

筑波大学大学院博士課程
数理物質科学研究科修士論文

アトラスSCT
シリコンマイクロストリップモジュール
のマイクロ放電特性の研究

桑野 太郎

(物理学専攻)

2005年2月

筑波大学大学院博士課程
数理物質科学研究科修士論文

アトラスSCT
シリコンマイクロストリップモジュール
のマイクロ放電特性の研究

桑野 太郎
(物理学専攻)

指導教官 受川 史彦

概要

現在、ヨーロッパ CERN 研究所において、2007 年稼動を目標とした LHC 加速器およびそこに設置される ATLAS 検出器が建設中である。LHC 実験では、トップクォークの精密測定、ヒッグス粒子や超対称性粒子などの探索を目的としており、また 2007 年の実験開始後には、世界で初めての TeV 領域での高エネルギー実験が実現される。

ATLAS(A Toroidal LHC Apparatus) 検出器は、LHC に建設中の汎用型粒子検出器である。高さ 22 m、全長 46 m、総重量 7000 t となり、内側のビームパイプから順に、ピクセル型検出器、半導体飛跡検出器 (SCT)、遷移輻射飛跡検出器 (TRT)、ソレノイド磁石、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、トロイド磁石、 μ 粒子検出器と並んでいる。日本のアトラス SCT グループは、その内の半導体飛跡検出器を構成する、バレル SCT モジュール 2112 台の内、予備を含む 981 台の製造、を担当している。2002 年 2 月に始まったバレル SCT モジュールの量産は、2004 年 12 月に完了した。

バレル SCT モジュールの量産によって蓄積されたデータ及び経験を、整理及び解析することによって、これを将来に向けて有効に活かすことができる。特に、バレル SCT モジュールに見られるような半導体を用いた粒子検出器は、高エネルギー実験ではもちろんのこと、医療から宇宙まで、幅広い分野において利用されている。本論文では、シリコンストリップ型検出器の量産にあたって、最も重要な課題の一つであるマイクロ放電現象の特性研究をまとめた。特に、可視光領域から赤外線領域にまで感度をもつ CCD カメラを用いた測定をはじめ、その他多くの観点から得られた結果を元にして進めた解析の結果を報告する。

2004 年 12 月、日本のアトラス SCT グループは、予備を含む 981 台のバレル SCT モジュールの量産を完了し、その内約 10 %にあたる 105 台のモジュールに対して、マイクロ放電の発生が確認された。マイクロ放電の検査及び評価の方法としては、各検査工程における I-V 特性の測定、24 時間 500V を印加した試験にあらわれるマイクロ放電の減衰の評価、アンプの入力ノイズの評価、赤外線カメラによるマイクロ放電の発光の撮影などを用いた。とくに赤外線 CCD カメラによるマイクロ放電の撮影は、マイクロ放電を引き起こす原因を直接認識できる。マイクロ放電が発生している 105 モジュールの評価の結果、その内 61 台についてマイクロ放電の発生場所を赤外線領域における発光点として特定できた。

その結果、ほとんどのマイクロ放電が、インプラント電極の埋設工程及びその後の酸化被膜工程において発生させていたと思われる。61 台中 41 台がこれに該当すると考えられる。酸化被膜によってシリコンセンサーの表面を覆うとき、その表面に対して高い清浄性が求められる。もしもそこに塵あるいは傷が存在するとセンサーあるいはモジュールとしての完成後に、マイクロ放電を発生させる可能性が出てくる。また、インプラント電極の埋設時に、埋設用の穴をシリコン表面及びその上の保護膜に空けるときにもまた、その作業に対して高い精度が要求される。実際に 41 台中 7 台は、この穴を開ける際の不良だと考えられている。他の 4 台は、センサー表面に痕跡が無いことが確認されたので、内側に何らかの欠陥が存在すると考えられる。また他の 11 台は、原因をはっきりと確認できなかった。この 11 台及びセンサー表面に痕跡が無い 4 台については、マイクロ放電の発光がアルミストリップのエッジにあることから、原因がアルミストリップの下に隠れていると推測される。明らかに外部から受けた傷によるものは、61 台中 2 台だけだった。

残りの3台は、痕跡が確認できたが、可視光での写真が無いためにそれ以上の分類ができなかったものである。

マイクロ放電のほとんどが非常に短時間(1時間)で崩壊してしまうために、赤外線カメラを用いたその発生源の探査は、測定にかけられる時間が限られてしまい、困難になる。実際に、105台中14台は、この短い崩壊時間のために、マイクロ放電の発生源が特定できなかったものと評価できる。105台中15台程度は、面積の比率から考えて、フレキシブルハイブリッド等の構造物下に隠れて、発見ができないものと推定できる。また残りの15台程度は、暗電流値が大きいのにその発生場所を特定できなかったと言える。その理由としては、アルミストリップの真下にマイクロ放電の発光が隠れていて発見ができないことが考えられる。これらのモジュールは、傾向としては暗電流の減衰時間が長い。

目次

第1章	序論	7
1.1	LHC 計画	7
1.2	ATLAS 検出器	8
第2章	バレルSCT モジュール	10
2.1	バレルSCT	10
2.2	バレルSCT モジュールの構造	10
2.3	バレルSCT モジュールの動作原理	14
第3章	マイクロ放電	16
3.1	バレルSCT モジュールのI-V 特性	16
3.2	マイクロ放電の原理	18
3.3	マイクロ放電のI-V 特性	19
3.4	測定環境のI-V 特性への影響	21
第4章	IR CCD カメラを用いたマイクロ放電の測定	27
4.1	ノイズによるマイクロ放電の評価	27
4.2	IR CCD カメラによるマイクロ放電の測定及びそのセットアップ	29
第5章	測定結果	34
5.1	マイクロ放電とその発生源の分類	34
5.1.1	IR 測定結果の概要	34
5.1.2	マイクロ放電の発生源の形状による分類	35
5.1.3	マイクロ放電の発生場所による分類	46
5.1.4	センサー構造によるマイクロ放電の分類	51
5.1.5	センサー毎のマイクロ放電の発生頻度	51
5.2	マイクロ放電の発生時期	52
5.3	マイクロ放電のI-V 特性	54
5.3.1	マイクロ放電の発生電圧とその発生源の比較	54
5.3.2	マイクロ放電の暗電流値	57
5.3.3	マイクロ放電の減衰時間	58
第6章	マイクロ放電の減衰の理由	61
第7章	バレルSCT における、マイクロ放電モジュールの取り付け位置	63

目 次

1.1	ATLAS 検出器レイアウト	9
1.2	内部検出器レイアウト	9
2.1	バレル SCT モジュール外観	11
2.2	センサーデザイン	12
2.3	ストリップ断面図	13
2.4	電荷収集概観	15
3.1	正常な I-V 曲線 モジュール ID 268	18
3.2	460V でのマイクロ放電発生 モジュール ID 47	19
3.3	340V でのマイクロ放電発生 モジュール ID 527	20
3.4	10V でのマイクロ放電発生 モジュール ID 958	20
3.5	温度 15℃、湿度 0%における I-V 曲線	22
3.6	温度 25℃、湿度 0%における I-V 曲線	22
3.7	湿度 0%、温度 15℃における I-V 曲線	23
3.8	湿度 50%、温度 15℃における I-V 曲線	23
3.9	温度 15℃、湿度 0%における I-V 曲線、1 回目の測定	24
3.10	湿度 0%で一定、温度 15℃ -25℃ 間で変化させた時の暗電流値の変化	24
3.11	湿度 0%、温度 15℃ で一定に維持した時の暗電流値の変化	24
3.12	各種検査の流れ	26
4.1	平均より 30%以上大きい入力ノイズ モジュール ID 88	27
4.2	マイクロ放電に起因する入力ノイズの分布	28
4.3	平均より 10~30%大きい入力ノイズモジュール ID 107	28
4.4	IR カメラで発生場所を特定できなかったモジュールの最大入力ノイズ分布	29
4.5	CCD カメラの分光特性	30
4.6	IR 測定外観	31
4.7	IR 測定による画像	32
4.8	CCD 素子露出時間	33
5.1	“ 外傷 ”写真、モジュール ID 917	36
5.2	I-V 曲線、モジュール ID 917	36
5.3	減衰曲線、モジュール ID 917	36
5.4	“ インプラントの欠陥 ”写真、モジュール ID 827	37
5.5	“ インプラントの欠陥 ”広域写真、モジュール ID 827	38
5.6	I-V 曲線、モジュール ID 827	38

5.7	減衰曲線、モジュール ID 827	38
5.8	“ アルミ下の条状の傷 ”写真、モジュール ID 627	39
5.9	I-V 曲線、モジュール ID 627	39
5.10	減衰曲線、モジュール ID 627	39
5.11	“ アルミ下の条状の傷 ”写真、モジュール ID 706	40
5.12	I-V 曲線、モジュール ID 706	40
5.13	減衰曲線、モジュール ID 706	40
5.14	“ アルミエッジの泡状の異物 ”写真、モジュール ID 931	41
5.15	I-V 曲線、モジュール ID 931	41
5.16	減衰曲線、モジュール ID 931	41
5.17	“ バイアスリングでの発光 ”写真、モジュール ID 864	42
5.18	I-V 曲線、モジュール ID 864	42
5.19	減衰曲線、モジュール ID 864	42
5.20	“ 酸化膜の黒斑点 ”写真、モジュール ID 642	43
5.21	I-V 曲線、モジュール ID 642	43
5.22	減衰曲線、モジュール ID 642	43
5.23	“ 酸化膜の赤斑点 ”写真、モジュール ID 128	44
5.24	I-V 曲線、モジュール ID 128	44
5.25	減衰曲線、モジュール ID 128	44
5.26	“ 原因が見当たらない ”写真、モジュール ID 949	45
5.27	モジュール ID 949 における I-V 曲線	45
5.28	モジュール ID 949 における暗電流-経過時間の曲線。	45
5.29	“ アルミエッジ + やや離れて痕跡あり ”写真、モジュール ID 131	47
5.30	I-V 曲線、モジュール ID 131	47
5.31	減衰曲線、モジュール ID 131	47
5.32	“ アルミエッジ + 痕跡あり ”に分類されたモジュール ID 202 の画像。画像中、赤く書き込まれた円の中心においてスポットは発光していた。この図では、アルミエッジまたはその下に見えるインプラントの欠陥あるいはアルミ蒸着時の欠陥等によって、マイクロ放電を誘発したと考えられる。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図 (5.33) 及び図 (5.34) に示す	48
5.33	I-V 曲線、モジュール ID 202	48
5.34	減衰曲線、モジュール ID 202	48
5.35	“ エッジ脇 + 痕跡 (小) ”の写真、モジュール ID 180	49
5.36	I-V 曲線、モジュール ID 180	49
5.37	減衰曲線、モジュール ID 180	49
5.38	“ エッジ脇 + 欠陥 (大) ”に分類されたモジュール ID 885 の画像。画像中、赤く書き込まれた円の中心に、ちょうどアルミエッジと対角にある三角形の頂点において、スポットは発光していた。“ エッジ脇 ”の領域には、局所的に電場を強める要素は基本的に存在しない。しかしこの図の場合では、インプラントの欠陥がアルミの下から伸びて、“ エッジ脇 ”領域において鋭いエッジを形成している。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図 (5.39) 及び図 (5.40) に示す。	50
5.39	I-V 曲線、モジュール ID 885	50

5.40	減衰曲線、モジュール ID 885	50
5.41	バレル SCT モジュールの量産の進行に伴うマイクロ放電発生率	52
5.42	マイクロ放電の発生電圧の分布	54
5.43	マイクロ放電発生電圧の分布。“アルミエッジの泡状の異物”と“酸化膜の黒斑点”	55
5.44	マイクロ放電発生電圧の分布。“アルミエッジ”と“エッジ脇”	56
5.45	マイクロ放電初期の暗電流値と 24 時間後の暗電流値の関係	57
5.46	減衰時間定数と初期暗電流値の関係	58
5.47	IR スポットが特定できなかった 19 台に対する時期毎のマイクロ放電発生率	59
5.48	I-V 曲線、モジュール ID 709	60
5.49	減衰曲線、モジュール ID 709	60
6.1	Si-SiO ₂ 界面の電荷分布	61
6.2	減衰定数と 24 時間後の暗電流値の関係	62

表 目 次

1.1	LHC 加速器仕様	7
1.2	ATLAS 検出器仕様	8
4.1	CCD カメラの仕様	30
5.1	複数のスポットを持つモジュールの一覧	35
5.2	マイクロ放電の発生源の形状による分類	35
5.3	マイクロ放電の発生場所による分類	46
5.4	マイクロ放電のセンサー構造による分類	51
5.5	マイクロ放電のセンサー毎の発生頻度	52
5.6	減衰曲線の形による分類	60
7.1	マイクロ放電が発生している 105 台のバレル SCT における取り付け位置	63

第1章 序論

1.1 LHC 計画

現在、CERN(European organization for nuclear research)において、LHC(Large Hadron Collider) 加速器が、周長 27 km の LEP (Large Electron Positron Collider) トンネルの中に建設中である。2007 年運転開始予定の LHC では、重心系エネルギーが 14 TeV、ビーム衝突頻度は 40 MHz、ルミノシティーは最初の 3 年間は $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、それ以後の 7 年間は $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達し、約 10 年間の運転を予定している。

主リング長	26.66 km
陽子エネルギー	7 TeV
入射エネルギー	450 GeV
ルミノシティー	$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (最初の 3 年間)
ルミノシティー寿命	10 時間
バンチ衝突間隔	25 nsec
陽子数/バンチ	1×10^{11} 個
バンチ数	2808 バンチ
双極電磁石数	1232 台
双極電磁石長	14.3 m
双極電磁石磁場	8.3 T

表 1.1: LHC の主な仕様

LHC 実験では、その過去に例のない巨大なエネルギーを用いることによって、新粒子、未発見粒子の探索に力を発揮すると期待されている。標準理論や超対称性理論で存在が予想されるヒッグス粒子の探索をはじめとする、以下のような物理の項目に期待が持たれている。

- ヒッグス粒子の探索
 - 標準模型ヒッグス粒子
 - 荷電ヒッグスを含む超対称性ヒッグス粒子
- トップクォークの物理
 - 質量の精密測定
 - $t \rightarrow W^+b$ の分岐比の測定

- $t \rightarrow Z^0 c$ 等の希少事象の探索
- ボトムクォークの物理
 - 混合状態の研究
 - CP 対称性の破れ
 - $B_d, B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 等の希少事象の探索
- 超対称性粒子の探索
- 新しい物理
 - 新しいゲージボソン
 - レプトクォーク
 - サブクォーク
 - ゲージボソンの異常結合

1.2 ATLAS 検出器

ATLAS(A Toroidal LHC Apparatus) 検出器は、LHC に建設中の汎用型粒子検出器である。高さ 22m、全長 46m、総重量 7000t となり、内側のビームパイプから順に、ピクセル型検出器、半導体飛跡検出器 (SCT)、遷移輻射飛跡検出器 (TRT)、ソレノイド磁石、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーター、トロイド磁石、 μ 粒子検出器と並んでいる (図 (1.1)、図 (1.2) 参照)。各部性能に関しては、表 (1.2) にまとめた。

検出器	テクノロジー	性能
内部飛跡検出器	ピクセル	50 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ ピクセル
	シリコンストリップ	80 μm ピッチ
	ストローチューブ	$\sim 200 \mu\text{m}$ /ストロー
電磁カロリメーター	鉛板/液体アルゴン (アコーディオン)	10%/ $\sqrt{E} \oplus 0.7\%$
ハドロンカロリメーター	鉄板/タイルファイバー	50%/ $\sqrt{E} \oplus 3\%$ (バレル部)
	銅板/液体アルゴン	100%/ $\sqrt{E} \oplus 10\%$ (前方部)
μ 粒子検出器	ドリフトチューブ	10 % (1 TeV)

表 1.2: ATLAS 検出器の主な仕様

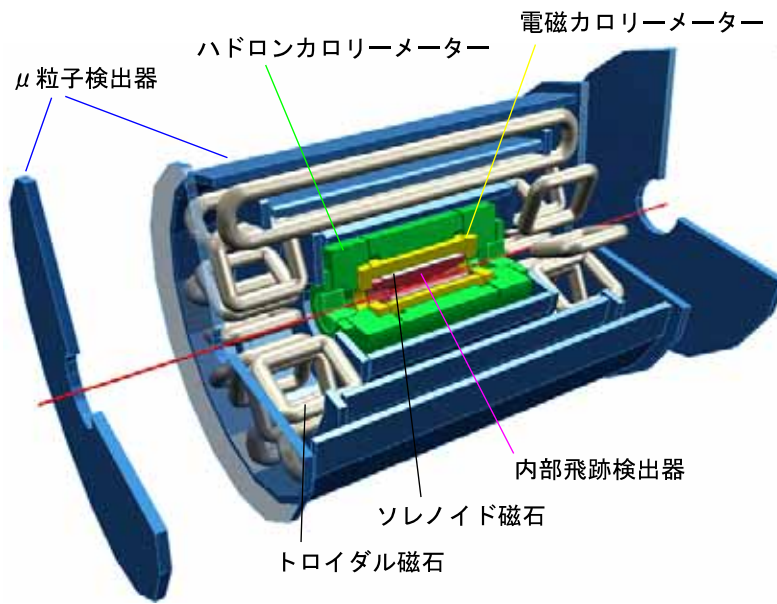


図 1.1: ATLAS 検出器レイアウト

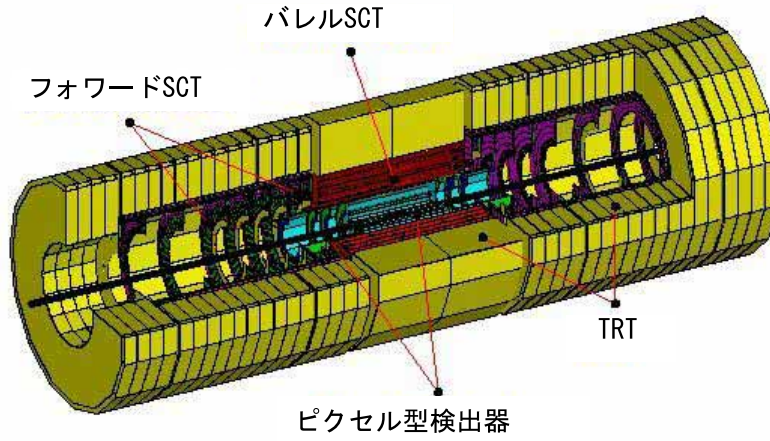


図 1.2: 内部検出器レイアウト 全長 7 m、外径 2.5 m、バレル SCT は全長 1.7 m

第2章 バレルSCT モジュール

2.1 バレルSCT

バレルSCTは、ビームパイプから同心円の4層で構成され、 $|\eta| < 1.4$ までの領域を覆っている。バレルSCTは2112台のバレルSCTモジュールによって構成されている。

2.2 バレルSCTモジュールの構造

バレルSCTモジュールは、4枚の片面読み出し p-on-n 型シリコンセンサーと読み出しのためのハイブリッド等によって構成されている。図(2.1)に外観を示す。

センサーには、シリコンを用いたマイクロストリップ型半導体検出器が用いられているが、これは、高い位置分解能、応答の高速性、高い検出効率、小型化し易いといった利点を持っている。シリコンセンサーの設計を図(2.2)に示す。

片側に2枚取り付けられているセンサーのそれぞれの大きさは、長さ 64.0 mm×幅 63.6 mm、モジュールは 64.0 mm×128.0 mm となっている。2枚のセンサーは、有効ストリップ長が 126.0 mm になる様に、ストリップ同士をワイヤーで繋げてある。またこれらのストリップは、モジュールの軸に対して ± 20 mrad の 1/2 ステレオ角が付けられている。これによって裏面2組のセンサーストリップは、40 mrad のステレオ角が生じるようになっているので、二次元的な位置情報を得ることができる。このように配置されたセンサー4枚がベースボードの表裏に接着され、その上から、各ストリップから信号を読み出すためのASICフロントエンドチップを12個搭載したフレックスハイブリッド基板を巻くように取り付ける。表面ストリップの読み出しを、表面に来るように取り付けられた6個のASICにておこない、裏面では残りの6個が担当する。このバレルSCTモジュールは、ベースボードに取り付けた2つのねじ穴を用いてバレル構造体に取り付けられ、同時にASICの動作熱およびセンサーからの熱もベースボードを伝わることによって、構造体の冷却パイプに逃がされる仕組みになっている。

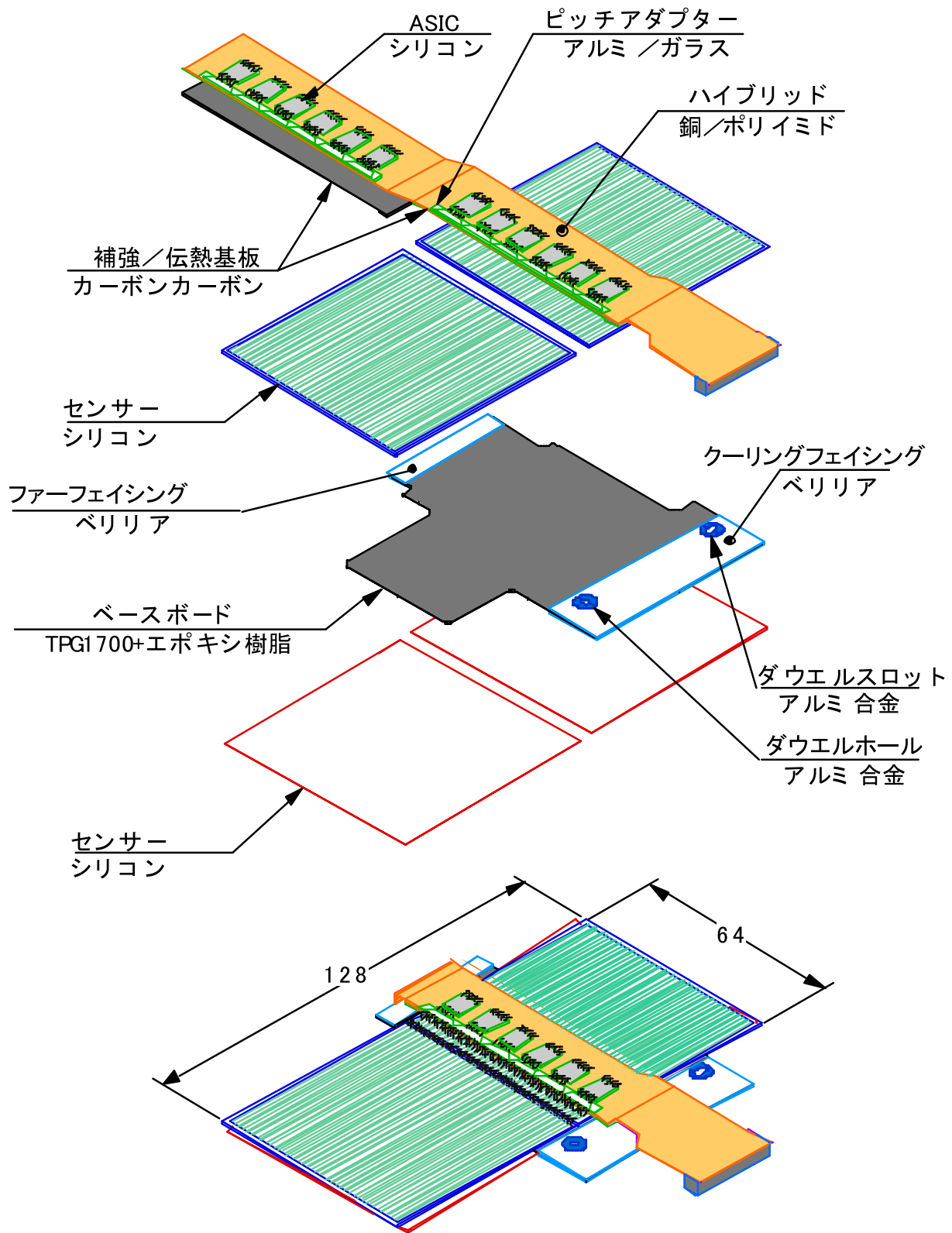
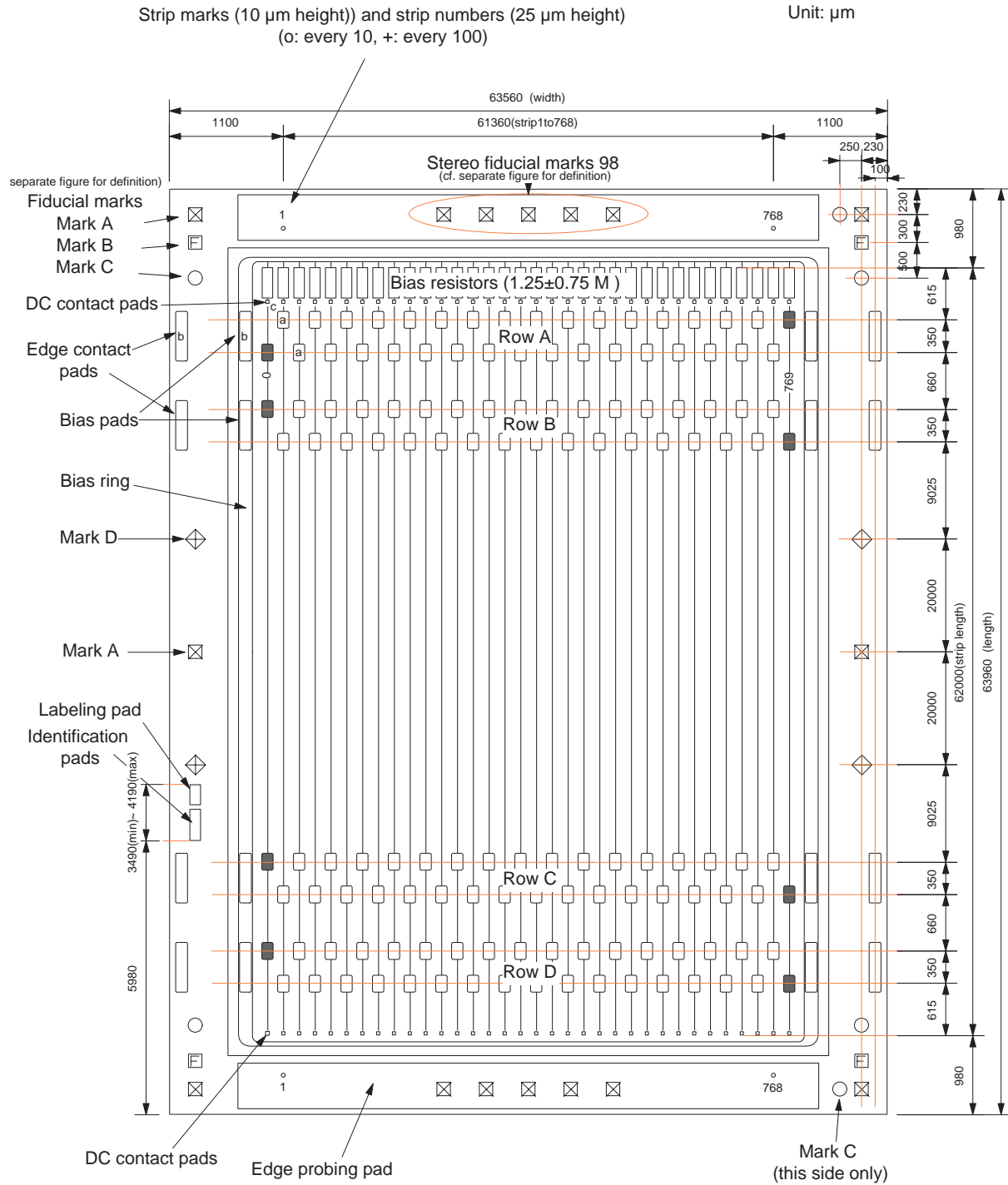


図 2.1: パレルSCT モジュール外観



Notes:

- (1) Pad sizes: a = 56 μm x 200 μm , b = 80 μm x 550 μm , c = 50 μm x 60 μm
- (2) Fiducial marks A & B are "metal-in-opening"
- (3) Fiducial marks C & D are either "hole-in-metal" or "metal-in-opening"
- (4) Bonding pads of strip 0 and 769 are required if the metal is not connected to the bias ring permanently
- (5) Use "Row C" pads for probing
- (6) Dicing tolerance: ± 25 μm to fiducial marks and ± 25 μm overall

図 2.2: センサーデザイン

シリコンセンサーは、 $4\text{ k}\Omega\text{-cm}$ の高抵抗を持つ高純度 n 型シリコン半導体に、電荷収集のためのインプラント電極をストリップ状に埋め込んである。ストリップ間隔は $80\ \mu\text{m}$ で、1 枚のセンサーには読み出し用の 768 本のストリップと電場整形用のダミーストリップ 2 本が両脇に並んでいる。有感領域の周囲には電圧をかけるためのバイアスリングがあり、インプラント電極とバイアスリングは $1.5\text{M}\Omega$ の多結晶 Si によって接続されている。

インプラント電極は、ボロンイオンを打ち込むことによって形成された不純物濃度の高い p^+ 型シリコンである。また n 型シリコンをはさんだ反対側には、不純物濃度の高い n^+ 型シリコンが一樣に層を成し、電気接続のためのアルミが蒸着されている。インプラント電極の上には、薄い絶縁層を通じてアルミがストリップ状に蒸着されており、インプラント電極とは AC 的に接続されている。図 (2.3) にストリップ断面図を示す。

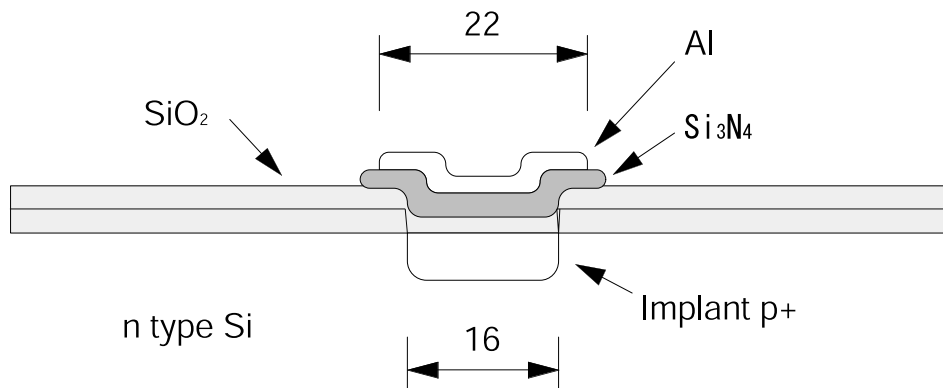


図 2.3: ストリップ断面図、単位は μm

まず SiO_2 で n 型シリコンを皮膜する。電極を形成したい領域を、エッチングにより SiO_2 を除去して、 p^+ インプラント電極を埋め込む。その上から再びインプラント電極を含む全面を SiO_2 によって皮膜する。この時、既に開けた穴も塞がることになる。さらにその上から順に、 Si_3N_4 、アルミ電極を蒸着する。最後にもう一度、全体を SiO_2 によって皮膜する。最表面の SiO_2 被膜は、図 (2.3) には描かれていない。

インプラント電極よりアルミストリップの幅を広くすることによって、次に説明する効果が得られる。

センサー単体で逆バイアス電圧 500 V を印加すると、 p^+ インプラント電極- n^+ 間で 500 V の電位差が生じる。このとき最も電場が集中しやすい場所は p^+ インプラント電極のエッジ部分である。それに対して、センサーをモジュールに組み立てた場合では、アルミストリップと p^+ インプラント電極がチップのグラウンドを介してほぼ等電位となる。逆バイアス電圧が印加される時に最も電場が集中しやすい場所は、 p^+ インプラント電極の上の酸化膜中に移動する。 $\text{Si p}^+\text{-n-n}^+$ 接合における降伏臨界電界は $\sim 10^5\text{ V/cm}$ 、 SiO_2 における降伏臨界電界は $\sim 10^6\text{ V/cm}$ であるので、張り出

し電極の構造は絶縁破壊しにくくなる。また、インプラント両脇の Si 部は MOS 効果により電場が安定するので、マイクロ放電が起こり難くなる。

これによって、センサー単体でマイクロ放電を起こしていても、モジュールに組み立てられることによってそのマイクロ放電が抑制される。

2.3 バレルSCT モジュールの動作原理

荷電粒子を検出するために、 p^+ インプラント電極と n^+ 型電極の間の領域 "n-bulk" 内に、空乏層が必要になる。空乏層は、残留するキャリアが各電極に移動して、キャリアが存在しない状態である。まず、 p^+ インプラント電極と n^+ 型電極の間に逆バイアス電圧をかける。n-bulk 内のキャリアが電極に移動して、 p^+ から n^+ に向かって空乏層が広がっていき、 n^+ に達すると全空乏層化が完了する。またこの時の電圧を全空乏化電圧という。後に詳しく述べるが、この値は n-bulk の厚さや不純物濃度によって異なり、バレルSCT モジュールでは ~ 70 V となっている。高エネルギー放射線の照射によって Si 原子は破碎されて、n-bulk 内のアクセプターは実効的に増加する。このため、全空乏化電圧は、放射線照射とともに n 型が真性半導体に近づくにつれて減少するが、一旦 p 型に変換すると、次には増加する。印加することのできる電圧の最大値は、表面の構造によって異なるが、バレルSCT モジュールでは 300~500 V で設計されている。これを越えた電圧を印加すると、マイクロ放電 (第 3 章) により暗電流が増加して、ノイズの原因になる。さらに電圧を印加すると、p-n 接合が破壊されたり、エッジ部での表面電流のため通電する可能性が生じてくる。

荷電粒子が空乏層を通過すると、荷電粒子が落とすエネルギーによって電子 - ホール対が生成される。生成された電子 - ホール対は、逆バイアス電圧によって作られる電場に沿って各電極に移動する。概観を図 (2.4) に示す。 p^+ インプラント電極に誘起された電荷は、絶縁層を通じて AC 接続されたアルミ電極に電荷が移動する。アルミ電極の電荷は増幅器を通じてデジタル読み出しされ、入射粒子の一次元的な入射位置情報が得られる。その位置分解能は、ストリップ間隔 $80 \mu\text{m}$ によって決定され、 $23 \mu\text{m}$ 程度となっている。ステレオ角 40mrad を持った裏面からの情報を合わせて、入射粒子の二次元的な入射位置情報が得られる。

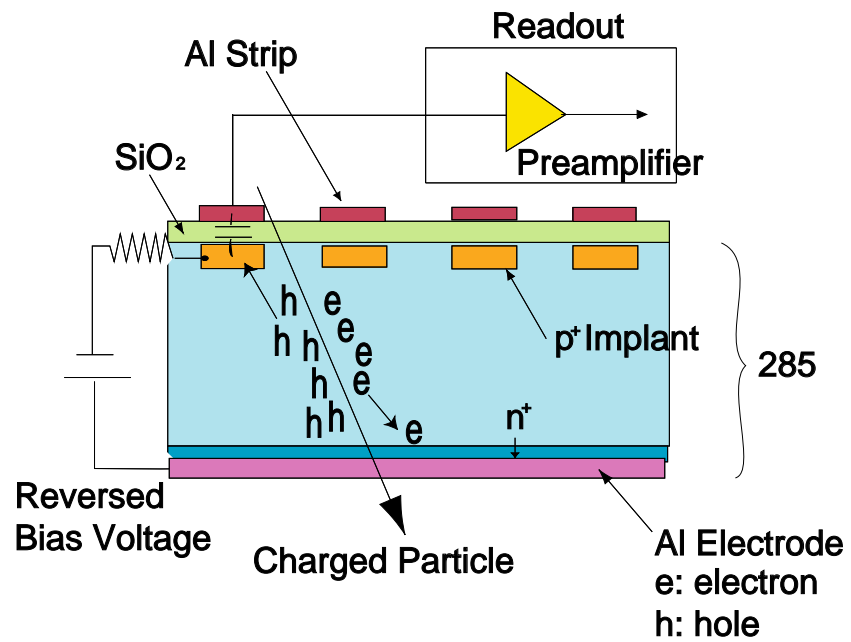


図 2.4: 電荷収集の概観、単位は μm

第3章 マイクロ放電

3.1 バレルSCT モジュールの I-V 特性

十分な逆バイアス電圧が印加されると、空乏層内では残留キャリアが電極に移動して、キャリアが無い状態が作られる。熱のために、電極に残っている少数キャリアが空乏層内に流れ込んだり、空乏層内に電子-ホール対が生成されて、暗電流の原因となる。また、バルク内の不純物や欠陥、電極の構造などによる電流の増加や、シリコンの表面の状態あるいは形に依存して流れる電流もある。主に前者に対して“バルク暗電流”、後者に対して“表面暗電流”と呼び、区別する。暗電流と呼ばれるこれらの電流は、印加される逆バイアス電圧の大きさに左右され、特にバルク暗電流は、空乏層の厚さに依存している。

逆バイアス電圧 V_R を印加したとき、 p^+ - n 接合における空乏層の厚さは、式 (3.1) で与えられる [9]。

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] (V_{bi} + V_R)} \quad (3.1)$$

ϵ_s はシリコンの誘電率、 q は素電荷、 N_A は p^+ 内のアクセプター密度、 N_D は n -bulk 内のドナー密度、 V_{bi} は内蔵電位と呼ばれ、外部から電圧を印加しない状況での、 p^+ - n 接合境界の空乏領域における電位差を表す。多くの場合内蔵電位 V_{bi} は非常に小さく、 $V_{bi} < 1$ V なので、逆バイアス電圧 V_R より十分に小さいと考えると、逆バイアス電圧と空乏層の厚さの関係について、式 (3.2) がいえる。

$$W \propto \sqrt{V_R} \quad (3.2)$$

p^+ - n 接合では、 $N_A \gg N_D$ であり、また n 型半導体の比抵抗 ρ_n は、電子の易動度 μ_e (300 において、 $\mu_e = 1350 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) を用いて、 $\rho_n^{-1} = q N_D \mu_e$ と表されることより、

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si} V_R}{q N_D}} = \sqrt{2\epsilon_{Si} \rho_n \mu_e V_R} \quad (3.3)$$

$\epsilon_s = 12 \times 8.8 \times 10^{-10} \text{ F/cm}$ を代入すれば、また、比抵抗を $\Omega \cdot \text{cm}$ 、 V_R を V の単位とすれば、

$$W = 0.53 \sqrt{\rho_n V_R} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.4)$$

特に、 $\rho_n = 4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ を用いれば、

$$W = 34 \sqrt{V_R} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.5)$$

であり、 $W = 285 \mu\text{m}$ の全空乏化電圧に要する逆バイアス V_R は 70 V に相当する。

また式 (3.1) より、放射線照射を受け、不純物濃度が高くなると、同じ空乏層の厚さを確保するのにより大きな逆バイアス電圧が必要になることもわかる。すなわち放射線照射後には、全空乏化電圧が高くなる。

理想的 p-n 接合における理想的電流-電圧特性を示す理想ダイオードの式に対して、空乏領域でのキャリアの生成・再結合効果も取り入れる。それによって、逆バイアス電圧 V_R を印加したときに流れる暗電流の電流密度 J_R は、式 (3.6) で与えられる。

$$J_R \simeq -J_s \left\{ \exp\left(-\frac{qV_R}{k_B T}\right) - 1 \right\} + \frac{qn_i W}{\tau_g} \quad (3.6)$$

$$J_s \equiv \frac{qD_p P_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \quad (3.7)$$

J_s は飽和電流密度、 D は拡散係数、 L は、 $L \equiv \sqrt{D\tau}$ で定義される拡散長、 P_{no} は n 型半導体の熱平衡状態におけるホール密度、 n_{po} は p 型半導体の熱平衡状態における電子密度、 n_i 固有キャリア密度、 N_D は n -バルク中のドナー密度、 τ_g はキャリアの生成時間、 T は絶対温度、 k_B はボルツマン係数。

式 (3.6) の右辺第一項は、 p^+ や n^+ 電極の少数キャリアが、熱拡散により空乏層に入り込むために発生する拡散電流、右辺第二項は、空乏層領域内で熱のため、電子-ホール対が生成（再結合）する効果によって生成された電流を表しており、これは空乏層の厚さに比例している。

式 (3.7) で表される飽和電流密度は、シリコン $p^+ - n$ 接合の場合次のような温度依存性を示す。

$$J_s \simeq \frac{qD_p P_{no}}{L_p} \propto n_i^2 \propto T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (3.8)$$

E_g はシリコンのエネルギーバンドギャップ。しかし、 k_B が小さな値のため $\exp(-qV_R/k_B T) - 1$ の項は V_R が全空乏化電圧程度であれば良い近似でゼロとみなせ、実質、飽和電流密度の寄与は無視して良い。式 (3.6) の 2 項目は n_i に比例するから、シリコンセンサーの形状に依存した係数を a とおくと、

$$J_R(V_R \sim V_{FD}) = aT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (3.9)$$

となる。 $E_g = 1.1 \text{ eV}$ を代入すると、室温のあたりで、温度が 7 上がると暗電流の値は約 2 倍になる。

以上より、基本的な I-V 特性が得られた。

1. 逆バイアス電圧が大きくなるにしたがって、暗電流は大きくなり、やがて $qn_i W / \tau_g$ で飽和する、
2. 温度が上昇するにしたがって、暗電流値は大きくなる。

実際のパレル SCT モジュールにおける典型的な I-V 曲線を図 (3.1) に示す。

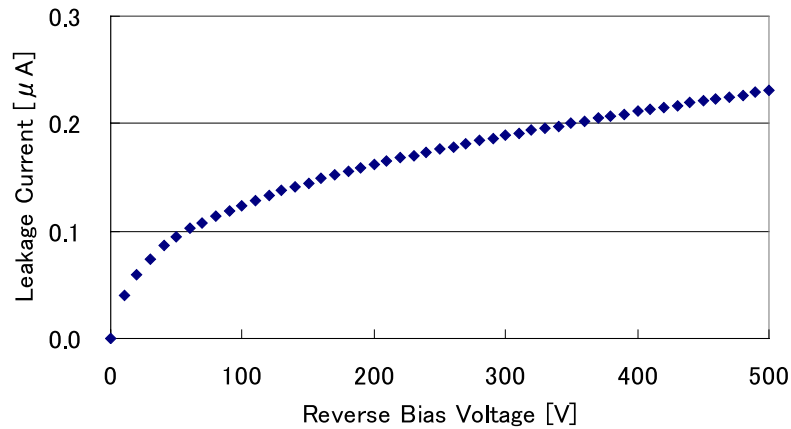


図 3.1: モジュール ID 268 における典型的な I-V 曲線。環境温度は 0 。逆バイアス電圧が大きくなるにつれて暗電流は大きくなり、全空乏化電圧 70 V あたりから、暗電流値の増加率は小さくなる。全空乏化電圧を超えた領域での暗電流値の増加は、表面暗電流の効果と考えられる。

3.2 マイクロ放電の原理

図 (2.3) に見られるように、 p^+-n 接合部は複雑な構造をしている。その形成過程によって、フォトレジストの形成、除去、エッチング、蒸着などのプロセスが必要で、どれかが不完全であったり、不純物が混入すると、異常な要素が発生する。それらの要素に周囲の電場が集中することによって局部的に高い電場が生み出される。そうしてできた高電場によって、暗電流の原因となるキャリアは移動中に異常に加速される。通常キャリアは、マクロ的には一定速度で移動するが、この急激な加速は平均自由行程よりも短い尺度で達成されるため、新たな電子-ホール対を生成できるエネルギーを得る。そのため次々と、非常に多くのキャリアが指数関数的に増えていき、雪崩増幅を起こす。こうしてマイクロ放電が発生する。

またこのことから、放射線照射後のシリコンセンサーでは、マイクロ放電は起き難くなる。 p -on- n 半導体が放射線照射を受けると、放射線が格子原子を変位させ格子に欠陥を作り、これによって n バルク内にアクセプタを作る。 n バルク内のアクセプタが増えるにしたがって“ n ”が“ p ”に変わっていく。すなわち、 p^+-n-n^+ 型シリコンセンサーが p^+-p-n^+ 型になってしまう。その結果、構造上多くの凹凸をその境界面に含んでいた p^+ インプラント電極- n バルク間の p - n 接合部が、あらたにストリップと反対側に移動することになる。構造上ストリップと反対側は、一様に平らな境界面になるように設計されているので、放射線照射後にはマイクロ放電を誘発するような局部的電場が発生し難い構造になっている。したがって、 p^+-n-n^+ 型から p^+-p-n^+ 型に変換された後は、空乏層が p - n^+ 接合から p^+-p 接合に達するまでは局部的電場の集中が起こらない。その後、 p^+-p 接合において、局部的電場の集中が起こる。すなわち、放射線照射後において、マイクロ放電の発生電圧は、全空乏化電圧分のオフセットを要することになり、マイクロ放電の実効発生電圧は放射線照射以前に比べて高くなる。よって、放射線照射後は、マイクロ放電が起こり難くなる。

さらに、放射線照射によって、暗電流の大きな要因の一つであるバルク内の不純物濃度が大きくなるので、マイクロ放電よりも大きな暗電流が発生することになる。よって放射線照射後のシ

リコンセンサーでは、マイクロ放電は重要な問題ではなくなる。

パレルSCTには、パレルSCTモジュールが2112台設置されることになっており、その内の900台、予備を含めて981台を日本のアトラスSCTグループが製造した。実際の組立作業は、浜松ホトニクス株式会社、セイコープレジジョン株式会社で行った。2002年2月にその量産を開始して、2004年12月に量産を完了した。981台の内約10%にマイクロ放電が発生していることが確認されている。

3.3 マイクロ放電のI-V特性

マイクロ放電のほとんどは、図(3.2)に見られるように、500V付近でマイクロ放電が発生している。マイクロ放電の発生電圧は個々のモジュールや、あるいはその原因によって様々に異なっている。日本のアトラスSCTグループが製造した981台のパレルSCTモジュールの内、約10%にあたる、105台のモジュールでマイクロ放電が発生している。その105台のうち、66.6%のモジュールが、図(3.2)のような、発生電圧400~500Vのマイクロ放電を起こしている。

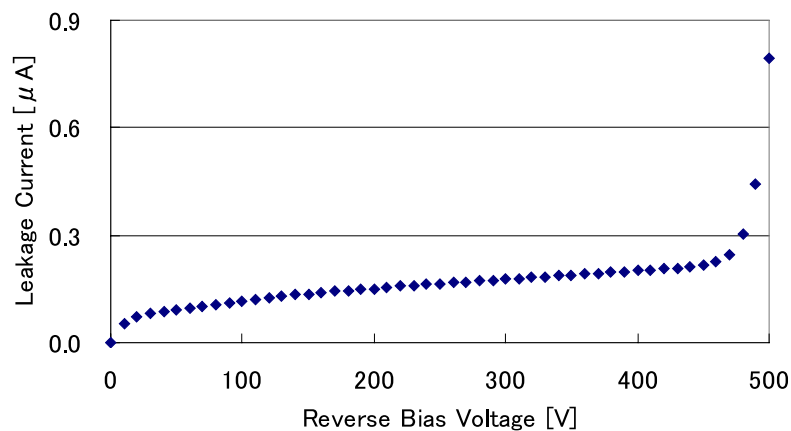


図 3.2: モジュール ID 47 における I-V 曲線。逆バイアス電圧 460 V でマイクロ放電が発生している。

後に詳しく述べるが、これらの発生電圧を持つマイクロ放電のほとんどは、発生後、短時間 (<1 時間) で消滅するものが多い。この消滅過程を、以後、減衰と呼び、マイクロ放電が減衰した後は、通常のもジュールと同じ I-V 特性を示す。

105 台の内、23.8%のモジュールは、図(3.3)のような、発生電圧 200~400 V のマイクロ放電を起こしており、比較的大きな暗電流値を示している。そして残りの、105 台の内 9.5%のモジュールは図(3.4)のような、発生電圧 0~200 V のマイクロ放電を起こしている。

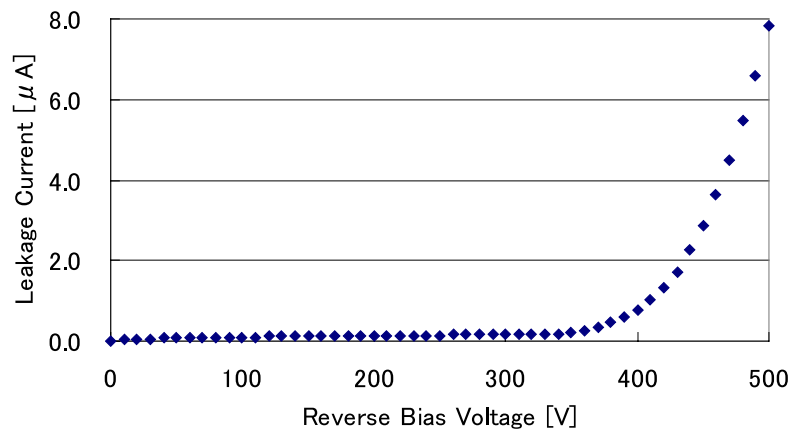


図 3.3: モジュール ID 527 における I-V 曲線。逆バイアス電圧 340 V でマイクロ放電が発生している。図 (3.2) の場合に比べるとマイクロ放電の発生電圧が低くなったことによる暗電流値の絶対値の増加が確認できる。

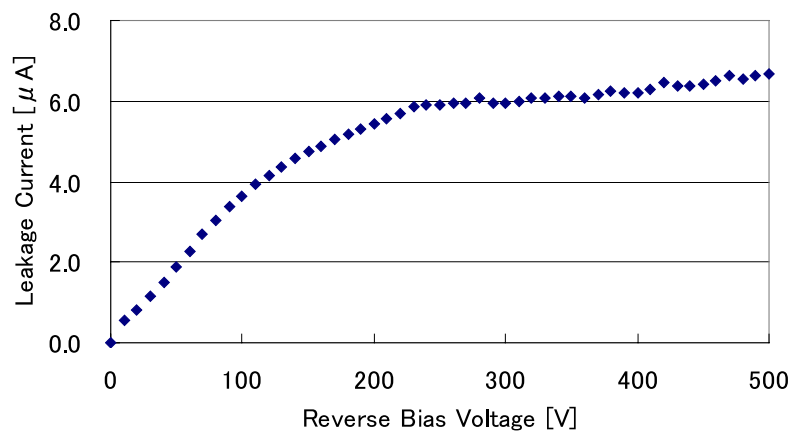


図 3.4: モジュール ID 958 における I-V 曲線。逆バイアス電圧 10 V でマイクロ放電が発生している。

3.4 測定環境の I-V 特性への影響

I-V 特性はまた、環境にも影響を及ぼされる。特に温度と湿度は重要となる。そこで、ここでは、温度変化および湿度変化に対する I-V 特性の変化を調べた。

温度及び湿度を適宜管理するために、熱電子工業株式会社製の電子恒温槽 TH-17P を使用、また湿度を管理するために、TDK 株式会社製の湿度センサー CHS-UPS(公称精度 $\pm 3\%RH$) を使用した。まず、恒温槽内部に、水を十分に含ませたスポンジを固定する。これによって、恒温槽作動時、恒温槽内部のファンによる風の効果でスポンジの水が蒸発し、恒温槽内部の湿度を 60%~80%程度上げることができる。同時に恒温槽内部に設置した湿度センサーからの湿度値を監視しながら、窒素ガスの恒温槽内部への流入量を適切に (500~1000 cc/min.) 調整する。窒素ガスの流入は、恒温槽内部の湿度を下げるためであり、また、それによって湿度は 0%まで下げることができる。こうして、窒素ガスの流入量を適宜調節することによって、必要な湿度環境そして温度環境を得ることができる。

また、温度には 2 種類の温度があり、1 つはモジュールが置かれる環境の温度、すなわちこれを“環境温度”と呼び、もう 1 つは、モジュール自体の温度、すなわちこれを“モジュール温度”と呼ぶことにする。

環境温度は、恒温槽によって管理、読み出しがなされ、モジュール温度については、フレキシブルハイブリッド上の読み出しチップ内に組み込まれているチップサーミスタ (103KT1608) による。ハイブリッド及びチップの動作に伴う発熱の効果によって、環境温度が -16 のときは、モジュール温度は約 0 、環境温度が 0 のときは、モジュール温度は約 15 、環境温度が 15 の時は、モジュール温度は約 27 の関係にある。

シリコンセンサーの温度は、環境温度とモジュール温度のほぼ中央値である。バレル SCT モジュールに対する各種測定においては、その環境温度は -16 、 0 もしくは 15 で行われた。

パレルSCTモジュールのI-V特性に関する温度依存性については、式(3.9)で記述されている。図(3.6)と図(3.5)において、実際のパレルSCTモジュールのデータと比較してみる。

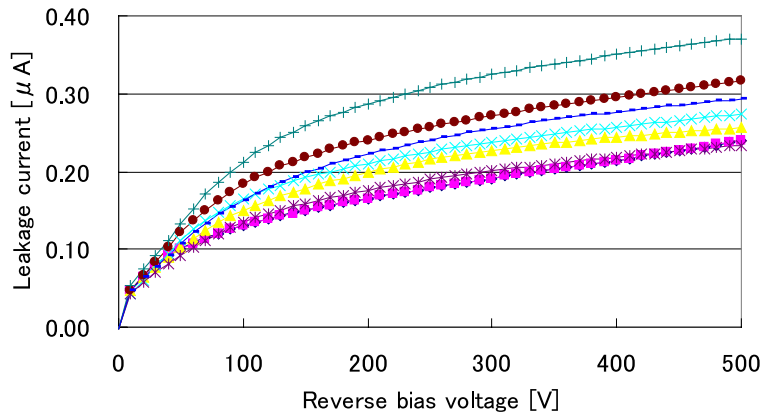


図 3.5: モジュールの温度 15 、湿度 0% における I-V 曲線

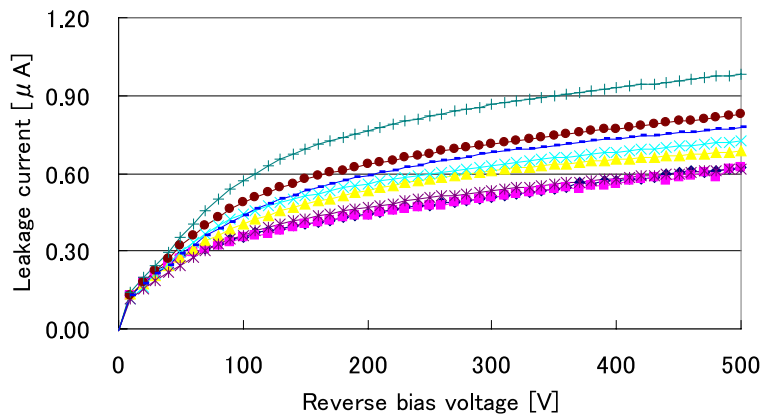


図 3.6: モジュールの温度 25 、湿度 0% における I-V 曲線

測定に使用したモジュールは、マイクロ放電を起こしていないモジュールを 8 台無作為に選び出したものを使用した。選び出された 8 台のモジュールに対して湿度 0% を保ち、モジュールの温度のみを 15 、25 と変化させて、I-V 特性を調べた。その結果、8 台のモジュールに対する暗電流値の平均値は、モジュールの温度 10 の上昇に対して約 2.5 倍の変化を示した。式(3.9)によれば、温度 10 の上昇に対して約 2.2 倍の変化を示すはずなので、これはよく合っている。

一方、同一の 8 台のモジュールに対してモジュールの温度 15 を保ち、湿度のみを 0%、50% と変化させて、I-V 特性を調べた。その結果全く変化が見られなかった。すなわちマイクロ放電を起こしていないモジュールに関して、I-V 特性は式(3.9)で記述される温度依存性のみを示した。

次に湿度依存性に関して、マイクロ放電を起こしているモジュールでは、マイクロ放電を起こしていないモジュールとは異なった結果を示した。図(3.7)と図(3.8)において、湿度と I-V 特性の関係を示す。

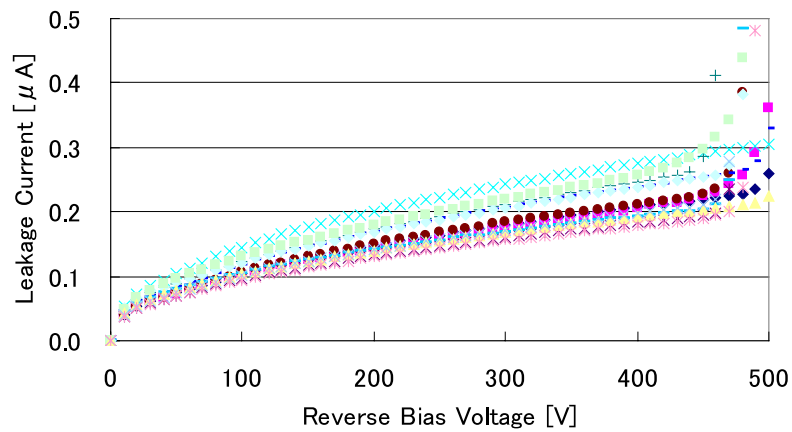


図 3.7: 湿度 0%、モジュール温度 15 における I-V 曲線

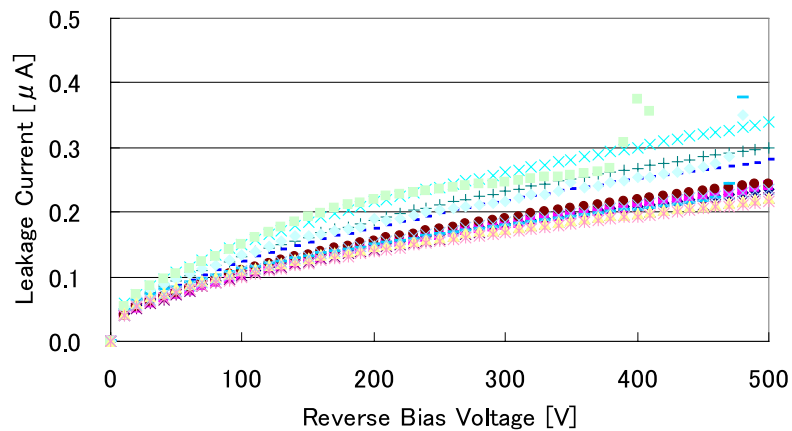


図 3.8: 湿度 50%、モジュール温度 15 における I-V 曲線

測定にしたモジュールは、マイクロ放電を起こしているモジュールの中から、13 台無作為に選び出したものを使用した。この 13 台に関しては、マイクロ放電に対して再現性があることを確認してある。モジュール温度 15 で一定に保ち、湿度のみを 0%、50%と変化させて結果、13 台の内 10 台のマイクロ放電が消えた。残り 3 台のマイクロ放電は発生し続けた。これより、高い湿度環境ではマイクロ放電の発生が抑制されることがわかる。一般に、湿度を調節できる様な設備の無い実験室環境では、晴天では 30%~40%、雨天では 50%を超える湿度値を示すので、I-V 特性を観察する場合には注意する必要がある。

一方、マイクロ放電を起こしていて、その再現性を確認され、さらに無作為に選び出された 6 台のモジュールに対して、湿度を 0%に保ち、モジュール温度を 15、25、15 と変化させて測定した結果を、図 (3.9)、図 (3.10)、図 (3.11) に示す。

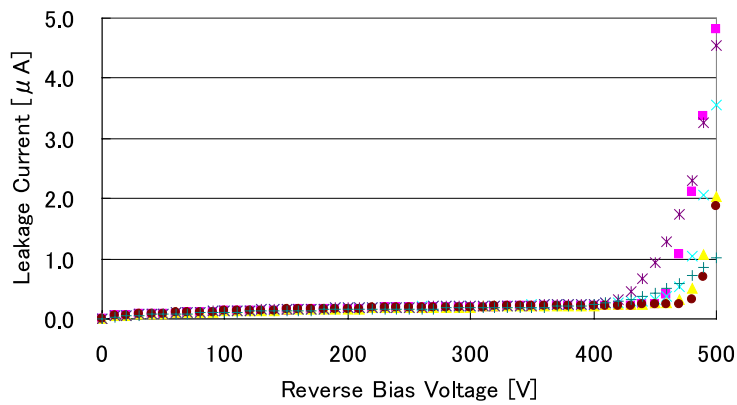


図 3.9: モジュール温度 15℃、湿度 0%における I-V 曲線、1 回目の測定

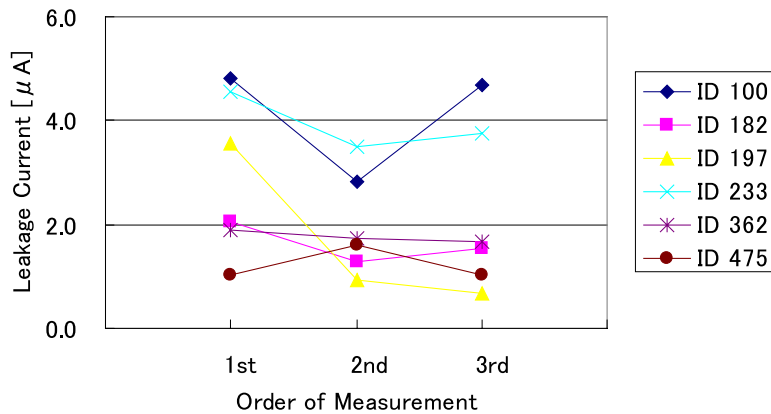


図 3.10: 湿度 0% で一定、モジュール温度 15℃ - 25℃ 間で変化させた時の暗電流値の変化、逆バイアス電圧は 500V の時の値。6 台のモジュールに対して 1 回目の測定では温度 15℃、2 回目では温度 25℃、3 回目では温度 15℃ に設定した。測定間隔は 1st-2nd 間が 1 時間、2nd-3rd 間が 2 時間とした。

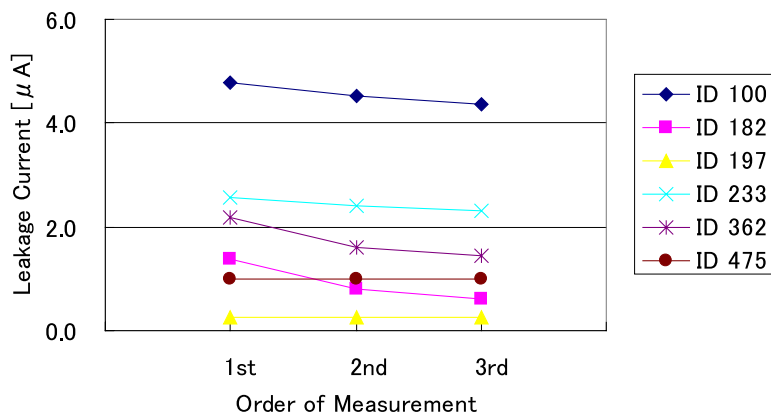


図 3.11: 湿度 0%、モジュール温度 15℃ で一定に維持した時の暗電流値の変化、逆バイアス電圧は 500V の時の値。6 台のモジュールに対して測定間隔は 1st-2nd 間が 1 時間、2nd-3rd 間が 2 時間とした。

1回目から3回目の測定において、温度の変化に対して、マイクロ放電が消えることはなかった。暗電流値に関しては、例えば逆バイアス電圧が300V付近のマイクロ放電の影響を受けていない範囲において、1回目から2回目の測定に見られるように、暗電流値の6台分の平均値は、温度10の上昇に対して約2.4倍の値に上がっていて、式(3.9)にしたがっている。また2回目から3回目の測定でも、同様に式(3.9)にしたがっていることが確認された。

500V付近のマイクロ放電発生後の暗電流の絶対値に関しては、モジュール温度が高い方がマイクロ放電暗電流の値が小さくなる傾向がみられた。

1回目の測定の1時間後に2回目の測定を行い、2回目の測定の2時間後に3回目の測定を行った。マイクロ放電暗電流に関しては、電圧の印加を伴う連続測定を繰り返すと、減衰によってその暗電流値は減少することがわかっている。そこで、同じ条件における再現性試験の場合には、そのマイクロ放電暗電流値の減少率は、平均で $1.56\mu\text{A}$ (1回目から2回目)、 $0.64\mu\text{A}$ (2回目から3回目)となった。一方、15 -25 の温度変化を伴う測定では、マイクロ放電暗電流値の減少率は、平均で $1.31\mu\text{A}$ (1回目15 から2回目25)、 $-0.41\mu\text{A}$ (2回目25 から3回目15)となった。ただし、6台中1台(図(3.10)中モジュールID 475)だけは、再現性試験において $0.00\mu\text{A}$ (1回目から2回目)、 $0.00\mu\text{A}$ (2回目から3回目)と、マイクロ放電暗電流値の変動を示さず、15 -25 の温度変化を伴う測定では $-0.58\mu\text{A}$ (1回目15 から2回目25)、 $0.58\mu\text{A}$ (2回目25 から3回目15)となった。マイクロ放電暗電流の値は、温度を15 に保っているときは、連続測定による減少を示すが、それに対して、15 -25 の温度変化を伴う測定では、15 から25 への温度上昇に対してはマイクロ放電暗電流値を減らし、25 から15 への温度減少に対してはマイクロ放電暗電流値を増やすことが確認できる。これより、マイクロ放電による暗電流に対しては、モジュール温度が高い方がその暗電流値は小さくなる傾向がみられた。

以上より、暗電流値は温度依存性、マイクロ放電は温度依存性及び湿度依存性があることがわかった。

品質管理の一貫として、バレルSCTモジュールのI-V測定は、環境温度-16、0あるいは15、測定環境となる恒温槽内部には、常時窒素ガスを500~1000 cc/minで流入しており、測定環境の湿度を0%に保って行った。またバレルSCTモジュールの保管場所にも同様に窒素ガスが流入しており、その湿度を~0%に保っている。

ここで、パレルSCTモジュールの量産場所(浜松ホトニクス株式会社、セイコープレジジョン株式会社)と検査場所(高エネルギー加速器研究機構)での各種検査を図(3.12)に示す。

パレルSCTモジュールに対する主な検査の流れ

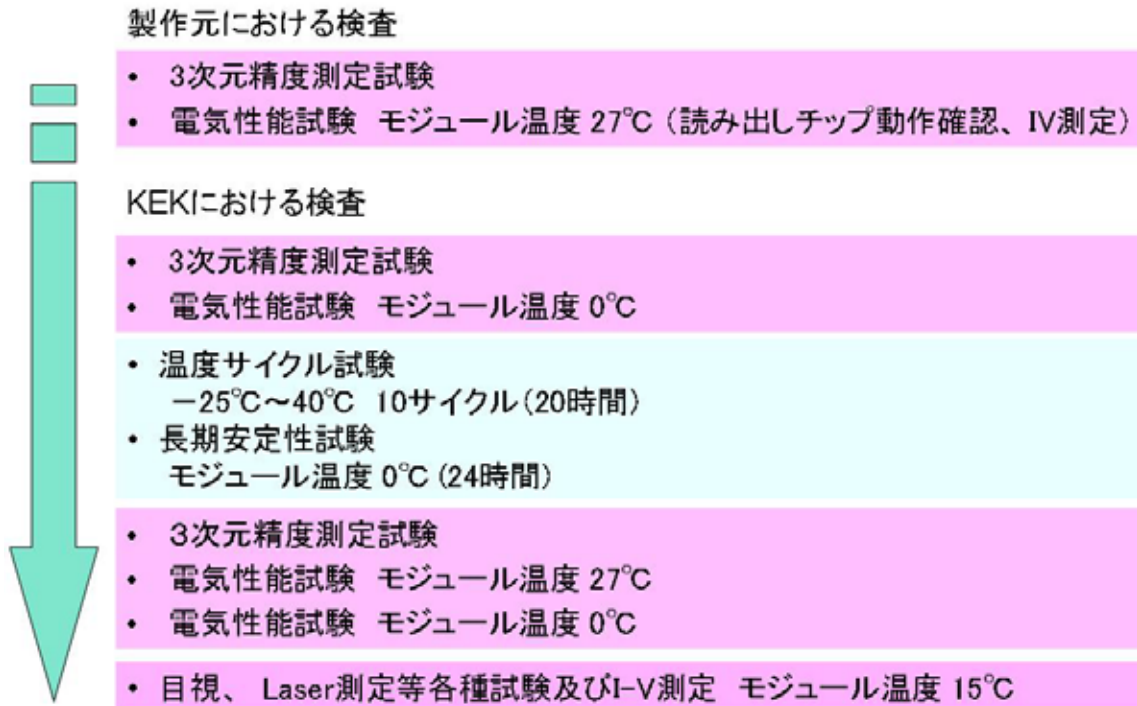


図 3.12: パレルSCTモジュールに対して行われる各種検査の流れの図。

まず、モジュールに組み立てられる前の工程において、シリコンセンサー単体に対するI-V測定が行われた。その後、製作元においてモジュールに組み立てられた後、製作元における出荷前の検査が施される。三次元精度測定試験で、組み立てられたモジュールの組み立て精度を45項目にわたってチェックする。また電気性能試験では、読み出しチップのテストパルスを用いた動作確認試験と、モジュールのI-V測定が施される。その後高エネルギー加速器研究機構に移送された後、製作元からの受け入れ後検査をはじめ、各種検査が行われる。温度サイクル試験及び長期安定性試験は、モジュールに対して環境負荷を与えることにより、初期不良の発見を目的として行われる試験である。

以上の検査の流れはアトラスSCTグループ全体で合意したもので、公式には5回、非公式にはそれ以上の回数のI-V試験が、1台のモジュールあるいはセンサーに対して行われた。ここで製作元でのI-V測定は、窒素ガスを用いた湿度管理を行わず、測定を行う部屋の湿度を50%に管理しているのみである。I-V測定は恒温槽内にて行うが、そのモジュールのI-V測定環境は温度のみ管理されており、環境温度15°Cである。湿度値は記録されていないが、環境温度を下げる過程で湿度値も低下すると推測される。

製作元以外における測定環境は、全てその温度及び湿度を管理している。

第4章 IR CCDカメラを用いたマイクロ放電の測定

4.1 ノイズによるマイクロ放電の評価

モジュール毎のマイクロ放電発生の有無は、I-V 特性を調べることによって簡単にわかる。さらに、モジュールの各チャンネルの入力ノイズの値を見ることによって、どのチャンネルでマイクロ放電が発生しているか特定できる場合がある。

マイクロ放電は、それが発生しているストリップ、あるいは場所において通常より大きなノイズを発生させる傾向にあることが確認されている。バレルSCTモジュールでは、平均すると通常1チャンネルあたり約 $1600 e^-$ 相当の入力ノイズを示す。マイクロ放電は、それ以上の大きさの入力ノイズを発生させる傾向がある。その代表的なものを図(4.1)に示す。1モジュールあたり 768×2 ストリップ、すなわち 1536 チャンネルが存在する。

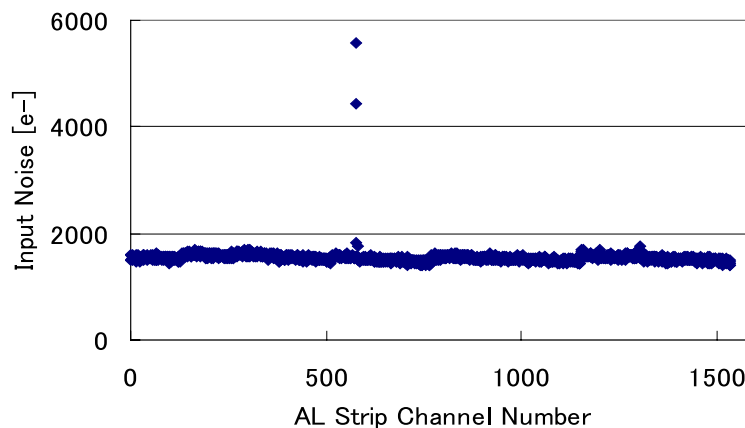


図 4.1: モジュール ID 88 における入力ノイズの分布、横軸はチャンネル 1 から 1536、縦軸は入力ノイズの値。

図(4.1)では、チャンネル 1 から 1536(マイクロ放電の影響を受けているためチャンネル 575~579 を除く)までの平均入力ノイズの値= $1540 e^-$ 、マイクロ放電が発生しているチャンネル No.577 における入力ノイズの値= $5590 e^-$ がそれぞれ示されている。この入力ノイズが発生しているストリップと、マイクロ放電が発生しているストリップは一致している。よって、このレベルの大きさの入力ノイズが発生していれば、マイクロ放電の発生しているチャンネルを特定できる可能性が大きい。

後に詳しく述べるが、IR 測定によって、マイクロ放電の発生場所は 72 箇所特定されている。各

マイクロ放電発生場所のことを以後スポットと呼ぶ。特定された 72 スポット (100%) 中、通常より大きい入力ノイズの発生を確認できた 56 スポット (78%) について、その入力ノイズ値の分布を、図 (4.2) に示す。

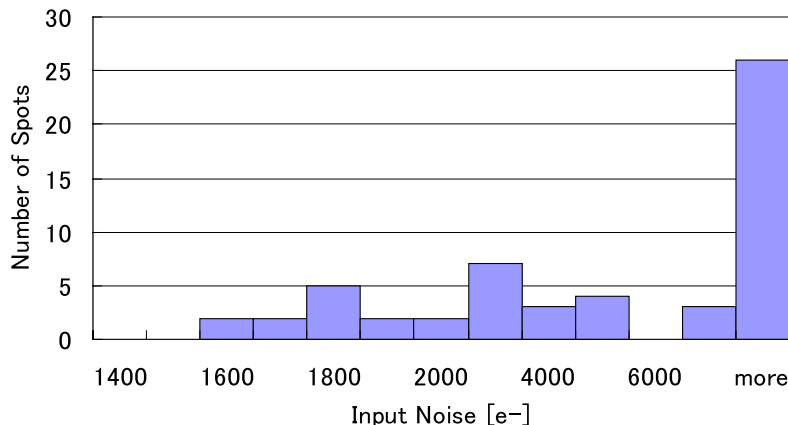


図 4.2: 特定された 72 スポット (100%) 中、通常より大きい入力ノイズを発生させている 56 スポット (78%) に関する入力ノイズ分布

72 スポット (100%) の内、42 スポット (58%) において、図 (4.1) に見られるような、通常の入力ノイズの平均値より 30%かそれ以上大きいノイズが発生している。その入力ノイズの発生しているストリップと、マイクロ放電が発生しているストリップは一致している。また、72 スポット (100%) 中、通常の入力ノイズに比べて 10%~30%大きい入力ノイズを示すものが 9 スポット (13%) ある。この代表的なものを図 (4.3) に示す。

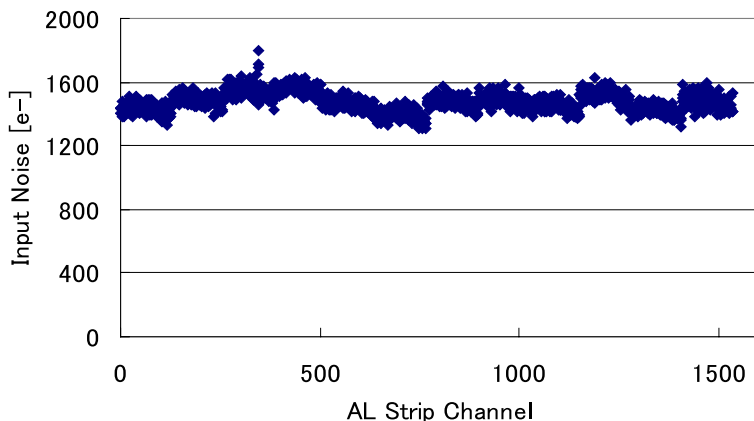


図 4.3: モジュールID 107 における入力ノイズ分布、平均ノイズ = $1475e^-$ (100%) に対して、マイクロ放電による入力ノイズ = $1715e^-$ (116%) が示されている。マイクロ放電はチャンネル No.343 で発生。

図(4.3)には、平均より16%大きいノイズを示すマイクロ放電が示されているが、このレベルの大きさの入力ノイズでもまだチャンネルの特定は可能である。これより小さなノイズ、10%以下のノイズを示す場合はそのチャンネルの特定は困難になってくる。いずれの場合においても、その入力ノイズが発生しているストリップと、マイクロ放電が発生しているストリップは一致している。72スポットの内、残りの16スポットはノイズの発生が確認できなかった。

マイクロ放電を起こしている105台においてIRカメラで確認できた72スポット(61台)については、56スポット(46台)で入力ノイズの増加を確認することができた。

一方、場所を特定することができなかった44台の内、ノイズ測定した35台について最大の入力ノイズの分布を図(4.4)に示す。このうち、5台については、異常なノイズの発生を確認できなかった。

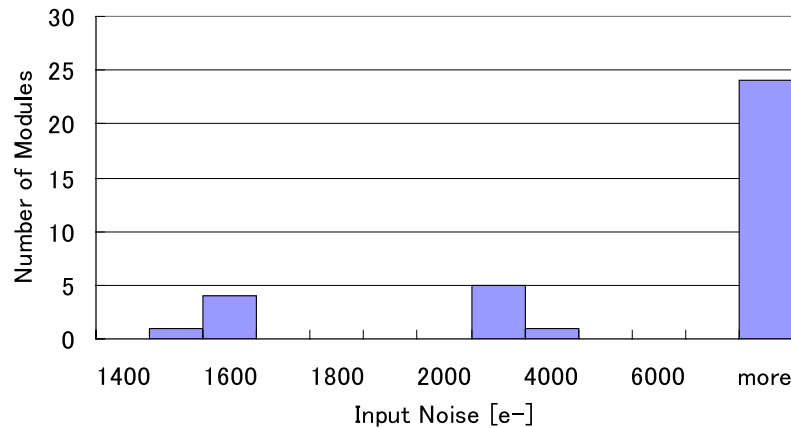


図 4.4: マイクロ放電が発生している105台の内、マイクロ放電の発生場所がIRカメラで特定できなかった44モジュールの内35モジュールに対する最大の入力ノイズ分布。

4.2 IR CCDカメラによるマイクロ放電の測定及びそのセットアップ

マイクロ放電は、局所的に集中した電場によって、雪崩増幅が発生することで起こる。雪崩増幅の際に発生する比較的エネルギーの高い光子を赤外線領域にまで感度のあるCCDカメラによって撮影することができる。これによって、マイクロ放電の発生場所が特定できる。

使用するカメラは、浜松ホトニクス株式会社製のC4880-26W CCDカメラで、表(4.1)にその仕様をまとめる。また図(4.5)に示されているように、このCCDカメラは1000nmまで感度がある。

Module name	C4880-21-26W
Effective number of pixels	512(H) × 512(V)
Cell size	24(H) × 24(V) μm
Effective area	12.29(H) × 12.29(V) mm
Readout noise	12 electrons r.m.s
Dark current	3 electrons/pixel/sec
A/D converter	16 bits
Exposure time	20 ms or more
Cooling temperature	up to -80
Ambiant storage temperature	-10 to 50
Ambiant operating temperature	0 to 40

表 4.1: Specifications of CCD camera

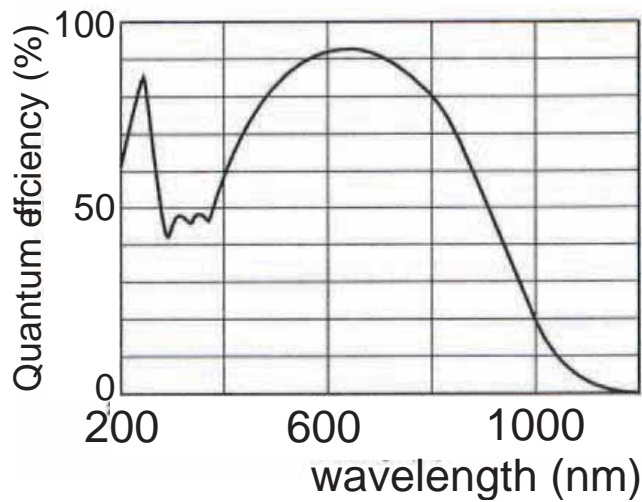


図 4.5: C4880-26W CCD カメラの分光特性

CCD カメラは、垂直方向の Z 軸ステージに固定され、ステージはステッピングモーターによって移動できる。CCD カメラ直下に、サーボ機構で制御された X-Y ステージがある。測定に用いるモジュールはここにセットされ、水平面を自由に移動できる。この X-Y ステージは冷却水で冷やされ、モジュール自体の冷却も担っている。CCD カメラはペルチェ素子により-55 まで冷却され、発熱は冷却水の循環によって除去される。これは、CCD カメラ自体の発熱が赤外線領域での撮影を妨害しないためである。赤外線領域での撮影においては、あらゆる熱や光が非常に大きなノイズとなって写りこむことになる。そのためセット全体が暗箱のなかに収められている。また暗箱の中には窒素ガスが常時流入しており、湿度を低下させる役目を担っている。セット全体の写真を図 (4.6) に示す。測定に際しては、CCD カメラに、広角レンズあるいは顕微鏡用対物レンズを選び、取り付けて使用する。以後、以上の一連のセットを用いた測定を、IR 測定と呼ぶことにする。

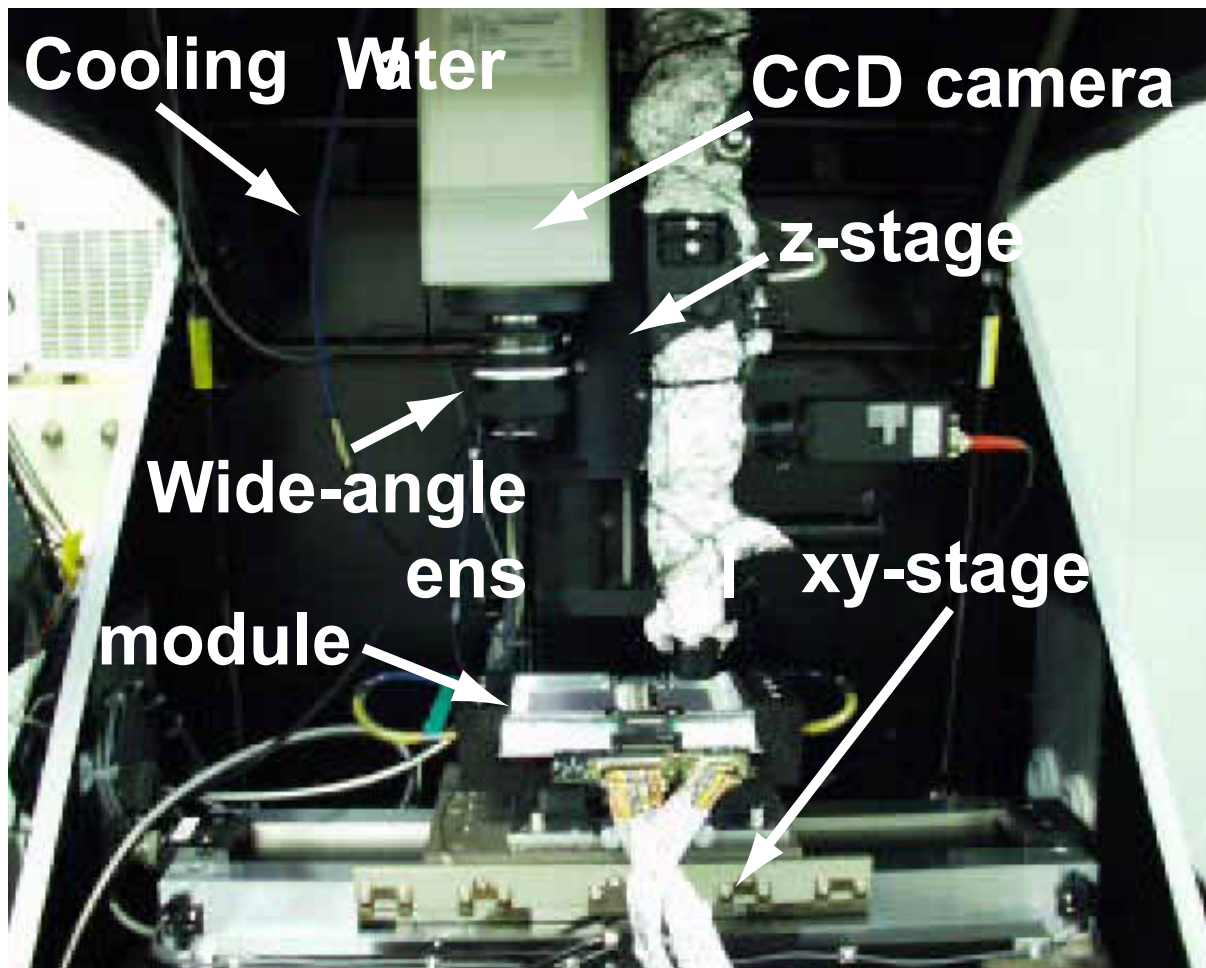


図 4.6: CCD カメラと、台上にセットされたモジュール、また CCD カメラには広角レンズが取り付けられている。

実際の手順を次に示す。またその過程における実際の画像を図 (4.7) に示す。

1. I-V 測定に基づいて IR 測定に用いるマイクロ放電モジュールを選ぶ、
2. 入力ノイズのデータを用いてマイクロ放電を起こしているセンサーあるいはチャンネルを絞り込んでおく、(オプション)
3. 可視光の下で、参照用の写真を撮影する (図 (4.7)-1)、
4. 暗箱を閉じて、ノイズの写真を撮影する (図 (4.7)-2)、
5. モジュールに逆バイアス電圧を印加して、マイクロ放電によって発光したスポットを撮影する (図 (4.7)-3)、
6. スポットを写した画像から、ノイズを写した画像を差し引き、ノイズを取り除く、
7. 可視光の下で撮影した画像に、ノイズを取り除いたスポットの画像を重ね合わせ、スポットの場所を特定する (図 (4.7)-4)。

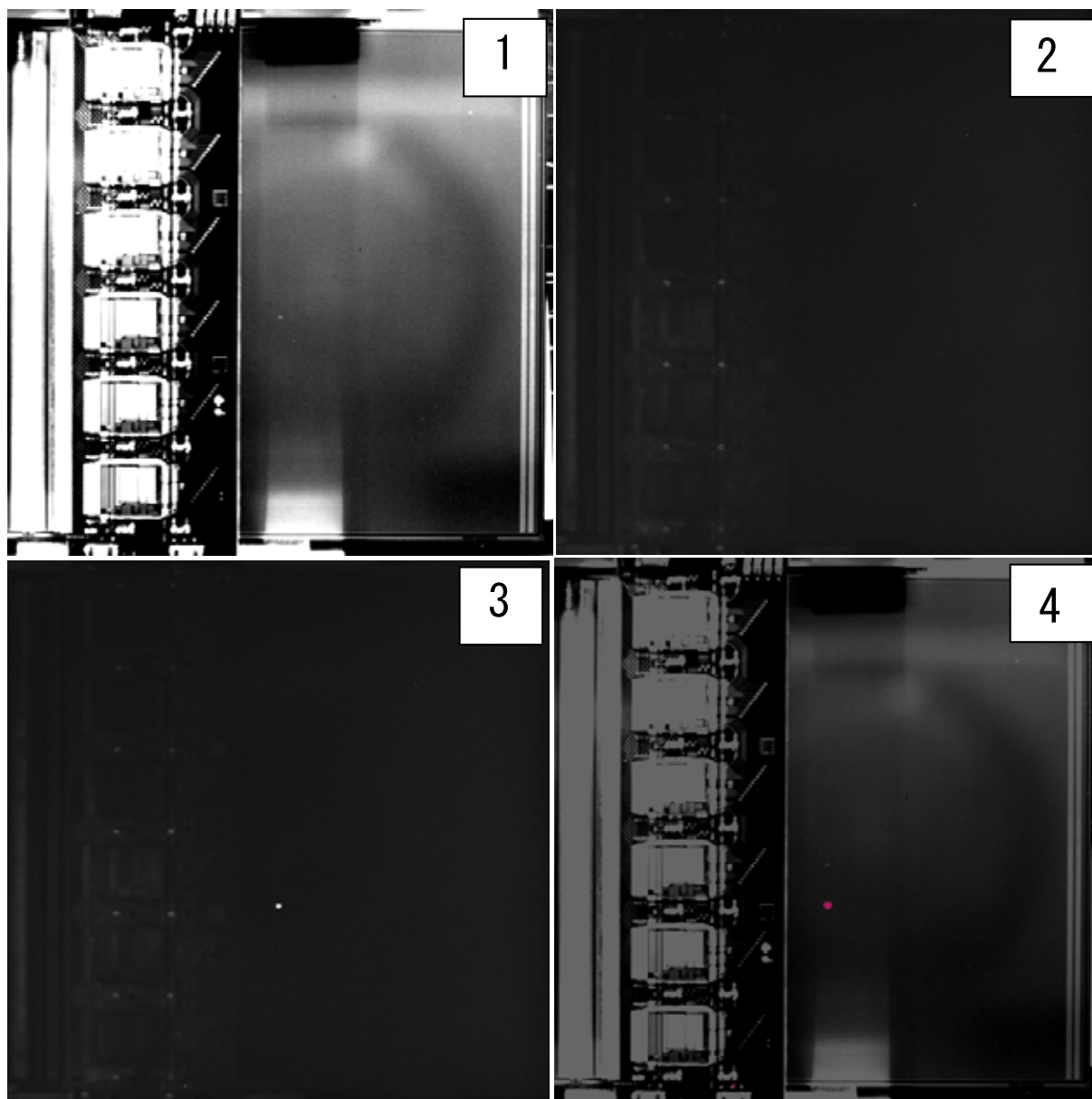


図 4.7: IR 測定における各段階で得られる画像。画像 4 では、便宜上白く写っていたスポットを赤く塗ってある。使用したレンズは広角レンズ。写真はモジュール ID 627 の撮影結果

最初に、発光したスポットを探すために広角レンズを用いる。これによって、64.0 mm×63.6 mmのセンサー1枚が全て視野に収まる。そのため、モジュール一台を撮影するためには、最低4回の撮影が必要になる。次に、発見されたスポットに焦点を当て、拡大して撮影するために、顕微鏡用対物レンズを取り付ける。顕微鏡用対物レンズには4種類の倍率を適宜使い、それによって得られる画像の倍率は25倍、62.5倍、125倍、250倍となる。

撮影に際しては、スポットの発光の強弱によって露光時間を適宜に調整してS/N比を最適化する。基本的にスポットの発光の強弱は、そのスポットに流れる暗電流値に比例するはずなので、実際にはマイクロ放電で誘起される暗電流の値に対して、CCD素子露出時間を調節した。実験的に導き出されたCCD素子露出時間と暗電流値の適正な関係を、図(4.8)に示す。

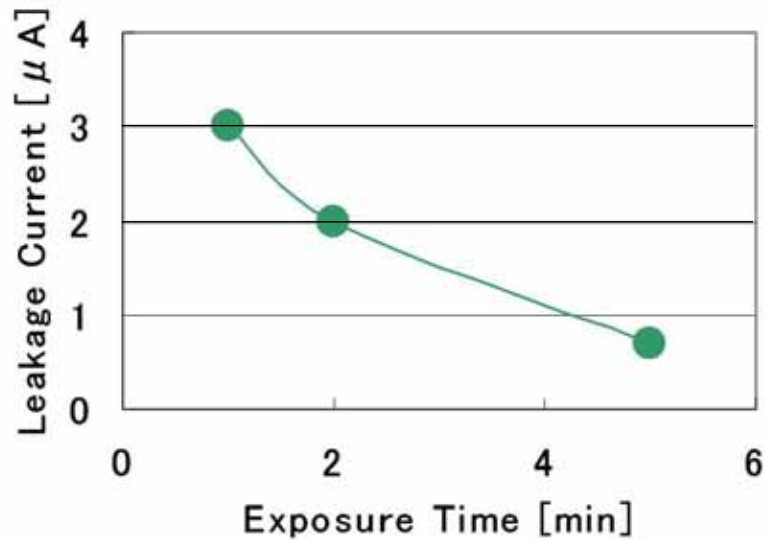


図 4.8: 適正な CCD 素子露出時間と暗電流の関係

また、広角レンズではなく、顕微鏡用対物レンズを使用した場合は、CCD素子露出時間は20秒~30秒で足りる。

第5章 測定結果

5.1 マイクロ放電とその発生源の分類

5.1.1 IR 測定結果の概要

日本のアトラス SCT グループが製造した 981 台 (予備を含む) のバレルモジュールの内、約 10% にあたる 105 台のモジュールにおいて、マイクロ放電の発生が確認されている。その 105 台全てに対して、IR 測定を行った。その結果、105 台 (100%) 中 61 台 (58%) のモジュールにおいて、スポット、すなわちマイクロ放電が発生している場所を特定することに成功した。

その他のモジュールのうち、30 台 (24%) のモジュールにおいては、スポットの特定はできなかった。これは、IR 測定中にマイクロ放電による暗電流は、スポットを発光させるのに十分に必要な暗電流値を確保できたにも関わらず、スポットを発見できなかったものである。この原因の一つとして、後に詳しく述べるが、センサーの一部を上から覆い隠す様に取り付けられているフレキシブルハイブリッドによって、スポットが隠されていることが考えられる。ここで、スポットを発光させるのに十分な暗電流値とは、おおよそ $1.0 \mu\text{A}$ 以上の暗電流値のことである。

残りの、14 台 (14%) のモジュールについても、スポットの特定はできなかった。これについては次の様な理由がある。IR 測定中、マイクロ放電の暗電流値が比較的小さく、 $0.8\sim 0.9 \mu\text{A}$ 以下であった。この大きさの暗電流値では、発光したとしても非常に弱く、スポットの発見は困難になる。あるいは、暗電流値が小さい事により、IR 測定に必要な CCD 素子露出時間を待たずにマイクロ放電が減衰してしまう場合も、IR 測定は不可能となる。

以上の状況から、マイクロ放電の発生源の分類に関しては、まず、そのスポットを特定できた 61 台のモジュールに対して行う。

また、その 61 台中、表 (5.1) に示すモジュールは、次に述べる分類に基づいて、複数のスポットを持つモジュールとして扱うことにする。

- 1 モジュールの中の 4 枚のセンサーにおいて、異なったセンサー上で、マイクロ放電のスポットが特定された、
- 1 モジュール中、同一のセンサー上において、複数の独立した傷あるいは状況が原因でそれぞれマイクロ放電スポットが特定された、
- 例えば、長さ $200 \mu\text{m}$ 傷がセンサー上に存在して、その傷の両端でそれぞれマイクロ放電が発生、合計 2 つのスポットが特定されたとしても、それは 1 つのスポットとして扱う。

これによって、マイクロ放電を起こしているモジュール 105 台中、61 台、72 スポットについて、その発生源または発生場所を特定し、分類していく。

モジュール ID	認定するスポットの数
107, 915, 946, 950	2
268, 885	3
228	4

表 5.1: 複数のスポットを持つモジュールの一覧及びそのスポットの数

5.1.2 マイクロ放電の発生源の形状による分類

マイクロ放電の発生源または発生場所を特定できたモジュール 61 台 (72 スポット) について、その発生源の形状、性質別に分類を行った。表 (5.2) には、マイクロ放電の原因を分類してモジュール台数、スポット数を示した。

マイクロ放電の発生原因	モジュール数 (スポット数)
外傷	2 (2)
インプラントの欠陥	7 (13)
アルミ下に条状の傷	6 (6)
アルミエッジに泡状の異物	5 (6)
パイアスリングでの発光	2 (2)
酸化膜の赤斑点	7 (7)
酸化膜の黒斑点	15 (16)
原因は見当たらない	4 (4)
痕跡あり (分類不能)	3 (4)
判別不能	11 (12)

表 5.2: 発生源、場所を特定されたモジュール 61 台 (72 スポット) に対するその原因の形状、性質別分類。

“ 外傷 ”とは、明らかに外部から受けた傷によって引き起こされた場合を指す。図 (5.1) に見られるように、“ 外傷 ”においてはアルミストリップの上から傷が付いている。明らかにセンサー製造後に、モジュールの組み立てかテスト過程に外部から傷を受けたものである。

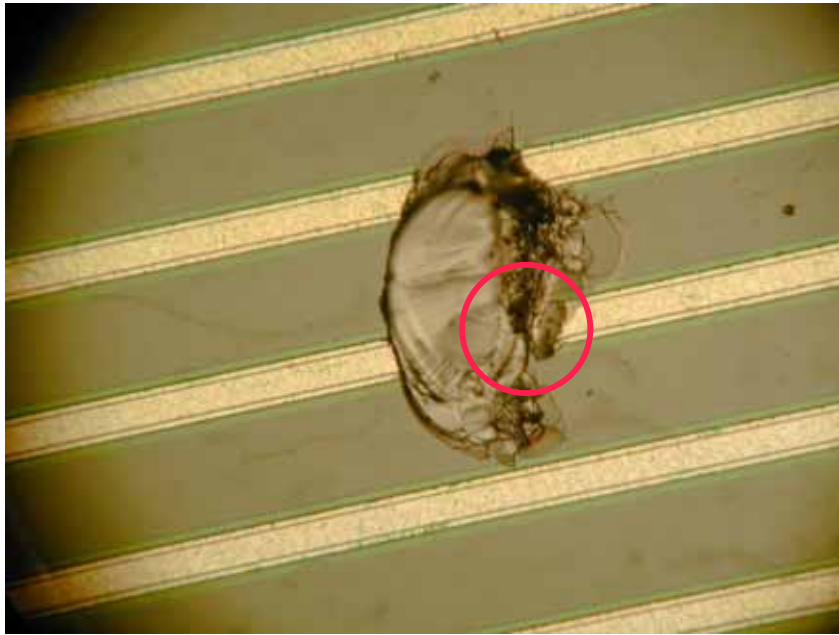


図 5.1: “外傷”に分類されたモジュール ID 917 の画像。画像中、赤く書き込まれた円の中心において、ちょうど傷とアルミエッジが重なっている部分で、スポットは発光していた。さらに、このモジュールの I-V 曲線を図 (5.2) に、暗電流-経過時間の関係を図 (5.3) に示す。

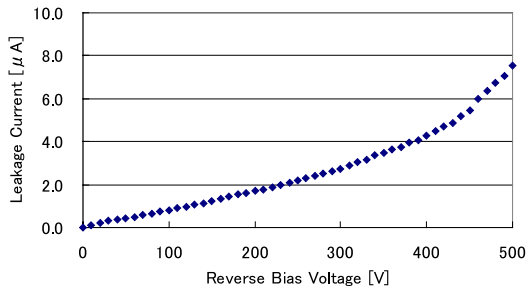


図 5.2: モジュール ID 917 における I-V 曲線

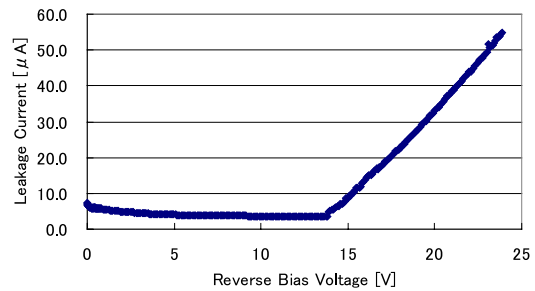


図 5.3: モジュール ID 917 における暗電流-経過時間の曲線。電圧を 500 V に維持したまま、その後 24 時間の暗電流の値の推移。図中、14 時間後から暗電流値が増加を始めて、24 時間後には 55 μ A に達した。この測定以後、モジュール ID 917 については、暗電流-経過時間の曲線を測定しても減衰を示さなくなり、増加のみ示すようになった。

“インプラントの欠陥”とは、次のような状況で起きた欠陥を指す。まず、図(2.3)で説明したように、 SiO_2 被膜でカバーされた n 型シリコンにインプラント電極を埋め込むとき、被膜の一部をエッチングしなければならない。そのときに例えばレジストの一部が剥離したり、破損したりされてしまうと、正常なエッチングができない。その後の工程ではインプラント電極は欠陥のまま埋設される。インプラント自体にエッジが形成されてしまうと、一様でない境界面のため、そこに局所的な電場を集中させてしまう状況が起こる。すなわちマイクロ放電が発生してしまう。この様に、インプラントの形状が異常なものを、“インプラントの欠陥”と分類する。アルミストリップ上には、両側エッジ付近にそれぞれ一本ずつ直線が見える。これはインプラント埋め込み時にあける穴に対応する線である。正しく穴が開き、インプラントが埋め込まれた場合、そのインプラントの幅でアルミ上両側エッジ付近に直線が見られることになる。ところがこのアルミ上の線が途切れてしまう場合(図(5.4)参照)や、外側へ広がっている場合(図(5.38)参照)などは、インプラント埋設用の穴開けに失敗して、インプラントに欠陥があるとわかる。このアルミ上の線の変形が、“インプラントの欠陥”の特徴を表す。

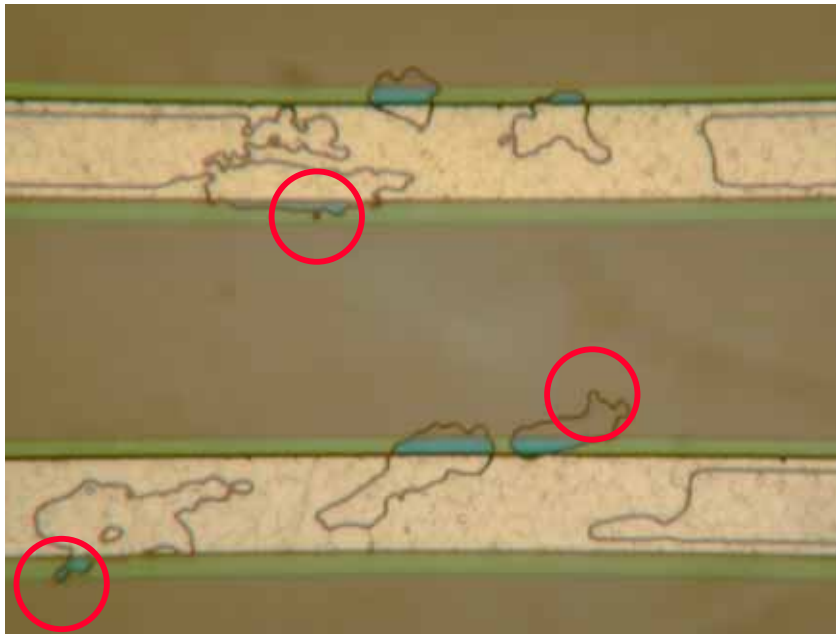


図 5.4: “インプラントの欠陥”に分類されたモジュール ID 827 の画像、赤外線撮影時に発光していた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心に位置する。この図では、同時に 3 箇所が発光しているが、この画像部分を含むより広域な画像を図(5.5)では合計 6 箇所において発光している様子が見える。全てが一連のインプラントの欠陥によるものであることも確認できる。またこのモジュールに対する I-V 曲線及び暗電流-経過時間の関係を、図(5.6)および図(5.7)に示す。

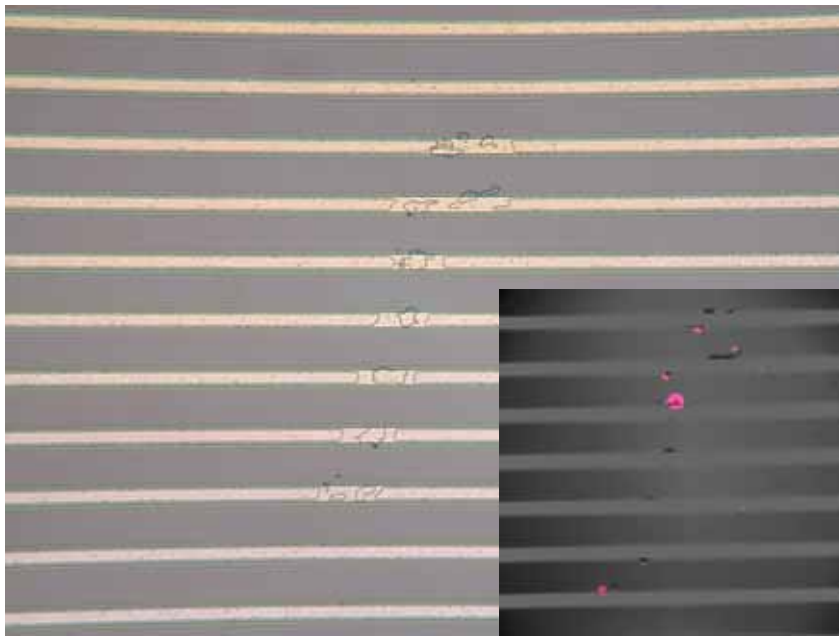


図 5.5: 図 (5.4) を含む、より広域な範囲の画像。小画像は赤外線において撮影された発光の写真。発光点は便宜上赤く塗られている。合計 6 箇所において発光しており、そしてその全てが一連のインプラントの欠陥によるものであることも確認できる。

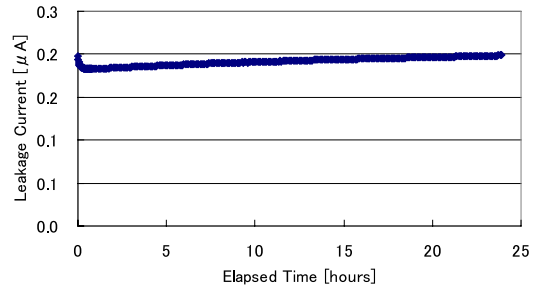
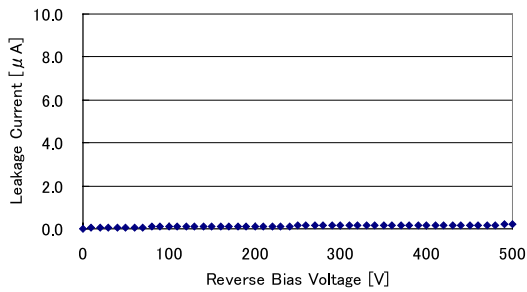


図 5.6: モジュール ID 827 における I-V 曲線。500V で 0.2 μ A 程度の非常に小さな暗電流値を示している。

図 5.7: モジュール ID 827 における暗電流-経過時間の曲線。

“ アルミ下の条状の傷 ”とは、アルミの表面は正常であるが、アルミの下に条状の傷があるものを指す。インプラントは正常に形成されている状況から、製造工程中で、インプラントを形成する工程以前に付いた傷だと考えられる。代表的なものを図 (5.8)、図 (5.11) に示す。これらの図では、傷が赤く見えるが、これは酸化膜の厚さや表面の傾斜具合等によって赤く見える現象。

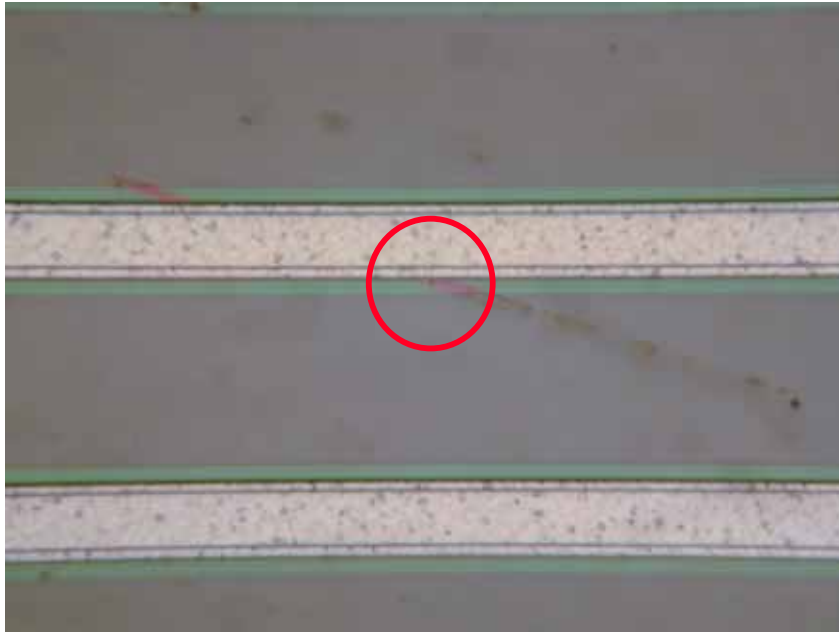


図 5.8: “ アルミ下の条状の傷 ”に分類されたモジュール ID 627 の画像。赤外線撮影した際にスポットが光っていた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心に位置する。条状の傷はアルミストリップの下を通っている様子がわかる。このモジュールに対する I-V 曲線及び暗電流-経過時間の関係を、図 (5.9) および図 (5.10) に示す

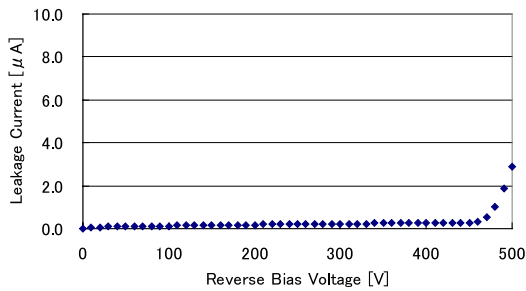


図 5.9: モジュール ID 627 における I-V 曲線。

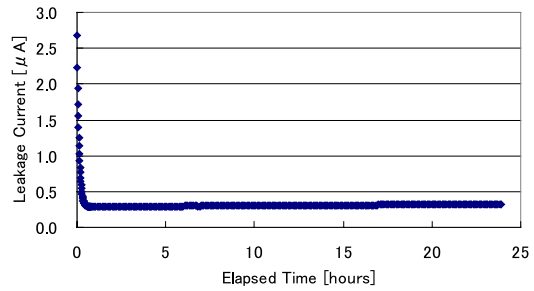


図 5.10: モジュール ID 627 における暗電流-経過時間の曲線。

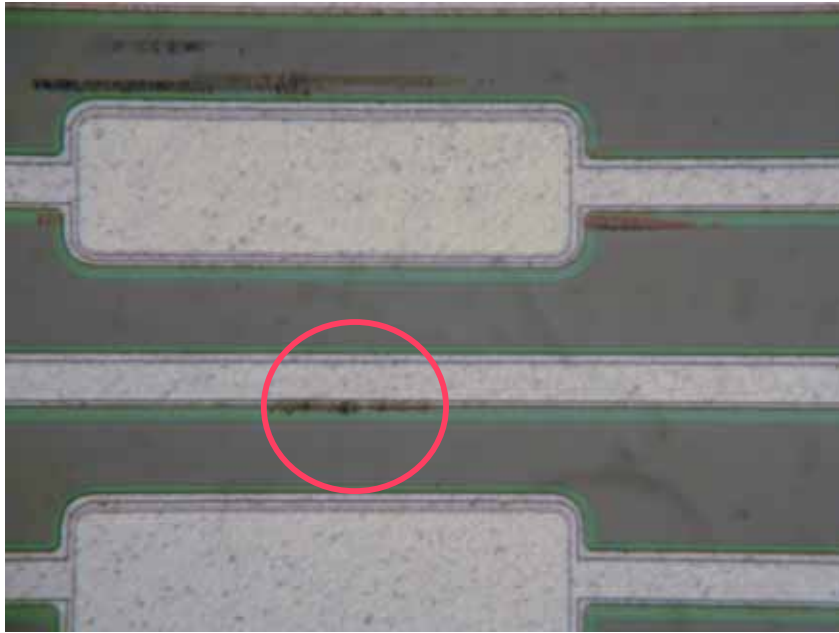


図 5.11: “ アルミ下の条状の傷 ”に分類されたモジュール ID 706 の画像。赤外線撮影の際にスポットが光っていた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心に位置する。傷はアルミ下を通っているが、その上に蒸着しているアルミのエッジに影響して、傷に沿った影を作っている。このモジュールに対する I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係は図 (5.12) 及び図 (5.13) に示す。

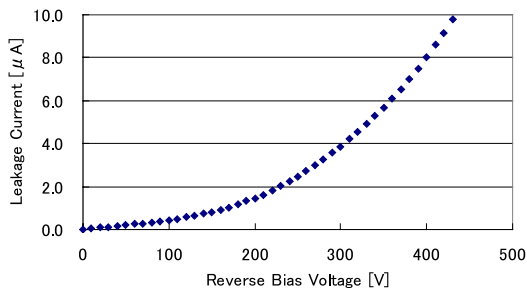


図 5.12: モジュール ID 706 における I-V 曲線

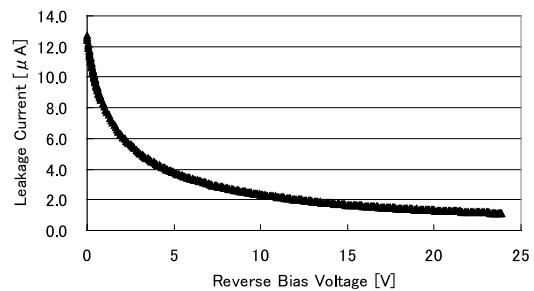


図 5.13: モジュール ID 706 における暗電流-経過時間の曲線。

“アルミエッジの泡状の異物”とは、アルミエッジに泡の様に見えるものや、あるいはアルミエッジ及びその周囲に点在する黒色の斑点を指す。アルミの形成が正常なことから、アルミストリップ蒸着用のマスクの縁に付いた異物か、 Si_3N_4 層の表面に付いた異物を原因とするものかと思われる。酸化膜が正しく絶縁すれば、アルミはAC結合のため電場を乱すことは無いだろうが、スポットが発生した箇所は、周囲のパターンと異なり、より下層に達する問題があると考えられる。代表的なものを図(5.14)や図(5.32)に示す。

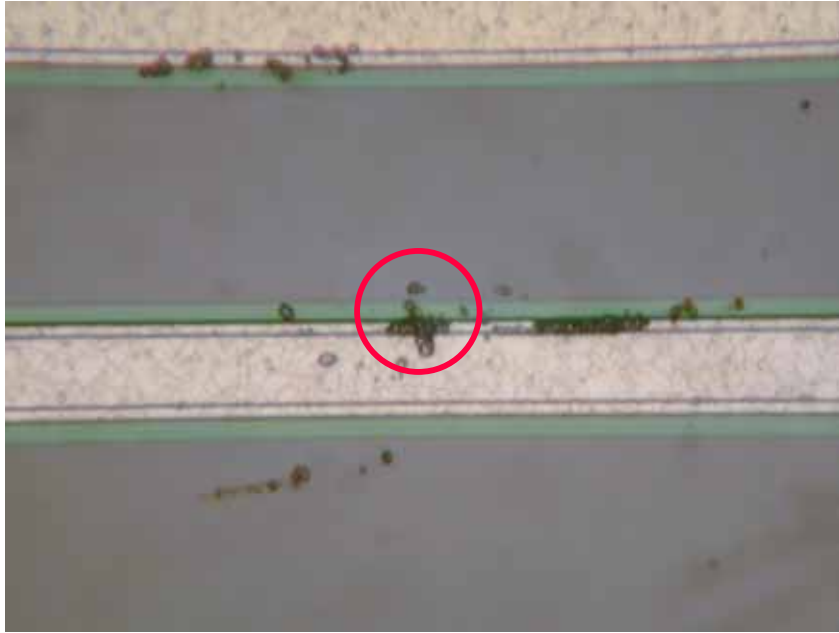


図 5.14: “アルミエッジの泡状の異物”に分類されたモジュール ID 931 の画像。赤外線撮影した際にスポットが光っていた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心に位置する。このモジュールに対する I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係は図(5.15)及び図(5.16)に示す。

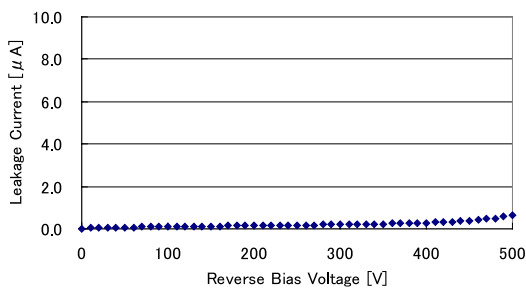


図 5.15: モジュール ID 931 における I-V 曲線

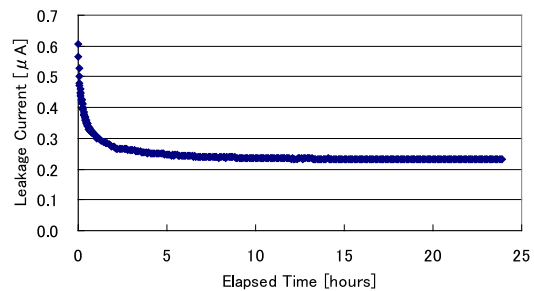


図 5.16: モジュール ID 931 における暗電流-経過時間の曲線。

“ バイアスリングでの発光 ”とは、有感領域を囲むように位置するバイアスリングでの発光を指す。分類された2台の内、1台は図(5.17)に示す。写真では見辛いですが、発光箇所わずかに色が異なり、何らかのプロセス異常があったものと思われる。もう1台はマイクロ放電の発生場所は確認できたが、そこに痕跡を発見できなかった。



図 5.17: “ バイアスリングでの発光 ”に分類されたモジュール ID 864 の画像。赤外線撮影した際にスポットが光っていた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心に位置する。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図(5.18)及び図(5.19)に示す。

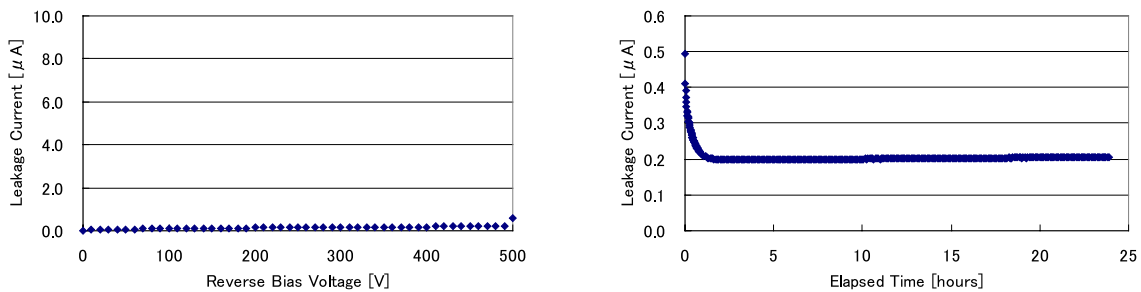


図 5.18: モジュール ID 864 における I-V 曲線、図 5.19: モジュール ID 864 における暗電流-経過 500V で 0.6 μA 程度の暗電流値を示している。時間の曲線。

“酸化膜の赤斑点”、“酸化膜の黒斑点”とは、酸化膜や Si_3N_4 膜において、マイクロ放電が発生している状況を指す。黒や赤の斑点は異常の程度の違いによるもので、その形状から SiO_2 や Si_3N_4 皮膜でシリコン表面等を覆う工程において、表面が完全にきれいな状態ではなかった可能性が考えられる。あるいはその下層のインプラントが異常であるとも考えられる。インプラントで原因とするならば、電場の局所的集中を起こす可能性がある。また、それによって、その上の酸化膜層が不均一になり、あるいは微妙な凹凸が発生して、赤斑点等の色の変化を起こさせていると考えられる。それぞれの代表例を図(5.20)、図(5.23)、図(5.29)、図(5.35)に示す。



図 5.20: “酸化膜の黒斑点”に分類されたモジュール ID 642 の画像。赤外線撮影した際にスポットが光っていた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心、アルミのエッジに存在する黒斑点上。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図(5.21)及び図(5.22)に示す。

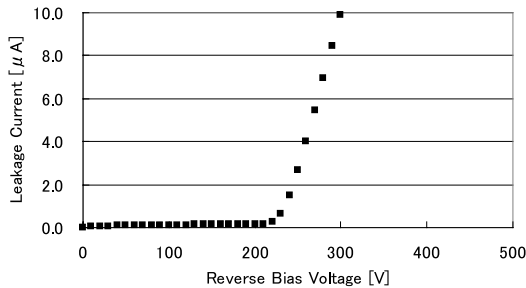


図 5.21: モジュール ID 642 における I-V 曲線。500V で 68 μA 程度の暗電流値を示す。

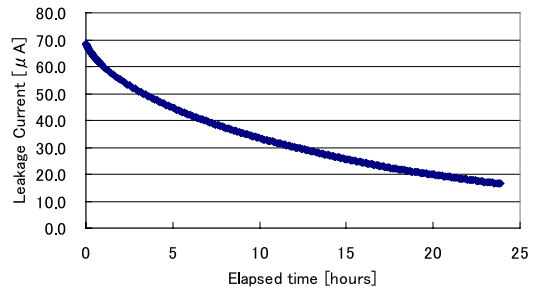


図 5.22: モジュール ID 642 における暗電流-経過時間の曲線。24 時間後でも 16 μA 程度の暗電流値を示す。

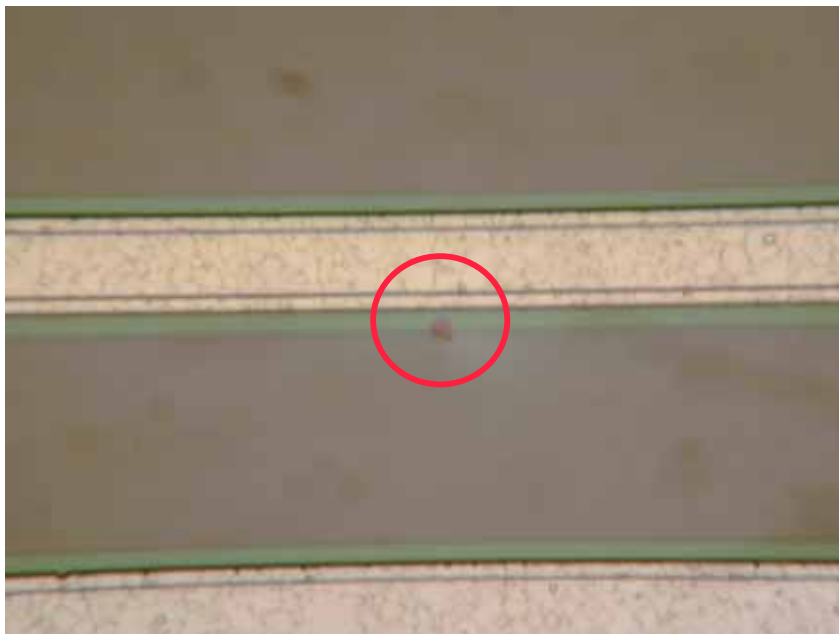


図 5.23: “酸化膜の赤斑点”に分類されたモジュール ID 128 の画像。赤外線撮影した際にスポットが光っていた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心、赤斑点の輪郭上において、アルミエッジに最も近い位置。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図 (5.24) 及び図 (5.25) に示す。

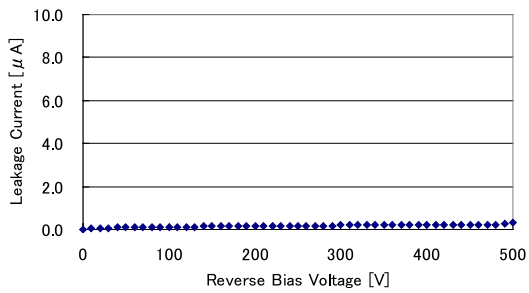


図 5.24: モジュール ID 128 における I-V 曲線

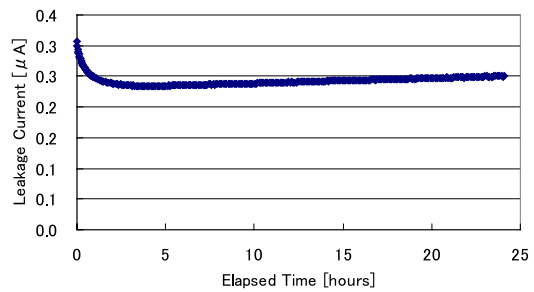


図 5.25: モジュール ID 128 における暗電流-経過時間の曲線。

“原因は見当たらない”とは、スポット及びその場所を明確に特定できたにもかかわらず、その場所及び周辺に、マイクロ放電の原因候補となるような痕跡が全く確認できなかった場合を指す。代表的なものを、図(5.26)に示す。またこれは、表面に欠陥が無いことを確認できたということでもあるので、欠陥は表面酸化膜より内部あるいはアルミの下に存在する可能性が考えられる。

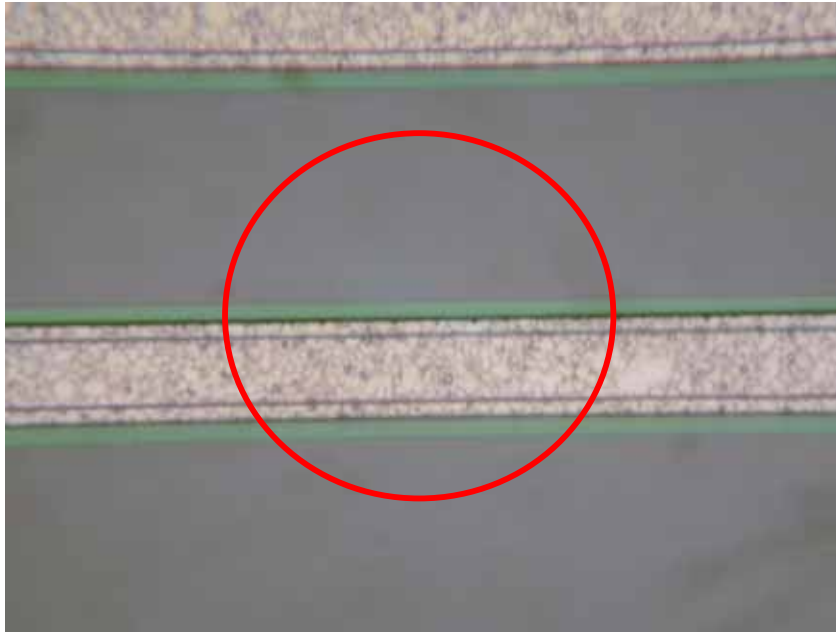


図 5.26: “原因が見当たらない”に分類されたモジュール ID 949 の画像。赤外線撮影した際にスポットが光っていた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心に位置するアルミのエッジ部分であり、そのスポットが光っていた場所およびその周辺には、何の痕跡も確認できない。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図(5.27)及び図(5.28)に示す。

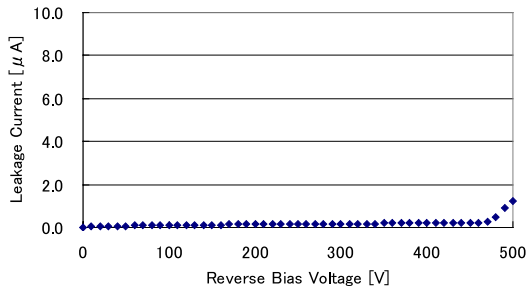


図 5.27: モジュール ID 949 における I-V 曲線

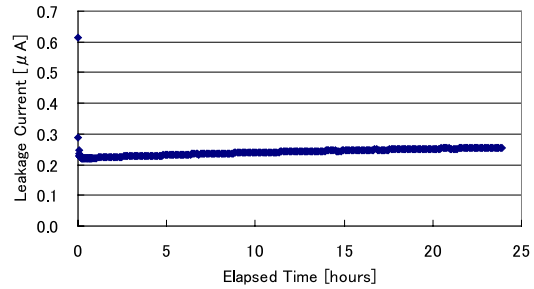


図 5.28: モジュール ID 949 における暗電流-経過時間の曲線。

可視光での撮影は、IR での画像を見て特徴的なパターンを参照しながら行う。この参照パターンが全く無い場合は可視光撮影は不可能である。

“ 痕跡あり ”とは、スポットの発光を確認後、可視光での撮影が測定スケジュール上不可能であった場合には、図 (4.7-1) あるいは (4.7-4) の様な、IR 測定時に撮影した画像によってマイクロ放電の発生源を識別しなければならない。この画像は、その性質上可視光での画像より暗く、マイクロ放電の発生源の痕跡を認めることはできてもその形状まで詳細に観察することはできない。したがって“ 痕跡あり ”として、それ以上の分類を行わなかった分類である。

“ 判別不能 ”とは、スポットの確認後、IR 測定時に撮影した画像には痕跡が無いように見える場合を指す。可視光での撮影ができなかったため、痕跡自体の判別は不可能とした。

5.1.3 マイクロ放電の発生場所による分類

マイクロ放電の発生場所を特定できたモジュール 61 台 (72 スポット) について、アルミストリップとの位置関係と外見の異常に対して分類を行った。表 (5.3) には、スポットの位置 + そのスポットの原因候補、分類されたモジュール台数 (スポット数) を示した。

スポットの場所 + 原因候補の存在	モジュール数 (スポット数)
アルミエッジ + 痕跡なし	13 (14)
アルミエッジ + やや離れて痕跡あり	15 (16)
アルミエッジ + 痕跡あり	11 (13)
エッジ脇 + 痕跡なし	2 (2)
エッジ脇 + 痕跡 (小)	5 (5)
エッジ脇 + 痕跡 (大)	14 (20)
外傷	2 (2)

表 5.3: 発生源、場所を特定されたモジュール 61 台、72 スポットに対する分類、主に発生場所に焦点を当てている。

位置関係として、“ アルミエッジ ”と“ エッジ脇 ”の 2 箇所に分類した。“ アルミエッジ ”とは、スポットがちょうどアルミストリップのエッジ部分に存在する場合を指す。アルミのエッジでは、その構造上 (図 (2.3) 参照) インプラントのエッジ、保護被膜の境界面、アルミのエッジ等の構造物も多く、マイクロ放電が発生しやすいと考えられる。一方、“ エッジ脇 ”とは、スポットがアルミのエッジではなく、そこから離れた (数 μm ~ 数 10 μm) 場所に存在している。

個々の分類を見ていくと、“ アルミエッジ + 痕跡なし ”とは、スポットがアルミエッジに存在すること事は確認されたが、その場所及びその周辺に原因あるいは原因候補が確認されなかった場合を指している。図 (5.26) の“ 原因が見当たらない ”と同様の状況である。

“ アルミエッジ + やや離れて痕跡あり ”とは、IR スポットがアルミエッジに存在し、そこからわずかに離れた (~ 数 μm) 場所に、傷あるいは点状の痕跡の存在が確認できる場合を指す。この傷あるいは痕跡が、スポットから非常に近い距離 (~ 数 μm) にあり、かつマイクロ放電を誘発するような電場を作り出している可能性が考えられる。また別の可能性としては、この傷または痕跡は、構造体により隠されていて、実際には IR スポットの位置まで欠陥がつながっていることも考えられる。代表例を図 (5.29) に示す。

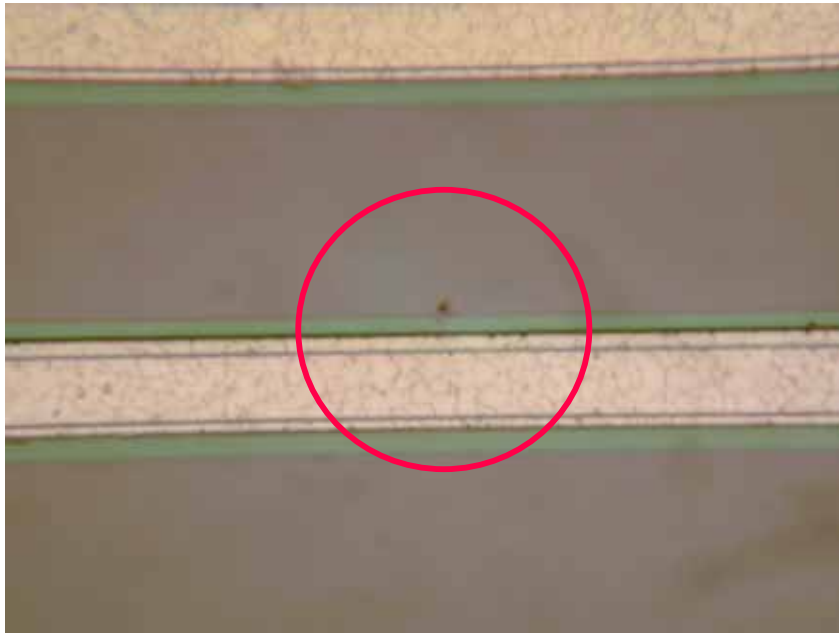


図 5.29: “ アルミエッジ + やや離れて痕跡あり ”に分類されたモジュール ID 131 の画像。IR 測定においてスポットが光っていた場所は、図中に書き込まれた赤い円の中心に位置する。赤い円内に薄赤色の斑点が見られるが、この赤斑点から最も近いアルミエッジにおいてスポットは光っていた。赤斑点とアルミエッジとの最短距離は約 $5.5 \mu\text{m}$ 。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図 (5.30) 及び図 (5.31) に示す。

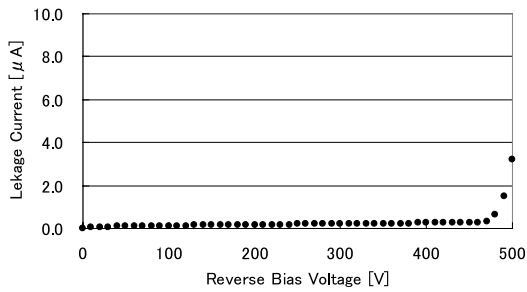


図 5.30: モジュール ID 131 における I-V 曲線

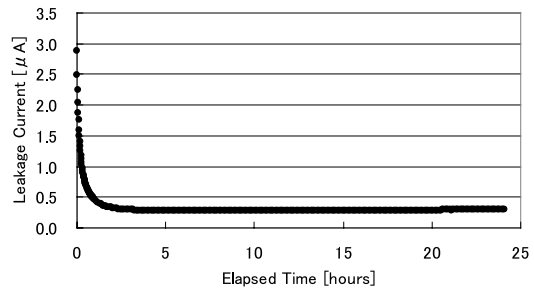


図 5.31: モジュール ID 131 における暗電流-経過時間の曲線。

“アルミエッジ + 痕跡あり”とは、スポットがアルミエッジに存在して、その全く同じ場所に、傷あるいは痕跡等の存在が確認された場合を指す。この場合、まさにその傷あるいは痕跡自体がマイクロ放電を誘発するような電場を作り出していると考えられる。もともと複雑な構造物を持ち、電場の集中を受けやすい場所なので、傷等によって凹凸やエッジが形成されればマイクロ放電が起きる確率は高くなる。代表例を図 (5.32) 及び図 (5.20) に示す。

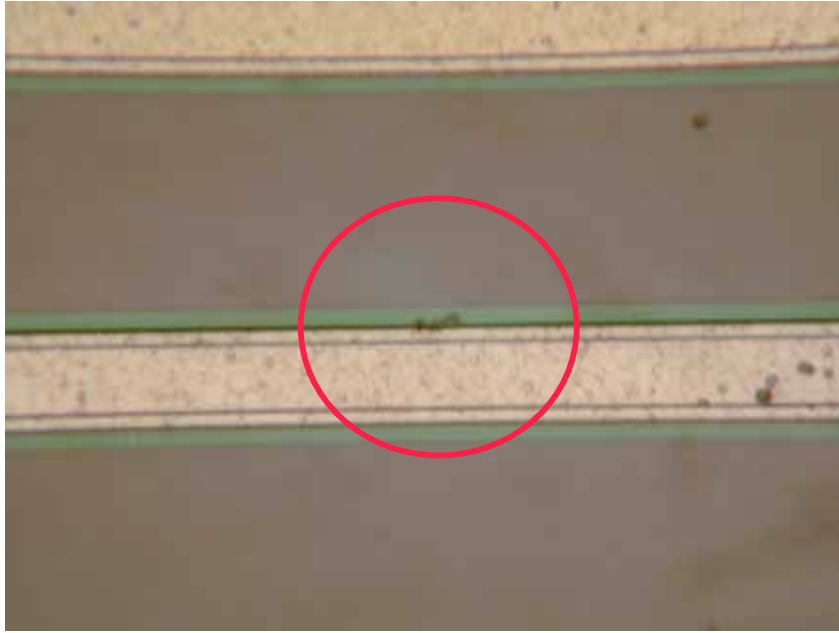


図 5.32: “アルミエッジ + 痕跡あり”に分類されたモジュール ID 202 の画像。画像中、赤く書き込まれた円の中心においてスポットは発光していた。この図では、アルミエッジまたはその下に見えているインプラントの欠陥あるいはアルミ蒸着時の欠陥等によって、マイクロ放電を誘発したと考えられる。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図 (5.33) 及び図 (5.34) に示す

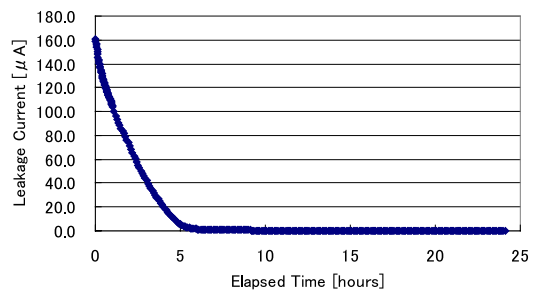
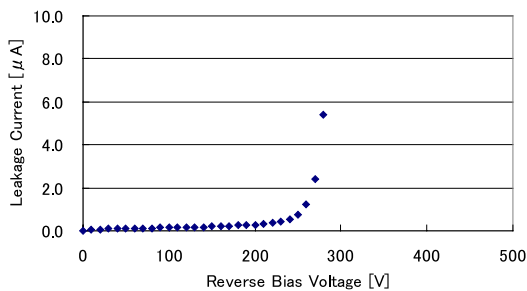


図 5.33: モジュール ID 202 における I-V 曲線。図 5.34: モジュール ID 202 における暗電流-経過 500V で 160 μA 程度の暗電流値を示す。時間の曲線。

“ エッジ脇 + 痕跡なし ”とは、スポットがアルミエッジではなく、そこから少し離れた場所で発光していて、さらに、“ アルミエッジ + 痕跡なし ”の分類と同様に、その場所及び周辺に原因または原因候補となるようなものが確認できない場合を指す。“ エッジ脇 + 痕跡 ”とは、スポットがアルミエッジから離れた場所に存在し、またその同じ場所に何らかの欠陥が認められる場合を指す。“ 痕跡 (小) ”と“ 痕跡 (大) ”があるが、どちらも基本的には同じで、“ 痕跡 (小) ”では、非常に小さな点状の痕跡が認められる場合を指す。図 (5.35) に“ 痕跡 (小) ”の代表例を示す。それに対して“ 痕跡 (大) ”ではより大きな規模のもので、より明確に確認できる。図 (5.38) に“ 痕跡 (大) ”の代表例を示す。

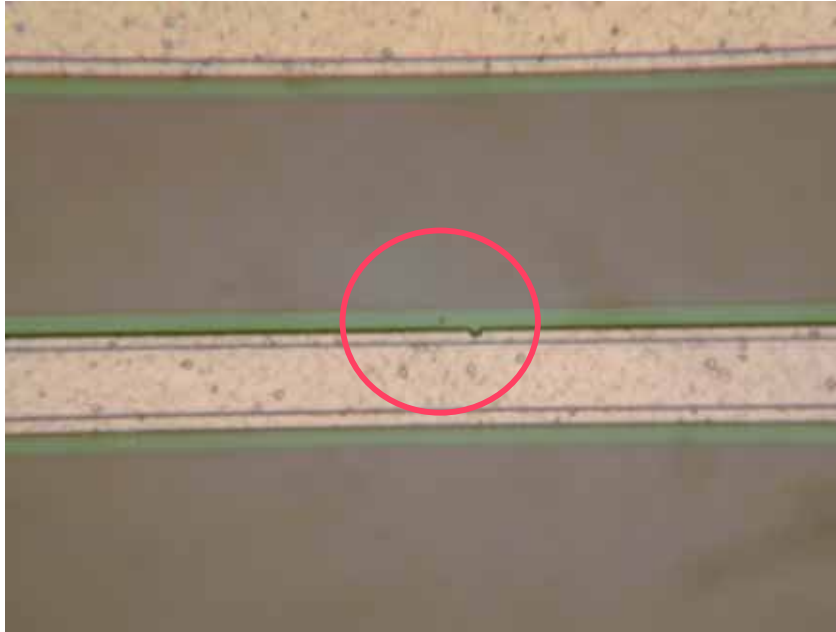


図 5.35: “ エッジ脇 + 痕跡 (小) ”に分類されたモジュール ID 180 の画像。画像中、赤く書き込まれた円の中心においてスポットは発光していた。この図では、スポットの発光点に、マイクロ放電を誘発したと考えられる非常に小さな点状の黒い斑点の存在が確認できる。その近くに見えるアルミエッジの欠けは全く関係ないと考えられる。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図 (5.36) 及び図 (5.37) に示す。

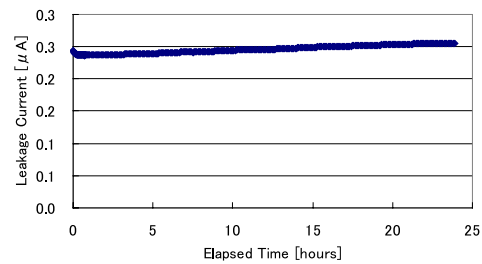
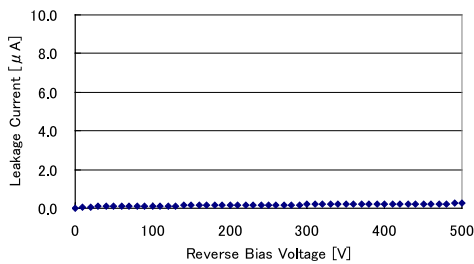


図 5.36: モジュール ID 180 における I-V 曲線。図 5.37: モジュール ID 180 における暗電流-経過時間 500V で 0.3 μ A 程度の暗電流値を示す。時間の曲線。

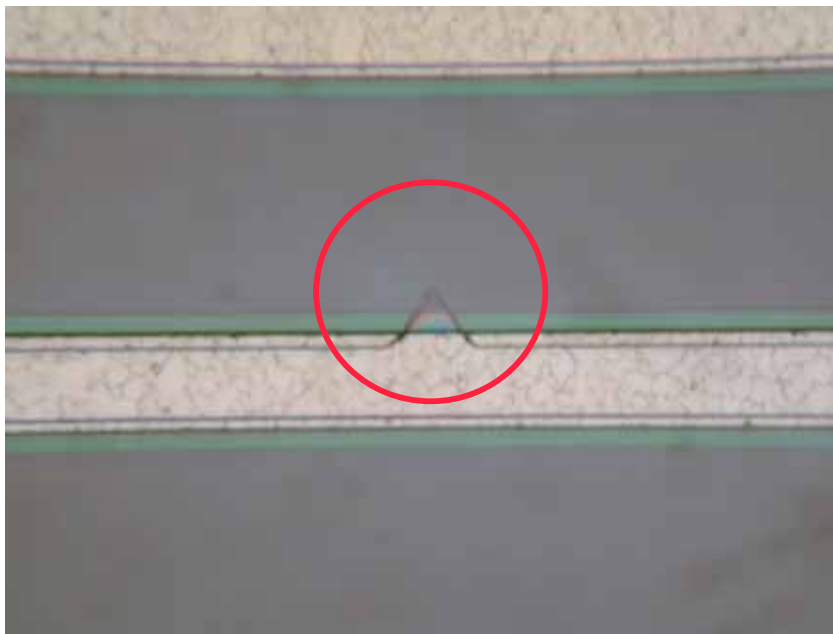


図 5.38: “ エッジ脇 + 欠陥 (大)” に分類されたモジュール ID 885 の画像。画像中、赤く書き込まれた円の中心に、ちょうどアルミエッジと対角にある三角形の頂点において、スポットは発光していた。“ エッジ脇 ”の領域には、局所的に電場を強める要素は基本的に存在しない。しかしこの図の場合では、インプラントの欠陥がアルミの下から伸びて、“ エッジ脇 ”領域において鋭いエッジを形成している。I-V 曲線と暗電流-経過時間の関係を図 (5.39) 及び図 (5.40) に示す。

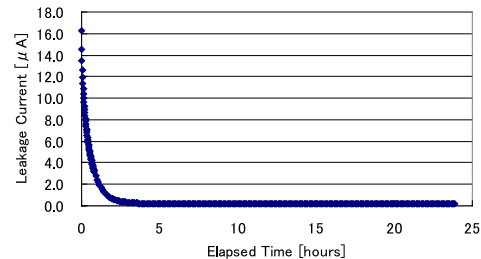
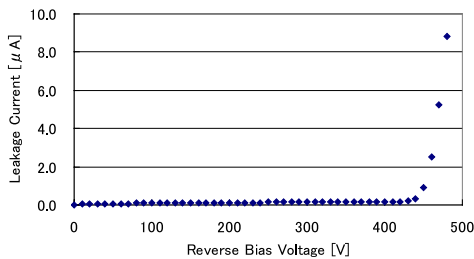


図 5.39: モジュール ID 885 における I-V 曲線。図 5.40: モジュール ID 885 における暗電流-経過 500V で 17 μA の暗電流値を示す。時間の曲線。

“ 外傷 ”とは、明らかに外部から受けた傷によって引き起こされた場合を指す。図 (5.1) 参照。

5.1.4 センサー構造によるマイクロ放電の分類

マイクロ放電の発生場所を特定された 61 台のモジュールについて、センサー構造の観点から発生場所を分類し、表 (5.4) に示す。

場所	モジュール数 (スポット数)
有感領域	56 (67)
バイアスリング	2 (2)
ワイヤーボンディングパッド	3 (3)

表 5.4: 発生源、場所を特定されたモジュール 61 台 (72 スポット) に対するセンサー構造に注目した分類。

“ 有感領域 ”とは、アルミストリップの領域全体の内、周囲を囲む“ バイアスリング ”とアルミストリップからの信号を読み出すためのワイヤーが接続される場所である“ ワイヤーボンディングパッド ”を除いた領域で、“ 有感領域 ”は一面に同一の構造を持つ。

“ バイアスリング ”とは、アルミ下の Si_3N_4 が存在しない等、“ 有感領域 ”のアルミストリップとはその構造が異なる。またその周辺領域も含む。

“ ワイヤーボンディングパッド ”とは、基本的にアルミストリップの両端に位置する場所であるが、アルミストリップより $34 \mu\text{m}$ 幅が広くなり、 $200 \mu\text{m}$ (長さ) $\times 56 \mu\text{m}$ (幅) の長方形の形をしている。またその周辺領域も含む。

図 (5.4) では構造の違うこれらの領域におけるマイクロ放電の発生頻度を示している。図 (2.2) よりそれらの領域のおおよその面積を算出、比較すると、“ 有感領域 ”が 73%、“ バイアスリング ”が 5.7%、“ ワイヤーボンディングパッド ”が 6.1% 占めている。残りの 16% はハイブリッドに隠されているため、IR 測定はできない。これによって表 (5.4) の値は、スポットが、センサー上一様に分布していると考えても矛盾しない。ここで、“ バイアスリング ”の 2 モジュールは既に図 (5.17) に示したように、エッジで発生し、“ ワイヤーボンディングパッド ”についてもパッド上ではなく、アルミエッジの近傍でマイクロ放電している。

5.1.5 センサー毎のマイクロ放電の発生頻度

モジュールに組み込まれているセンサーについて、フレキシブルハイブリッドに隠されていないセンサーが表面の第 1 センサー、裏面の第 3 センサーである。各第 1 から第 4 センサーでのマイクロ放電発生数を表 (5.5) に示す。

表 (5.5) の“ マイクロ放電センサーを除く ”は、モジュール組み立て前のセンサー単体でマイクロ放電を起こしていたセンサーの数を、“ マイクロ放電の発生数 ”から引いた値である。センサーの大きさが、 $64.0 \text{ mm} \times 63.6 \text{ mm}$ 、フレキシブルハイブリッドの幅が 21.3 mm であるので、第 2 及び第 4 センサーそれぞれの面積の約 33% がフレキシブルハイブリッドに隠されていることになる。すなわち、この隠された場所においてマイクロ放電が発生していたら、それは IR 測定では発見す

発生場所	マイクロ放電の発生数 モジュール数 (スポット数)	マイクロ放電センサーを除く モジュール数 (スポット数)
第1 センサー	20 (23)	16 (19)
第2 センサー	8 (10)	5 (7)
第3 センサー	25 (29)	21 (23)
第4 センサー	10 (10)	9 (9)

表 5.5: 発生源、場所を特定されたモジュール 61 台 (72 スポット) のセンサー番号ごとの分類。

ることはできない。したがって、そのことが第2 および第4 センサーにおけるマイクロ放電の発生数が少ない一因と考えられる。

5.2 マイクロ放電の発生時期

パレルSCT モジュールの量産の進行に伴うマイクロ放電の発生率を、図 (5.41) に示す。

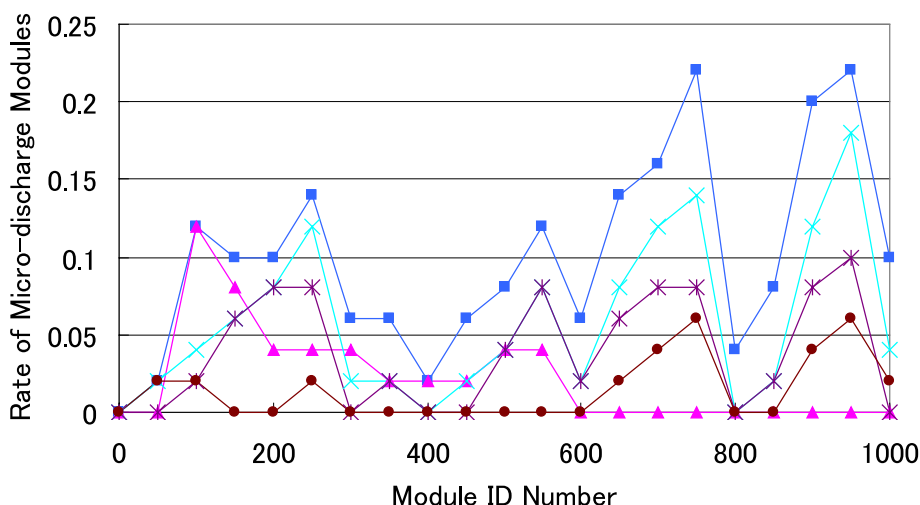


図 5.41: パレルSCT モジュールの量産の進行に伴うマイクロ放電発生率。横軸は、モジュールの ID 番号で、これは製造順に付けられている。50 台ごとにマイクロ放電発生率で表した。マイクロ放電を起こしたモジュール 105 台を青色、そのうちマイクロ放電を起こしたセンサーを用いて組み立てられたモジュール 23 台を赤色で表した。また、IR 測定でマイクロ放電発生場所を特定できたモジュール 61 台を緑色、そのうち表 (5.2) の分類からセンサー自体に発生原因があったと考えられる 41 台を紫色、表 (5.2) で“原因が見当たらない”と“判別不能”に分類された 15 台を茶色で表した。

量産の前半の時期では、マイクロ放電を起こしたセンサーによって組み立てられたモジュールの台数と、マイクロ放電を起こしたモジュールの台数が多く現れている。これはマイクロ放電モジュール数を増やさないように、優先的にマイクロ放電センサーを組み合わせてモジュール製造したた

めである。また、センサー自体に発生原因があったと考えられる 41 台について、41 台中 8 台がセンサー段階でマイクロ放電が確認されている。これはセンサー単体の試験での湿度が 0% に管理されていなかったことが原因と考えられる。

後半の時期では、マイクロ放電を起こしたセンサーによって組み立てられたモジュールの台数は減少して、マイクロ放電を起こしたモジュールの台数は増加している。

IR 測定でマイクロ放電発生場所を特定できた 61 台のうち、センサー自体に発生原因があったと考えられる 41 台は、量産の時期によらず一様に分布しているのに対して、マイクロ放電原因候補を確認できなかった表 (5.2) 中“原因が見当たらない”と“判別不能”に分類された 15 台中 12 台は量産の後半の時期に集中している。またこの 15 台のうち 14 台は、表 (5.3) で“アルミエッジ”に分類されており、マイクロ放電原因候補がアルミストリップの下に隠れていると推測される。このことから、量産の後半の時期においてマイクロ放電発生率が上がっている理由として、次のことが考えられる。

センサーをモジュールに組み立てる工程において、センサーの位置の調整は表面を上に向けて調整台に載せられる。そして、センサー表面に吸着用プレートを位置し吸い上げることで、センサーの移動を行う。この時、センサー表面が傷付かないようにクリーンルーム用不織布を挟んでいるが、センサー表面には一様に力が加わることになる。この時に余分な負荷がかかった場合、アルミストリップの下で欠陥が発生する可能性が考えられる。

モジュール ID 564 以前のモジュールとそれ以降のモジュールでは、製作サイトが異なるが、モジュール ID 565 以降の新しい製作サイトに替わってから、マイクロ放電を起こしたモジュールの台数が増加している。そこで、モジュール ID 750 の時期において、モジュール組み立て工程においてセンサーを位置決めピンに軽く当てて行う仮調整をする際に、センサーエッジや裏面に加わる負荷を軽減するように改善したが、その後マイクロ放電発生台数が減少した。

モジュール ID 900 の時期より再びマイクロ放電発生台数が増加しているが、量産終了まで製作サイトで再び作業を改善する機会は無かった。

したがって、センサー自体に発生原因があったものの発生率は量産の時期によらず、また、マイクロ放電原因候補がアルミストリップの下にあると推測されるものの発生率は後半の時期に増えている傾向がある。

5.3 マイクロ放電の I-V 特性

マイクロ放電を起こしている 105 台のモジュールについて、マイクロ放電の発生電圧、マイクロ放電暗電流の大きさ、マイクロ放電の減衰時間及びその振る舞いについての特性を調べた。

5.3.1 マイクロ放電の発生電圧とその発生源の比較

マイクロ放電を発生させている 105 台のモジュールと、その内 IR 測定によってその発生源あるいは発生場所が特定された 61 台のモジュールについて、そのマイクロ放電発生電圧を図 (5.42) に示す。

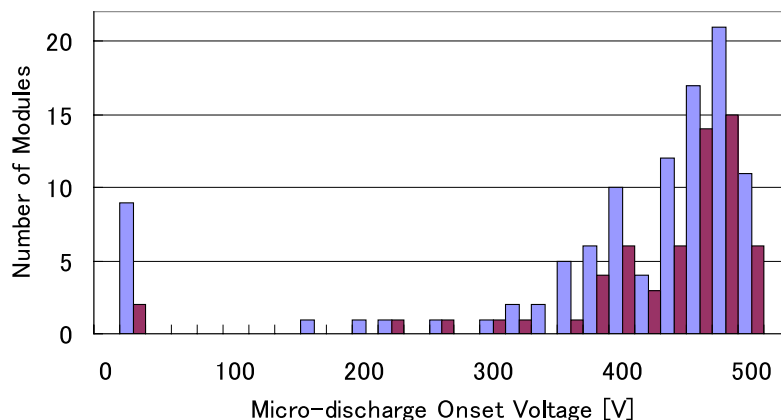


図 5.42: マイクロ放電の発生電圧。マイクロ放電を発生させている 105 台のモジュールを青色、その内発生源が特定された 61 台を赤色で示している。

図 (5.42) では、マイクロ放電発生電圧の分布は、IR 測定によるスポットの特定の成否に依存しないことを示している。

まず表 (5.2) の分類において、そのマイクロ放電発生電圧を比較する。表 (5.2) の“アルミエッジの泡状の異物”および“酸化膜の黒斑点”の分類に対して、そのマイクロ放電発生電圧がその他の分類の電圧よりも低い傾向にあることがわかる。図 (5.43) に、マイクロ放電の発生場所が特定された 61 台のモジュールのマイクロ放電発生電圧に対する分布と、その内表 (5.2) における“アルミエッジの泡状の異物”と“酸化膜の黒斑点”に分類されたものの分布を比較した。

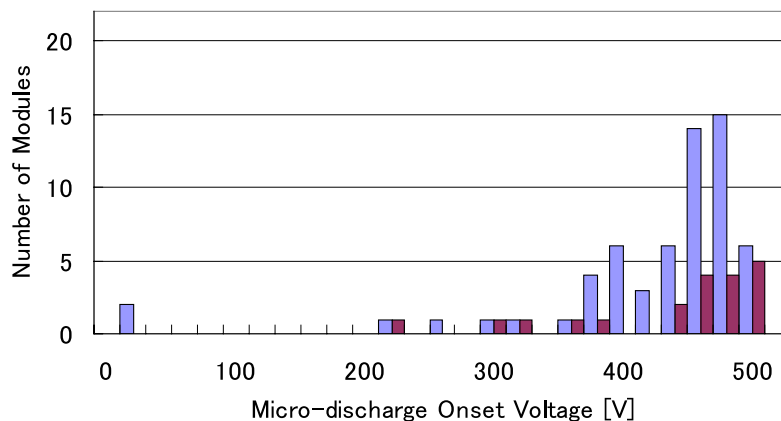


図 5.43: マイクロ放電の発生電圧の分布。発生場所が特定された 61 台のマイクロ放電発生電圧は青色、そのうち表 (5.2) における“ アルミエッジの泡状の異物 ”に分類された 5 台と“ 酸化膜の黒斑点 ”に分類された 15 台のマイクロ放電発生電圧は合わせて赤色で示されている。

図 (5.43) において、最も低い 20 V の分布を除くと、200 V~400 V 未満のほとんどの分布が、表 (5.2) における“ アルミエッジの泡状の異物 ”と“ 酸化膜の黒斑点 ”に分類されたモジュールによる分布となっている。すなわち、この 2 つの分類の原因を持つモジュールにおいては、マイクロ放電が低い電圧で発生し易いということがいえる。

この 2 つの分類には 1 つの共通点があり、それは、大きさを問わず、その斑点や傷に対して、色が黒く見えるということである。現時点では、見かけの色による、酸化膜あるいはシリコンの表面の状態の識別は不可能であるが、見かけの色が、シリコンあるいはシリコン系化合物により形成される異物の厚さや傾斜具合といった状態に左右されることは確かである。

また、特に低いマイクロ放電発生電圧を示す 20V の分布は、表 (5.2) における“ 外傷 ”に分類されたモジュール ID 917 (図 (5.1) 参照) と、“ アルミ下の傷 ”に分類されたモジュール ID 706 (図 (5.11) 参照) による分布となっている。

次に表 (5.3) の分類において、そのマイクロ放電発生電圧を比較する。表 (5.3) の個々の分類においては、マイクロ放電の発生電圧に対する明らかな傾向はとくに見られなかった。しかし、表 (5.3) の分類を大きく 2 つに分けて比較すると、若干の傾向が現れる。表 (5.3) の分類において、アルミのエッジにおいてマイクロ放電が起きたものを、合わせて“ アルミエッジ ”として分類し、エッジ脇においてマイクロ放電が起きたものを合わせて“ エッジ脇 ”として分類する。この 2 つの分類でマイクロ放電発生電圧を図 (5.44) に示す。

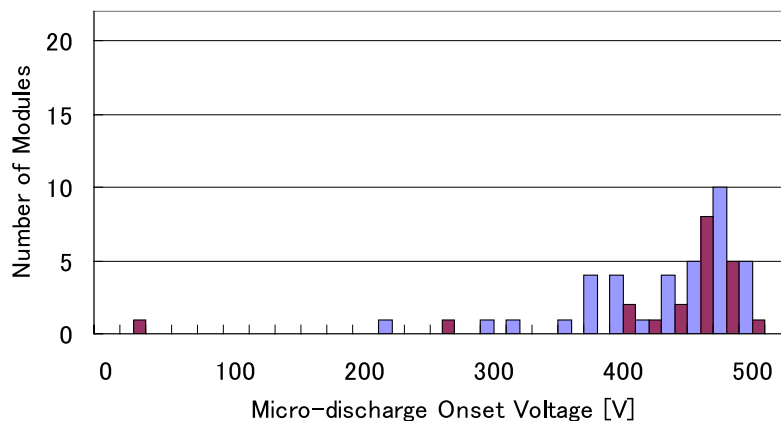


図 5.44: マイクロ放電の発生電圧の分布。表 (5.3) における“ アルミエッジ ”に分類された 38 台のマイクロ放電発生電圧は青色、“ エッジ脇 ”に分類された 21 台のマイクロ放電発生電圧は赤色で示されている。

図 (5.44) において、400 V 以下の電圧には、表 (5.3) における“ アルミエッジ ”に分類されたモジュールによる分布が多く広がっている。すなわち“ エッジ脇 ”よりも“ アルミエッジ ”の方が低い電圧でもマイクロ放電を起こしやすいということがいえる。

これは、一様に平らな構造を持つ“ エッジ脇 ”における欠陥よりも、複雑な構造、形状を持つ“ アルミエッジ ”における欠陥の方が、より低い電圧でマイクロ放電を起こし易いためと考えられる。また、図 (5.44) 中の特に低い 20 V の分布は、図 (5.43) における 20 V の分布と同じモジュール ID 706 による分布となっている。

5.3.2 マイクロ放電の暗電流値

マイクロ放電を示したモジュールに対して 500 V での暗電流値を 24 時間後の暗電流値と比較した。具体的には、まず逆バイアス電圧を 0V から 500 V まで上げてから 10 秒後に、“初期の暗電流値”を測定する。その後そのまま 500V の電圧を 24 時間維持してマイクロ放電を減衰させる。そして“24 時間後の暗電流値”を測定する。

マイクロ放電を発生させている 105 台のモジュール及びその内 IR スポットを特定された 61 台のモジュールそれぞれに対して、この 2 種類の暗電流値の関係を、図 (5.45) に示した。

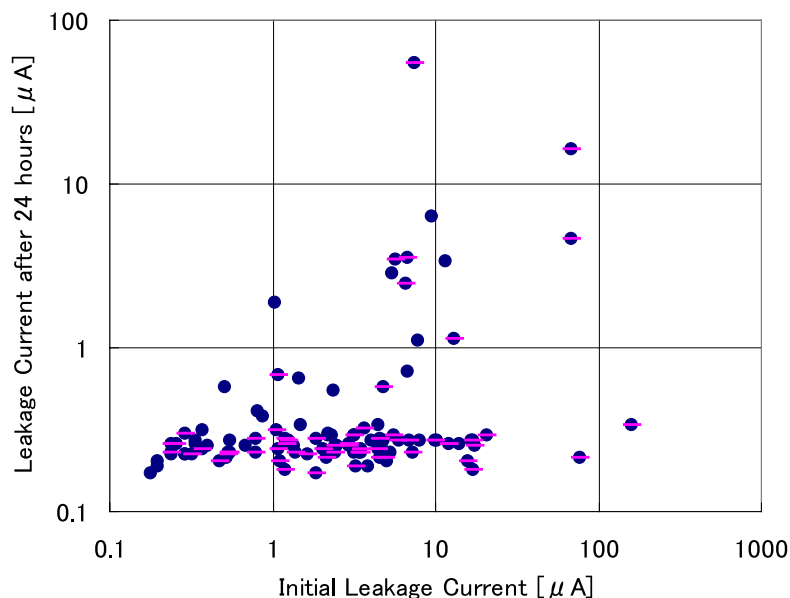


図 5.45: マイクロ放電初期の暗電流値と、その 24 時間後の暗電流値の関係。マイクロ放電を発生させている 105 台の分布は青色、その内マイクロ放電の発生場所を特定できた 61 台には赤色“- ”印を付けた。

図 (5.45) では、まずマイクロ放電による暗電流は、殆どのモジュールに対してその初期の電流値の大きさに関わらず、24 時間後には一定した小さな電流値を示すことがわかる。IR 測定によって発生源の特定に成功したもの 61 台 (100%) の内、24 時間後の暗電流値が $0.00\sim 0.35\mu\text{A}$ にあるものは、53 台 (87%) となっている。また、IR スポットの特定に失敗したものは 44 台 (100%) 中 32 台 (73%) である。全 105 台 (100%) に対しては 84 台 (80%) である。したがって、IR スポットの特定率に対する傾向は特に見られない。

また、初期の暗電流値が非常に大きい ($\sim 100\mu\text{A}$) 場合には、24 時間後の暗電流値が大きくても IR スポットの特定に成功している。

図 (5.45) において、暗電流値が非常に大きく ($\sim 100\mu\text{A}$) で、かつ 24 時間後の暗電流値が小さい ($\sim 0.35\mu\text{A}$) ものは、それぞれ表 (5.2) 中“インプラントの欠陥”に分類されたモジュール ID 202 (図 (5.32) 参照)、及び“バイアスリングでの発光”に分類されたモジュール ID 709 である。初期の暗電流値 ($\sim 10\mu\text{A}$) よりも 24 時間後の暗電流値のほうが遥かに大きい値 ($\sim 100\mu\text{A}$) を示し

ているものは、“ 外傷 ”に分類されたモジュール ID 917 (図 (5.1) 参照) である。

さらに、減衰前の暗電流値 ($\sim 100\mu\text{A}$) も 24 時間後の暗電流値 ($\sim 10\mu\text{A}$) もどちらも非常に大きな値を示すものは、“ 酸化膜の黒斑点 ”に分類されるモジュール ID 642 (図 (5.20) 参照) と、“ 判別不能 ”に分類されたモジュール ID 698 である。

5.3.3 マイクロ放電の減衰時間

マイクロ放電減衰時間は、その発生後、逆バイアス電圧を 500 V に維持し続けることによって測定した。図 (5.31) に典型的な減衰過程が示されている。

基本的に、マイクロ放電の減衰過程は、減衰時間定数及び減衰の形によって評価され、その減衰時間定数 T は、式 (5.1) によって定義される。

$$I(t) = \{I(0) - I(\infty)\} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + I(\infty) \quad (5.1)$$

$I(t)$ は減衰が始まってから t 時間後の暗電流値で、 $I(0)$ は $t=0$ のときの暗電流値。 $I(\infty)$ は、減衰による暗電流の値の変化が終了して、一定の値になった時の暗電流値。

測定した 105 台のうち 5 台は後述する理由から減衰時間を定義できなかった。そこで、マイクロ放電が発生している 100 台とその内 IR スポットが特定された 58 台のモジュールに対して、減衰前の暗電流値と減衰時間係数との関係を図 (5.46) に示す。

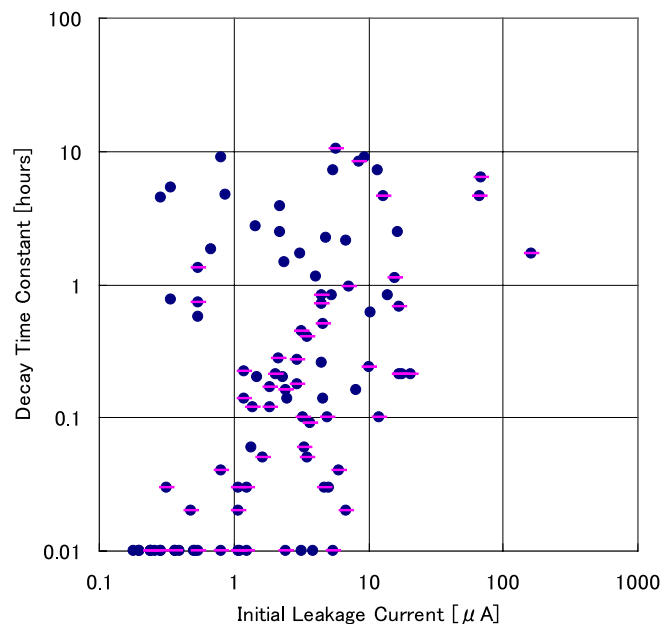


図 5.46: マイクロ放電の減衰時間定数と減衰前の暗電流値の関係。マイクロ放電を発生させている 100 台の分布は青色、そのうちマイクロ放電の発生場所を特定できた 58 台の分布は赤色“ - ”印を付けた。

図 (5.46) 中、IR が特定されたものの分布に関して、初期の暗電流値と減衰時間定数の間にはおよその比例関係がみられる。すなわち初期の暗電流値が大きければ、減衰に掛かる時間も大きくなる。逆にその関係から外れた領域、特に図 (5.46) において、初期の暗電流値が $\sim 10 \mu\text{A}$ 以下で、減衰時間定数がおよそ 1~10 時間の領域においては、IR スポットが特定できなかったものの分布が集中している。このことから、マイクロ放電の減衰が急速に進むものや、減衰に掛かる時間が大きい場合でも、初期暗電流値が大きければ IR スポットが特定できる可能性が高い。

図 (5.46) において、IR スポットが特定されたモジュールのうち、特に減衰時間が大きく (~ 10 時間)、初期暗電流値が $10 \mu\text{A}$ 程度の 3 台のモジュールは、表 (5.2) の分類において、“痕跡なし” に分類されたモジュール ID 69、“判別不能” に分類されたモジュール ID 966 および“エッジ下の傷” に分類されたモジュール ID 706 (図 (5.11) 参照) である。減衰時間と共に、初期の暗電流値も大きい 3 台は、“酸化膜の黒斑点” に分類されたモジュール ID 642 (図 (5.20) 参照)、“判別不能” に分類されたモジュール ID 698、そして“アルミエッジの泡” に分類されたモジュール ID 202 (図 (5.32) 参照) となっている。

初期暗電流値が小さくて減衰時間定数が大きい領域に分布している IR スポットが特定できなかった 19 台のモジュールに対してマイクロ放電発生時期を調べると、6 台がセンサー単体で発生、10 台がモジュール組み立て時に発生、3 台が検査中に発生していた。これらのモジュールに対する時期毎の発生率を図 (5.47) に表す。

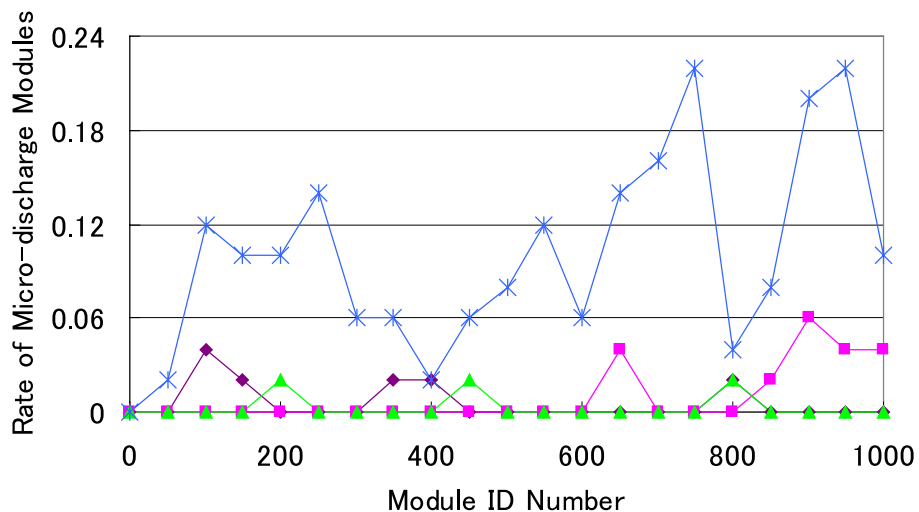


図 5.47: パレル SCT モジュールの量産の進行に伴うマイクロ放電発生率。横軸は、モジュールの ID 番号で、これは製造順に付けられている。50 台ごとにマイクロ放電発生率で表した。マイクロ放電を起こしたモジュール 105 台を青色、そのうち初期暗電流値が小さくて減衰時間定数が大きい領域に分布している IR スポットが特定できなかった 19 台のモジュールに対して、センサー段階でマイクロ放電を起こしたモジュール 6 台を紫色、モジュール組み立て時に発生したモジュール 10 台を赤色、検査中に発生したモジュール 3 台を緑色で表した。

マイクロ放電を起こしたセンサーが量産の前半の時期に優先的に使われたことを考慮すると、モジュール組み立て時以外で発生した 9 台に関しては、時期によらず一様に分布していると言える。一方、モジュール組み立て時に発生した 10 台全ては量産の後期に集中している。図 (5.47) で説明

したように、量産後期では、モジュール組み立て時にマイクロ放電を発生させていて、かつアルミストリップの下にその原因候補があると推測されるものが集中していることを考えると、この10台もアルミストリップの下に原因候補が存在する可能性がある。特に、“アルミエッジ”ではなくてアルミストリップの真下でマイクロ放電発光が起こっていた場合は、そのIRスポットが発見できない可能性がある。

また、マイクロ放電の減衰曲線の形によって分類を行った。これは、逆バイアス電圧を500Vに維持し続けた時の、暗電流値-経過時間の関係になるが、この分類においては、暗電流値や減衰時間定数の絶対値にはよらず、曲線の形そのものによる分類を行った。結果を表(5.6)に示す。

減衰曲線の形	モジュール数 (スポット数)
減衰	100 (111)
増加	4 (4)
その他	1 (1)

表 5.6: マイクロ放電が発生しているモジュール 105 台に対する、その減衰曲線の形による分類。

“減衰”とは、式(5.1)に表されるような減衰を示すものを指す。“増加”とは、24時間の測定中に、その暗電流の値が増加する期間があるため、式(5.1)には適用されないものを指す。したがってこの分類では24時間後の暗電流値が比較的高くなる。“その他”については、式(5.1)に見られるような、指数関数的な振る舞いを持たないものを指す。

“増加”に分類されたモジュールは、モジュールID 475, 527, 917 (図(5.3)参照), 958 の4台。モジュールID 475 及び 527 については、どちらも表(5.2)における“判別不能”に分類される。またモジュールID 917 及び 958 については、どちらも表(5.2)における“外傷”に分類され、これによって“外傷”に分類されたモジュールは2台中2台が“増加”傾向を示す。また、“その他”に分類されたモジュールは、モジュールID 709 であり、これは表(5.2)における“バイアスリングでの発光”に分類されている。モジュールID 709 については、欠陥の詳細な形状がわかる画像が無いので、そのI-V 曲線及び減衰曲線のみを図(5.48) 及び図(5.49) に示す。

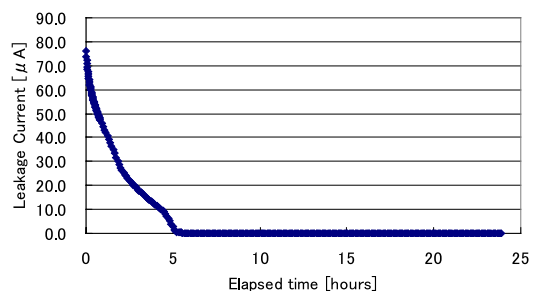
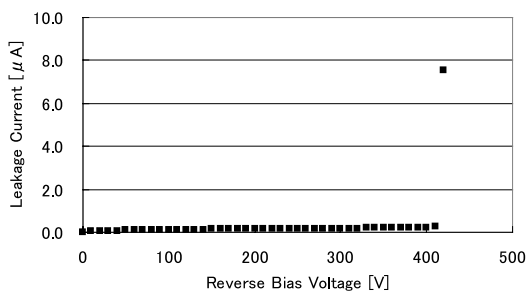


図 5.48: モジュール ID 709 における I-V 曲線。図 5.49: モジュール ID 709 における暗電流-経過500V で暗電流値が77 μ A に達する。時間の曲線。

第6章 マイクロ放電の減衰の理由

マイクロ放電を起こす原因となる局所的電場の集中が、 p^+ インプラント電極のエッジで発生した場合の Si-SiO₂ 界面及び周辺の電荷分布の模式図を図 (6.1) に示す。存在する主な電荷の種類は、界面 (表面準位) にトラップされた電荷、固定電荷、酸化膜中にトラップされた電荷 (捕獲電荷)、可動イオンによる電荷である。

Si-SiO₂ 界面に生じる表面準位にトラップされた電荷は、界面の化学的な組成に依存している。固定電荷は酸化の過程から生じる正の固定電荷である。捕獲電荷は、SiO₂ 中の欠陥に関するものである。可動イオンによる電荷は、アルカリ金属イオンによる汚染に関する。また Si 結晶内にも熱的揺らぎを受けて生成される電子-ホール対が存在する。 [9]

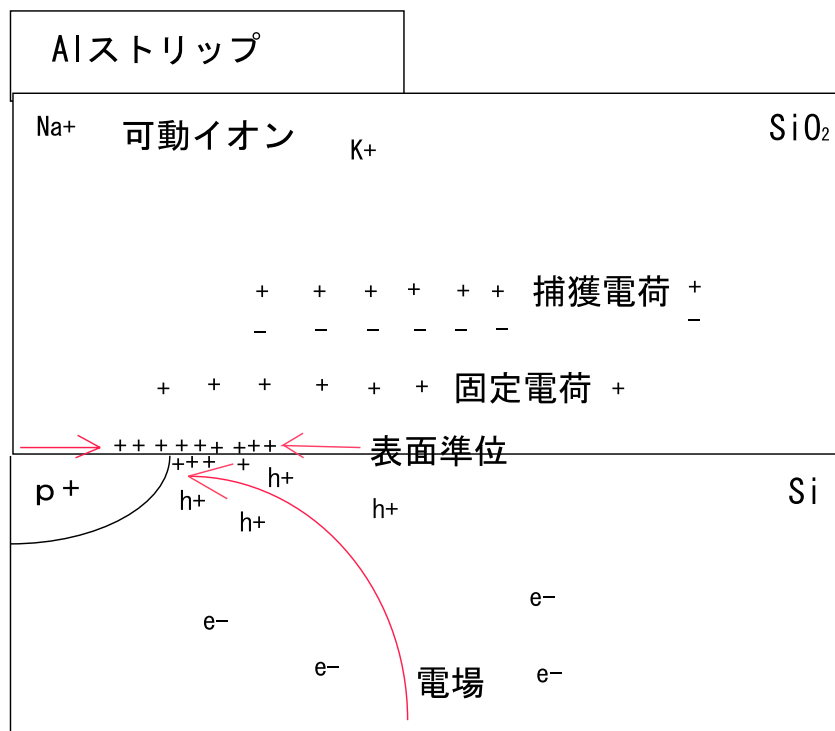


図 6.1: Si-SiO₂ 界面における電荷分布の模式図。

p^+ インプラント電極のエッジでマイクロ放電が起きたとき、その局所的電場の集中に引き寄せられて、表面準位にトラップされたイオンや Si 結晶中のホールが、 p^+ インプラント電極のエッジに集められる。これは、マイクロ放電を起こす電場とは逆の電位を作り出すので、これによってマイクロ放電は抑制されることになる。これがマイクロ放電の減衰の理由と考えられる。

ここで、減衰定数と24時間後の暗電流値の関係を図(6.2)に示す。

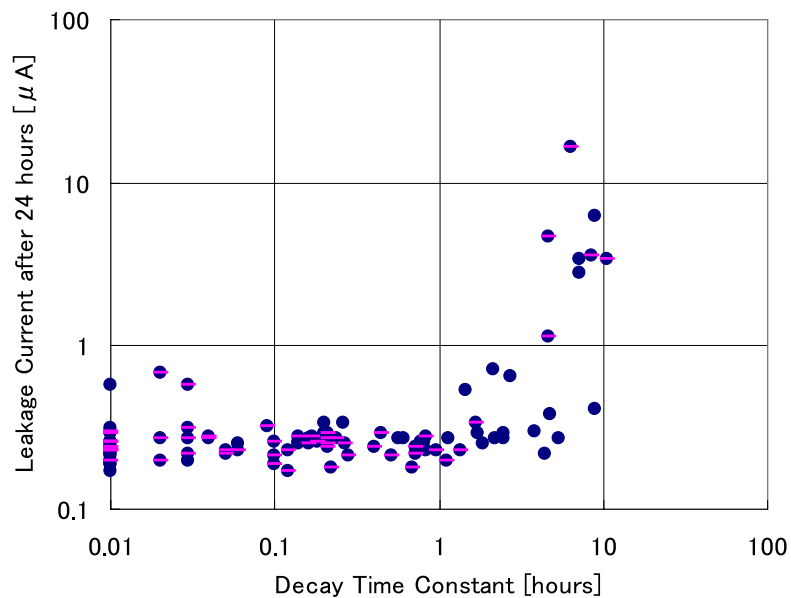


図 6.2: 減衰定数と24時間後の暗電流値の関係。マイクロ放電を発生させている全100台(式(5.1)で評価できない5台を除く。)の分布は青色、そのうちマイクロ放電の発生場所を特定できた58台は赤色“-”印を付けた。

減衰定数が大きくて24時間後の暗電流値も大きいものうち、IRスポットが特定できたものは5台あり、モジュールID 69は、表(5.2)で“原因は見当たらない”に分類されたものであり、モジュールID 698と966は、“判別不能”に分類されたものである。モジュールID 642(写真(5.20)参照)は“酸化膜の黒斑点”、モジュールID 706(写真(5.11)参照)は“アルミ下の条状の傷”にそれぞれ分類されたもので、いずれもSiO₂界面に何らかの欠陥があると推測される。

また式(5.1)で評価できない5台のうち、表(5.6)において“増加”に分類されたモジュール4台(“判別不能”2台、“外傷”2台)についてもSiO₂界面に何らかの欠陥があることが原因で、暗電流の増加傾向を示していると推測される。

第7章 バレルSCTにおける、マイクロ放電モジュールの取り付け位置

バレルSCTは、バレルSCTモジュール及び読み出しシステムを全て取り付け後に電気試験が行われるが、内側2層では500 V、外側2層では300 Vまで試験電圧をかけられることになっている。したがって、マイクロ放電を起こしたバレルSCTモジュールはそのマイクロ放電発生電圧によって区別され、75台は外側2層に取り付けて、19台は予備として扱い、残りの11台はバレルSCTに取り付けないことに決定している。105台に対する詳しい分類を以下に示す。

設置場所	マイクロ放電発生電圧	減衰時間定数	該当するモジュール数
バレルSCT 第3層または第4層	350 V 以上	1時間 以下	73台
バレルSCT 第4層	300 V 以上	1時間 以下	2台
予備として待機	150 V 以上	6時間 以下	19台
バレルSCTに取り付けない	150 V 未満	6時間より大	11台

表 7.1: マイクロ放電が発生している 105 台のバレルSCTにおける取り付け位置

第8章 結論

2004年12月、日本のアトラスSCTグループは、予備を含む981台のバレルSCTモジュールの量産を完了した。その内、約10%にあたる105台のモジュールに対して、マイクロ放電の発生が確認された。

マイクロ放電の検査及び評価の方法としては、各検査工程におけるI-V特性の測定、24時間500Vを印加した試験にあらわれるマイクロ放電の減衰の評価、アンプの入力ノイズの評価、赤外線カメラによるマイクロ放電の発光の撮影などを用いた。とくに赤外線CCDカメラによるマイクロ放電の撮影は、マイクロ放電を引き起こす原因を直接認識できる。

マイクロ放電が発生している105モジュールの評価の結果、その内61台についてマイクロ放電の発生場所をIRスポットとして特定できた。その結果、ほとんどのマイクロ放電が、インプラント電極の埋設工程及びその後の酸化被膜工程において、発生させていたと思われる。61台中41台がこれに該当すると考えられる。SiO₂保護膜によってシリコンセンサーの表面を覆うとき、その表面に対して高い清浄性が求められる。もしもそこに塵あるいは傷が存在するとセンサーあるいはモジュールとしての完成後に、マイクロ放電を発生させる可能性が出てくる。また、インプラント電極の埋設時に、埋設用の穴をシリコン表面及びその上の保護膜に空けるときにもまた、その作業に対して高い精度が要求される。実際に41台中7台は、この穴を開ける際の不良だと考えられている。

他に4台は、センサー表面に痕跡が無いことが確認されたので、内側に何らかの欠陥が存在すると考えられる。またその他の11台は、原因をはっきりと特定できなかった。この11台とセンサー表面に痕跡が無い4台については、そのうち14台でマイクロ放電の発光がアルミストリップのエッジで起こっていることから、原因がアルミストリップの真下にあると推測される。明らかに外部から受けた傷によるものは、61台中2台だけだった。残りの3台は痕跡は確認できたが、可視光での写真が無いためにそれ以上の分類ができなかったものである。

マイクロ放電のほとんどが非常に短時間(<1時間)で減衰してしまうために、赤外線カメラを用いたその発生源の探査は、測定にかけられる時間が限られてしまい、困難になる。実際に、105台中14台は、この短い減衰時間にのために、マイクロ放電の発生源が特定できなかったものと評価できる。

105台中15台程度は、面積の比率から考えて、フレキシブルハイブリッド等の構造物下に隠れて、発見ができないものと推定できる。よって残りの15台程度は、暗電流値が大きいのにその発生場所を特定できなかったと言える。その理由としては、アルミストリップの真下にマイクロ放電の発光が隠れていて発見ができないことが考えられる。これらのモジュールは、傾向としては暗電流の減衰時間が長い。

謝辞

筑波大学素粒子実験研究室には、2年にわたりあらゆる面において厚くご指導を頂き、また非常に恵まれた研究環境を与えて頂きました滝川紘治先生、金信弘先生、受川史彦先生には、心より感謝申し上げます。原和彦先生には、研究生活全般において常に見守っていただき、数え切れないほどのご指導を頂きました。その上、実験の現場においては、技術、知識だけではなく、研究者としてのあるべき姿を学ばせて頂きました。心より感謝申し上げます。武内勇司先生には、公私ともによく面倒を見て頂きました。心より感謝申し上げます。

アトラスSCTグループにおいては、近藤敬比古先生には、親のように暖かい眼差しで研究生活を見守って頂き、また多くのすばらしい経験を積む機会を与えて頂きました。心より感謝申し上げます。海野義信先生、寺田進先生には、研究に関係する全ての場面において、厚くご指導を頂き、そして支えて頂きました。さらに、研究生活において、常に非常に恵まれた環境、および機会を与えて頂きました。心より感謝申し上げます。氏家宣彦先生には、研究に関する多くの知識、そしてご指導を与えて頂きました。心より感謝申し上げます。池上陽一先生、高力孝先生には、実験の現場において、あらゆる面において支えていただき、そして日々のご指導を頂きました。また現場において非常に多くの知識、経験、技術を惜しみなく与えて頂きました。心より感謝申し上げます。

アトラス物理グループにおいては、神前純一先生には、物理解析の意味から、その手法に至る全ての局面において、常に、そして非常に多くのご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。浅井祥仁先生、田中純一先生には、物理解析における非常に多くの恵まれた環境、すばらしい機会を与えて頂きました。そして惜しみなく知識を与えて頂き、また常に技術面でのご支援を頂きました。心より感謝申し上げます。田中礼三郎先生には、物理解析の手法のみならず、物理全般に関する幅広いご指導を惜しみなく与えて頂きました。心より感謝申し上げます。尾高茂先生には、物理解析における、非常にすばらしい環境を与えていただきました。心より感謝申し上げます。坂本宏先生には、物理解析に関する数多くのすばらしい機会を与えて頂きました。その上、折に触れて公私共に非常によく面倒を見て頂きました。心より感謝申し上げます。

神代和子さん、朝日恵美さんには、研究生活を送る上で、決して疎かにしてはならない事務仕事全般を常に支えて頂きました。心より感謝申し上げます。

公私共に、研究生活を支えて頂きました多くの方々に、心よりの感謝を申し上げます。

最後に、精神面および経済面において、最高の支援を与えて下さいました両親に、心よりの感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] I. Lazanu, Current problems in semiconductor detectors for HEP after particle irradiation, Romanian Report in Physics , 55 (2003) p213.
- [2] 秋元崇、アトラスバレルSCT 用量産モジュールの品質保証のシステム、筑波大学数理物質科学研究科修士論文 (2001)
- [3] ATLAS Inner Detector Technical Design Report, Volume 1 (1997)
- [4] ATLAS Inner Detector Technical Design Report, Volume 2 (1997)
- [5] ATLAS SCT Barrel Module FDR, SCT Barrel Module : MODULE QA (2003)
- [6] Y.Unno, ATLAS SCT collaboration, ATLAS Silicon Microstrip Semiconductor Tracker(SCT), 7th International conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Nuclear Instruments and Methods A453 (2000) p109.
- [7] T.Ohsugi, et al., Nuclear Instrumental and Methods, A342, (1994) p22.
- [8] T.Kondo Construction and Performance of the ATLAS silicon microstrip barrel modules, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 485 (2002) p27.
- [9] S.M.SZE, SEMICONDUCTOR DEVICES Physics and Technology, Jhon Wiley and Sons, (1985)
- [10] 新間秀一、Diagnostic Testing of ATLAS Barrel SCT Modules、筑波大学大学院数理物質科学研究科修士論文 (2003)
- [11] TDK CORPORATION, The Technical note by SENSORS and ACTUATORS BUSINESS GROUP
- [12] HAMAMATSU PHOTONICS K.K,
- [13] Willian R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, SpringerVerlag, (1987)