1153/1158     1077/1071     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0515</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> <li>D-0416</li> <li>D-0316</li> <li>D-0216</li> <li>D-0417</li> <li>D-0317</li> <li>D-0217</li> <li>D-0117</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0406 ID-0306 ID-0306 ID-0206 ID-0106 ID-0207 ID-0307 ID-0307 ID-0207	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360 - 629/655 1603/1604 1500/1499 1393/1402	100nm)           配線回           D-0308           D-0208           D-0108           D-0709           D-0609           D-0509           D-0409           D-0308           ID-0108           D-0409           D-0309           ID-0409           ID-0109           ID-0109           ID-0109           ID-0510           ID-0510           ID-0410           ID-0310           ID-0210	<b> 抵抗値[Ω]</b> 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140 - - - 1443/1440 1321/1320 1252/11250 1161/1160 1075/1073 - - - - - - - - -	<ul> <li>記線ID</li> <li>記令目</li> <li>日-0511</li> <li>日-0411</li> <li>日-0311</li> <li>日-0211</li> <li>日-0211</li> <li>日-0912</li> <li>日-0912</li> <li>日-0812</li> <li>日-0612</li> <li>日-0612</li> <li>日-0512</li> <li>日-0412</li> <li>日-0312</li> <li>日-0412</li> <li>日-0112</li> <li>日-0813</li> <li>日-0713</li> <li>日-0613</li> <li>日-0513</li> <li>日-0413</li> <li>日-0313</li> <li>日-0413</li> <li>日-0313</li> </ul>	抵抗值[Ω]     1361/1362     1311/1312     1002/957     1153/1158     1077/1071     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0515</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> <li>D-0416</li> <li>D-0316</li> <li>D-0216</li> <li>D-0417</li> <li>D-0317</li> <li>D-0217</li> <li>D-0318</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0105 ID-0506 ID-0406 ID-0306 ID-0206 ID-0106 ID-0206 ID-0106 ID-0207 ID-0307 ID-0207 ID-0207 ID-0207	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360 - 629/655 1603/1604 1500/1499 1393/1402 832/826	100nm) 記線D D-0308 D-0208 D-0108 D-0809 D-0709 D-0609 D-0509 D-0409 D-0309 D-0209 D-0109 D-0100 D-0810 D-0510 D-0410 D-0310 D-0210 D-0110 D-0110	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140 - - - 1443/1440 1321/1320 1252/11250 1161/1160 1075/1073 -	<ul> <li>記線ID</li> <li>記のの目的</li> <li>目のの目前</li> <li>目前</li> <li>目前</li></ul>	抵抗值[Ω]     1361/1362     1311/1312     1002/957     1153/1158     1077/1071     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0216</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0317</li> <li>ID-0217</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0218</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - 00/00 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530 1462/1465 1337/1331 1628/1633 1564/1567 1489/1487 1361/1362 1573/1572 1500/1495
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0406 ID-0306 ID-0306 ID-0206 ID-0106 ID-0307 ID-0407 ID-0307 ID-0307 ID-0207 ID-0207 ID-0207	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360 - 629/655 1603/1604 1500/1499 1393/1402 832/826	100nm)           配線回           D-0308           D-0208           D-0108           D-0709           D-0609           D-0409           D-0308           D-0409           D-0409           D-0108           D-0409           D-0409           D-0509           D-0109           D-0109           D-0109           D-0109           D-01010           D-0510           D-0410           D-0310           D-0410           D-0101           D-0101           D-0101           D-0110           D-0110           D-0110	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140 - - - 1443/1440 1321/1320 1252/11250 1161/1160 1075/1073 - -	<ul> <li>記線ID</li> <li>記のの目的</li> <li>目のの目前</li> </ul>	抵抗值[Ω]     1361/1362     1311/1312     1002/957     1153/1158     1077/1071     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0515</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> <li>D-0416</li> <li>D-0316</li> <li>D-0216</li> <li>D-0417</li> <li>D-0317</li> <li>D-0217</li> <li>D-0318</li> <li>D-0218</li> <li>D-0118</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - 00/00 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530 1462/1465 1337/1331 1628/1633 1564/1567 1489/1487 1361/1362 1573/1572 1500/1495 1381/1360
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0405 ID-0105 ID-0105 ID-0506 ID-0406 ID-0306 ID-0406 ID-0306 ID-0206 ID-0106 ID-0407 ID-0507 ID-0407 ID-0307 ID-0307 ID-0207 ID-0207 ID-0107 ID-0708 ID-0608	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360 - 629/655 1603/1604 1500/1499 1393/1402 832/826	100nm)           配線回           D-0308           D-0208           D-0108           D-0709           D-0609           D-0409           D-0308           D-0409           D-0409           D-0108           D-0409           D-0409           D-0509           D-0409           D-0309           D-0209           D-0109           D-0410           D-0510           D-0410           D-0310           D-0410           D-0101           D-0101           D-0101           D-0110           D-0110           D-0111           D-0111	抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140 - - - 1443/1440 1321/1320 1252/11250 1161/1160 1075/1073 - - -	<ul> <li>記線ID</li> <li>記のの目的</li> <li>目のの目前</li> </ul>	抵抗值[Ω]     1361/1362     1311/1312     1002/957     1153/1158     1077/1071     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線D</li> <li>D-0414</li> <li>D-0314</li> <li>D-0214</li> <li>D-0615</li> <li>D-0615</li> <li>D-0415</li> <li>D-0415</li> <li>D-0415</li> <li>D-0315</li> <li>D-0215</li> <li>D-0115</li> <li>D-0516</li> <li>D-0416</li> <li>D-0316</li> <li>D-0417</li> <li>D-0317</li> <li>D-0217</li> <li>D-0318</li> <li>D-0218</li> <li>D-0118</li> <li>D-0219</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - 0 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530 1462/1465 1337/1331 1628/1633 1564/1567 1489/1487 1361/1362 1573/1572 1500/1495 1381/1360 1490/1493
MLR#2 配線ID ID-0102 ID-0103 ID-0103 ID-0304 ID-0204 ID-0204 ID-0104 ID-0405 ID-0305 ID-0305 ID-0205 ID-0105 ID-0506 ID-0406 ID-0306 ID-0306 ID-0206 ID-0106 ID-0206 ID-0106 ID-0307 ID-0407 ID-0307 ID-0307 ID-0307 ID-0207 ID-0207 ID-0107 ID-0708 ID-0508	(AI 50nm/AI 抵抗値[Ω] 2367/2367 1590/1580 1464/1470 1696/1693 1573/1570 1468/1450 1778/1778 1679/1664 1545/1540 1428/14218 1816/1817 1700/1702 1582/1576 1465/1472 1368/1360 - 629/655 1603/1604 1500/1499 1393/1402 832/826 - - 1599/1598	100nm)           配線回           D-0308           D-0208           D-0108           D-0709           D-0609           D-0409           D-0308           D-0409           D-0409           D-0108           D-0409           D-0409           D-0509           D-0409           D-0309           D-0209           D-0109           D-0410           D-0510           D-0410           D-0310           D-0410           D-0310           D-0410           D-0410           D-0310           D-0410           D-0410           D-0310           D-0410	<b>王リア②</b> 抵抗値[Ω] 1412/1408 1307/1302 1214/1212 - - - 1478/1484 1391/1398 1305/1308 448/477 1146/1140 - - - 1443/1440 1321/1320 1252/11250 1161/1160 1075/1073 - - - - - - - - - - - - -	<ul> <li>記線ID</li> <li>記のの目</li> <li>目のの目</li> <li>日のの目</li>     &lt;</ul>	抵抗值[Ω]     1361/1362     1311/1312     1002/957     1153/1158     1077/1071     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -     -	<ul> <li>つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0414</li> <li>ID-0314</li> <li>ID-0214</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0515</li> <li>ID-0415</li> <li>ID-0315</li> <li>ID-0215</li> <li>ID-0115</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0416</li> <li>ID-0316</li> <li>ID-0216</li> <li>ID-0116</li> <li>ID-0117</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0218</li> <li>ID-0219</li> <li>ID-0119</li> </ul>	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 1487/1519 1441/1448 1346/1347 1234/1237 - 0 1543/1541 1479/1478 1413/1415 1291/1289 1662/1663 1603/1602 1533/1530 1462/1465 1337/1331 1628/1633 1564/1567 1489/1487 1361/1362 1573/1572 1500/1495 1381/1360 1490/1493 1353/1355

図 6.3: MLR#2の常温時の配線抵抗結果その1。基板一部破損により未測定あり。

MLR#2	(Al 50nm/Al	100nm) 🗄	エリア③			※一つの配線に	こつき2回ずつ測定
配線ID	· 抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]
ID-0220	1375/1368	ID-0818	-	ID-1116	-	ID-1417	-
ID-0319	1472/1477	ID-0819	-	ID-1117	° <b>_</b> •	ID-1418	-
ID-0320	1353/1361	ID-0820	-	ID-1118	-	ID-1419	-
ID-0418	1572/1570	ID-0913	-	ID-1119	•	ID-1420	-
ID-0419	1458/1456	ID-0914	-	ID-1120		ID-1515	-
ID-0420	1354/1373	ID-0915	-	ID-1212	- 1	ID-1516	-
ID-0517	1659/1657	ID-0916	-	ID-1213	- 1	ID-1517	-
ID-0518	1541/1544	ID-0917	-	ID-1214	-	ID-1518	-
ID-0519	1437/1424	ID-0918	-	ID-1215	· •	ID-1519	-
ID-0520	1323/1324	ID-0919	-	ID-1216	-	ID-1520	-
ID-0616	-	ID-0920	-	ID-1217	-	ID-1616	-
ID-0617	-	ID-1012	-	ID-1218	-	ID-1617	-
ID-0618	-	ID-1013	-	ID-1219	- 1	ID-1618	-
ID-0619	-	ID-1014	-	ID-1220	- 1	ID-1619	-
ID-0620	-	ID-1015	-	ID-1313	-	ID-1620	-
ID-0715	14	ID-1016	-	ID-1314	<u>_</u> -	ID-1717	-
ID-0716	-	ID-1017	-	ID-1315	-	ID-1718	-
ID-0717	-	ID-1018	-	ID-1316		ID-1719	-
ID-0718	-	ID-1019	-	ID-1317	-	ID-1720	-
ID-0719	-	ID-1020	-	ID-1318	-	ID-1818	-
ID-0720	-	ID-1111	-	ID-1319	-	ID-1819	-
ID-0814	-	ID-1112	-	ID-1320	-	ID-1820	-
ID-0815	1	ID-1113	-	ID-1414		ID-1919	-
ID-0816	-	ID-1114	-	ID-1415		ID-1920	-
ID-0817	-	ID-1115	-	ID-1416		ID-2020	-
MLR#2	(Al 50nm/Al	100nm) :	エリア④			※一つの配線に	こつき2回ずつ測定
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]
ID-1920	-	ID-1318		ID-1016	-	ID-0717	-
ID-1819	121	ID-1319	2	ID-1017	<u>_</u>	ID-0718	-
ID-1820	-	ID-1320	-	ID-1018		ID-0719	-
ID-1718	-	ID-1213	-	ID-1019	-	ID-0720	-
ID-1719	-	ID-1214	-	ID-1020	-	ID-0615	-
ID-1720	-	ID-1215	2	ID-0912	-	ID-0616	-
ID-1617	-	ID-1216	-	ID-0913	-	ID-0617	-
ID-1618	-	ID-1217	-	ID-0914	-	ID-0618	-
ID-1619		ID-1218	2	ID-0915	<u> </u>	ID-0619	-
ID-1620	-	ID-1219	-	ID-0916		ID-0620	-
ID-1516	· - ·	ID-1220	-	ID-0917	-	ID-0516	-
ID-1517		ID-1112	-	ID-0918		ID-0517	-
ID-1518	-	ID-1113	-	ID-0919	-	ID-0518	-
ID-1519	-	ID-1114	-	ID-0920	- 1	ID-0519	-
ID-1520	-	ID-1115	2	ID-0813	-	ID-0520	-
ID-1415	-	ID-1116	2	ID-0814	-	ID-0417	-
ID-1416	-	ID-1117	-	ID-0815	-	ID-0418	-
ID 1417			_	ID 0816			

図 6.4: MLR#2の常温時の配線抵抗結果その 2。基板一部破損により未測定あり。

-

-

-

_

-

-

-

ID-0817

ID-0818

ID-0819

ID-0820

ID-0714

ID-0715

ID-0716

-

-

-

_

-

-

-

ID-0420

ID-0318

ID-0319

ID-0320

ID-0219

ID-0220

ID-0120

-

-

-

_

_

-

-

ID-1119

ID-1120

ID-1011

ID-1012

ID-1013

ID-1014

ID-1015

ID-1418

ID-1419

ID-1420

ID-1314

ID-1315

ID-1316

ID-1317

-

-

-

-

-

-

-

## MLR#3(Nb 50nm/Al 100nm) エリア①

※一つの配線につき2回ずつ測定

配線ID	抵抗值[Ω]	配線ID	抵抗值[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗值[Ω]
ID-0119	4465 / 5388	ID-0313	4377 / 4393	ID-0510	1887 / 1907	ID-0407	4784 / 4769
ID-0218	4841 / 4829	ID-0213	4079 / 4094	ID-0410	4190 / 4177	ID-0307	4570 / 4590
ID-0118	4476 / 4492	ID-0113	3779 / 3798	ID-0310	4005 / 4934	ID-0207	1038 / 1051
ID-0317	5161 / 5173	ID-0812	5666 / 5648	ID-0210	3741 / 3724	ID-0107	1038 / 1055
ID-0217	4857 / 4872	ID-0712	5322 / 5339	ID-0110	3448 / 3466	ID-0606	1033 / 1018
ID-0117	4492 / 4477	ID-0612	5045 / 5023	ID-0909	5418 / 5407	ID-0506	1336 / 1349
ID-0416	5429 / 5411	ID-0512	4703 / 4720	ID-0809	5171/5164	ID-0406	1420 / 1405
ID-0316	5060 / 5044	ID-0412	4444 / 4446	ID-0709	4940 / 4926	ID-0306	1468 / 1374
ID-0216	4737 / 4710	ID-0312	4126 / 4144	ID-0609	4733 / 4748	ID-0206	1471 / 1559
ID-0116	4371 / 4355	ID-0212	3998 / 3980	ID-0509	4525 / 4505	ID-0106	6060 / 6130
ID-0515	5580 / 5598	ID-0112	3565 / 3587	ID-0409	4504 / 4523	ID-0505	5407 / 5397
ID-0415	5216 / 5231	ID-0911	5546 / 5530	ID-0309	4092 / 4109	ID-0405	5188 / 5208
ID-0315	4873 / 4890	ID-0811	5241 / 5264	ID-0209	3880 / 3905	ID-0305	6700 / 6720
ID-0215	4526 / 4546	ID-0711	4982 / 5001	ID-0109	3589 / 3578	ID-0205	4782 / 4768
ID-0115	4237 / 4221	ID-0611	4725 / 4747	ID-0808	5296 / 5316	ID-0105	4377 / 4393
ID-0614	5613 / 5630	ID-0511	4530 / 4509	ID-0708	5112 / 5098	ID-0404	5311 / 5299
ID-0514	5316 / 5295	ID-0411	4222 / 4237	ID-0608	4907 / 4929	ID-0304	5108 / 5122
ID-0414	4974 / 4987	ID-0311	3994 / 3977	ID-0508	4744 / 4722	ID-0204	4900 / 4879
ID-0314	4640 / 4625	ID-0211	3735 / 3753	ID-0408	4524 / 4540	ID-0104	4468 / 4484
ID-0214	4318 / 4339	ID-0111	3434 / 3450	ID-0308	4339 / 4322	ID-0303	5160 / 5181
ID-0114	4046 / 4030	ID-1010	5613 / 5605	ID-0208	4107 / 4126	ID-0203	4925 / 4906
ID-0713	5628 / 5649	ID-0910	5364 / 5372	ID-0108	3793 / 3813	ID-0103	4515 / 4535
ID-0613	5313 / 5332	ID-0810	5113/5101	ID-0707	5363 / 5379	ID-0202	4875 / 4855
ID-0513	4986 / 5001	ID-0710	4868 / 4880	ID-0607	5163 / 5145	ID-0102	4530 / 4512
ID0413	4704 / 4686	ID-0610	4674 / 463	ID-0507	4952 / 4973	ID-0101	4372 / 4385

### MLR#3(Nb 50nm/Al 100nm) エリア②

※一つの配線につき2回ずつ測定

	U JUIII/AI	- (100					
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗值[Ω]
ID-0102	4503 / 4517	ID-0308	4475 / 4495	ID-0511	4525 / 4544	ID-0414	4951 / 4936
ID-0203	4909 / 4895	ID-0208	4191 / 4175	ID-0411	4321 / 4305	ID-0314	4759 / 4736
ID-0103	4572 / 4589	ID-0108	3870 / 3886	ID-0311	4076 / 4089	ID-0214	4542 / 4525
ID-0304	5463 / 5346	ID-0809	5686 / 5665	ID-0211	3857 / 3840	ID-0114	4198 / 4178
ID-0204	4910 / 4897	ID-0709	1245 / 1179	ID-0111	3595 / 3607	ID-0615	5595 / 5571
ID-0104	4782 / 4765	ID-0609	4469 / 4453	ID-0912	5489 / 5476	ID-0515	5404 / 5415
ID-0405	5493 / 5510	ID-0509	4820 / 4453	ID-0812	5271 / 5288	ID-0415	5192 / 5208
ID-0305	5545 / 5537	ID-0409	4532 / 4516	ID-0712	5164 / 5153	ID-0315	4981 / 5001
ID-0205	4770 / 4797	ID-0309	4236 / 4256	ID-0612	4867 / 4884	ID-0215	4777 / 4760
ID-0105	4447 / 4432	ID-0209	3996 / 3982	ID-0512	4741 / 4757	ID-0115	4480 / 4501
ID-0506	5773 / 5787	ID-0109	3675 / 3682	ID-0412	4428 / 4449	ID-0516	5625 / 5605
ID-0406	5439 / 5422	ID-0910	5645 / 5632	ID-0312	4247 / 4232	ID-0416	5390 / 5408
ID-0306	4955 / 4972	ID-0810	5693 / 5705	ID-0212	4007 / 4022	ID-0316	5198 / 5172
ID-0206	4635 / 4619	ID-0710	5111 / 5096	ID-0112	3747 / 3728	ID-0216	4951 / 4971
ID-0106	4279 / 4295	ID-0610	4842 / 4858	ID-0813	5460 / 5476	ID-0116	4569 / 4551
ID-0607	5739 / 5723	ID-0510	4608 / 4592	ID-0813	5271 / 5258	ID-0417	5527 / 5552
ID-0507	5415 / 5399	ID-0410	4328 / 4345	ID-0813	5050 / 5072	ID-0317	5328 / 5306
ID-0407	5050 / 5082	ID-0310	4091 / 4072	ID-0813	4882 / 4863	ID-0217	5108 / 5134
ID-0307	4769 / 4751	ID-0210	3917 / 3934	ID-0813	4672 / 4698	ID-0117	4768 / 4749
ID-0207	4408 / 4426	ID-0110	3548 / 3533	ID-0813	4487 / 4469	ID-0318	5357 / 5380
ID-0107	4112 / 4093	ID-1011	5682 / 5695	ID-0813	4258 / 4274	ID-0218	5140 / 5118
ID-0708	5718 / 5737	ID-0911	5477 / 5466	ID-0813	3940 / 3925	ID-0118	4717 / 4745
ID-0608	5456 / 5435	ID-0811	5206 / 5212	ID-0714	5512 / 5532	ID-0219	5109 / 5091
ID-0508	5114/5135	ID-0711	5035 / 5047	ID-0614	5371 / 5354	ID-0119	4794 / 4817
ID-0408	4812 / 4789	ID-0611	4771 / 4757	ID-0514	5137 / 5149	ID-0120	4686 / 4656

図 6.5: MLR#3の常温時の配線抵抗結果その1。

MLR#3(I	Nb 50nm/Al	100nm) 🏻	Lリア③		×	(一つの配線)	こつき2回ずつ測定
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]
ID-0220	4762 / 4778	ID-0818	5685 / 4671	ID-1116	4646 / 4660	ID-1417	5060 / 5037
ID-0319	5187 / 5137	ID-0819	4360 / 4342	ID-1117	4433 / 4419	ID-1418	4829 / 4851
ID-0320	4774 / 4791	ID-0820	4053 / 4015	ID-1118	4189 / 4209	ID-1419	4650 / 4636
ID-0418	5493 / 5467	ID-0913	2235 / 2193	ID-1119	3980 / 3965	ID-1420	4266 / 4254
ID-0419	5106 / 5122	ID-0914	5555 / 5578	ID-1120	3660 / 3689	ID-1515	5688 / 5710
ID-0420	4782 / 4762	ID-0915	5281 / 5264	ID-1212	5691 / 5706	ID-1516	5507 / 5489
ID-0517	5725 / 5743	ID-0916	5053 / 5066	ID-1213	5398 / 5409	ID-1517	5313 / 5335
ID-0518	5383 / 5363	ID-0917	4690 / 4679	ID-1214	5181 / 5203	ID-1518	5160 / 5133
ID-0519	5057 / 5083	ID-0918	4444 / 4445	ID-1215	5006 / 4990	ID-1519	4851 / 4879
ID-0520	4647 / 4629	ID-0919	4126 / 4105	ID-1216	4858 / 4383	ID-1520	4522 / 4496
ID-0616	5900 / 5880	ID-0920	3798 / 3821	ID-1217	4569 / 4561	ID-1616	5685 / 5710
ID-0617	5548 / 5563	ID-1012	5805 / 5789	ID-1218	4346 / 4365	ID-1617	5510 / 5487
ID-0618	5178 / 5156	ID-1013	2201 / 2220	ID-1219	4148 / 4137	ID-1618	5227 / 5306
ID-0619	900 / 919	ID-1014	5256 / 5269	ID-1220	3838 / 3852	ID-1619	5064 / 5046
ID-0620	4477 / 4488	ID-1015	5034 / 5016	ID-1313	5589 / 5564	ID-1620	4644 / 4666
ID-0715	5950 / 5930	ID-1016	4749 / 4768	ID-1314	5367 / 5391	ID-1717	5667 / 5648
ID-0716	5607 / 5633	ID-1017	4488 / 4470	ID-1315	5188 / 5203	ID-1718	5410 / 5480
ID-0717	5282 / 5262	ID-1018	4208 / 4244	ID-1316	5092 / 5070	ID-1719	5172 / 5145
ID-0718	5006 / 4944	ID-1019	3973 / 3955	ID-1317	4976 / 4882	ID-1720	4748 / 4766
ID-0719	4624 / 4607	ID-1020	7/  9	ID-1318	4602 / 4590	ID-1818	5461 / 5432
ID-0720	4278 / 4298	ID-1111	5830 / 5823	ID-1319	4419 / 4413	ID-1819	5191 / 5208
ID-0814	5940 / 5910	ID-1112	5573 / 5597	ID-1320	1531 / 1517	ID-1820	4789 / 4774
ID-0815	5590 / 5620	ID-1113	5373 / 5350	ID-1414	5615 / 5630	ID-1919	5158/5171
ID-0816	5349 / 5331	ID-1114	5511 / 5495	ID-1415	5450 / 5437	ID-1920	4759 / 4737
ID-0817	4967 / 4987	ID-1115	4893 / 4880	ID-1416	5253 / 5274	ID-2020	4629 / 4655

MLR#3(Nb 50nm/Al 100nm) エリア④

※一つの配線につき2回ずつ測定

		,					
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗值[Ω]
ID-1920	4729 / 4737	ID-1316	4582 / 4560	ID-1015	4573 / 4587	ID-0717	5182 / 5198
ID-1820	5131/5118	ID-1315	4280 / 4299	ID-1014	4476 / 4457	ID-0716	4705 / 4690
ID-1819	4862 / 4847	ID-1314	4063 / 4047	ID-1013	4077 / 4100	ID-0715	4500 / 4517
ID-1720	5530 / 5521	ID-1220	5860 / 5870	ID-1012	3898 / 3874	ID-0714	4126 / 4113
ID-1719	5157 / 5139	ID-1219	5479 / 5465	ID-1011	3564 / 3551	ID-0620	5473 / 5397
ID-1718	4722 / 4750	ID-1218	5256 / 5271	ID-0920	5500 / 5513	ID-0619	5310 / 5286
ID-1620	5723 / 5708	ID-1217	5530 / 5521	ID-0919	5384 / 5373	ID-0618	5138 / 5160
ID-1619	5321 / 5337	ID-1216	4590 / 4608	ID-0918	5047 / 5067	ID-0617	4866 / 4884
ID-1618	4964 / 4975	ID-1215	4322 / 4303	ID-0917	5031 / 5009	ID-0616	4651 /4671
ID-1617	4662 / 4635	ID-1214	4016 / 4032	ID-0916	4631 / 4645	ID-0615	1.993M / 1.996M
ID-1520	5850 / 5860	ID-1213	3737 / 3719	ID-0915	4440 / 4421	ID-0520	5488 / 5474
ID-1519	5590 / 5577	ID-1120	5739 / 5752	ID-0914	4220 / 4221	ID-0519	5291 / 5272
ID-1518	5141 / 5463	ID-1119	5424 / 5406	ID-0913	4009 / 3989	ID-0518	5293 / 5307
ID-1517	4829 / 4822	ID-1118	5156 / 5171	ID-0912	3669 / 3689	ID-0517	4820 / 4810
ID-1516	4449 / 4462	ID-1117	4898 / 4880	ID-0820	5870 / 5855	ID-0516	4426 / 4440
ID-1420	5900 / 5870	ID-1116	5221 / 5245	ID-0819	5265 / 5287	ID-0420	5506 / 5491
ID-1419	5535 / 5558	ID-1115	4374 / 4358	ID-0818	5045 / 5026	ID-0419	5147 / 5166
ID-1418	5223 / 5206	ID-1114	4116/4127	ID-0817	4824 / 4841	ID-0418	14760 / 14670
ID-1417	4886 / 4900	ID-1113	3885 / 3866	ID-0816	4650 / 4632	ID-0417	4540 / 4553
ID-1416	4540 / 4518	ID-1112	3582 / 3570	ID-0815	4543 / 4569	ID-0320	4889 / 4878
ID-1415	4217 / 4248	ID-1020	5735 / 5751	ID-0814	4227 / 4219	ID-0319	6900 / 6890
ID-1320	5862 / 5840	ID-1019	5487 / 5457	ID-0813	3881 / 3893	ID-0318	4555 / 4540
ID-1319	5537 / 5562	ID-1018	5253 / 5262	ID-0720	6070 / 6090	ID-0220	4918 / 4929
ID-1318	5233 / 5246	ID-1017	5012 / 5029	ID-0719	5576 / 5596	ID-0219	4524 / 4512
ID-1317	5022 / 5034	ID-1016	4810 / 4785	ID-0718	5077 / 5066	ID-0120	4407 / 4426

図 6.6: MLR#3の常温時の配線抵抗結果その 2。

MLR#4(	Nb 100nm/A	l 100nm)	エリア①		*	一つの配線に	こつき2回ずつ測定
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]
ID-0119	2158/2164	ID-0313	2161 / 2168	ID-0510	2123 / 2123	ID-0407	2293 / 2289
ID-0218	2346 / 2338	ID-0213	1974 / 1961	ID-0410	2046 / 2041	ID-0307	2192 / 2185
ID-0118	2172/2177	ID-0113	1819 / 1873	ID-0310	1902 / 1901	ID-0207	2085 / 2093
ID-0317	2501 / 2558	ID-0812	1.993M / 1.995M	ID-0210	1800 / 1809	ID-0107	1963 / 1967
ID-0217	2314/2321	ID-0712	1.992M / 1.919M	ID-0110	1685 / 1660	ID-0606	528 / 540
ID-0117	2153 / 2149	ID-0612	2400 / 2408	ID-0909	1.905M / 1.908M	ID-0506	603 / 614
ID-0416	2603 / 2613	ID-0512	2261 / 2253	ID-0809	2408 / 2481	ID-0406	558 / 563
ID-0316	2519 / 2506	ID-0412	2 3 /2 37	ID-0709	2368 / 2365	ID-0306	2308 / 2304
ID-0216	2259 / 2263	ID-0312	1992 / 1989	ID-0609	2273 / 2266	ID-0206	578 / 573
ID-0116	2108 / 2103	ID-0212	1858 / 1865	ID-0509	2177 / 2182	ID-0106	2025 / 2032
ID-0515	2676 / 2683	ID-0112	1729 / 1721	ID-0409	2084 / 2081	ID-0505	2594 / 2585
ID-0415	2525 / 2517	ID-0911	2.023M / 2.022M	ID-0309	1985 / 19068	ID-0405	2553 / 2557
ID-0315	2348 / 2350	ID-0811	1.971M / 1.972M	ID-0209	1864 / 1868	ID-0305	2017 / 2008
ID-0215	2184 / 2178	ID-0711	2502 / 2510	ID-0109	1726 / 1726	ID-0205	2288 / 2282
ID-0115	2021 / 2027	ID-0611	2349 / 2342	ID-0808	2566 / 2568	ID-0105	2150 / 2146
ID-0614	2736 / 2732	ID-0511	2147 / 2154	ID-0708	2457 / 2452	ID-0404	2541 / 2547
ID-0514	2550 / 2557	ID-0411	2030 / 2021	ID-0608	2359 / 2356	ID-0304	2450 / 2443
ID-0414	2413 / 2404	ID-0311	1977 / 1983	ID-0508	2265 / 2269	ID-0204	2329 / 2335
ID-0314	2230 / 2236	ID-0211	1800 / 1791	ID-0408	2171 / 2168	ID-0104	2163/2168
ID-0214	2079 / 2073	ID-0111	1672 / 1679	ID-0308	2074 / 2079	ID-0303	2471 / 2466
ID-0114	1932 / 2939	ID-1010	2678 / 2672	ID-0208	1982 / 1978	ID-0203	2351 / 2347
ID-0713	3037 / 3045	ID-0910	1.944M / 1.946M	ID-0108	1823 / 1820	ID-0103	2169/2176
ID-0613	2607 / 2599	ID-0810	2464 / 2474	ID-0707	2603 / 2610	ID-0202	2343 / 2336
ID-0513	2394 / 2399	ID-0710	2377 / 2346	ID-0607	2494 / 2490	ID-0102	2148/2143
ID0413	2253 / 2245	ID-0610	2250 / 2243	ID-0507	2385 / 2391	ID-0101	2110/2114

#### 

### MLR#4(Nb 100nm/Al 100nm) エリア②

※一つの配線につき2回ずつ測定

WIE11#4		1001111				E as House	
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗值[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗值[Ω]
ID-0102	2231 / 2235	ID-0308	2166 / 2174	ID-0511	2211 / 2205	ID-0414	2447 / 2440
ID-0203	2361 / 2357	ID-0208	2027 / 2020	ID-0411	2086 / 2098	ID-0314	2313 / 2320
ID-0103	2185 / 2190	ID-0108	1883 / 1888	ID-0311	1992 / 1986	ID-0214	2223 / 2228
ID-0304	2525 / 2518	ID-0809	2748 / 2746	ID-0211	1874 / 1880	ID-0114	2057 / 2047
ID-0204	2342 / 2349	ID-0709	2604 / 2597	ID-0111	1745 / 1740	ID-0615	2775 / 2784
ID-0104	526 / 488	ID-0609	2460 / 2468	ID-0912	2670 / 2678	ID-0515	2649 / 2642
ID-0405	2640 / 2638	ID-0509	2331 / 2323	ID-0812	2570 / 2562	ID-0415	2561 / 2567
ID-0305	2475 / 2481	ID-0409	2181 / 2189	ID-0712	2464 / 2473	ID-0315	2451 / 2445
ID-0205	2304 / 2295	ID-0309	2071 / 2065	ID-0612	2367 / 2363	ID-0215	2343 / 2353
ID-0105	2146/2141	ID-0209	1919 / 1929	ID-0512	2261 / 2267	ID-0115	2172/2152
ID-0506	2720 / 2729	ID-0109	1794 / 1789	ID-0412	2182 / 2172	ID-0516	2750 / 2749
ID-0406	2567 / 2558	ID-0910	2728 / 2717	ID-0312	2053 / 2060	ID-0416	2661 / 2655
ID-0306	2389 / 2394	ID-0810	2603 / 2606	ID-0212	1962 / 1958	ID-0316	2548 / 2543
ID-0206	2240 / 2240	ID-0710	2474 / 2469	ID-0112	1810 / 1818	ID-0216	2443 / 2450
ID-0106	2093 / 2100	ID-0610	2376 / 2380	ID-0813	2687 / 2673	ID-0116	2250 / 2245
ID-0607	2764 / 2759	ID-0510	2225 / 2220	ID-0713	2570 / 2575	ID-0417	2724 / 2729
ID-0507	2611 / 2615	ID-0410	2102 / 2109	ID-0613	1644 / 1637	ID-0317	2617/2610
ID-0407	2450 / 2444	ID-0310	1986 / 1980	ID-0513	2372 / 2371	ID-0217	2494 / 2503
ID-0307	2284 / 2287	ID-0210	1870 / 1876	ID-0413	2288 / 2293	ID-0117	2313 / 2306
ID-0207	2134 / 2129	ID-0110	1734 / 1724	ID-0313	2191 / 2185	ID-0318	2642 / 2648
ID-0107	1979 / 1986	ID-1011	2788 / 2782	ID-0213	2088 / 2094	ID-0218	2525 / 2508
ID-0708	2770 / 2764	ID-0911	2650 / 2657	ID-0113	1949 / 1935	ID-0118	2336 / 2329
ID-0608	2610 / 2617	ID-0811	2541 / 2531	ID-0714	2696 / 2704	ID-0219	2512 / 2519
ID-0508	2468 / 2459	ID-0711	2426 / 2430	ID-0614	2781 / 2772	ID-0119	2391 / 2383
ID-0408	2969 / 2947	ID-0611	2317/2310	ID-0514	2512 / 2520	ID-0120	2278 / 2271

図 6.7: MLR#4の常温時の配線抵抗結果その1。

MLR#4(	Nb 100nm/A	l 100nm)	エリア③		*	一つの配線に	こつき2回ずつ測定
配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]	配線ID	抵抗値[Ω]
ID-0220	2342 / 2353	ID-0818	2300 / 2308	ID-1116	2307 / 2304	ID-1417	2508 / 2514
ID-0319	2552 / 2547	ID-0819	2158 / 2155	ID-1117	2198 / 2202	ID-1418	2405 / 2304
ID-0320	2370 / 2376	ID-0820	2005 / 2009	ID-1118	2084 / 2093	ID-1419	2300 / 2122
ID-0418	2720 / 2713	ID-0913	2890 / 2885	ID-1119	1982 / 1977	ID-1420	2119/2127
ID-0419	2526 / 2521	ID-0914	2742 / 2740	ID-1120	1844 / 1851	ID-1515	2817/2813
ID-0420	2346 / 2352	ID-0915	2592 / 2599	ID-1212	2776 / 2783	ID-1516	2728 / 2732
ID-0517	2835 / 2530	ID-0916	2455 / 2453	ID-1213	2672 / 2663	ID-1517	2630 / 2624
ID-0518	2651 / 2661	ID-0917	2310 / 2308	ID-1214	2561 / 2568	ID-1518	2522 / 5232
ID-0519	2477 / 2468	ID-0918	2172 / 2178	ID-1215	2463 / 2461	ID-1519	2426 / 2419
ID-0520	2298 / 2299	ID-0919	2037 / 2036	ID-1216	2360 / 2358	ID-1520	2233 / 2225
ID-0616	2910/2917	ID-0920	1890 / 1895	ID-1217	2257 / 2261	ID-1616	2825 / 2832
ID-0617	2736 / 2737	ID-1012	2856 / 2857	ID-1218	2155 / 2152	ID-1617	2732 / 2727
ID-0618	2557 / 2552	ID-1013	2727 / 2731	ID-1219	2050 / 2059	ID-1618	2623 / 2636
ID-0619	2420 / 2432	ID-1014	2599 / 2593	ID-1220	1904 / 1897	ID-1619	2520 / 2515
ID-0620	2224 / 2219	ID-1015	2460 / 2467	ID-1313	2758 / 2755	ID-1620	2316/2314
ID-0715	2936 / 2932	ID-1016	2347 / 2337	ID-1314	2660 / 2668	ID-1717	2790 / 2786
ID-0716	2768 / 2773	ID-1017	2222 / 2218	ID-1315	2574 / 2569	ID-1718	2681 / 2676
ID-0717	2605 / 2601	ID-1018	2101/2105	ID-1316	2473 / 2469	ID-1719	2561 / 2568
ID-0718	2437 / 2446	ID-1019	1971 / 1966	ID-1317	2372 / 2380	ID-1720	2370 / 2366
ID-0719	2500 / 2490	ID-1020	1830 / 1824	ID-1318	2283 / 2280	ID-1818	2701 / 2712
ID-0720	2114/2110	ID-IIII	2863 / 2870	ID-1319	2177 / 2172	ID-1819	2597 / 2590
ID-0814	2917 / 2922	ID-1112	2754 / 2461	ID-1320	2004 / 2012	ID-1820	2386 / 2379
ID-0815	2769 / 2761	ID-1113	2644 / 2639	ID-1414	2791 / 2785	ID-1919	2568 / 2575
ID-0816	2605 / 2612	ID-1114	2530 / 2526	ID-1415	2692 / 2687	ID-1920	2372 / 2376
ID-0817	2458 / 2455	ID-1115	2408 / 2426	ID-1416	2597 / 2607	ID-2020	581 / 586
MLR#4(	Nb 100nm/A	l 100nm)	エリア④		*	一つの配線に	こつき2回ずつ測定
MLR#4( 配線ID	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω]	<b>100nm)</b> 配線ID	エリア④ ^{抵抗値[Ω]}	配線ID	» 抵抗值[Ω]	一つの配線 記線ID	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω]
MLR#4( 配線ID ID-1920	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360	100nm) 配線ID ID-1318	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263	配線ID ID-1016	× 抵抗值[Ω] 2240 / 2226	 一つの配線は 配線ID ID-0717	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559	100nm) 配線ID ID-1318 ID-1319	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105	配線ID ID-1016 ID-1017	× 抵抗值[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118	一つの配線に 配線ID ID-0717 ID-0718	こつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365	100nm) 配線ID ID-1318 ID-1319 ID-1320	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959	配線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018	× 抵抗值[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717	100nm) 配線ID ID-1318 ID-1319 ID-1320 ID-1213	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849	配線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018 ID-1019	抵抗值[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523	100nm) 配線D ID-1318 ID-1319 ID-1320 ID-1213 ID-1214	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694	記線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018 ID-1019 ID-1020	抵抗值[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754	<ul> <li>一つの配線(</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350	100nm) 配線ID ID-1318 ID-1319 ID-1320 ID-1213 ID-1214 ID-1215	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552	配線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018 ID-1019 ID-1020 ID-0912	抵抗值[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832	100nm) 配線ID ID-1318 ID-1319 ID-1320 ID-1213 ID-1214 ID-1215 ID-1216	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414	配線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018 ID-1019 ID-1020 ID-0912 ID-0913	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663	100nm) 配線D ID-1318 ID-1319 ID-1320 ID-1213 ID-1214 ID-1215 ID-1216 ID-1217	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273	配線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018 ID-1019 ID-1020 ID-0912 ID-0913 ID-0914	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663 2466 / 2463	100nm) 配線D ID-1318 ID-1319 ID-1320 ID-1213 ID-1214 ID-1215 ID-1216 ID-1217 ID-1218	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129	配線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018 ID-1019 ID-1020 ID-0912 ID-0913 ID-0914 ID-0915	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1620	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663 2466 / 2463 2285 / 2291	100nm) 配線D ID-1318 ID-1319 ID-1320 ID-1213 ID-1214 ID-1215 ID-1216 ID-1217 ID-1218 ID-1219	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988	配線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018 ID-1019 ID-1020 ID-0912 ID-0913 ID-0914 ID-0915 ID-0916	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0620</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1620 ID-1516	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663 2466 / 2463 2285 / 2291 151 / 144	100nm)           配線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844	配線ID ID-1016 ID-1017 ID-1018 ID-1019 ID-1020 ID-0912 ID-0913 ID-0914 ID-0915 ID-0916 ID-0917	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663 2466 / 2463 2285 / 2291 151 / 144 2710 / 2718	100nm)           配線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219	玉リア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0918</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0517</li> </ul>	エつき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663 2466 / 2463 2285 / 2291 151 / 144 2710 / 2718 2556 / 2551	100nm)           配線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1218           ID-1219           ID-1210	玉リア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0620</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518 ID-1519	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663 2466 / 2463 2285 / 2291 151 / 144 2710 / 2718 2556 / 2551 2359 / 2365	100nm)           配線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1210           ID-1112           ID-1114	玉リア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0920</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1520	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663 2466 / 2463 2285 / 2291 151 / 144 2710 / 2718 2556 / 2551 2359 / 2365 2198 / 2192	100nm)           配線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1114	玉リア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0813</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0520</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1520 ID-1415	Nb 100nm/A 抵抗值[Ω] 2364 / 2360 2551 / 2559 2375 / 2365 2706 / 2717 2529 / 2523 2342 / 2350 2837 / 2832 2659 / 2663 2466 / 2463 2285 / 2291 151 / 144 2710 / 2718 2556 / 2551 2359 / 2365 2198 / 2192 2912 / 2915	100nm)           配線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1115           ID-1116	玉リア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0417</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1519 ID-1519 ID-1416	Nb 100nm/A           抵抗值[Ω]           2364 / 2360           2551 / 2559           2375 / 2365           2706 / 2717           2529 / 2523           2342 / 2350           2837 / 2832           2659 / 2663           2466 / 2463           2285 / 2291           151 / 144           2710 / 2718           2556 / 2551           2359 / 2365           2198 / 2192           2912 / 2915           2742 / 2735	100nm)           配線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1115           ID-1116	<b>エリア④</b> 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270 2145 / 2152	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0920</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0815</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553 2460 / 2453	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0517</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0418</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156 2625 / 2632 2506 / 2499
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1519 ID-1519 ID-1519 ID-1415 ID-1416 ID-1417	Nb 100nm/A           抵抗值[Ω]           2364 / 2360           2551 / 2559           2375 / 2365           2706 / 2717           2529 / 2523           2342 / 2350           2837 / 2832           2659 / 2663           2466 / 2463           2285 / 2291           151 / 144           2710 / 2718           2556 / 2551           2359 / 2365           2198 / 2192           2912 / 2915           2742 / 2735           2568 / 2574	100nm)           記線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1115           ID-1116           ID-1117	<b>エリア④</b> 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270 2145 / 2152 2027 / 2021	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0816</li> <li>ID-0816</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553 2460 / 2453 2355 / 2366	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0419</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156 2625 / 2632 2506 / 2499 2403 / 2413
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1519 ID-1519 ID-1519 ID-1415 ID-1418	Nb 100nm/A           抵抗值[Ω]           2364 / 2360           2551 / 2559           2375 / 2365           2706 / 2717           2529 / 2523           2342 / 2350           2837 / 2832           2659 / 2663           2466 / 2463           2285 / 2291           151 / 144           2710 / 2718           2556 / 2551           2359 / 2365           2198 / 2192           2912 / 2915           2742 / 2735           2568 / 2574           2409 / 2403	100nm)           記線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1114           ID-1115           ID-1116           ID-1117           ID-1118           ID-1119	エリア④ 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270 2145 / 2152 2027 / 2021 1901 / 1906	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0816</li> <li>ID-0817</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553 2460 / 2453 2355 / 2366 2266 / 2271	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0720</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0420</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156 2625 / 2632 2506 / 2499 2403 / 2413 2207 / 2198
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1519 ID-1519 ID-1519 ID-1415 ID-1418 ID-1419	Nb 100nm/A           抵抗值[Ω]           2364 / 2360           2551 / 2559           2375 / 2365           2706 / 2717           2529 / 2523           2342 / 2350           2837 / 2832           2659 / 2663           2466 / 2463           2285 / 2291           151 / 144           2710 / 2718           2556 / 2551           2359 / 2365           2198 / 2192           2912 / 2915           2742 / 2735           2568 / 2574           2409 / 2403           2259 / 2252	100nm)           記線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1114           ID-1115           ID-1117           ID-1118           ID-1119           ID-1119	<b>エリア④</b> 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270 2145 / 2152 2027 / 2021 1901 / 1906	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0815</li> <li>ID-0816</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553 2460 / 2453 2355 / 2366 2266 / 2271 2176 / 2162	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0420</li> <li>ID-0318</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156 2625 / 2632 2506 / 2499 2403 / 2413 2207 / 2198 2515 / 2520
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1519 ID-1520 ID-1415 ID-1416 ID-1417 ID-1418 ID-1419 ID-1420	Nb 100nm/A           抵抗值[Ω]           2364 / 2360           2551 / 2559           2375 / 2365           2706 / 2717           2529 / 2523           2342 / 2350           2837 / 2832           2659 / 2663           2466 / 2463           2285 / 2291           151 / 144           2710 / 2718           2556 / 2551           2359 / 2365           2198 / 2192           2912 / 2915           2742 / 2735           2568 / 2574           2409 / 2403           2259 / 2252           2089 / 2084	100nm)           記線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1114           ID-1115           ID-1116           ID-1117           ID-1118           ID-1119           ID-1120           ID-1011	<b>エリア④</b> 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270 2145 / 2152 2027 / 2021 1901 / 1906 1769 / 1774 2810 / 2805	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0816</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0819</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553 2460 / 2453 2355 / 2366 2266 / 2271 2176 / 2162 2057 / 2065	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0420</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0319</li> </ul>	エンき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156 2625 / 2632 2506 / 2499 2403 / 2413 2207 / 2198 2515 / 2520 2403 / 2397
MLR#4( 配線ID ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1519 ID-1520 ID-1415 ID-1416 ID-1417 ID-1418 ID-1419 ID-1420 ID-1314	Nb 100nm/A           抵抗值[Ω]           2364 / 2360           2551 / 2559           2375 / 2365           2706 / 2717           2529 / 2523           2342 / 2350           2837 / 2832           2659 / 2663           2466 / 2463           2285 / 2291           151 / 144           2710 / 2718           2556 / 2551           2359 / 2365           2198 / 2192           2912 / 2915           2742 / 2735           2568 / 2574           2409 / 2403           2259 / 2252           2089 / 2084           2885 / 2892	100nm)           記線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1114           ID-1115           ID-1116           ID-1117           ID-1118           ID-1119           ID-1120           ID-1011	<b>エリア④</b> 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270 2145 / 2152 2027 / 2021 1901 / 1906 1769 / 1774 2810 / 2805 2684 / 2690	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0816</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0820</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553 2460 / 2453 2355 / 2366 2266 / 2271 2176 / 2162 2057 / 2065 1905 / 1898	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0420</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0320</li> </ul>	エフき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156 2625 / 2632 2506 / 2499 2403 / 2413 2207 / 2198 2515 / 2520 2403 / 2397 2217 / 2210
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1519 ID-1520 ID-1416 ID-1417 ID-1418 ID-1419 ID-1419 ID-1315	Nb 100nm/A           抵抗值[Ω]           2364 / 2360           2551 / 2559           2375 / 2365           2706 / 2717           2529 / 2523           2342 / 2350           2837 / 2832           2659 / 2663           2466 / 2463           2285 / 2291           151 / 144           2710 / 2718           2556 / 2551           2359 / 2365           2198 / 2192           2912 / 2915           2742 / 2735           2568 / 2574           2409 / 2403           2259 / 2252           2089 / 2084           2885 / 2892           2826 / 2840	100nm)           記線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1114           ID-1115           ID-1116           ID-1117           ID-1118           ID-1119           ID-1120           ID-1011           ID-1012           ID-1013	<b>エリア④</b> 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270 2145 / 2152 2027 / 2021 1901 / 1906 1769 / 1774 2810 / 2805 2684 / 2690 2575 / 2568	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0815</li> <li>ID-0816</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0820</li> <li>ID-0714</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553 2460 / 2453 2355 / 2366 2266 / 2271 2176 / 2162 2057 / 2065 1905 / 1898 2653 / 2662	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>配線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0420</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0319</li> <li>ID-0320</li> <li>ID-0219</li> </ul>	エンき2回ずつ測定 抵抗値[Ω] 2383 / 2378 2275 / 2280 2178 / 2171 1997 / 2004 2665 / 2656 2587 / 2593 2504 / 2594 2372 / 2378 2278 / 2270 2090 / 2099 2672 / 2666 2561 / 2567 2515 / 2506 2345 / 2354 2163 / 2156 2625 / 2632 2506 / 2499 2403 / 2413 2207 / 2198 2515 / 2520 2403 / 2397
MLR#4( 配線D ID-1920 ID-1819 ID-1820 ID-1718 ID-1719 ID-1720 ID-1617 ID-1618 ID-1619 ID-1619 ID-1619 ID-1620 ID-1516 ID-1517 ID-1518 ID-1519 ID-1519 ID-1520 ID-1416 ID-1417 ID-1418 ID-1419 ID-1419 ID-1419 ID-1315 ID-1316	Nb 100nm/A           抵抗值[Ω]           2364 / 2360           2551 / 2559           2375 / 2365           2706 / 2717           2529 / 2523           2342 / 2350           2837 / 2832           2659 / 2663           2466 / 2463           2285 / 2291           151 / 144           2710 / 2718           2556 / 2551           2359 / 2365           2198 / 2192           2912 / 2915           2742 / 2735           2568 / 2574           2409 / 2403           2259 / 2252           2089 / 2084           2885 / 2892           2826 / 2840           2570 / 2582	100nm)           記線ID           ID-1318           ID-1319           ID-1320           ID-1213           ID-1214           ID-1215           ID-1216           ID-1217           ID-1218           ID-1219           ID-1219           ID-1112           ID-1113           ID-1114           ID-1115           ID-1116           ID-1117           ID-1118           ID-1119           ID-1120           ID-1011           ID-1012           ID-1013           ID-1014	<b>エリア④</b> 抵抗値[Ω] 2257 / 2263 2113 / 2105 1952 / 1959 2856 / 2849 2684 / 2694 2551 / 2552 2408 / 2414 2282 / 2273 2121 / 2129 1994 / 1988 1838 / 1844 2819 / 2792 2659 / 2666 2535 / 2527 2402 / 2410 2278 / 2270 2145 / 2152 2027 / 2021 1901 / 1906 1769 / 1774 2810 / 2805 2684 / 2690 2575 / 2568 2455 / 2464	<ul> <li>記線ID</li> <li>ID-1016</li> <li>ID-1017</li> <li>ID-1018</li> <li>ID-1019</li> <li>ID-0912</li> <li>ID-0913</li> <li>ID-0914</li> <li>ID-0915</li> <li>ID-0916</li> <li>ID-0917</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0918</li> <li>ID-0919</li> <li>ID-0813</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0815</li> <li>ID-0816</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0814</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0816</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0817</li> <li>ID-0818</li> <li>ID-0819</li> <li>ID-0820</li> <li>ID-0714</li> <li>ID-0715</li> </ul>	抵抗値[Ω] 2240 / 2226 2109 / 2118 2010 / 2003 1890 / 1899 1759 / 1754 2679 / 2670 1298 / 1306 2479 / 2471 2366 / 2372 2272 / 2268 2161 / 2173 2071 / 2065 1956 / 1962 1809 / 1803 2657 / 2651 2548 / 2553 2460 / 2453 2355 / 2366 2266 / 2271 2176 / 2162 2057 / 2065 1905 / 1898 2653 / 2662 2566 / 2558	<ul> <li>一つの配線に</li> <li>記線ID</li> <li>ID-0717</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0718</li> <li>ID-0719</li> <li>ID-0615</li> <li>ID-0616</li> <li>ID-0617</li> <li>ID-0618</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0619</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0516</li> <li>ID-0518</li> <li>ID-0519</li> <li>ID-0520</li> <li>ID-0417</li> <li>ID-0418</li> <li>ID-0419</li> <li>ID-0420</li> <li>ID-0318</li> <li>ID-0319</li> <li>ID-0320</li> <li>ID-0219</li> <li>ID-0220</li> </ul>	<ul> <li>こうき2回ずつ測定</li> <li>抵抗値[Ω]</li> <li>2383 / 2378</li> <li>2275 / 2280</li> <li>2178 / 2171</li> <li>1997 / 2004</li> <li>2665 / 2656</li> <li>2587 / 2593</li> <li>2504 / 2594</li> <li>2372 / 2378</li> <li>2278 / 2270</li> <li>2090 / 2099</li> <li>2672 / 2666</li> <li>2561 / 2567</li> <li>2515 / 2506</li> <li>2345 / 2354</li> <li>2163 / 2156</li> <li>2625 / 2632</li> <li>2506 / 2499</li> <li>2403 / 2413</li> <li>2207 / 2198</li> <li>2515 / 2520</li> <li>2403 / 2397</li> <li>2217 / 2210</li> <li>2386 / 2390</li> <li>2205 / 2197</li> </ul>

図 6.8: MLR#4の常温時の配線抵抗結果その2。

# 付録B: 3.5 cm角KOHウェットエッチング用治具の 図面

メンブレンをつくる Si 裏堀り方法は KOH ではなく DRIE 法を用いたことを述べた。しかし 400 ピク セルとなると 3.5 cm 角と基板が大きくなり、内側と外側のエッチングスピードに大きな差が生じる可能 性がある。そこで、DRIE 法と KOH の複合レシピで Si の裏掘りをする方法があげられる。これは Si の 厚さが残り数十 µm となるまで DRIE 法で掘り、最後は KOH のウェットエッチングで仕上げるという ものである。今回はこの複合レシピには取り組めなかったが、3.5 角の 400 ピクセル用の基板に対応した KOH ウェットエッチング用の治具の設計を行った。製作は新島真空工業研究所にお願いをした。以下に 図面を示す。



図 6.9: 3.5 cm 角 KOH 用治具その 1。



図 6.10: 3.5 cm 角 KOH 用治具その 2。



図 6.11: 3.5 cm 角 KOH 用治具その 3。



図 6.12: 3.5 cm 角 KOH 用治具その 4。

参考文献

- [1] K. D. Irwin and G. C. Hilton, 2005 Topics in Appl. Phys. 99, 63
- [2] T. Ohashi et al., 2010 SPIE J. 7732, 77321S
- [3] Fleischmann, L. et al., 2009, J. P. Conf., 150
- [4] Kelley, R. L. et al., 2007, PASJ, 59, 77
- [5] D. Moore et al., 2011, LTD14
- [6] S. J. Smith et al., 2011, LTD14
- [7] H. Akamatsu et al., 2009 AIP Conf. Proc. 1185, 195
- [8] Y. Ezoe et al., 2009 AIP Conf. Proc.1185, 60
- [9] Y. Ezoe et al., 2011 IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 246
- [10] K. C. Suetal., 2008 CS MANTECH Conference
- [11] S. Oishi et al., 2011, LTD14
- [12] 関東化学株式会社, 2006, 公開特許公報, P2006-291341A
- [13] 加藤 勝, 2004, 金属エッチング液
- [14] 吉武 宏, 2009, 修士論文, 東京大学
- [15] 関谷 典央, 2011, 修士論文, 東京大学
- [16] 草野 英二,「はじめての薄膜製作技術」,工業調査会
- [17] 近藤 英一, 「機械・材料系のためのマイクロ・ナノ加工の原理」, 共立出版

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、本当にさまざまな機関の多くの方々に御指導・御協力を頂きました。この 場をお借りして感謝の気持ちを述べさせていただきます。

指導教員である大橋先生には、まずこの研究室に受け入れて下さったことに感謝致します。何もわか らない私に研究への取り組み方、宇宙の面白さをわかりやすく擬音語を交えながら教えてくださり、お かげで研究室生活の楽しさを味わうことができました。卒研生の頃、TES 製作の実験チームを勧めてく ださりとても感謝しております。お忙しい中ほぼ毎日学生部屋に来て、実験の進捗状況から世間話まで、 学生と向き合って会話してくださり、私の中で研究室のお父さんのような存在でした。時には毒舌を交 え、時には冗談を交えながら丁寧にわかりやすく指導して下さいました。この大橋研で研究に対する向 き合い方を教わり、面白さや難しさなど様々な経験をすることができました。大橋研に3年間所属する ことができて本当に感謝しております。本当にありがとうございました。

石崎先生は TES まわりの実験のアドバイスをいつもしていただいておりました。特に TES の測定に 関しては、わからないことや行き詰まった時でもポジティブに状況を捉え、本質的な部分をパッとおっ しゃっていただき、大変勉強になりました。ものすっごくお忙しいのに、そのフォワッとした安定感の ある存在で、研究室内のさまざまな実験状況を把握しておられた石崎先生は本当に神のようです。あり がとうございました。

江副さんには実験のノウハウから、ものの考え方まで様々なことを教えていただきました。TESのテ の時も知らない私に、いかに研究が面白いものであるかを丁寧にご指導してくださいました。時には教 育的な質問をしてくださり、私の理解の浅さを痛感したものです。実験に行き詰まった時も江副さんの 無駄のない的確なアドバイスにより、スムーズに進めることができました。また実験だけでなく、研究 の合間の雑談も楽しかったです。砂の器など、映画話をたくさんできたことは凄く嬉しかったです。楽 しい雑談から研究のご指導まで、大変お世話になりました。江副さんの元でいろいろ勉強ができ、とて も充実した研究生活でした。本当にありがとうございました。

PD の河原さんは、研究室での世間話がとても面白かったです。毒舌っぷりにはじめは驚きましたが、 そのズバッと本音を言う姿に憧れておりました。普段厳しい意見を言う分、褒められたときが嬉しかっ たです (論紹とかとか)。

研究室の先輩方にはたくさんのご迷惑をお掛けしました。と同時に、研究室生活の楽しさを身をもっ て教えてくださり大変感謝しております。赤松さんには私が卒研生のころに大変お世話になりました。 何もわからない私に、TESの測定について丁寧にご指導して下さいました。いつもストイックに研究に 打ち込む姿はすごいなと感じておりました。ありがとうございました。林さんは実験でご一緒する機会 はありませんでしたが、飲み会でのお姿は尊敬に値するものでした。飲むときはとことん飲んで楽しむ、 研究するときはとことん研究するという姿勢はまさに学生の鏡だと思います。林さんを見習って、飲む 時はとことん飲み、パシッと仕事する社会人になりたいと思います。

石川さん、佐藤さん、横田さん、高木さんにもお世話になりました。特に石川ねーさんには感謝しき れない程感謝しております。私が卒研生の頃、気さくに声を掛けてくださり何事にも親切に答えてくだ さいました。研究で一緒になることはほとんどありませんでしたが、実験について質問すると何でも答 えてくださり尊敬しておりました。特にゼミ合宿では、激しくご迷惑をお掛けしました。当時 M2 であっ た石川ねーさんは、嫌な顔ひとつせずに手伝って下さり大変感謝しております。また、くだらない私の 駄洒落にも激しく突っ込みを入れて下さり、ボケのしがいがありました。飲み会の席では毎回ご迷惑を お掛けしていた気がします。研究室でオールで飲み語り合ったこと、校内のとある場所でシンデイタ私 を救出してくださったこと、数々のご失態をこの場をお借りしてお詫び申し上げます。研究で忙しく、久 しぶりに研究室でお会いしたときはとても嬉しく思っていました。石川ねーさんのような先輩がいて、 大変心強かったです。まさに姉御のような存在でした。石川ねーさんの今後を陰ながら応援しておりま す。本当にありがとうございました。横田さんには飲み会というものの面白さを教えていただきました。 またいつも面白くクセのあるお話を聞かせてくださり、とても楽しかったです。佐藤さんはふと笑った 笑顔がステキでした。高木さんは積極的に話しかけてくださり、研究室に入りたてで緊張していた私を 和ませて下さいました。

1つ上の学年であった阿部さん、石津さん、塩野目さん、辺見さんには、いじっていじっていじり倒 していただき大変感謝しております。阿部さんはものまねを交えつつ、いつも面白おかしくいろいろな 話をしてくださいました。研究の合間や夕ご飯時などにお話できるのが楽しくて仕方がありませんでし た。また、いじられキャラという新たな引き出しを私に与えてくださり、とても感謝しております。本 当に。。。研究では PSP 実験や修論で忙しい時期でも、なにかと TES 開発を気にかけてくださり測定も していただきました。普段の研究室生活から実験までと、とてもお世話になりました。卒業後も電話を いただき、冷やかしながらも修論頑張ってと応援してくださり、とても嬉しかったです。石津さんと塩 野目さんは、実験でご一緒する機会はありませんでしたが、宇宙研にいるときはいつも夕ご飯に連れて 行ってくださいました。「首都大グルメサークル」を石津さんが設立し、時には「首都大グルメ人民共和 国」と称して塩野目さんカーで美味しそうなお店を巡る夕ご飯時が楽しみでした。このグルメサークル のお陰でずっといると気が狂いそうになるイエローブース内でも、毎日頑張って実験することができま した。辺見さんは、ほわっとしたオーラでいつも話しかけてくださり、とても癒されておりました。通 学時に見かけるとすぐに声を掛けてくださり、とても嬉しかったです。先輩方がいたお陰で本当に楽し い毎日でした。本当にありがとうございました。

首都大だけではなく、宇宙研の先生方や先輩方にも大変お世話になりました。特に吉武さんや関谷さんには TES 製作を一から教えてくださり、大変お世話になりました。最初の頃、ことあるごとにへマをしていた私を優しく見守ってくださり、根気強くご指導していただきました。実験の楽しさを教えていただき、ありがとうございました。

そして同期。森山くん、榎くんは何でもまじめにキチッとこなすので、いつもすごいなぁと思っていま した。同期がしっかりしていたからこそ、私も道をはずす事なく無事にここまでこれました。研究テー マは違うものの、3人それぞれ刺激し合いながら実験を進められたと思います。飲み会の時は、かなー りご迷惑をお掛けしました。本当にごめんなさい。そして見捨てないでくれてありがとう。2人が同期 で本当に良かったです。また、酒井さんをはじめとする宇宙研の同期の存在も大きいものでした。X線 の学生だけでなく、赤外や電波、惑星など研究分野を越えて、みんなと交流できとても楽しかったです。

後輩の協力も必要不可欠なものでした。特に榎島くん、鳥羽さんには TES チームとして一緒に実験し てくれてありがとうございました。鳥羽さんは卒研生なのに、毎回終電近くまで一緒に実験をしてもら い、本当に感謝をしています。太る太ると言いながら、夜23 時頃に約 1000 キロカロリーのステーキを ガッツいたことは忘れもしません。榎島くんには、測定を急いでもらったりといろいろと手伝ってもら いました。急なお願いにも嫌な顔ひとつせずに、ひょいひょいっと測定してくれてとても頼もしかった です。

企業の方々にも大変お世話になりました。特に SIINT の田中さん、SII の師岡さんには積層配線の製作からアドバイスに至まで、丁寧に対応してくださいました。師岡さんにはなにかとメールで質問ばかりしていましたが、お忙しい中細かくしっかりと答えて下さり大変助かりました。田中さんは、見かけると必ず気さくに話しかけてくださり嬉しかったです。とてもエネルギッシュなオーラを感じ、失敗続きで凹んでいた私に元気を与えて下さいました。本当にありがとうございました。

最後に、夜遅くになっても帰宅するまで必ず起きていてくれ、ずっと私を支えてくれた家族に感謝致 します。こうして振り返ると多くの方の支えなしでは、今の私はなかったのだと改めて実感致しました。 本当に感謝しています。3年という短い期間でしたが、とても充実していました。本当にありがとうご ざいました。