

p型シリコンストリップセンサーと  
ピクセルセンサーの設計及び放射線損傷評価

三井真吾

博士(理学)

総合研究大学院大学

高エネルギー加速器科学研究科

素粒子原子核専攻

平成24年度

(2013)



# 目次

<b>第 1 章 序章</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 LHC と ATLAS	1
1.2.1 LHC	1
1.2.2 ATLAS	2
1.2.3 内部飛跡検出器	5
1.3 HL-LHC と LHC・ATLAS アップグレード	11
1.3.1 LHC アップグレード	11
1.3.2 ATLAS アップグレード	11
1.4 シリコンセンサー	13
1.4.1 原理	13
1.4.2 構造	17
1.4.3 動作	18
1.4.4 シリコン単結晶の製造法	20
1.5 シリコンセンサーの放射線損傷	21
1.5.1 表面損傷	21
1.5.2 バルク損傷	22
1.5.3 Non Ionizing Energy Loss (NIEL)	22
1.5.4 アニーリング	24
1.5.5 基礎特性の変化	26
<b>第 2 章 n-in-p シリコンセンサーの設計</b>	<b>27</b>
2.1 n-in-p シリコンセンサーの特徴	27
2.2 n-in-p シリコンストリップセンサーの設計	27
2.3 n-in-p シリコンピクセルセンサーの設計	31
2.4 ミニチュアセンサーとモニターダイオード	35
2.4.1 ミニチュアセンサーとモニターダイオードの構造	35
<b>第 3 章 放射線照射試験</b>	<b>43</b>
<b>第 4 章 放射線損傷評価</b>	<b>53</b>
4.1 全空乏化電圧	53
4.1.1 C-V 測定	53
4.1.2 全空乏化電圧の評価	54
4.2 損傷係数とエネルギーギャップ	55
4.2.1 I-V 測定	55
4.2.2 損傷係数	55

4.2.3	エネルギーギャップ	58
4.3	耐電圧の Field width 依存性	60
4.4	Multi Guard Ring の耐電圧	68
4.5	Punch Through Protection (PTP)	71
4.5.1	Punch Through Protection 測定	71
4.5.2	Punch Through Protection の評価	71
4.6	ストリップ間抵抗	74
4.6.1	ストリップ間抵抗測定	74
4.6.2	ストリップ間抵抗の評価	74
4.7	マイクロ放電の発生点	76
4.8	p-stop 電位	78
4.8.1	p-stop 電位測定	78
4.8.2	p-stop 電位の評価	78
4.9	収集電荷量	79
4.9.1	$\beta$ 線を用いた収集電荷量測定	79
4.10	TCAD による放射線損傷の評価	86
4.10.1	暗電流	86
4.10.2	ストリップ間抵抗	89
4.10.3	p-stop 電位とブレークダウンポイント	91
4.10.4	Punch Through Protection (PTP)	95
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>99</b>

# 目 次

1.1	LHC の全景 . . . . .	2
1.2	ATLAS の全景 . . . . .	4
1.3	内部飛跡検出器の設置位置 . . . . .	6
1.4	内部飛跡検出器 . . . . .	7
1.5	PIXEL モジュール . . . . .	8
1.6	SCT モジュール . . . . .	9
1.7	SCT Hybrid の断面図 . . . . .	10
1.8	SCT が組み込まれた TRT . . . . .	10
1.9	HL-LHC10 年間の運転の際に見込まれる放射線量 [2] . . . . .	12
1.10	n 型半導体と p 型半導体の組成 . . . . .	13
1.11	シリコン原子を近づけたときのバンド構造 . . . . .	14
1.12	導体、半導体、絶縁体のバンドギャップのイメージ . . . . .	15
1.13	ドナー準位とアクセプタ準位の概念図 . . . . .	15
1.14	pn 接合による拡散電流と空乏層、内蔵電場、内蔵電位 . . . . .	16
1.15	バイアス電圧と逆バイアス電圧 . . . . .	16
1.16	シリコンストリップセンサー . . . . .	17
1.17	シリコンストリップセンサーの表面構造 . . . . .	18
1.18	Float Zone 法 . . . . .	20
1.19	Czochralski 法 . . . . .	21
1.20	表面電荷 . . . . .	22
1.21	フレンケル欠陥とショットキー欠陥 [6] . . . . .	23
1.22	proton、electron、neutron、pion の変位損傷断面積のエネルギー依存性 [7] . . . . .	23
1.23	p 型シリコンセンサーの全空乏化電圧と有効不純物密度の 60 °C のアニーリング時間依存性 ( $2 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> ) . . . . .	24
1.24	n 型シリコンセンサーの有効不純物密度の 60 °C のアニーリング時間依存性 [8] . . . . .	25
1.25	n 型シリコンセンサーのアニーリング速度の温度依存性 [7] . . . . .	25
1.26	n 型シリコンセンサーの逆アニーリング速度の温度依存性 [7] . . . . .	25
1.27	n 型シリコンセンサーの全空乏化電圧と有効不純物密度の放射線量依存性 (300 $\mu$ m 厚)[7] . . . . .	26
2.1	n-in-p シリコンストリップセンサーの設計及び特徴 . . . . .	29
2.2	電極間分離構造の種類 . . . . .	29
2.3	n-in-p シリコンピクセルセンサーの設計 バッチ #1 . . . . .	32
2.4	n-in-p シリコンピクセルセンサーの設計 バッチ #2 . . . . .	33
2.5	ピクセルの拡大図 . . . . .	33
2.6	測定用 PCB ボードに貼りつけたミニチュアセンサーとモニターダイオード . . . . .	35

2.7	individual p-stop (zone 2) と common p-stop (zone 3) の構造	36
2.8	p-stop 電位測定用パッド	36
2.9	p-stop の構造 zone 3、30/75 $\mu\text{m}$ 間隔のサンプルの構造	37
2.10	p-stop の構造 zone 3、75 $\mu\text{m}$ 間隔のサンプルの構造	38
2.11	p-stop の構造 zone 2、40/75/100 $\mu\text{m}$ 間隔のサンプルの構造	39
2.12	PTP 構造の種類	40
2.13	p 型スリムエッジサンプルと断面図	41
2.14	マルチガードリングの種類	42
3.1	930 型 AVF サイクロトロン	43
3.2	照射サンプルと照射ボード	44
3.3	照射ボックスと照射量評価用アルミ箔	44
3.4	CYRIC32 コース及び、照射ボックス・XY ステージ	45
3.5	ゲルマニウム検出器と校正用 $^{60}\text{Co}$ のエネルギー分布	46
3.6	2010 年 7 月照射サンプル一覧 (p 型基板)	48
3.7	2010 年 7 月照射サンプル一覧 (n 型基板)	49
3.8	2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ1 320 $\mu\text{m}$ p-stop)	50
3.9	2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ1 150 $\mu\text{m}$ p-stop)	50
3.10	2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ3 150 $\mu\text{m}$ p-stop)	51
3.11	2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ1 320 $\mu\text{m}$ p-spray)	51
3.12	2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ1 150 $\mu\text{m}$ p-spray)	52
4.1	I-V、C-V 測定方法	53
4.2	全空乏化電圧の評価方法	54
4.3	全空乏化電圧測定サンプル	54
4.4	p 型シリコンセンサーの全空乏化電圧の放射線量依存性	55
4.5	n 型シリコンセンサーの全空乏化電圧の放射線量依存性 [7]	56
4.6	損傷係数評価サンプル	56
4.7	PTP サンプルの IV 曲線	57
4.8	p 型センサーの損傷係数の評価	57
4.9	n 型センサーの損傷係数のアニーリング時間依存性 [7]	58
4.10	暗電流の温度依存性	59
4.11	全空乏化電圧時の暗電流の温度依存性	59
4.12	耐電圧の評価方法	60
4.13	+20 $^{\circ}\text{C}$ と -20 $^{\circ}\text{C}$ における暗電流の逆バイアス電圧依存性 (3 Guard Ring の非照射サンプル)	61
4.14	耐電圧の Field width 依存性評価サンプル (n 型 p エッジサンプル)	61
4.15	耐電圧の Field width 依存性 (n 型 p エッジ、320 $\mu\text{m}$ 厚、Slim Edge・Multi Guard Ring サンプル)	62
4.16	耐電圧の Field width 依存性 (n 型 p エッジ、200 $\mu\text{m}$ 厚、Slim Edge・Multi Guard Ring サンプル)	63
4.17	耐電圧の Field width 依存性評価サンプル (n 型 n エッジサンプル)	63

4.18 耐電圧の Field width 依存性 (n 型 n エッジ、320 $\mu\text{m}$ 厚、Slim Edge・Multi Guard Ring サンプル) . . . . .	64
4.19 耐電圧の Field width 依存性 (n 型 n エッジ、200 $\mu\text{m}$ 厚、Slim Edge・Multi Guard Ring サンプル) . . . . .	64
4.20 耐電圧の Field width 依存性評価サンプル (p 型 p エッジサンプル) . . . . .	65
4.21 耐電圧の Field width 依存性 (p 型 p エッジ、320 $\mu\text{m}$ 厚、p-stop、FZ1、Slim Edge サンプル) . . . . .	65
4.22 耐電圧の Field width 依存性 (p 型 p エッジ、150 $\mu\text{m}$ 厚、p-stop、FZ1、Slim Edge サンプル) . . . . .	66
4.23 耐電圧の Field width 依存性 (p 型 p エッジ、150 $\mu\text{m}$ 厚、p-stop、FZ3、Slim Edge サンプル) . . . . .	66
4.24 耐圧 1000 V に必要な Field width の評価 . . . . .	67
4.25 Multi Guard Ring の耐電圧の評価サンプル . . . . .	68
4.26 p 型 p エッジ Multi Guard Ring サンプルの耐電圧の照射量依存性 . . . . .	69
4.27 p 型 n エッジ Multi Guard Ring サンプルの耐電圧の照射量依存性 . . . . .	70
4.28 PTP 測定方法 . . . . .	71
4.29 PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-1) . . . . .	72
4.30 PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-2) . . . . .	72
4.31 PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-3) . . . . .	73
4.32 PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-4) . . . . .	73
4.33 PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-5) . . . . .	74
4.34 ストリップ間抵抗測定 . . . . .	75
4.35 ストリップ間抵抗の評価 . . . . .	75
4.36 ストリップ間抵抗の温度依存性 . . . . .	76
4.37 1800 V、1900 V におけるホットエレクトロン撮影 . . . . .	77
4.38 Multi Guard Ring サンプルのホットエレクトロン撮影 . . . . .	77
4.39 p-stop 電位評価サンプル . . . . .	78
4.40 p-stop 測定 . . . . .	78
4.41 p-stop 電位の全空乏化電圧に対する割合 . . . . .	79
4.42 $\beta$ 線照射システム 断面図 . . . . .	79
4.43 $\beta$ 線を用いた収集電荷量の測定方法 . . . . .	80
4.44 光電子増倍管の High voltage の決定 . . . . .	81
4.45 ADC カウントのゲート幅依存性 . . . . .	81
4.46 1e14、150 $\mu\text{m}$ 厚、スタンダードダイオード、1000 V の信号波形 . . . . .	82
4.47 ENC のゲート幅依存性 . . . . .	82
4.48 アンプのゲイン測定 . . . . .	83
4.49 320 $\mu\text{m}$ 厚の非照射サンプル 1000 V における収集電荷量の ADC 分布 . . . . .	84
4.50 電荷収集効率の逆バイアス電圧依存性 . . . . .	85
4.51 320 $\mu\text{m}$ 厚と 150 $\mu\text{m}$ 厚センサーの収集電荷量の放射線量依存性 (900 V) . . . . .	85
4.52 浜松ホトニクスセンサー (320 $\mu\text{m}$ 厚) と MICRON センサー (300 $\mu\text{m}$ 厚) の収集電荷量 (900 V) [13] . . . . .	86
4.53 An、Ap の調整による暗電流の変化 . . . . .	87
4.54 デフォルト値での IV 特性 . . . . .	88

4.55 チューニング後の IV 特性 . . . . .	88
4.56 逆バイアス電圧-200 V の時のバルク中の電位 . . . . .	89
4.57 放射線損傷による暗電流の増加 . . . . .	90
4.58 ストリップ間抵抗の暗電流依存性 . . . . .	90
4.59 放射線損傷によるバルク中の電位、p-stop 電位の変化 . . . . .	91
4.60 表面電荷の違いによる p-stop の電位の違い . . . . .	92
4.61 表面電荷の違いによる電場強度分布の違い . . . . .	93
4.62 高電圧まで印加した時の IV 曲線 . . . . .	93
4.63 高電圧での電場強度分布 . . . . .	94
4.64 p、n インプラント (p、n エッジ) の電場強度の逆バイアス電圧依存性 . . . . .	94
4.65 逆バイアス電圧の上昇による電子層の排除 . . . . .	95
4.66 バルク内での電場強度分布 . . . . .	96
4.67 シミュレーションサンプルの構造 . . . . .	96
4.68 パラメータの変化による PTP の変化 . . . . .	97
4.69 TCAD と測定結果の Punch Through 発生電圧の比較 . . . . .	98

# 表 目 次

1.1	LHC の主なパラメータ . . . . .	3
1.2	内部飛跡検出器の主なパラメータ . . . . .	6
1.3	HL-LHC の運転値と最大値、Phase-1 の目標値 . . . . .	11
1.4	シリコンの性質 [3][4] . . . . .	14
2.1	ストリップメインセンサーとミニチュアセンサーの種類 . . . . .	28
2.2	ストリップメインセンサーとミニチュアセンサーの特徴 . . . . .	30
2.3	ピクセルセンサーとミニチュアセンサーの特徴 . . . . .	34



# 第1章 序章

## 1.1 背景

標準理論における唯一未発見のヒッグス粒子の発見を目的として、スイスのジュネーブにある CERN (欧州原子核研究機構) で LHC (Large Hadron Collider) による高エネルギー加速器実験が行われている。LHC の汎用検出器の一つとして ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) があり、ヒッグス粒子の探索、超対称性粒子の探索などが行われている。ATLAS は、内部飛跡検出器、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーター、ミューオン検出器から構成される。内部飛跡検出器は通過した粒子の飛跡検出を行っており、シリコンピクセル検出器の PIXEL とシリコンストリップ検出器の SCT (SemiConductor Tracker)、ガスチェンバーの TRT (Transition Radiation Tracker) からなる。LHC 加速器と ATLAS 検出器は順調に運転を続けており、2021 年頃までに積分ビーム輝度が  $350 \text{ fb}^{-1}$  に達する予定である。2022 年以降は、ビーム輝度を LHC の 5 倍に上げた HL-LHC (High Luminosity - LHC) が計画されている。HL-LHC では、粒子密度が高くなり TRT が稼働しなくなるため TRT をシリコン検出器に、また、検出器が甚大な放射線損傷を受けるためシリコンピクセル・ストリップ検出器は一桁上の放射線耐性を持つものに交換する。そこで我々は、HL-LHC のような高頻度高粒子密度でも運用可能な、高度放射線耐性を持つ n-in-p シリコン検出器の開発研究を行った。

開発にあたっては、p 型シリコンミニチュアセンサー及びモニターダイオードの放射線照射試験を行い、放射線損傷の評価を行った。また、TCAD (Semiconductor Technology Computer-Aided Design tool) を用いて、シリコン検出器をシミュレーションし、放射線損傷を評価した。

## 1.2 LHC と ATLAS

### 1.2.1 LHC

2008 年 9 月 10 日より、スイスのジュネーブ郊外にある CERN では、LHC が稼働している。LHC は、周長 27 km の陽子-陽子衝突型加速器で、重心系エネルギーは世界最高の 14 TeV で設計されており、2011 年に 7 TeV、2012 年に 8 TeV を達成した。2013 年 1 月現在、瞬間最高ビーム輝度 (ルミノシティ) は  $7.73 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を達成しており、設計値  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に向けて順次上げられていく。現在の LHC の積分ビーム輝度は約  $27 \text{ fb}^{-1}$  で、2021 年頃までに  $350 \text{ fb}^{-1}$  を達成する。2022 年頃からは、ビーム輝度を  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に上げて 2030 年頃までに積分ビーム輝度が  $3000 \text{ fb}^{-1}$  以上となる HL-LHC が計画されている。LHC のビーム輝度  $L$  は、以下の式で与えられる。

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_r \gamma}{4\pi \epsilon_n \beta^*} F \quad (1.1)$$

$N_b$  はバンチ当たりの粒子数で  $1.15 \times 10^{11}$ 、 $n_b$  はバンチ数で 2808、 $f_r$  は回転周波数で  $1.12 \times 10^4 \text{ Hz}$ 、 $\gamma$  は相対論的ファクターで 7461、 $\epsilon_n$  は規格化エミッタンスで  $3.75 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 、 $\beta^*$  は衝突点での  $\beta$  関

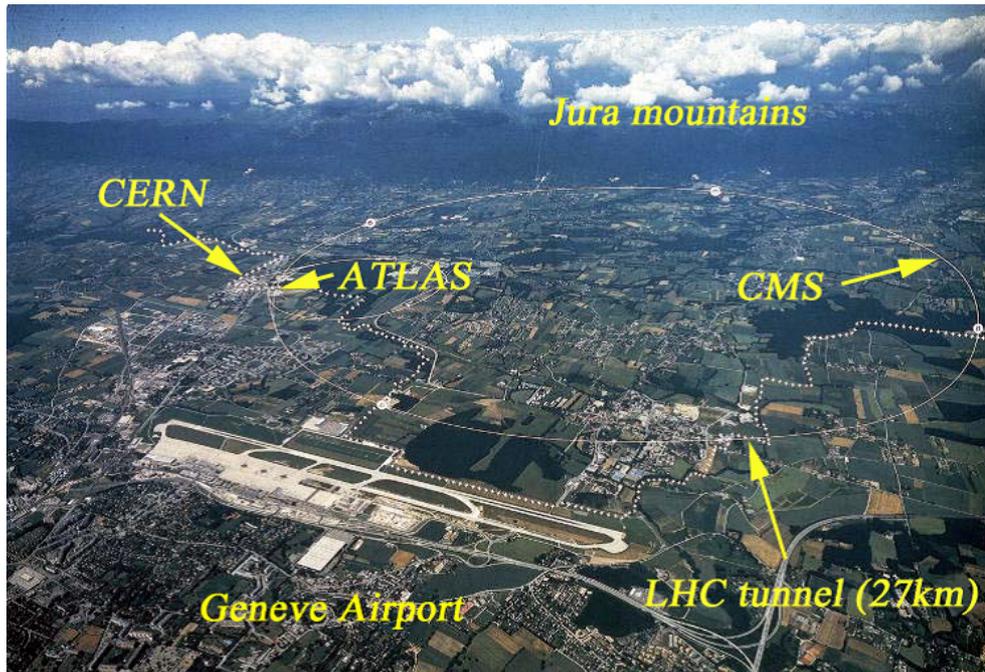


図 1.1: LHC の全景

数で 55 cm、F は交差角による減少ファクターで 0.86。これらにより LHC の設計値  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  が得られる。ここで、F は以下のように 定義される。

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*}\right)^2}} \quad (1.2)$$

$\theta_c$  は交差角、 $\sigma_z$  は RMS バンチ長さ、 $\sigma^*$  は RMS ビームサイズをあらわす。LHC の主なパラメータを表 1.1 に示す。

## 1.2.2 ATLAS

LHC には 4ヶ所の粒子衝突点があり、汎用検出器としては ATLAS と CMS (Compact Muon Solenoid) の二つの検出器が設置されている。その他に B 粒子の測定に特化し標準理論の検証を行う LHCb (LHC - beauty)、重イオン衝突を測定し、クォークグルーオンプラズマ相などの物理を明らかにすることが目的の ALICE (A Large Ion Collider Experiment) が設置されている。

LHC の ATLAS 実験の主な目的として、

- ヒッグス粒子の探索
- 超対称性粒子の探索
- 余剰次元の探索
- B 中間子崩壊による CP 対称性の破れの検証
- トップクォークの物理

などが挙げられる。初めての TeV 領域での実験として、新しい物理の発見が期待されている。

表 1.1: LHC の主なパラメータ

主リング長	26658.883 m
陽子ビームエネルギー	7.0 TeV
最高瞬間ビーム輝度	$1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
バンチ間隔	25 ns (40 MHz)
バンチ当たりの陽子数	$1.15 \times 10^{11}$
バンチ数	2808 /ring
規格化エミッタンス	$3.75 \times 10^{-4} \text{ cm}$
二口径双極電磁石長, 数, 磁場	14.3 m, 1232 台, 8.33 T
四極電磁石長, 数	3.1 m, 506 台
曲げ半径	2803.95 m
回転周波数	11.245 kHz
RMS ビームサイズ	16.7 $\mu\text{m}$
RMS バンチ長さ	7.55 cm
ビーム衝突角度	$\pm 142.5 \mu\text{rad}$
交差平面 (ATLAS, CMS)	垂直 (ATLAS), 水平 (CMS)
バンチ衝突当たりの陽子衝突数	19
ルミノシティ寿命	14.9 hours
シンクロトロン放射損失エネルギー	3.6 kW/ring, 6.71 keV/turn

ATLAS は、高さ 22 m、全長 44 m、重量 7000 t の汎用型粒子検出器である。ATLAS の構造は内側から内部飛跡検出器、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーター、ミューオン検出器となっている。内部飛跡検出器は、超伝導ソレノイドマグネットによって作られた 2 T の磁場中に置かれている。磁場によって曲げられた荷電粒子の曲率半径を求め、粒子の運動量や崩壊点の測定を行う。電磁カロリメーターは、電子・光子の同定とエネルギーの測定、電磁シャワーの位置測定を行う。ハドロンカロリメーターは、ジェットのエネルギの測定を行い、また、超前方まで覆うことで横方向への消失エネルギーの測定を可能とし、ニュートリノの横運動量測定をする。ミューオン検出器は、トロイドマグネットによって作られた磁場中に置かれ、 $\mu$  粒子の運動量の測定を行う。

### 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は、ATLAS の最内部に設置されており、内側からシリコンピクセル検出器 (PIXEL)、シリコンマイクロストリップ検出器 (SCT)、遷移輻射ストローチューブチェンバー (TRT) という構造になっている。その外側は、2 T の磁場を作り出すソレノイドマグネットが覆っている。粒子が通過すると、典型的に PIXEL 検出器は 3 点、SCT 検出器は 4 点の位置座標が得られ、TRT 検出器は最大 36 の飛跡点を得る。内部飛跡検出器の外径は、半径 1150 mm で、全長 7024 mm の円柱状である。シリコン検出器は、バレル領域ではビーム軸から同軸上のシリンダーに取り付けられ、エンドキャップ領域ではビーム軸に対し垂直なディスクにマウントされる。TRT 検出器のバレル領域のストローは、ビーム方向に平行になっており、エンドキャップ領域の検出器は、ビーム軸に対し垂直方向に放射状に位置される。内部飛跡検出器の詳細は、1.2.3 で述べる。

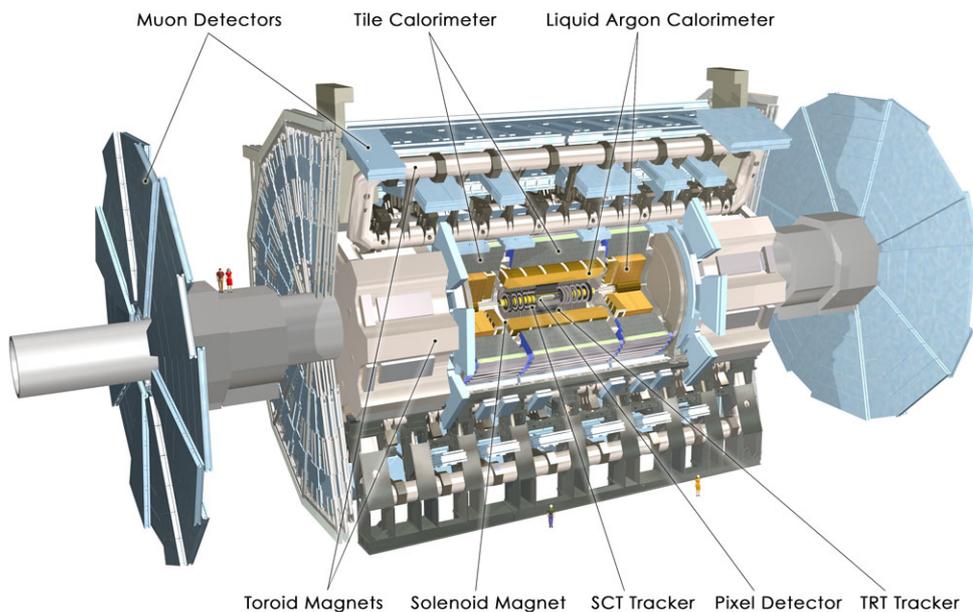


図 1.2: ATLAS の全景

## カロリメーター

カロリメーターは、内部飛跡検出器とソレノイドマグネットの外側に位置し、内側から電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーターとなっている。カロリメーターは、アブソーバーと呼ばれる金属板と検出領域からなり、電子、光子およびハドロン粒子 ( $\pi$  中間子、K 中間子、陽子、中性子等) のエネルギー測定を行う。アブソーバーでの衝突の際の衝突エネルギーは、粒子のシャワーとなり、検出領域で検出される。電磁カロリメーターは鉛と液体アルゴンのサンプリングカロリメーターである。ハドロンカロリメーターは、鉄とプラスチックシンチレータのタイルを並べたタイルカロリメーターである。エンドキャップ領域は、銅と液体アルゴンからなる領域とタングステンと液体アルゴンからなる領域がある。

## ミューオン検出器

ミューオン検出器はカロリメーターを覆うように位置し、ミューオンの飛跡を測定して高精度で運動量の決定をする。大型超伝導トロイダルコイルで作られる磁場中に置かれ、運動量を測定する検出器とトリガー検出器がある。ミューオン検出器は4種類のガス検出器からなり、飛跡の位置を検出して運動量を測定する Monitored Drift Tube (MDT) と Cathode Strip Chamber (CSC)、トリガー検出器として Resistive Plate Chamber (RPC)、Thin Gap Chamber (TGC) がある。MDT は円筒同軸型ドリフトチェンバーで、CSC は Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) と呼ばれる構造をしている。RPC は平行平板型ガス検出器でバレル領域に取り付けられ、TGC は MWPC 型に似た構造でエンドキャップ領域に取り付けられる。

## マグネットシステム

**ソレノイドマグネット** ソレノイドマグネットは、長さ 5.3 m で内径が 2.4 m の超伝導マグネットである。導体は複合材で、長方形の断面を持つ安定化アルミニウムの中心に位置された超伝導フラットケーブルからなる。これは、2 T (最大 2.6 T) の磁場を発生させるために設計されている。システム全体の重量は 5.7 t にもおよぶ。

**トロイドマグネット** トロイドマグネットシステムは、8つのバレルトロイドコイルと8つのエンドキャップトロイドコイルからなる。バレルコイルはそれぞれ分離されたクライオスタットに格納され、エンドキャップは一体型クライオスタットに格納される。エンドキャップコイルシステムは、半径方向のオーバーラップと電源供給の最適化のために、バレルトロイドに対して 22.5 度回転している。

**バレルトロイドマグネット** バレルトロイドシステムは8つのコイルからなり、ビーム軸周りに対称的に放射状に組み立てられている。20.5 kA 仕様のアルミ安定化 NbTi 超伝導線により作られたダブルパンケーキコイルである。コイルは、軸長 25.3 m、放射状に 9.4 ~ 20.1 m まで広がっている。全体の重量は 830 t にもおよぶ。バレルトロイドコイルは最大 3.9 T の磁場を発生させ、擬ラピディティが 0 ~ 1.3 の範囲で、2 ~ 6 Tm の曲げる力を発生させる。

**エンドキャップトロイドマグネット** トロイドエンドキャップシステムは、ビーム軸周りに対照的に放射状に組み立てられた8つのコイルから出来ている。20.5 kA 仕様のアルミ安定化 NbTi 超伝導線により作られた2つのダブルパンケーキが扇形に開いたレーストラック状のコイルである。それらは一つの大きなクライオスタットに収納されている。クライオスタットは、検出器中心へのアクセスのための移動や停止を容易にするために、レールシステム上に置かれている。各コイルは、軸長 5 m、放射状に 1.65 ~ 10.7 m まで広がっている。全体の重量は 239 t にもおよぶ。エンドキャップトロイドコイルは最大 4.1 T の磁場を発生させ、擬ラピディティが 1.6 ~ 2.7 の範囲で、4 ~ 8 Tm の曲げる力を発生させる。

### 1.2.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は、PIXEL 検出器、SCT 検出器、TRT 検出器のバレル部とエンドキャップ部からなり、主なパラメータは表 1.2 にまとめる。以下で定義される擬ラピディティ  $|\eta| < 2.5$  までを覆っている。

$$\eta = -\ln \left( \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1.3)$$

$\theta$  は衝突点を原点とし、ビームラインからの極角を示す。また、ビームライン上のビームの方向を z 軸、衝突点からリング中心方向を x 軸、衝突点から上方向を y 軸、ビームラインまわりの方位角を  $\phi$  とする。内部飛跡検出器の運動量分解能 ( $\sigma(1/P_T)$ )、崩壊点位置分解能 (動径方向  $\sigma(d_0)$ 、ビーム軸方向  $\sigma(z_0)$ ) がシミュレーションによって以下のように見積もられている。ただし、 $\oplus$  は自乗和の平方根を表す。

$$\sigma(1/P_T) = 0.00036 \oplus \frac{0.013}{P_T \sqrt{\sin \theta}} \text{ (GeV}^{-1}\text{c)} \quad (1.4)$$

$$\sigma(d_0) = 12 \oplus \frac{88}{P_T \sqrt{\sin \theta}} (\mu\text{m}) \quad (1.5)$$

$$\sigma(z_0) = 96 \oplus \frac{160}{P_T \sqrt{\sin \theta}} (\mu\text{m}) \quad (1.6)$$

表 1.2: 内部飛跡検出器の主なパラメータ

検出器	配置	検出器面積 m <sup>2</sup>	空間位置分解能 $\mu\text{m}$	チャンネル数 (10 <sup>6</sup> )	$\eta$
PIXEL	B層	0.2	$R_\phi=10, z=115$	16	$\pm 2.5$
	バレル部	1.4	$R_\phi=10, z=115$	81	$\pm 1.7$
	エンドキャップ部	0.7	$R_\phi=10, R=115$	43	1.7 - 2.5
SCT	バレル部	34.4	$R_\phi=17, z=580$	3.2	$\pm 1.4$
	エンドキャップ部	26.7	$R_\phi=17, R=580$	3.0	1.4 - 2.5
TRT	バレル部		130/straw	0.1	$\pm 0.7$
	エンドキャップ部		130/straw	0.32	0.7 - 2.5

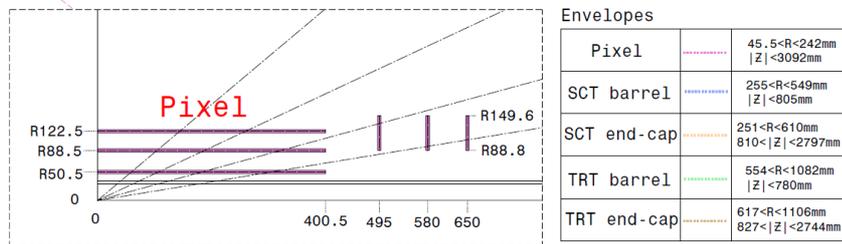
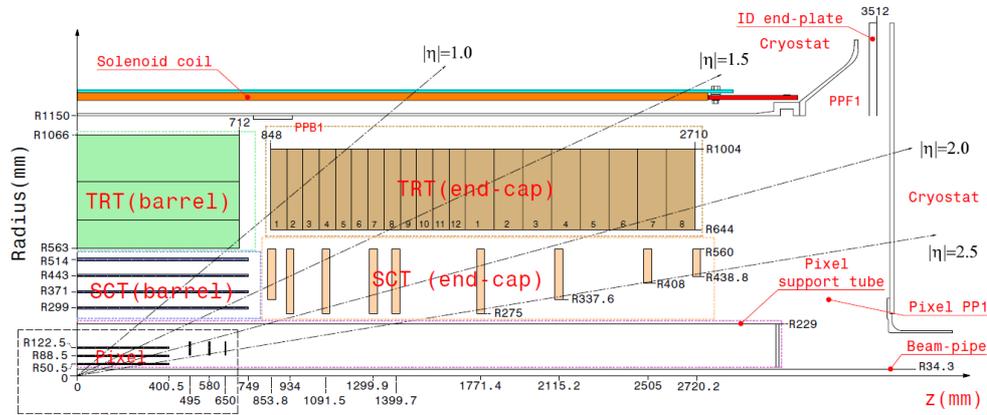


図 1.3: 内部飛跡検出器の設置位置 衝突点を原点に 1/4 の領域

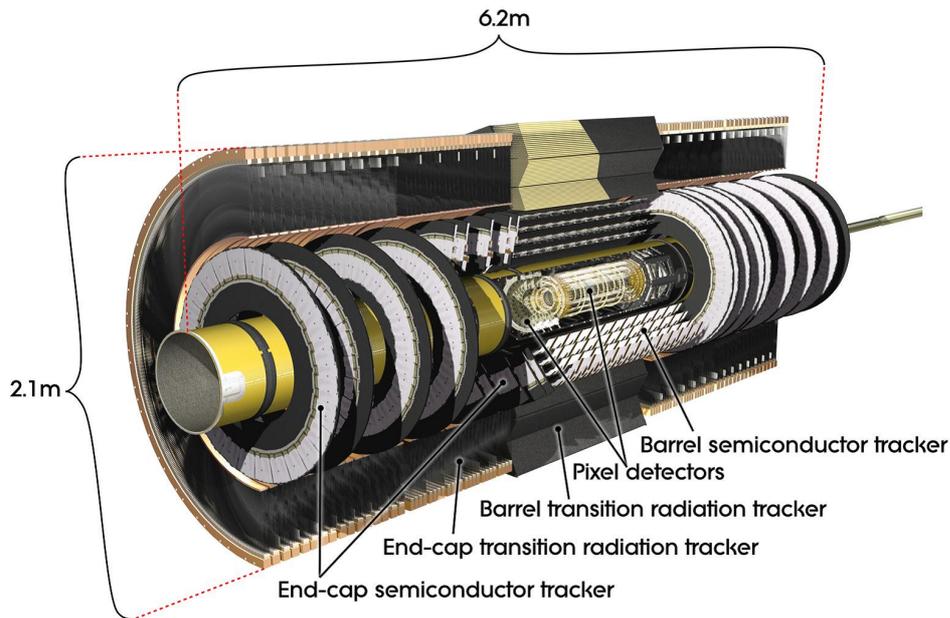


図 1.4: 内部飛跡検出器

## PIXEL 検出器

PIXEL 検出器は、可能な限り衝突点近くに置かれ、超高粒子密度下で高精度な測定が可能となるよう設計されている。 $|\eta| < 2.5$  の範囲での精度の高い測定を行い、インパクトパラメータの分解能など内部飛跡検出器の能力を決定付け、 $b$  クォークや  $\tau$  レプトンのような短寿命粒子の発見に寄与する。センサーピクセルの 2 次元的配置により、位置情報を得ることが出来る。読み出しチップは、レベル 1 トリガーの決定を待っている間にデータをためておくバッファリングを含め、各ピクセルごとに別々の回路となるため、広い面積が必要となる。各チップは、ピクセルごとに回路とバンプボンディングされている。さらに、チップは 300 kGy 以上の放射線や年間の運転で  $5 \times 10^{14} \text{ neq/cm}^2$  以上の照射量に耐えられるように設計されている。システム全体の 90 % のセンサーのピクセルの大きさは、 $R_\phi$  方向に  $50 \mu\text{m}$ 、 $z$  方向に  $400 \mu\text{m}$  である。フロントエンドチップには、 $R_\phi$  方向に  $50 \mu\text{m}$ 、 $z$  方向に  $600 \mu\text{m}$  のピクセルが含まれている。

システムはビーム軸からの平均半径が 50.5、88.5、122.5 mm の 3 つのバレルと、バレル両端の半径 88.8 ~ 149.6 mm の 3 つのディスクからなり、 $|\eta| = 2.5$  までの全角度方向を覆っている。システムは、1456 のバレルモジュールと 288 のディスクモジュールを含めて、高度にモジュール化された設計である。また、バレルとディスクは一つの支持構造の中に設置されている。

バレルとディスクのモジュールは、非常に似た構造である。バレルモジュールは、47232 ピクセルを持つ長さ 63.4 mm、幅 24.4 mm のピクセルセンサーと、2880 のピクセル回路が配列されている 16 枚のフロントエンドチップで構成されている。シミュレーションからそれぞれの層は、放射長の 1.39 % 以下と見積もられている。

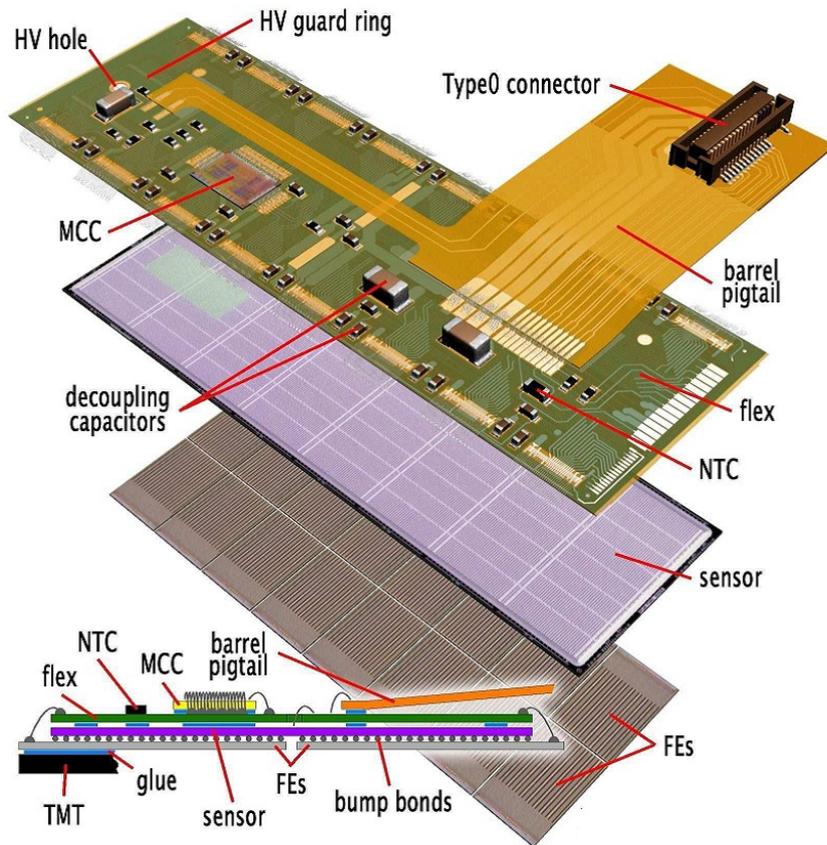


図 1.5: PIXEL モジュール センサーとフロントエンドチップはバンプボンディングされる。センサーと基板は接着剤で接着され、フロントエンドチップとワイヤーボンディングされる。

### SCT 検出器

システムは、高い精度で通過粒子の位置測定を行い、衝突点やインパクトパラメータ、運動量の測定に寄与している。このシステムはこれまでのシリコンマイクロストリップセンサーより大きな面積を必要とし、さらに、高い放射線耐性が要求される。

バレルは、2次元座標点を得るために、ステレオ角を持つ2層のシリコンマイクロストリップ検出器を使用する。一つの層は2枚のストリップセンサーで構成される。それぞれのシリコン検出器は、 $80\ \mu\text{m}$  間隔で768本の読み出しストリップを持ち、面積は $6.36 \times 6.40\ \text{cm}^2$ である。それぞれのモジュールは4つのストリップセンサーからなる。モジュールの片面は、2つのセンサーがワイヤーボンディングされ $12.8\ \text{cm}$ の長さのストリップを形成する。2つのセンサー対は、裏面同士が $40\ \text{mrad}$ の角度を持って接着され、高熱伝導ベースプレートに接着されている。エレクトロニクスはハイブリッドに搭載され、センサーの上に設置される。読み出しチェーンは、フロントエンド増幅器とディスクリミネータからなり、レベル1トリガーの決定まで閾値を超えたヒットをためておくバイナリパイプラインが備わっている。フロントエンドモジュールは構造が非常に似ているが、台形のセンサーを使っており、放射状に位置される。フロントエンドモジュールの長さは約 $12.7\ \text{cm}$ である。SCT検出器の面積は $61\ \text{m}^2$ 。位置分解能は、 $R_\phi$ 方向で $16\ \mu\text{m}$ 、 $z$ 方向で $580\ \mu\text{m}$ 。トラックは、およそ $200\ \mu\text{m}$ 以上離れていれば分離することが出来る。

バレルモジュールは、クーリングシステムを持つ4つのカーボンファイバーシリンダー上に設置される。4つのバレルシリンダーは、ビーム軸から半径 299、371、443、514 mm に位置している。フロントエンドモジュールは、スペースフレームにより接続された9枚のディスク上に配置され、各ディスクは、 $|\eta| < 2.5$  まで覆うよう、必要に応じて 6 cm の長さのモジュールを用いて、最高3リングで構成されている。

フロントエンドエレクトロニクスとストリップセンサーからなるモジュールは、磁場を印加したビームテストが行われており、10年間の運転で受ける放射線レベルでも、位置分解能、SN比、読み出し速度の要求性能を満たしていることが確認されている。システムには、非常に高い寸法安定性やストリップセンサーの暗電流による発熱やエレクトロニクスの発熱を冷却する冷却システムが要求される。構造は可能な限り熱膨張係数の低いカーボンを主体に設計され、冷却系は検出器全体に渡って低い熱勾配を達成するため  $C_3F_8$  を冷媒に用いた配管内蒸発冷却システムを採用している。

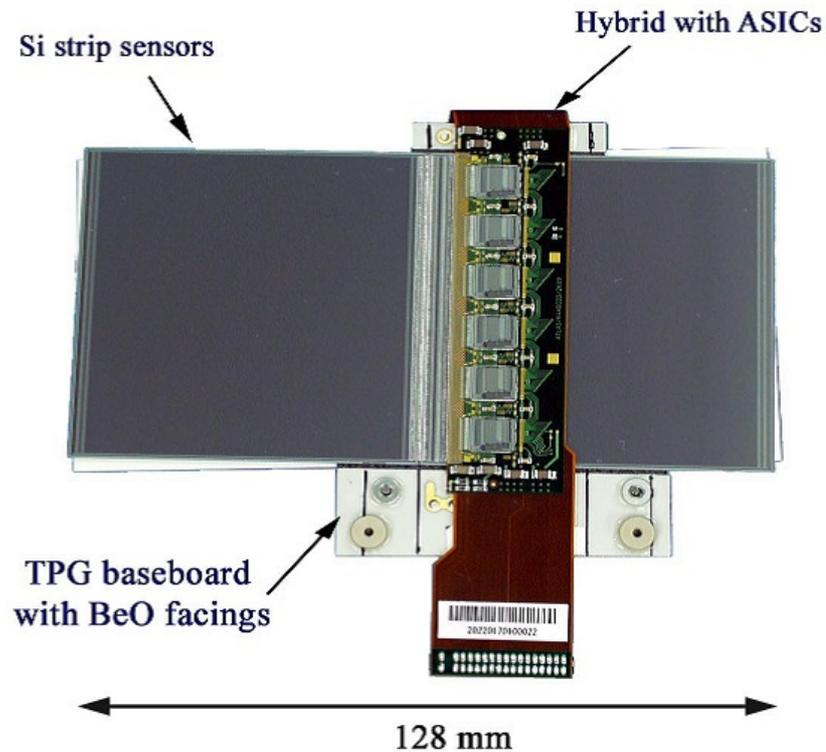


図 1.6: SCT モジュール ベースボードの表と裏に2枚ずつセンサーが貼り付けられている。表裏で40 mrad 傾けることで2次元の位置情報が得られる。片面のセンサー同士、センサーと読み出し回路はワイヤーボンディングで繋がれている。

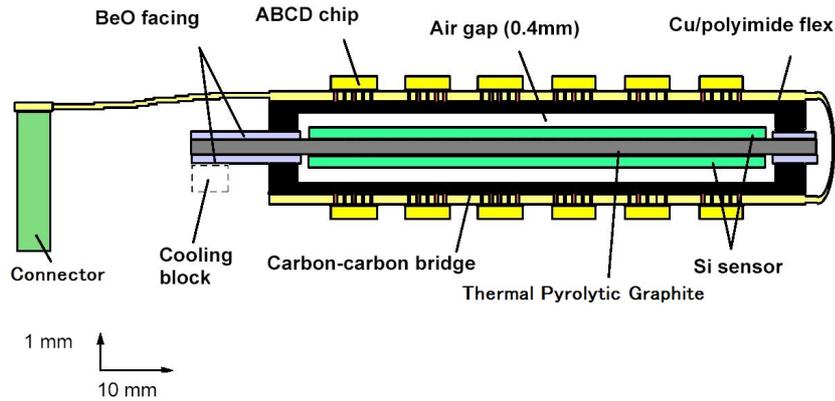


図 1.7: SCT Hybrid の断面図 1 枚のハイブリッドを裏へ折り曲げている。センサーとは接していない。

### TRT 検出器

TRT は、 $z=0 \sim 848$  mm のバレル領域は、ストローがビーム軸と平行に半径 554 ~ 1082 mm に置かれ、 $z=848$  mm 以上のエンドキャップ領域は、ストローがビーム軸と垂直に半径 617 ~ 1106 mm に置かれるストロー形ドリフトチューブチェンバーである。ストローの直径は 4 mm で、中心には 31  $\mu\text{m}$  の金メッキされたタングステンの読み出しワイヤーが張られている。チューブの中には、Xe 70 %、 $\text{CF}_4$  27 %、 $\text{CO}_2$  3 % のガスが充填されている。チューブは、36 層に積層されており、各ストローチューブでのドリフト時間を測定することにより 130  $\mu\text{m}$  の位置分解能が得られる。ストローチューブ間には、19  $\mu\text{m}$  径のポリプロピレンファイバーから成る層があり、荷電粒子が通過する際に発する遷移放射を測定することで、電子と荷電中間子の識別を可能にしている。

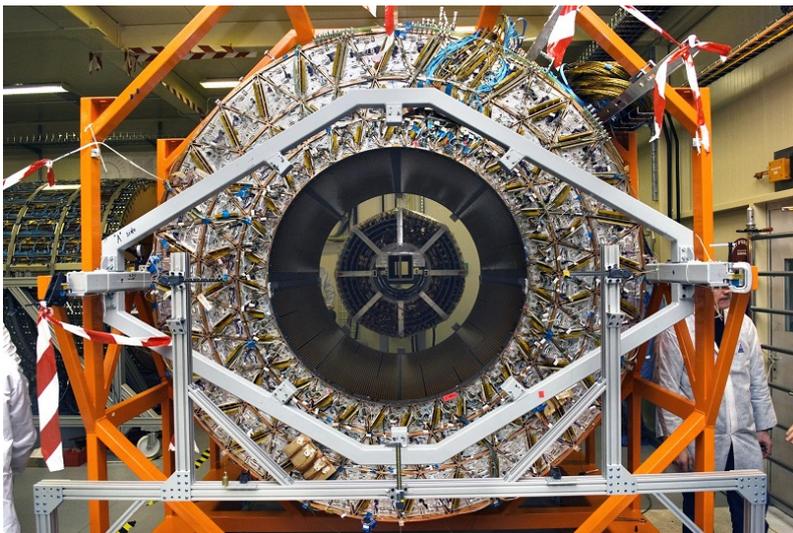


図 1.8: SCT が組み込まれた TRT

## 1.3 HL-LHC と LHC・ATLAS アップグレード

HL-LHC は、加速器と検出器の増強を行い、ルミノシティを LHC の 5 倍となる  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  まで上げ、2030 年頃までに積分ビーム輝度を  $3000 \text{ fb}^{-1}$  以上とする計画である。HL-LHC に向けた LHC 加速器や ATLAS 検出器のアップグレードは 3 回の Long Shutdown 中に行われる。1 回目の Long Shutdown、LS1 は 2012 年 12 月 ~ 2014 年 7 月に行われ Phase-0 と呼ばれる ATLAS 検出器のアップグレードが行われる。2017 ~ 18 年の LS2 では Phase-1 アップグレード、2021 ~ 22 年以降の LS3 では Phase-2 アップグレードが計画されている。

### 1.3.1 LHC アップグレード

LS1 では、LHC の設計値の達成を目的とされた加速器のアップグレードが行われ、マグネットの相互接続の修復やクエンチ保護のシステムを完成させる。重心系エネルギーは 13 ~ 14 TeV、瞬間最高ビーム輝度は  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、バンチ間隔は 50 ns から 25 ns に向上される。LS2 では、更にビーム輝度を上昇させるために、インジェクターやコリメーターの強化が行われる。重心系エネルギーは 14 TeV、瞬間最高ビーム輝度は約  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  となり、LS3 までに  $350 \text{ fb}^{-1}$  の積分ビーム輝度を目標としている。LS3 では、HL-LHC に向けて Interaction Region (IR) のアップグレードやビーム輝度の平滑化のためにクラブ空洞を導入する。

表 1.3: HL-LHC の運転値と最大値、Phase-1 の目標値

パラメータ	運転値	最大値	Phase-1
瞬間最高ビーム輝度	$5 \times 10^{34}$	$7 \times 10^{34}$	$2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
積分ビーム輝度 (10 年間)	$2500 \text{ fb}^{-1}$	$3000 \text{ fb}^{-1}$	$300 \text{ fb}^{-1}$
年間ビーム輝度	$250 \text{ fb}^{-1}$	$300 \text{ fb}^{-1}$	$100 \text{ fb}^{-1}$
イベントごとの平均衝突数	140	200	55
ビームスポットの広がり ( $1\sigma$ ) x, y, z(mm)	0.012, 0.012, 75.0		
バンチ長	106.1 mm		

### 1.3.2 ATLAS アップグレード

各 Phase では、パフォーマンスの向上のために、ATLAS 検出器のアップグレードが行われる [1]。Phase-0 では、最内層の PIXEL 検出器 (B-layer) と新たな Be ビームパイプの間に、IBL (Insertable B Layer) と呼ばれる PIXEL 検出器を増設する。IBL は、ビーム軸からの平均半径 3.3 cm に設置され、トラッキング性能を向上させる。既存のシステムの強化も行われ、カロリメータの低電圧電源は新たに設置され、内部飛跡検出器の冷却系のコンプレッサーポンプはサーモサイフォンに変更し、低温マグネットのパワーネットワークなどが改良される。また、ミューオンシステムの完成、エンドキャップトロイドマグネット内に新たな中性子シールドが設置される。Phase-1 では、LVL2 trigger のために Fast TracKer (FTK) の導入、新たな Muon small wheel の設置、カロリメータの LVL1 トリガーの高精度化、LVL1 の Topological trigger processors の導入、新たな Diffractive physics detector station の導入が行われる。Phase-2 では、その後の瞬間最高ビーム輝度が現在の

LHC の設計輝度の 5 倍 ( $1 \times 10^{34} \rightarrow 5 \times 10^{34}$ )、放射線損傷が約 10 倍 ( $350 \rightarrow 3000 \text{ fb}^{-1}$ ) になることから、それに耐えうる検出器が必要であり、内部飛跡検出器は全て交換することになる。検出器の候補は、プラナーセンサーと 3D センサーとダイヤモンドセンサーがある。その他にも、前方カロリメーターの交換、液体アルゴンカロリメーターへ新たなエレクトロニクスを設置が行われる。

内部飛跡検出器で見込まれる放射線量は、安全係数 2 を考慮に入れ、 $1 \text{ cm}^2$  当たりの 1 MeV 中性子の個数に換算して、最内層 PIXEL ( $R = 3.7 \text{ cm}$ ) では、 $2.2 \times 10^{16} \text{ 1-MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 、PIXEL ( $R = 7.5 \text{ cm}$ ) で、 $6 \times 10^{15} \text{ 1-MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 、SCT ( $R = 31 \text{ cm}$ ) で、 $1 \times 10^{15} \text{ 1-MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  となっている。PIXEL 領域では、中性子より荷電粒子による放射線損傷が支配的であり、STRIP 領域では中性子が支配的になる。

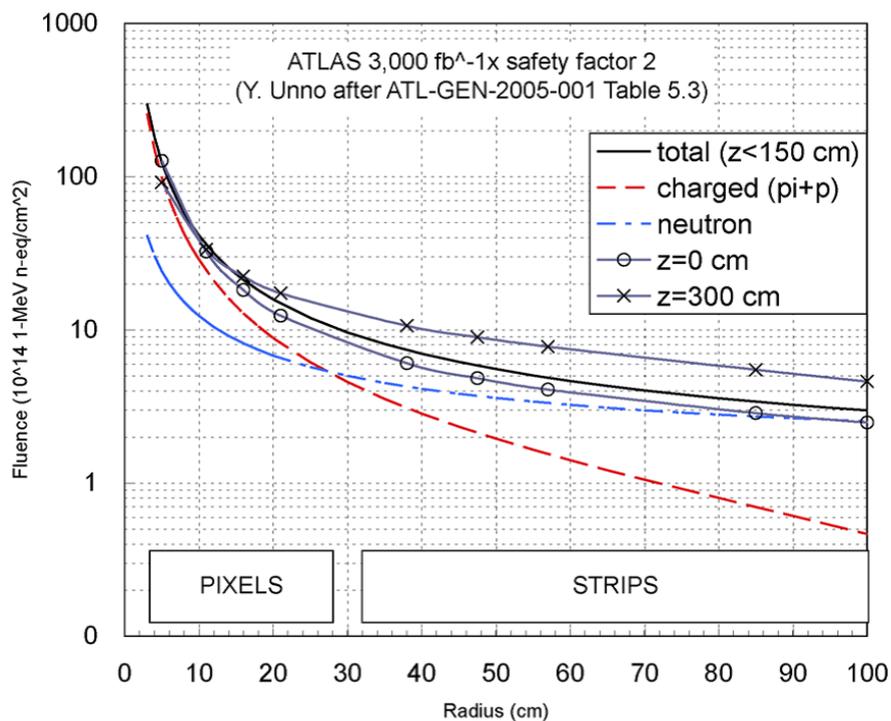


図 1.9: HL-LHC10 年間の運転の際に見込まれる放射線量 [2] (安全係数 2 を掛けている。)

## 1.4 シリコンセンサー

### 1.4.1 原理

半導体

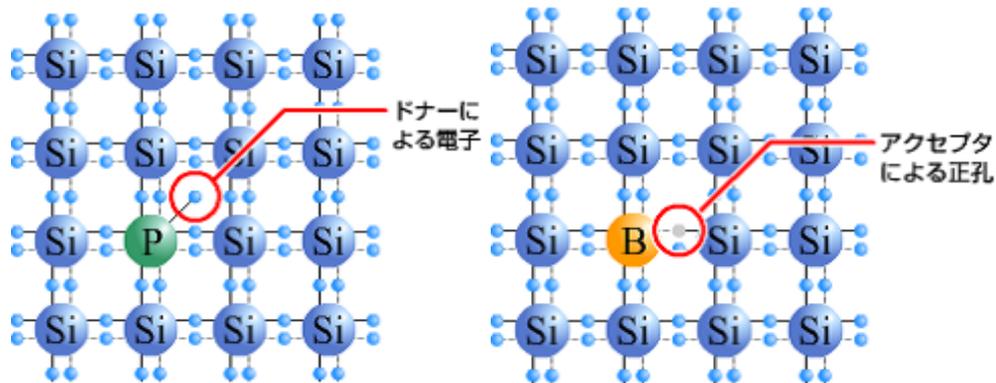


図 1.10: n 型半導体と p 型半導体の組成 Si 結晶中に V 族の P (リン) が含まれているものが n 型半導体 (左)、III 族の B (ホウ素) が含まれているものが p 型半導体 (右) となる。

半導体とは、電気をよく通す導体と通しにくい絶縁体の中間の性質を持つ物質のことである。半導体は、Si (シリコン) や Ge (ゲルマニウム) など IV 族の元素からなり、不純物を含まない真性半導体と V 族の P (リン) などをドーピングして電子が多数キャリアとなった n 型半導体、III 族の B (ホウ素) などをドーピングして正孔が多数キャリアとなった p 型半導体がある。n 型半導体の添加元素 (リン原子) は電子を供給したために正に帯電しておりドナーと呼ばれ、p 型半導体の添加元素 (ホウ素原子) は正孔を形成したために負に帯電しておりアクセプタと呼ばれる。ドナーとアクセプタは結晶中を動くことは出来ないので電荷を運搬するキャリアとはならない。シリコンの基本的な性質を表 1.4 に示す。

### バンド構造

水素原子の電子は、飛び飛びの離散的なエネルギー準位をとる。しかし、シリコンの結晶は多数のエネルギー準位が混在しておりエネルギーバンドを形成する (図 1.11)。金属の場合は、一つのバンドに電子が充満しておらず、室温のような低いエネルギーで電子が励起され結晶中を自由に移動することができる。そのため、金属は導電性を持つ。低いエネルギーバンド (価電子帯) が電子で充満している結晶は、電子が決まったエネルギーを得て高いエネルギーバンド (伝導帯) へと移らなければ導電性は得られない。その価電子帯と伝導帯のエネルギー幅をエネルギーギャップ (バンドギャップ) と呼び、シリコンは約 1.12 eV である。絶縁体は、このエネルギーギャップが大きく自由電子の数が極端に少ない。電子があるエネルギーを持つ確率はフェルミ分布関数に従う。

$$F(E) = \frac{1}{e^{-\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \quad (1.7)$$

k はボルツマン定数、T は絶対温度、 $E_F$  はフェルミエネルギーを表す。室温において  $kT$  = 約 0.026 eV であり、純粋なシリコンでは伝導帯に電子がほとんど存在しない。しかし、 $E_F$  より大きいエネルギー準位の伝導帯でも電子の存在する確率があるため半導体は僅かな導電性を持つ。

表 1.4: シリコンの性質 [3][4]

原子番号 $Z$	14
質量数 $A$	28.0855(3)
Nucl. coll. length $\lambda_T$	70.2 g/cm <sup>2</sup>
Nucl. inter. length $\lambda_I$	108.4 g/cm <sup>2</sup>
放射長 $X_0$	21.82 g/cm <sup>2</sup>
$dE/dx _{\min}$	1.664 MeV cm <sup>2</sup> /g
密度	2.329 g/cm <sup>3</sup>
融点	1687 K
沸点	3538 K
屈折率	3.95
比誘電率	11.9
ヤング率	$16 \times 10^6$ lbf/inch <sup>2</sup>
熱膨張係数	$2.8-7.3 \times 10^{-6}$ /K
比熱	0.162 cal/g K
熱伝導率	0.20 cal/cm K sec
電子易動度	<1400 cm <sup>2</sup> /Vsec
正孔易動度	<450 cm <sup>2</sup> /Vsec
ブレイクダウン電界	$3 \times 10^5$ V/cm

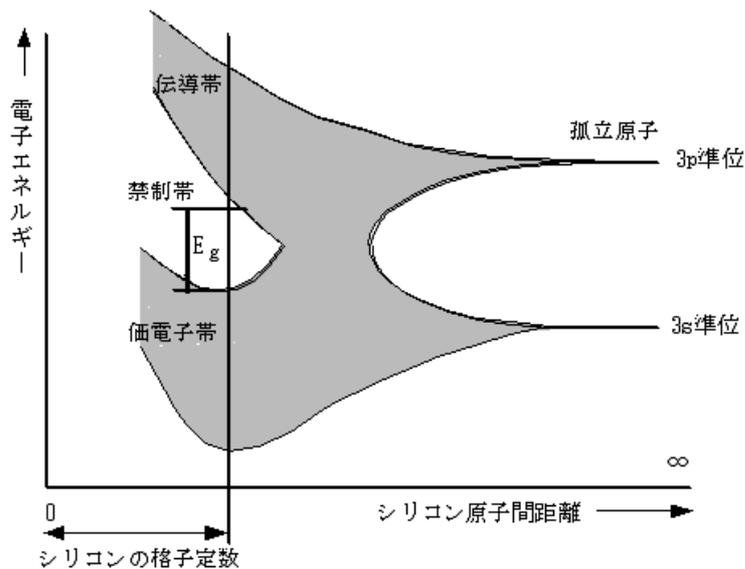


図 1.11: シリコン原子を近づけたときのバンド構造

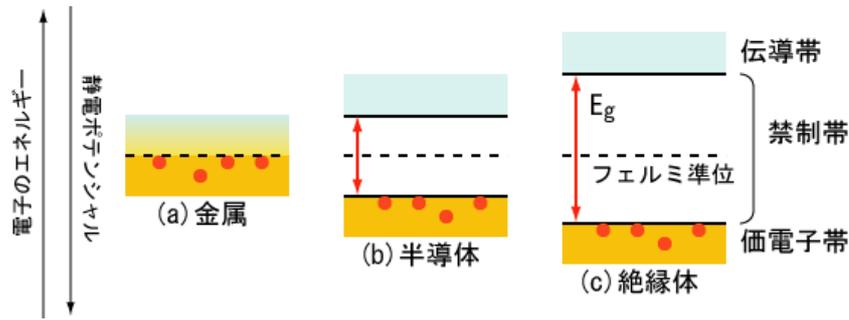


図 1.12: 導体、半導体、絶縁体のバンドギャップのイメージ

n 型半導体のドナーの電子は、伝導帯のすぐ下のドナー準位にあり、極めて低いエネルギーで伝導帯に励起して自由電子となり結晶中を移動することが出来る。p 型半導体のアクセプタによる正孔は、価電子帯のすぐ上のアクセプタ準位にある。極めて低いエネルギーで価電子帯の電子がアクセプタ準位へ移り、価電子帯にシリコン結晶中を移動できる正孔が作られる。そのため、常温ではほとんどのドナー準位の電子が自由電子となり、アクセプタ準位の正孔へ電子が励起し価電子帯へ正孔が作られる。

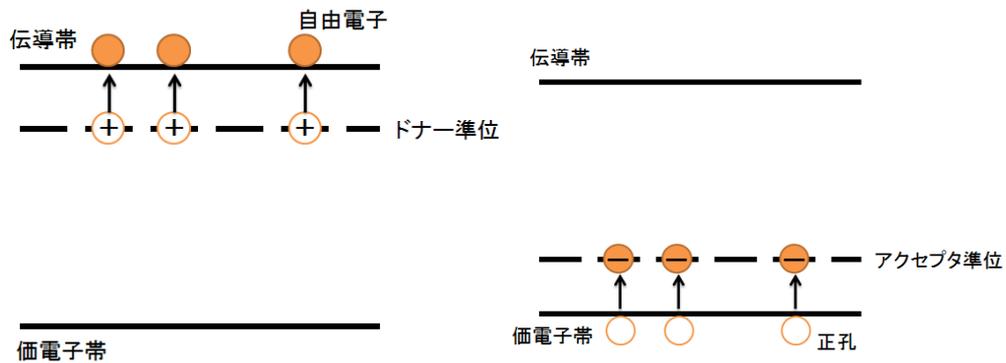


図 1.13: ドナー準位とアクセプタ準位の概念図

### pn 接合

p 型と n 型の半導体が接合すると、接合部付近の自由電子と正孔が互いに結びつき打ち消し合っ  
て拡散電流が流れる (図 1.14(1))。自由電子と正孔が打ち消しあった結果、接合部付近にキャリアの  
自由電子も正孔もない空乏層と呼ばれる領域が出来る。空乏層内において、n 型半導体のドナーは  
自由電子が不足するため正に帯電し、p 型半導体のアクセプタは正孔が不足するため負に帯電する。  
それらによりキャリアの移動を阻止する向きに内蔵電場と呼ばれる電場が発生する (図 1.14(2))。  
キャリアの移動がなくなると空乏層の両端に内蔵電位と呼ばれる電位差  $V_{bi}$  (約 0.6 ~ 0.7 V) が生  
じる (図 1.14(3))。

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1.8)$$

ここで、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度、 $q$  は電荷量、 $N_A$  はアクセプタ濃度、 $N_D$  はドナー濃度、 $n_i$  は純シリコンでのキャリア密度 (常温) で約  $1.45 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

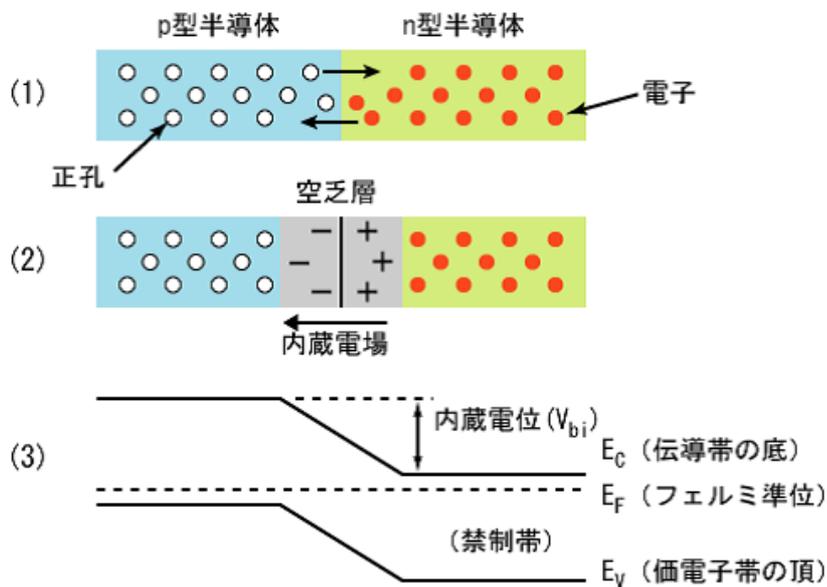


図 1.14: pn 接合による拡散電流と空乏層、内蔵電場、内蔵電位

p 型側に、n 型側に対して正の電圧を印加すると空乏層での電位差が減少し、キャリアの移動を妨げていた空乏層が減少する。さらに電圧を印加すると、p 型側に電子が、n 型側に正孔が拡散して電流が流れる。一方、p 型側に n 型側に対して負の電圧を印加すると、空乏層での電位差は拡大して電流は流れない。この、電流が流れ易い電圧印加方向を順バイアス、電流の流れにくい方向を逆バイアスと呼ぶ。その時の電圧を、それぞれバイアス電圧、逆バイアス電圧と呼ぶ (図 1.15)。

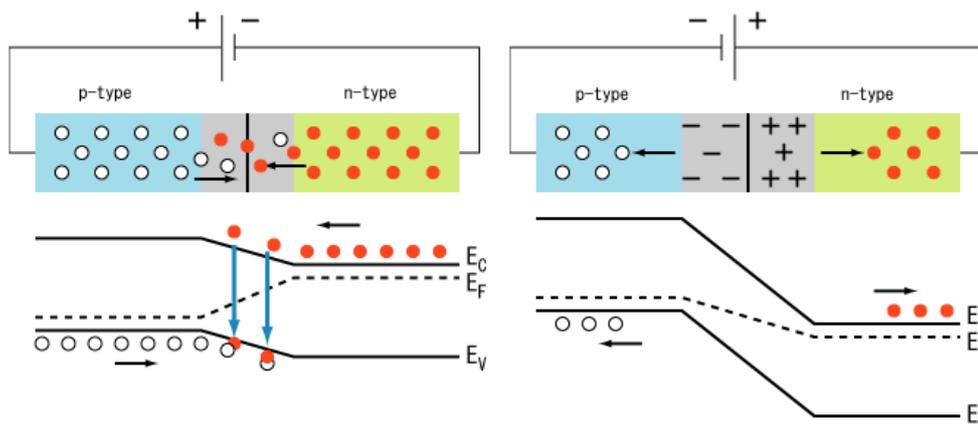


図 1.15: バイアス電圧と逆バイアス電圧

## 1.4.2 構造

### シリコンセンサー

シリコンストリップセンサーは、シリコン基板に細長いストリップ状の電極を取り付け、粒子が通過する際に発生した電荷を収集して、粒子の通過位置を測定する検出器である。シリコンセンサーの両面に電極を設けることや、片面電極のものを2枚重ねることで2次元的な位置の測定が可能になる。また、複数枚のセンサーを使うと通過した粒子の軌跡を求めることが出来る。荷電粒子が通過する際に磁場を印加するとらせん運動をしながら進むため、3点以上の測定点から曲率半径を求めることで荷電粒子の運動量が分かる。

シリコンセンサーのシリコン基板表面には、外側から、エッジリング、Guard Ring、バイアスリング、インプラント電極の順で不純物がインプラントされており、その上にAlが蒸着されている(図1.17)。ストリップセンサーでは、インプラント電極が数十 $\mu\text{m}$ 毎にインプラントされ、ストリップ全体を囲むようにバイアスリングとGuard Ringがあり、センサー外周のエッジ領域にエッジリングがインプラントされている。インプラント電極とバイアスリングは、バイアス抵抗(SCTでは、 $1.5\text{ M}\Omega$ )を介して接続されている。裏面電極は、全面に不純物が拡散されており、表面はアルミが蒸着されている。

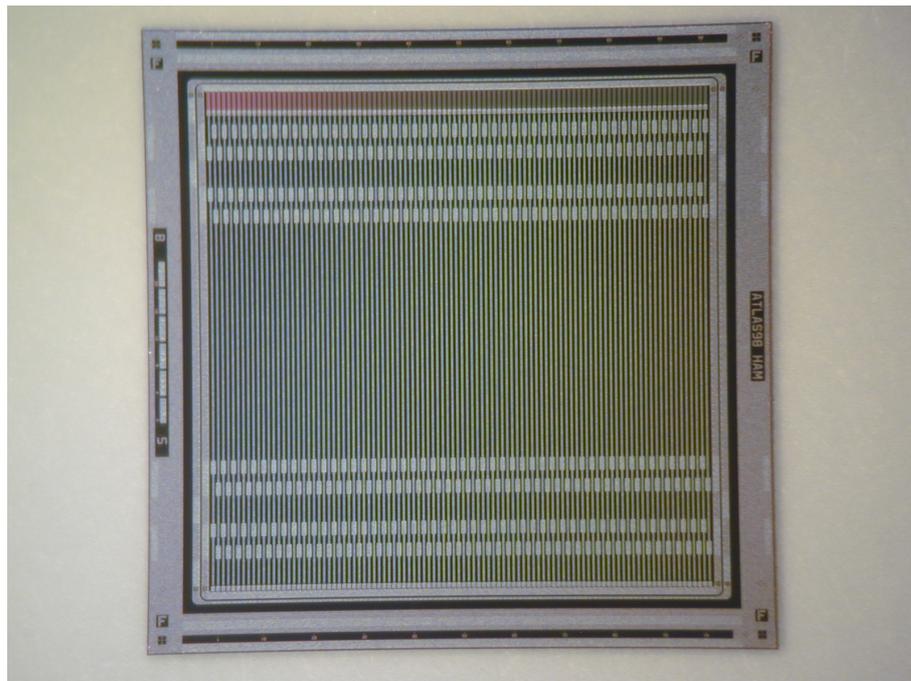


図 1.16: シリコンストリップセンサー (1 cm×1 cm のミニチュアセンサー、ストリップ間隔 74.5  $\mu\text{m}$ )

バイアスリングと裏面電極に逆バイアス電圧を印加すると、p-n 接合部から空乏層が広がっていく。空乏層がシリコン基板の全領域に渡った時の逆バイアス電圧を全空乏化電圧と呼ぶ。空乏層に高エネルギーの粒子が入射すると、センサーの厚さが 300  $\mu\text{m}$  の場合、典型的に電子正孔対が約 25000 対できる。空乏層内は、電極間に印加した電圧により電場が発生しており、生成された電子、正孔はそれぞれ逆方向へ移動する。すると、電荷の移動によりインプラント電極に信号が誘起される。その信号を読み出すことで、粒子が通過した位置を特定することが出来る。

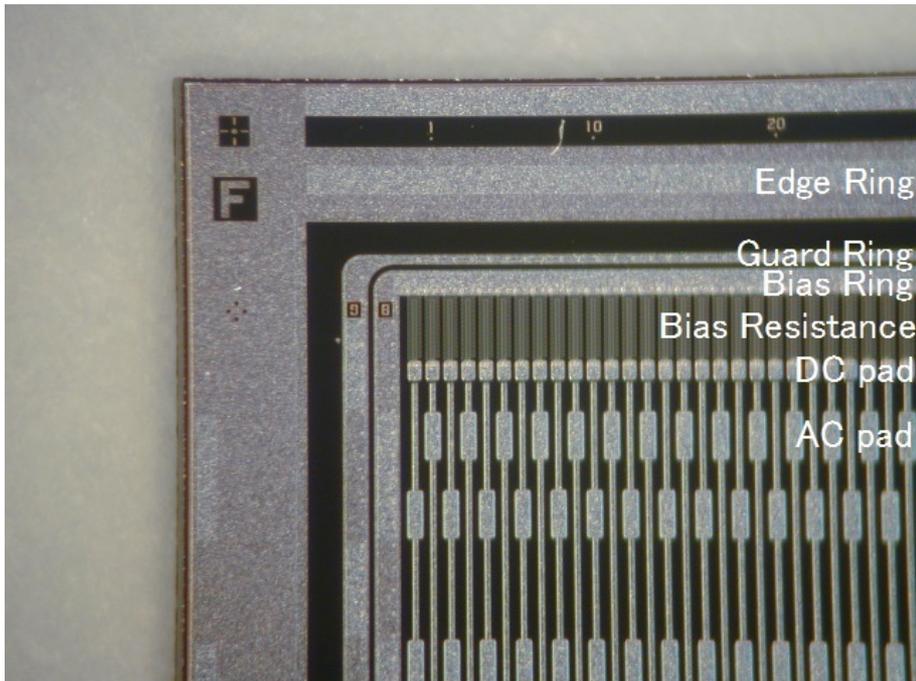


図 1.17: シリコンストリップセンサーの表面構造

### 電極間分離構造

基板に p 型シリコンを用いたセンサーは、製造過程においてシリコン基材の表面と表面保護の絶縁膜 (酸化シリコン) の界面に正の電荷が蓄積し、シリコン基材の表面に電子が引き寄せられて電子層を形成する。すると、電極間が電子層により数  $M\Omega/\text{sq}$  程度の表面抵抗率で接続され、電極間分離が悪化する。そのため、電子層を排除する構造が必要となる。電極間分離構造として、電極間に高濃度 p をインプラントして電子層を分断する p-stop、シリコン基板表面に高濃度 p を拡散して電子層を除去する p-spray がある。

### 1.4.3 動作

#### 暗電流

空乏層には電荷が存在しないので理想的には電流は流れない。しかし、実際は熱的揺らぎにより電子正孔対が生成され、逆バイアス電圧をかけても微小な電流が流れる。これを暗電流という。暗電流は、シリコンセンサーの発熱による熱暴走やノイズの原因となり、小さいことが望まれる。暗電流は温度に依存し、以下の式よりある決まった参照温度での暗電流を測定することで、任意の温度での暗電流を求めることが出来る。

$$I(T) = I(T_{ref}) \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^2 \exp \left( -\frac{E_g}{2k_B} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) \quad (1.9)$$

ここで、 $E_g$  はシリコンのエネルギーギャップ相当の係数、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は温度、 $T_{ref}$  は参照温度、 $I$  は暗電流。よって、暗電流と温度は以下の関係がある。

$$I(T) \propto \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (1.10)$$

これにより、いくつかの決まった温度での全空乏化時における暗電流を測定することで  $E_g$  を求めることができる。

暗電流は、発生原因から以下の3種類に分けることが出来る。

**バルク暗電流** 空乏層のシリコン結晶中に熱的揺らぎによって電子正孔対が生成されると、それらがバルク中の電場によって移動し電流が流れる。これをバルク暗電流という。このことから、バルク暗電流の大きさは空乏層の体積に比例する。禁制帯中のエネルギー準位でのキャリアの捕獲・放出によるバルク暗電流は、4.10.1 で述べる SRH モデルにより記述される。

**表面暗電流** 結晶表面には切断時にできたひびや凹凸、表面構成物などによる有限抵抗があるため電流が流れる。この電流を表面暗電流という。これは、加工の技術力やパッシベーションの物質にも関係する。

**マイクロ放電** 構造体などにより、バルク中で電場が局所的に強くなると電子雪崩が発生し、急激に暗電流が増大する。この現象をマイクロ放電という。インプラントのエッジや傷、不純物などで電場が増強されることにより起こる。

## 静電容量

インプラント電極側と反対面の裏面電極側はバルク部の空乏層を挟んだ平行板コンデンサーと考えることが出来る。空乏層の厚さ  $d$  は、ドナーとアクセプタによる空間電荷のポアソン方程式を解くことで以下のように求められる。

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon V}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} \quad (1.11)$$

ここで、 $\epsilon$  はシリコンの誘電率、 $V$  は逆バイアス電圧、 $q$  は素電荷、 $N_A$  はバルク内のアクセプタ密度、 $N_D$  はバルク内のドナー密度である。よって、バルク部の静電容量  $C_{bulk}$  は、 $C_{bulk} = \epsilon S/d$  より求められ、

$$C_{bulk} = S \sqrt{\frac{q\epsilon}{2V} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}} \quad (1.12)$$

となる。つまり、 $1/(\text{バルク部の静電容量})^2$  は逆バイアス電圧に比例する。また、全空乏化後は空乏層の厚さが一定となることから、 $1/(\text{バルク部の静電容量})^2$  が一定となる。このことから、 $1/(\text{バルク部の静電容量})^2$  の比例領域と一定領域の変換点から全空乏化電圧を評価することができる。

## 収集電荷量

シリコンのエネルギーギャップ  $E_g$  は、1.12 eV と比較的小さく、電子正孔対の生成には 3.6 eV (ガス検出器は約 30 eV) のエネルギーが必要である。シリコンの MIP (Minimum Ionizing Particle

最小電離粒子)における  $dE/dx$  は、 $1.66 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$  で、密度は  $2.33 \text{ g/cm}^3$  より、 $1 \text{ cm}$  で落とすエネルギーは約  $3.9 \text{ MeV}$  となる。すると、 $1 \mu\text{m}$  当たり約  $107$  電子正孔対が生成される。理想的には、 $300 \mu\text{m}$  の厚さで電子正孔対が約  $32000$  対 (約  $5.1 \text{ fC}$ ) 生成され電荷を収集できることになるが、電子・正孔捕獲や再結合などにより収集される電荷は約  $25000$  対に低下する。電子・正孔捕獲とは格子欠陥により出来たエネルギー準位に、電子や正孔が捕獲されることである。再結合とは、生成された電子正孔対が再び結合し消滅することである。シリコンの放射線損傷により格子欠陥が増加すると、電子・正孔捕獲される確率が増えるため信号量が低下する。たとえば、 $\beta$ 線を用いた収集電荷量測定により収集される電荷量を直接測ることにより、電子・正孔捕獲の評価を行うことができる。

#### 1.4.4 シリコン単結晶の製造法

##### Float Zone 法 (FZ 法)

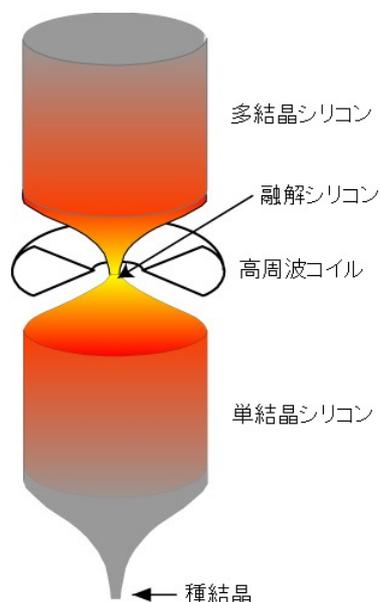


図 1.18: Float Zone 法

シリコン単結晶の製造法の一つとして Float Zone 法 (FZ 法) がある (図 1.18)。まず、原料となる多結晶シリコンを吊り下げた状態で固定し、先端に種結晶を取り付ける。シリコンの原料を回転させながら、種結晶から結晶化が始まるように、最下部を高周波コイルで加熱して狭い範囲を融かす。コイルをゆっくり上に移動させると、原子は規則的に配列しようとする性質があるので種結晶が成長して単結晶が出来る。原料を融かしそれを冷やして一部を固まらせると不純物は融けた部分に多く残る性質があるため、単結晶のなかの不純物が原材料より少なくなり、非常に高純度な結晶を作ることができる。周りは真空中に引かれ、外側から不純物が入るのを完全に防いでいる。FZ 法は、ごく低い酸素濃度の結晶が作れるが、大口径化が難しいという問題があり、結晶の半径方向の抵抗率分布にばらつきがあるため、中性子照射による抵抗率の均一化が図られる場合もある。この

FZ 法は現在、もっとも純度の高いシリコン結晶を作る方法として使われている。ここに特定の不純物を一様に含ませて、p 型、n 型の半導体を作る。

### Magnetic field applied Czochralski 法 (MCZ 法)

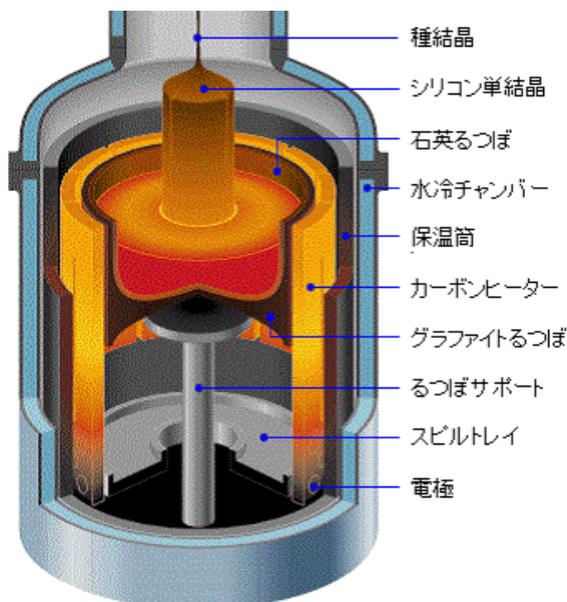


図 1.19: Czochralski 法

半導体素子などに使われるシリコン単結晶の製造法として一般的に用いられているのが Czochralski 法 (CZ 法) である (図 1.19)。まず、石英るつぼに多結晶シリコンを融解し、不純物としてホウ素やリンを添加する。液面に種結晶を接触させ回転させながら引き上げていくと、種結晶が成長して単結晶シリコンが出来る。周りからの不純物の混入を防ぐために、アルゴンガス雰囲気で行われる。この方法では、石英るつぼ壁面からの酸素が溶け出し混入してしまう。大型のるつぼを使うことにより FZ 法より比較的大口径の単結晶を得ることが出来る。大口径化すると溶液の対流が発生し、液面の乱れにより単結晶内に格子欠陥が発生してしまう。この対策として、るつぼ全体に磁場を加えて対流を制御したのが Magnetic field applied Czochralski 法 (MCZ 法) である。

## 1.5 シリコンセンサーの放射線損傷

### 1.5.1 表面損傷

センサーの表面損傷は、主に 300 keV 以下のエネルギーの光子と荷電粒子によって引き起こされる [5]。これらの光子と通過粒子は、 $\text{SiO}_2$  やシリコン原子をイオン化・励起し、エネルギーを落とす。イオン化損傷はシリコンバルク内では起こらず、主に  $\text{SiO}_2$  内部と  $\text{Si-SiO}_2$  界面で起こる。 $\text{SiO}_2$  内の損傷による電荷はバルクのキャリアに影響を与えにくく、図 1.20 の Fixed oxide charge と Interface trapped charge が影響する。Fixed oxide charge は正孔捕獲によるもので正の電荷を持ち、 $\text{Si-SiO}_2$  から数 nm の非常に不規則な範囲に存在する。Interface trapped charge は、Si と

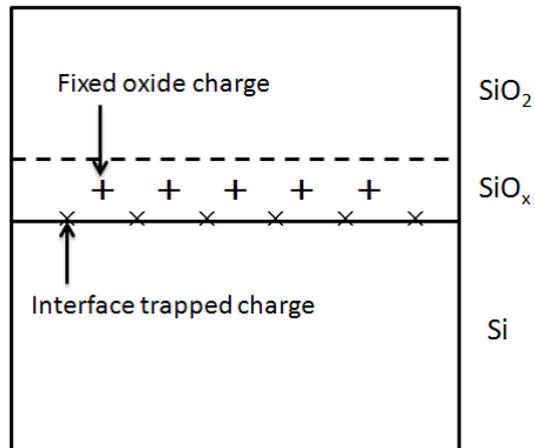


図 1.20: 表面電荷 Si-SiO<sub>2</sub> 界面に Interface trapped charge、そこから SiO<sub>2</sub> のごく浅い範囲に Fixed oxide charge が存在する。SiO<sub>2</sub> 内の電荷はキャリアに影響を与えにくいため省略した。

O の結合のふらつきによるもので、禁制帯に新たなエネルギー準位を形成する。そのため、正負どちらの状態も取り得る。これらは空間電荷として働き、移動しない。表面損傷による表面電荷はセンサーの性能に影響を与え、暗電流の増加や表面電場の上昇によるブレイクダウン電圧の変化、表面上に空乏化しない Dead layer の形成などが起こる。

### 1.5.2 バルク損傷

シリコンセンサーに放射線が入射すると、電子を励起、反跳したり、シリコン原子と衝突を繰り返してエネルギーを失っていく。その際、シリコン原子が弾き出されて生じた空孔と、弾き出された原子が他の結晶格子間に移動して出来た格子間原子の対をフレンケル欠陥、弾き出された原子が結晶表面に移動し空孔のみが残った欠陥をショットキー欠陥と呼ぶ [6]。これらの格子欠陥やそれらが立体的に集合して生じたボイドと呼ばれる空洞が放射線による主要なバルク損傷となる。これらの損傷は、電子と正孔の再結合中心になったりキャリアを捕獲し、基板の性質を変化させる。ボイドや格子欠陥は、周辺に比べ相対的に正電荷を帯びており、シリコンバルク中で p 型不純物として振る舞う。

### 1.5.3 Non Ionizing Energy Loss (NIEL)

照射線が物質内に入射して失うエネルギーのうち、原子の弾き出しにのみ使われるエネルギー (非イオン化エネルギー) を表したものを NIEL (Non Ionizing Energy Loss) と呼ぶ。図 1.22 は、NIEL をもとに各粒子における変位損傷断面積のエネルギー依存性を示した図である。縦軸は 95 MeV mb で規格化されているため、1 MeV の中性子相当に換算できる。このグラフより、異なる粒子による放射線損傷を比較することが出来る。たとえば、70 MeV の陽子による非イオン化損傷を 1 MeV の中性子に換算するときは約 1.4 倍すれば良いことになる。

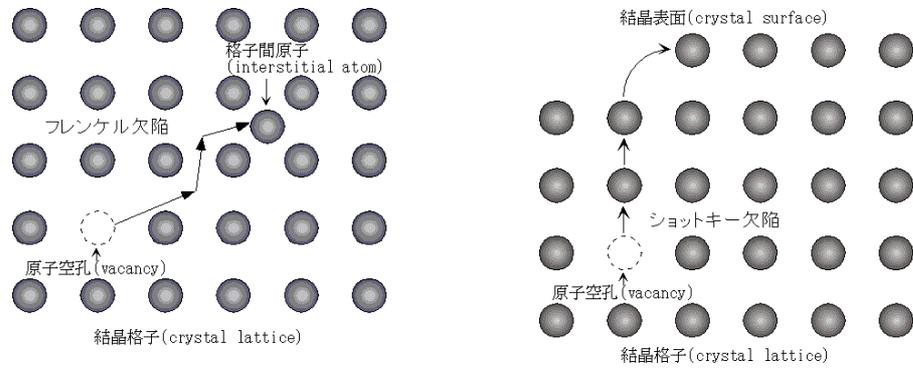


図 1.21: フレンケル欠陥とショットキー欠陥 [6]

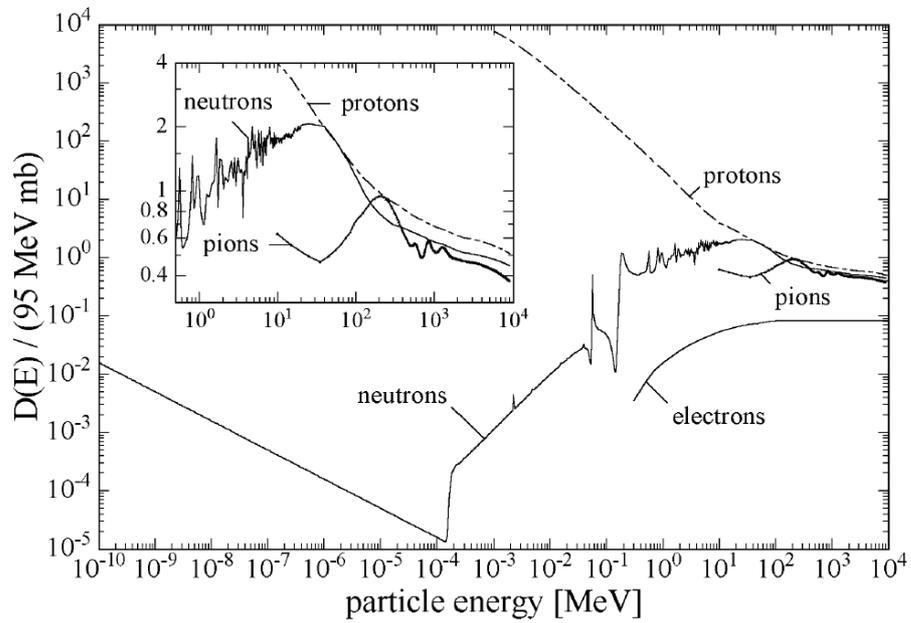


図 1.22: proton、electron、neutron、pion の変位損傷断面積のエネルギー依存性 [7] 1 MeV の中性子で換算するために、95 MeV mb で規格化されている。

### 1.5.4 アニーリング

放射線損傷による格子欠陥や格子間原子は、原子の熱振動により時間とともに移動する。その際、格子欠陥は消滅する場合もあるが、格子欠陥同士が結合し更に大きな欠陥へ成長する場合もある。この熱振動により、ある時点まで有効不純物密度が減少する現象をアニーリングと呼ぶ。その後、有効不純物密度が増加する逆アニーリングが起こる。アニーリングから、逆アニーリングに移る時間は温度に依存し、温度が高い程時間が短い。アニーリングの温度依存性は次のアレニウスの式から求めることができる。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_\alpha}{k_B T}\right) \quad (1.13)$$

ここで、 $k$  は反応速度の係数、 $A$  は頻度因子と呼ばれる定数で衝突回数に起因する、 $E_\alpha$  は活性化エネルギーで反応を起こすために必要なエネルギー、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度である。60 °Cにおける全空乏化電圧と有効不純物密度アニーリング時間依存性は p 型が図 1.23、n 型が図 1.24 となっている。n 型シリコンについては、アニーリング速度の温度依存性が求められており、アニーリングが図 1.25、逆アニーリングが図 1.26 となっている。

ATLAS 検出器では、運転中はアニーリングが進まないようにクーリングにより冷やされているが、メンテナンスにより常温に置かれアニーリングが起こる。そのため、アニーリングによる特性変化を知ることは重要となる。また、異なる放射線損傷によるセンサーの特性を比較するときは、一般的に 60 °C 80 分のアニーリングを行った結果を用いている。

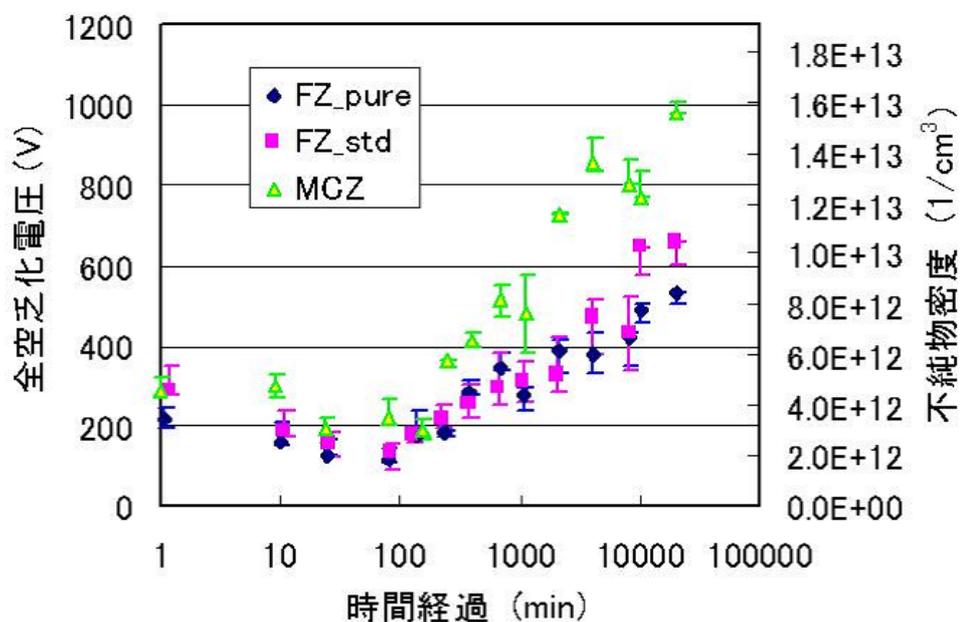


図 1.23: p 型シリコンセンサーの全空乏化電圧と有効不純物密度の 60 °C のアニーリング時間依存性 ( $2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ )

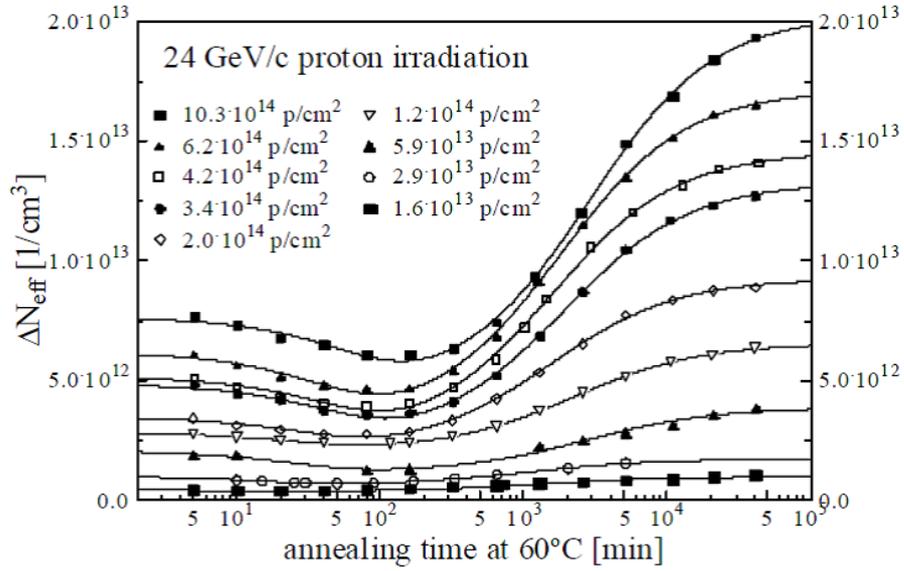


図 1.24: n 型シリコンセンサーの有効不純物密度の 60 °C のアニーリング時間依存性 [8]

temperature ( $T_a$ )	-10°C	-7°C	0°C	10°C	20°C	40°C	60°C	80°C
time constant ( $\tau_a$ )	306d	180d	53d	10d	55h	4h	19min	2min
acceleration factor	1/134	1/78	1/23	1/5	1	16	174	1490

図 1.25: n 型シリコンセンサーのアニーリング速度の温度依存性 [7]

temperature ( $T_a$ )	-10°C	0°C	10°C	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C
time constant ( $\tau_a$ )	516y	61y	8y	475d	17d	1260min	92min	9min
acceleration factor	1/396	1/47	1/6	1	29	544	7430	76650

図 1.26: n 型シリコンセンサーの逆アニーリング速度の温度依存性 [7]

### 1.5.5 基礎特性の変化

バルク損傷を受けたシリコンセンサーは、格子欠陥やボイドの増加により p 型の有効不純物密度が増加する。全空乏化電圧は有効不純物密度に比例し、その関係は以下の式で表される。

$$V_{fd} = \frac{ed^2}{2\epsilon_{Si}} |N_{eff}| - V_{bi} \quad (1.14)$$

ここで、 $V_{fd}$  は全空乏化電圧、 $e$  は素電荷、 $d$  はバルクの厚さ、 $\epsilon_{Si}$  はシリコンの誘電率、 $|N_{eff}|$  は有効不純物密度、 $V_{bi}$  は内蔵電位で 0.7 V 程度である。放射線による全空乏化電圧・不純物密度の変化は製造プロセス、放射線の種類、センサーの構造に依存する。n 型センサーの典型的な測定データを図 1.27 に示す。

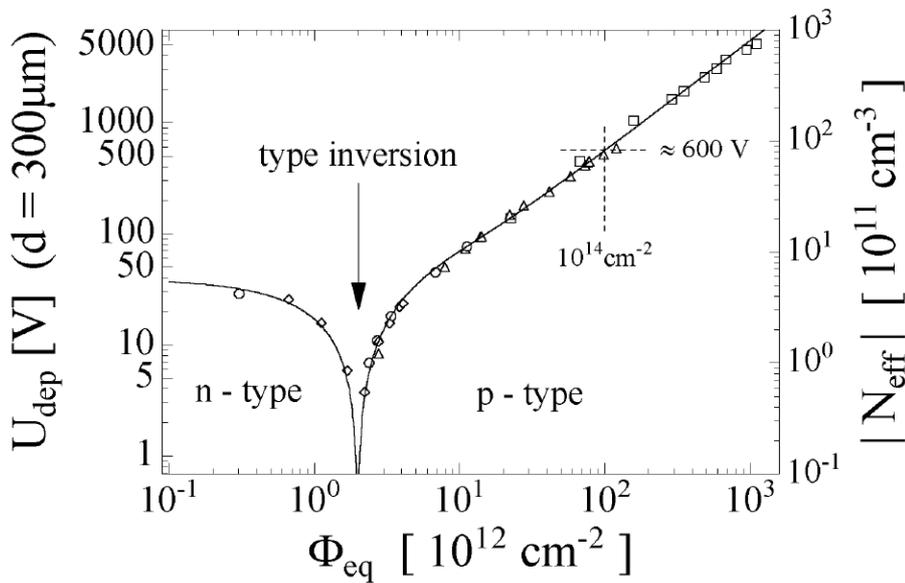


図 1.27: n 型シリコンセンサーの全空乏化電圧と有効不純物密度の放射線量依存性 (300  $\mu\text{m}$  厚)[7]

放射線損傷によって格子欠陥が増加するとシリコン基板に新たなエネルギー準位が出来る。また同時に、電子や正孔の易動度も減少する。その結果、入射粒子によって生成される電子正孔対はそのエネルギー準位に捕獲や再結合される確率が大きくなり、信号として収集される電荷量は減少する。

放射線損傷により、禁制帯に新たなエネルギー準位が出来ると、そのエネルギー準位を介して価電子帯から伝導帯への遷移確率が増大し、暗電流が増加する。暗電流と放射線量の関係は、以下の式で与えられる。

$$\Delta I = \alpha \times V \times \Phi \quad (1.15)$$

ここで、 $\Delta I$  は非照射からの暗電流の増加量、 $V$  はシリコンセンサーの有効体積、 $\Phi$  は放射線量である。 $\alpha$  は損傷係数と呼ばれ製造プロセスに依存する。損傷係数  $\alpha$  を評価する際は、全空乏化電圧での暗電流を 20  $^{\circ}\text{C}$  に換算して評価する。照射した粒子の種類やエネルギーは NIEL を用いて 1 MeV 相当の中性子数に換算した値を用いる。また、照射後のアニーリングを、逆アニーリングが起こる直前まで行ったという補正をいれる。

## 第2章 n-in-p シリコンセンサーの設計

### 2.1 n-in-p シリコンセンサーの特徴

現行の SCT は n 型基板に p+ストリップを埋め込んだ p-in-n 構造をしている。センサーが放射線の損傷を受けると、p 型不純物として振る舞う格子欠陥が生成される。放射線を受け n 型バルク部に p 型不純物が増加すると、しだいにバルク部の有効不純物密度が減少し、やがてバルク部が p 型になる型反転が起こる。型反転が起こりバルクが p 型となると、裏面電極とバルク部界面が p-n 接合面となり、バックプレーン電極側から空乏層が広がっていく。すると、空乏層がストリップまで達しないと信号の読み出しが出来なくなり、全空乏化しなければセンサーとして機能しなくなる。システムの耐圧が 500 V に設計されているため、全空乏化電圧が 500 V を超えたとき読み出しが出来なくなりセンサーとしての寿命を迎える。一方、p 型基板センサーには以下の様な特徴がある。バルク部が p 型であるため、放射線損傷により p 型不純物が増加しても型反転しない。n ストリップ側 (p-n 接合側) から読み出すことにより、常に読み出し側から空乏層が成長するため、部分空乏化でも信号が読み出せる。荷電キャリアが電子であるので、高速で電荷捕獲が起きにくい。これらの帰結として放射線耐性が高いセンサーが期待できる。さらに片面プロセスであるため、相対的に低価格であり、裏面は傷に強い。しかし、n 型シリコンセンサーについて知られていることは多いが、p 型については未だ知られていないことが多い。そこで、p 型シリコンセンサーについて放射線損傷における特性変化を調査し、高放射線耐性を持つセンサーの開発を行った。特に、p 型基板センサーは、製造プロセスにより Si-SiO<sub>2</sub> 界面に正電荷が蓄積され、Si 表面に電子層を形成し、電極間の分離が悪化する。そのため、電極分離構造として、ストリップ間に高濃度 p をインプラントした p-stop や、センサー表面に高濃度 p を照射した p-spray が必要となる。また、放射線の損傷により全空乏化電圧が上昇すると高電圧運転が必要となるため、マイクロ放電の発生を抑制しなければならない。

### 2.2 n-in-p シリコンストリップセンサーの設計

n-in-p シリコンストリップセンサーは LHC のための試作品が作られ、HL-LHC に向けて多くの研究がなされてきた。現在までに、浜松ホトニクス社 [9] 製の 4 インチ (100 mm) 又は 6 インチ (150 mm) のウエハーで、FZ 法又は MCZ 法の、 $\langle 100 \rangle$  又は  $\langle 111 \rangle$  ウエハーについて評価を行ってきた。

6 インチウエハーのマスキレイアウトを図 2.1 に示す。このレイアウトには、ベンダーによって決められた有効面積から得られる最大のサイズの  $9.75 \times 9.75 \text{ cm}^2$  の大面積メインセンサーを置いている。周辺には、様々なストリップや電極間分離構造をした  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  のミニチュアセンサーや  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  のモニターダイオードを置いている。メインセンサーは、高粒子密度環境用に 2.39 cm のショートストリップで設計した。4 つのセグメントに分かれており、上部の 2 つのセグメントは、"axial"ストリップと読んでいるセンサーエッジと平行なストリップである。下部の 2 つの

セグメントは、センサーエッジから 40 mrad の”stereo” angle を持たせた。メインセンサーの電極間分離構造は、ミニチュアセンサーの zone 3 と同様である。

1×1 cm<sup>2</sup> のミニチュアセンサーは、zone 1～6 (Z1～Z6) の6種類の異なる電極間分離構造を持たせた。Z1は p-stop 構造を持たず、Z2はインプラントストリップを個々に囲むように individual p-stop、Z3～Z6はインプラントストリップ間に common p-stop を持たせた。p-stop の幅は 6 μm とした。Z1 サンプルは p-stop が無いため、p-spray が施されたら p-spray-only となる。センサーは、インプラントストリップと Al メタルで絶縁層を挟んだ AC 結合構造を持つ。Z5 以外の zone のメタルは、インプラントストリップとメタルの電位が等しくなった際に、インプラントストリップのエッジで電場強度を弱めるためのフィールドプレートとして機能するために、インプラントストリップよりも広くしている。比較のために、Z5 のメタル幅はインプラントストリップより狭くした。

センサーの製造は、いくつかのバッチに分かれている。始めの 3 バッチの X1～X3 は少量バッチで、4 つ目の S1 バッチが大量バッチである。p-stop (P) や p-spray (R)、p-stop + p-spray の p+ の表面濃度を 10<sup>11</sup>～10<sup>13</sup> ions/cm<sup>2</sup> にして試験した。p-stop、p-spray の濃度、ウエハー番号を表 2.1 に示す。それぞれのウエハー番号は、バッチ番号と電極間分離構造から名付けている。たとえば、X1R2P8 は初めのバッチで p-spray 濃度が 2×10<sup>12</sup>、p-stop 濃度が 8×10<sup>12</sup> ions/cm<sup>2</sup> であることを示す。p-spray のみのバッチでは、p-stop プロセスはスキップされている。つまり、そのバッチのウエハーのすべてのミニチュアセンサーやメインセンサーには p-stop は施さなかった。

表 2.1: ストリップメインセンサーとミニチュアセンサーの種類

Batch name	P-spray(R)	P-stop (P)	No.of wafers		
			Main	Miniature	Wafer range
X1R2P8	2 × 10 <sup>12</sup>	8 × 10 <sup>12</sup>	9	14	1-22
X1P10	-	10 × 10 <sup>12</sup>	-	9	23-36
X2R2P8	2 × 10 <sup>12</sup>	8 × 10 <sup>12</sup>	-	1	1
X2P2	-	2 × 10 <sup>12</sup>	-	1	25
X2P4	-	4 × 10 <sup>12</sup>	-	1	31
X2R2	2 × 10 <sup>12</sup>	-	-	1	35
X3R2P2	2 × 10 <sup>12</sup>	2 × 10 <sup>12</sup>	-	3	1-11
X3R2P8	2 × 10 <sup>12</sup>	8 × 10 <sup>12</sup>	1	2	46-47
X3P1	-	1 × 10 <sup>12</sup>	1	1	12-13
X3P2	-	2 × 10 <sup>12</sup>	6	4	14-31
X3P4	-	4 × 10 <sup>12</sup>	2	2	32-39
X3R1	2 × 10 <sup>12</sup>	-	2	1	40-41
X3R2	2 × 10 <sup>12</sup>	-	1	1	42-43
X3R4	4 × 10 <sup>12</sup>	-	1	2	44-45
S1P4	-	4 × 10 <sup>12</sup>	28	15	1-41
S1P10	-	10 × 10 <sup>12</sup>	1	2	42-45
S1P20	-	20 × 10 <sup>12</sup>	1	2	46-49

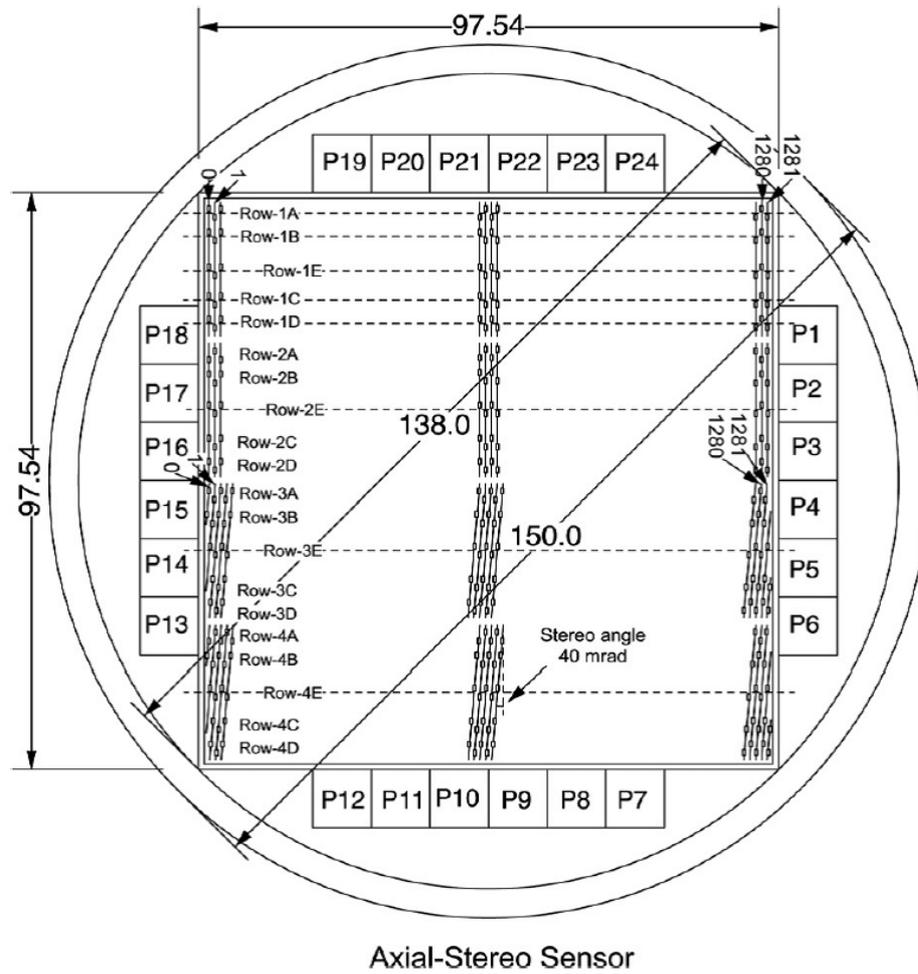


図 2.1: n-in-p シリコンストリップセンサーの設計及び特徴 中央に 97.54×97.54 mm<sup>2</sup> のメインセンサーがあり、周辺に 10×10 mm<sup>2</sup> のミニチュアセンサーがある。

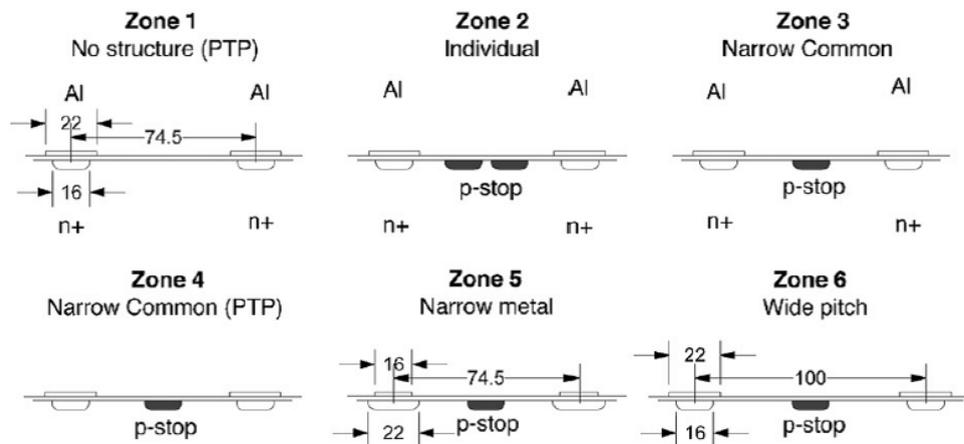


図 2.2: 電極間分離構造の種類

表 2.2: ストリップメインセンサーとミニチュアセンサーの特徴

Silicon wafer diameter	6 inch (150 mm)
Type	p-type FZ (high grade)
Orientation	< 100 >
Resistivity	~6.7 kΩcm
Thickness	320 μm
Interstrip capacitance (one-neighbor-both)	~0.80 pF/cm
Body capacitance per strip	~0.27 pF/cm
Bias resistance (Polysilicon)	~1.5 MΩ
Signal readout	AC coupling
AC coupling break down voltage	>100 V
Main sensor	
Sensor dimension (dicing center-center)	9.75 cm×9.75 cm
Number of strip segments	4
Number of strips per segment	1282
Strip pitch ( $\theta$ : stereo angle)	$74.5 \times \cos \theta \mu\text{m}$
Strip length ( $\theta$ : stereo angle)	$2.39 / \cos \theta \text{ cm}$
Stereo angle, $\theta$ of "axial"/"stereo" segment	0/40 mrad
Strip width, implant/metal	16/22 μm
Distance between bias rail and n-strips implants	70 μm
Miniature sensor	
Sensor dimension (dicing center-center)	1 cm×1 cm
Number of strips, Z1-Z5 (Z6)	104 (77)
Strip pitch, Z1-Z5 (Z6)	74.5 (100) μm
Strip length	0.80 cm
Strip width, implant/metal (Z1-Z4,Z6), (Z5)	16/22, 22/16 μm
Distance between bias rail and n-strips implants (Z1)/(Z2-Z6)/(Z4)	12/70/20 μm

## 2.3 n-in-p シリコンピクセルセンサーの設計

n-in-p シリコンピクセルセンサーの設計は、2つの異なるマスクセットを使った6インチウエハーのプロセスで行った。バッチ #1 のマスクセット図 2.3 は、part 1 ~ 29 のセクションにピクセルセンサーを置き、part 12 ~ 16、26 ~ 29 に ATLAS PIXEL センサーの FE-I3 と呼ばれる読み出しフロントエンドチップ用のセンサーを置いた。バッチ #2 のマスクセット図 2.4 は、FE-I3 と新たな大型の読み出しフロントエンドチップの FE-I4 用に設計した。FE-I3、FE-I4 シングルチップが part 1 ~ 7、34 ~ 39、FE-I4 ダブルチップが part 28 ~ 33、FE-I3 クアッドチップが part 40 ~ 42、その他様々なピクセルセンサーを置いた。周辺の小さな四角には、Slim Edge や Multi Guard Ring の研究のためのダイオードを置いている。

バッチ #1 のウエハーは p 型と n 型の両方あり、n-in-p と p-in-n センサーを作った。ウエハーの厚さは  $320 \mu\text{m}$  で、いくつかの n 型は  $200 \mu\text{m}$  に薄型化した。ウエハーの抵抗率は、p 型が約  $7 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ 、n 型が約  $4 \text{ k}\Omega \text{ cm}$  である。n-in-p ピクセルセンサーの n+ピクセルの電極間分離のため、 $4 \times 10^{12} \text{ ions/cm}^2$  の濃度の p-stop を用いた。FE-I3 シングルチップ用ピクセルセンサーは、パンチボンディングした後、テストビームに使った。テストビームのためのピクセル構造を図 2.5c に示す。

バッチ #2 は p 型ウエハーのみプロセスし、ウエハーの厚さは  $320 \mu\text{m}$  で、いくつかは  $150 \mu\text{m}$  に薄型化した。FE-I4 ピクセルセンサーの外周の寸法は、ピクセルの縦方向に沿ったエッジで、ピクセルエッジから 360、450、600、750、1011  $\mu\text{m}$  の距離でダイシングした。n ピクセルの電極間分離は、common か individual の  $4 \times 10^{12} \text{ ions/cm}^2$  の p-stop か、 $2 \times 10^{12} \text{ ions/cm}^2$  の p-spray で行っている。バイアス構造は、ポリシリコン構造か 4 ピクセルにつき 1 ドットの 4-to-1 PT、1 ピクセルにつき 1 ドットの 1-to-1 PT のパンチスルー構造を採用した。

このプロセスに先立ち、異なるいくつかのパンチスルー構造についての研究を行った。各ピクセルのバイアスドットからくる不感領域を減らすために、4つのピクセルの角に1つのバイアスドットを入れた 4-to-1 PT とポリシリコンバイアスについて評価を行った。ポリシリコン抵抗で電極分離構造の異なる種類について、図 2.5d に示す。4-to-1 PT 構造では、common p-stop と p-spray はともに、2つの隣接したピクセルの間隔は  $20 \mu\text{m}$  とした。ポリシリコン抵抗では、 $24$  と  $20 \mu\text{m}$  とした。一方、individual p-stop では間隔は広くなっており、4-to-1 PT とバイアス抵抗でそれぞれ  $30$  と  $34 \mu\text{m}$  とした。典型的な  $25 \text{ ns}$  のシェーピングタイムにおいて、隣接ピクセルに有効な信号分布が得られないようにするために、ピクセルの内部抵抗は  $1 \text{ M}\Omega$  以上必要となる。このバッチ/ウエハーのポリシリコンバイアス抵抗は  $2.7 \text{ M}\Omega$  であり、十分満たしている。ウエハーとピクセルセンサーの主な特徴を表 2.3 に示す。

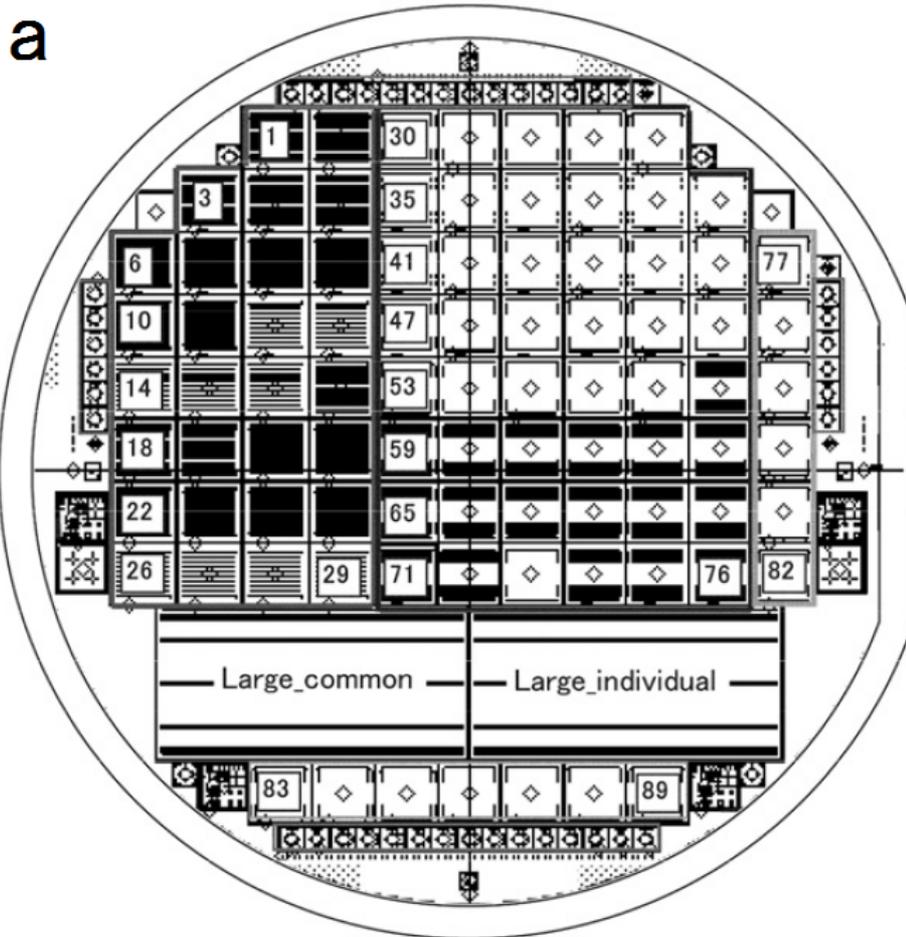


図 2.3: n-in-p シリコンピクセルセンサーの設計 バッチ #1 FE-I3 チップと  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  のミニチュアセンサー、 $4 \times 4 \text{ mm}^2$  のモニターダイオードがある。

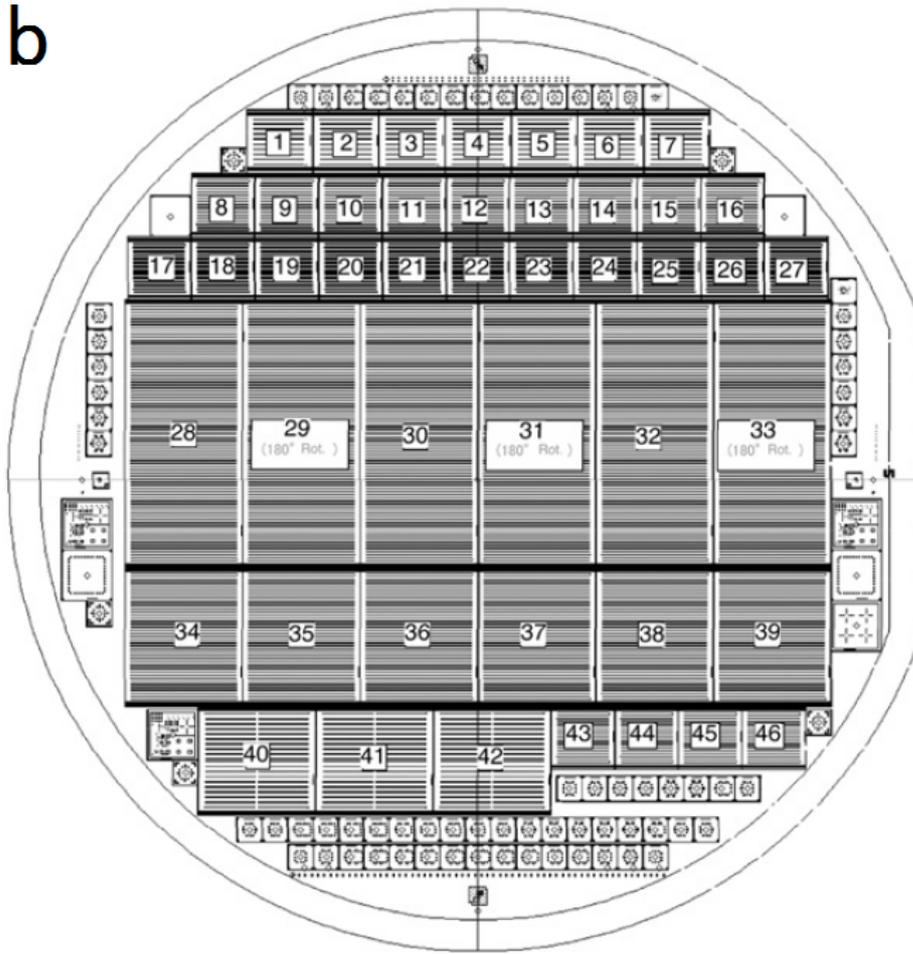


図 2.4: n-in-p シリコンピクセルセンサーの設計 バッチ #2 中央に FE-I3 または FE-I4 チップがあり、周辺に  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  のミニチュアセンサー、 $4 \times 4 \text{ mm}^2$  のモニターダイオードがある。

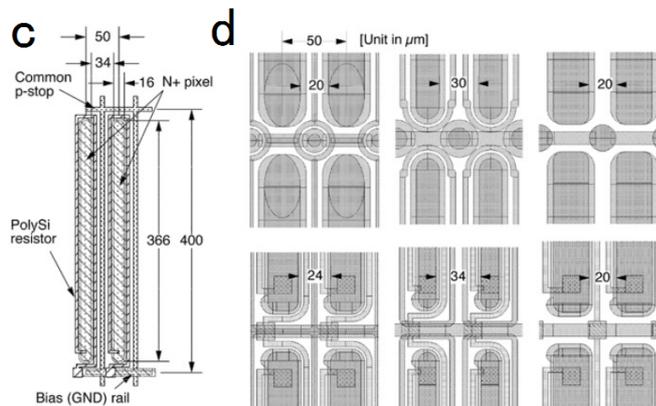


図 2.5: ピクセルの拡大図 c: ピクセルの周辺を囲むようにポリシリコンが走っている。 d: 上部がパンチスルーバイアス、下部がポリシリコンバイアス。

表 2.3: ピクセルメインセンサーとミニチュアセンサーの特徴

Silicon wafer diameter	6 inch (150 mm)
Type	FZ (high grade)
Orientation	< 100 >
Resistivity	$\sim 7 \text{ k}\Omega\text{cm(p)}$ , $\sim 4 \text{ k}\Omega\text{cm(n)}$
Thickness	320 $\mu\text{m}$ (nominal)
Thinned	150 $\mu\text{m}$ (p), 200 $\mu\text{m}$ (n)
FE-I3 compatible pixel sensor: single-chip	
Sensor dimensions	10.5 mm $\times$ 10.0 mm
Pixel dimensions	50 $\mu\text{m}$ $\times$ 400 $\mu\text{m}$
Number of pixels	164 $\times$ 18 = 2952
FE-I4 compatible pixel sensor: single-chip	
Sensor dimensions	18.7 mm $\times$ 20.9 mm
Pixel dimensions	50 $\mu\text{m}$ $\times$ 250 $\mu\text{m}$
Number of pixels	336 $\times$ 80 = 26,880
FE-I3 compatible pixel sensor: double-chip	
Sensor dimensions	18.7 mm $\times$ 20.9 mm
Pixel dimensions	50 $\mu\text{m}$ $\times$ 250 $\mu\text{m}$
Number of pixels	336 $\times$ 160 = 53,760
n+ pixel isolation	
p-stop (common, individual)	$4 \times 10^{12} \text{ ions/cm}^2$
p-spray	$2 \times 10^{12} \text{ ions/cm}^2$
Bias structures	
Punch-trough	4-to-1 or 1-to-4
Polysilicon	$\sim 1 \text{ M}\Omega$ (batch #1), $\sim 2.7 \text{ M}\Omega$ (batch #2)

## 2.4 ミニチュアセンサーとモニターダイオード

本研究では、主にピクセルセンサーのウエハーに載せられたミニチュアストリップセンサーおよびモニターダイオードについて基礎特性評価及び放射線損傷評価を行った。ウエハーは、FZ1 と FZ3 の 2 種類あり、FZ3 は裏面 p+インプラントが厚くなっており、FZ1 よりも空乏化できる厚さが薄くなっている。センサーの厚さは、150、200、320  $\mu\text{m}$  の 3 種類がある。センサー表面のエッジ領域に不純物をインプラントすることで、エッジ部の電場を抑制しマイクロ放電を起きにくくしている。エッジ部に、p+をインプラントした p エッジと n+をインプラントした n エッジがある。Punch Through Protection (PTP) の有効性を評価する PTP サンプルと p-stop 電位評価用サンプルは 1 cm×1 cm のストリップセンサーである。1000 V の耐電圧に必要なエッジ幅を評価する Slim Edge サンプル、Guard Ring の幅や本数と耐電圧の関係を評価する Multi Guard Ring サンプルは、4 mm x 4 mm のモニターダイオードである。測定は、サンプルを PCB ボードにシリコン系接着剤で接着し、Al ワイヤーで必要な配線をボンディングし、ピンヘッドで読みだした。



図 2.6: 測定用 PCB ボードに貼りつけたミニチュアセンサー (左) とモニターダイオード (右)

### 2.4.1 ミニチュアセンサーとモニターダイオードの構造

n-in-p センサーでは、放射線の照射によりシリコンバルク表面に可動性の電子が集まると、ストリップ間の電氣的分離が悪化する。そのため、電極間に p 型不純物を埋め込んだ p-stop や表面に p 型不純物を一様に照射した p-spray などの電極間分離構造が必要となる。その p-stop、p-spray の最適な構造を決定する。p-stop は、不純物濃度が  $4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  で、p-spray は、 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  のサンプルについて評価を行った。p-stop は、図 2.7 のように構造の違いから zone 2 (individual p-stop) と zone 3 (common p-stop) の 2 種類ある。

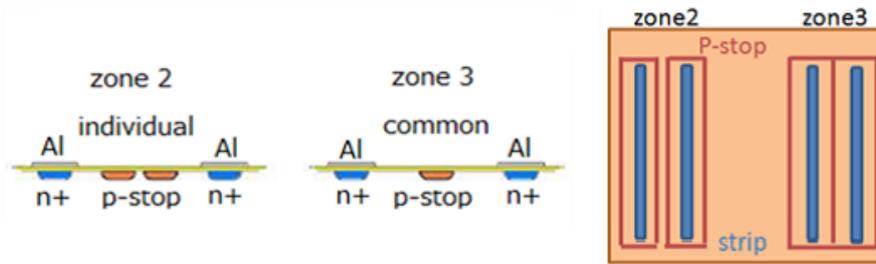


図 2.7: individual p-stop (zone 2) と common p-stop (zone3) の構造

### 電極間分離構造 (p-stop、p-spray)

individual p-stop とは、p-stop がストリップを個々に囲んだ構造であり、common p-stop とは、ストリップ間に p-stop を 1 本入れ、全ての p-stop をインプラント電極の両端で一つにまとめた構造である。なお、p-spray サンプルと表記されている場合は、zone に関わらず p-stop は施していない。ストリップ間隔は、30、40、75、100  $\mu\text{m}$  の 4 種類がある。いくつかの p-stop には電位を評価するためのパッドを付けた (図 2.8)。パッドはセンサーの 4 隅と中央の p-stop に付けている。また、zone2 の 40  $\mu\text{m}$  ピッチは 3 本ごと、75  $\mu\text{m}$  は 2 本ごと、100  $\mu\text{m}$  ピッチは全てのストリップ間の p-stop にパッドを付けた。図 2.9 ~ 2.11 に p-stop の構造を示す。サンプル名の BZ2、BZ3 は zone2、zone3 を表し、30、40、75、100 の数字はストリップ間隔、A ~ F は p-stop の幅や位置の違い、最後の数字はウエハー上の位置を示す。

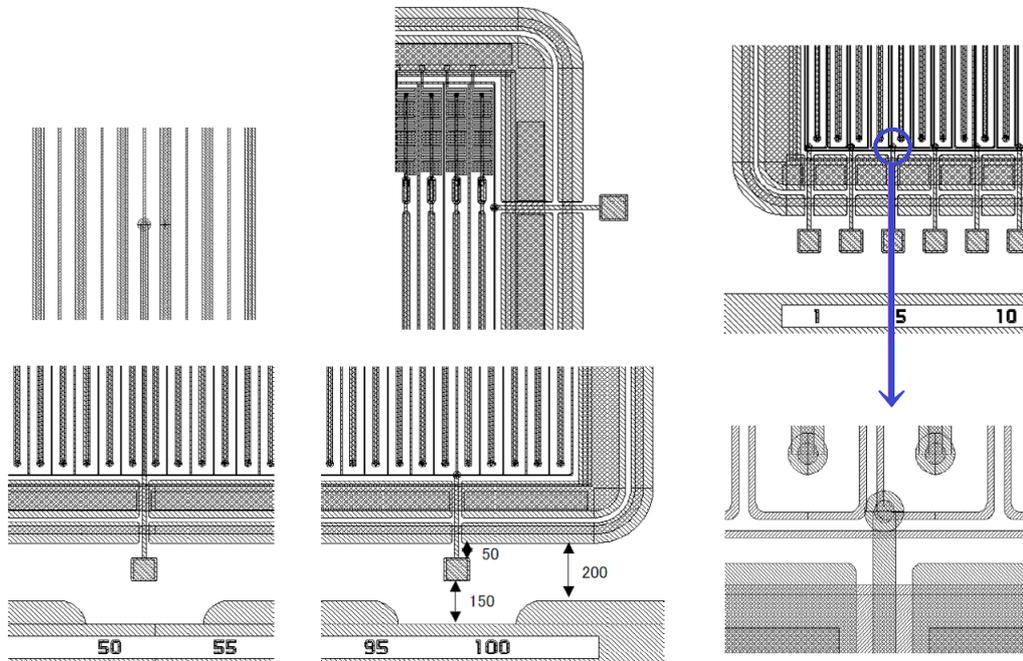


図 2.8: p-stop 電位測定用パッド 左: センサー中央の p-stop (zone3) 中: センサー四隅の p-stop (zone3) 右: 各ストリップの周りの p-stop (zone2)

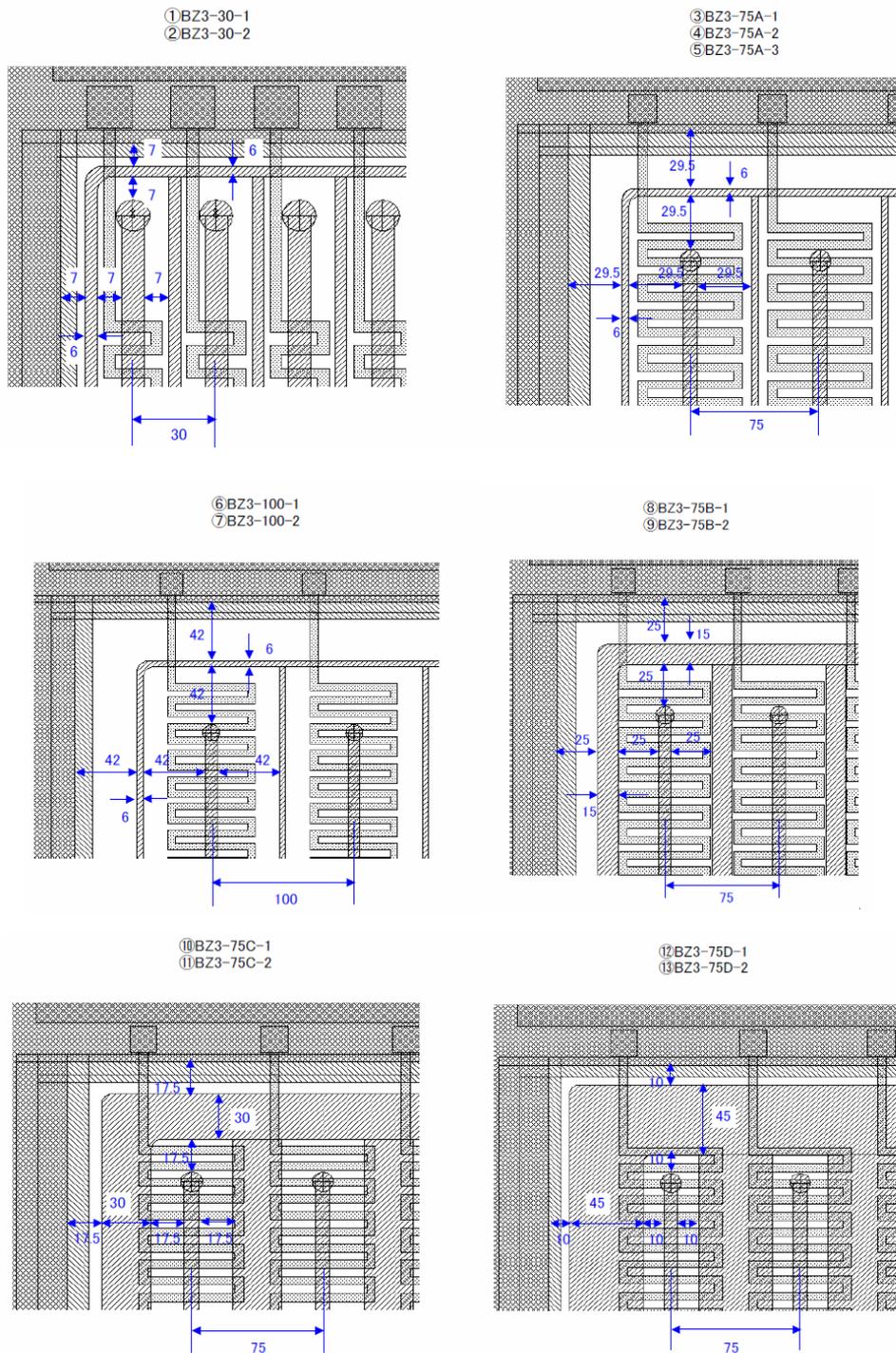


図 2.9: p-stop の構造 zone 3、30/75  $\mu\text{m}$  間隔のサンプルの構造。A ~ D は p-stop の幅が異なる。

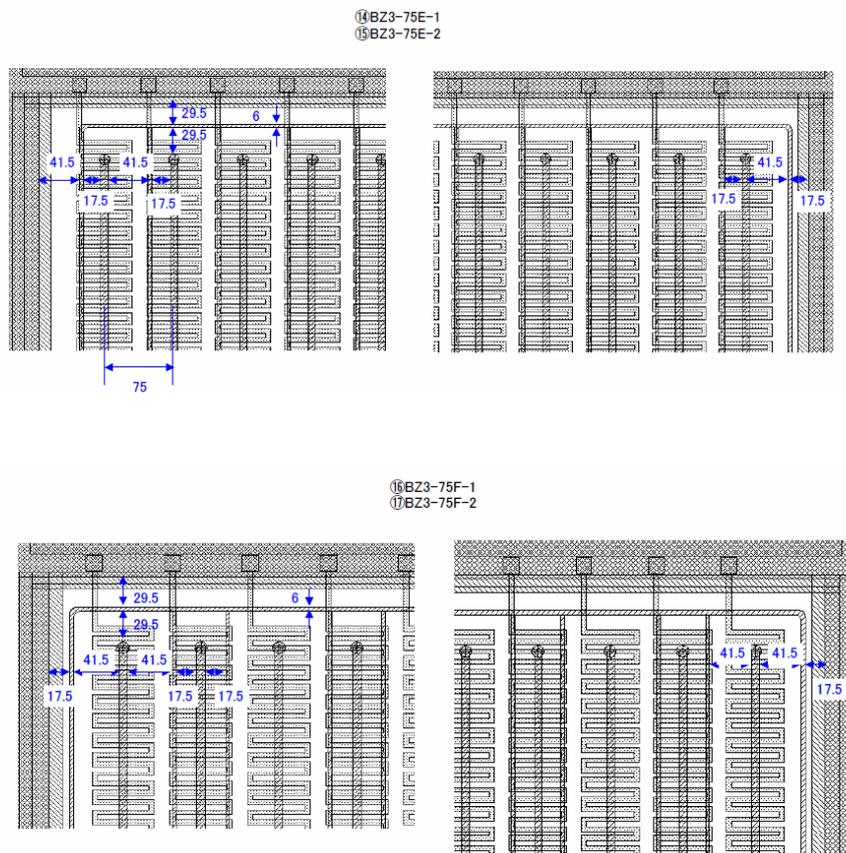


図 2.10: p-stop の構造 zone 3、75  $\mu\text{m}$  間隔のサンプルの構造。E、F は p-stop の位置が異なる。

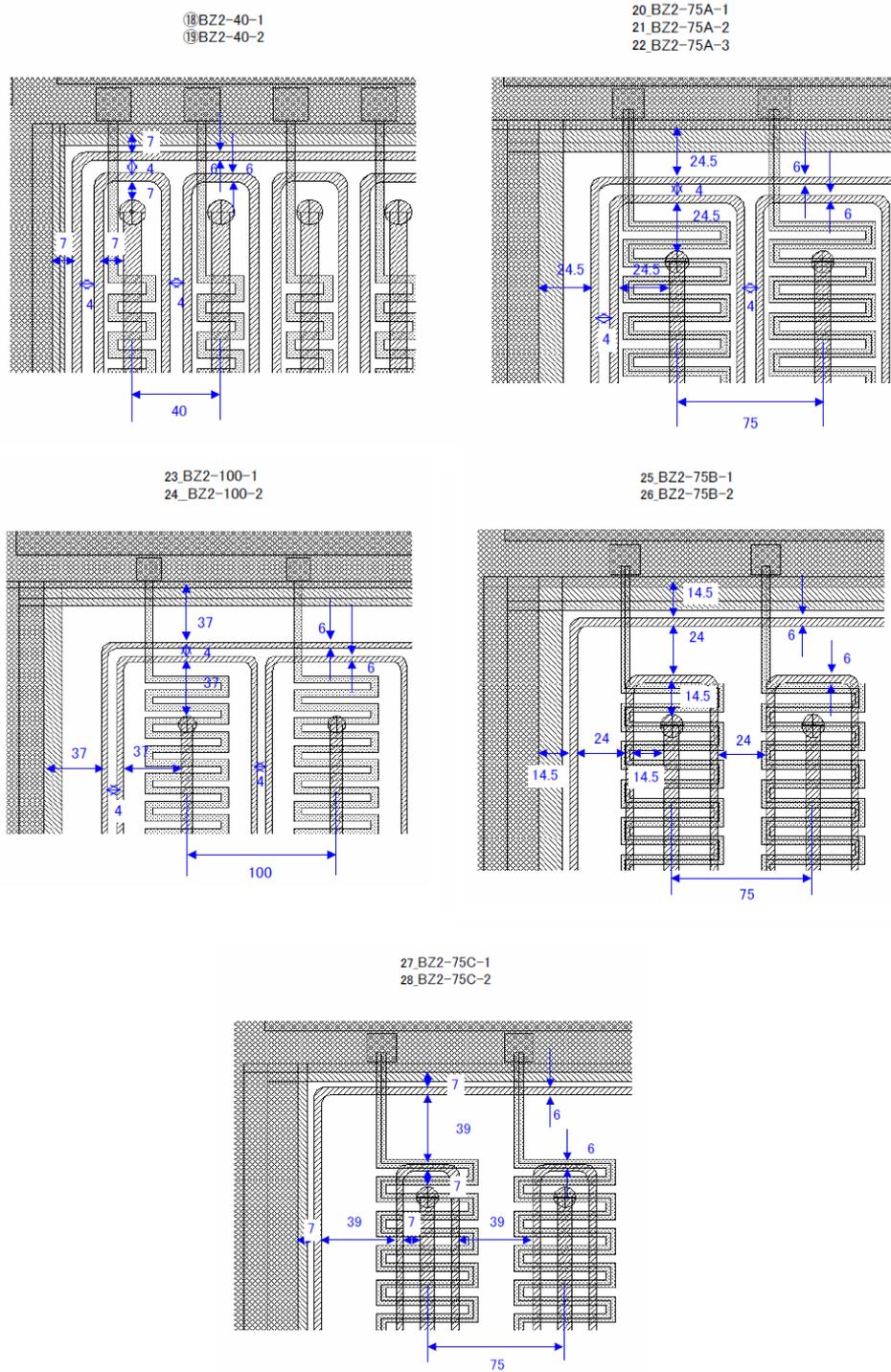


図 2.11: p-stop の構造 zone 2、40/75/100  $\mu\text{m}$  間隔のサンプルの構造。A ~ C は p-stop の位置が異なる。

## Punch Through Protection 構造 (PTP 構造)

突発的なビームスプラッシュなどにより大量の電荷が発生し、ストリップに大電流が流れると、バイアス抵抗を通して n インプラントストリップの電位がバックプレーンバイアス電圧に向かって急激に落ち込む。すると、n インプラントストリップの電位が AC カップリング絶縁膜のブレイクダウン電圧を超えて、絶縁膜を破壊することがある。そこで、ストリップとバイアスリングを近づけ、電流をバイアスリングに逃がすことでこのような現象が起こることを防ぐ。バイアスリングと同電位の延長 Al は、フィールドプレートとして働き、ストリップエッジの電場強度を抑制し、p-stop エッジで増強することで、センサーのブレイクダウンを防いでいる。試験サンプルは、延長 Al の長さの異なる 5 種類があり、PTP の有効性について調査を行った。

BZ4D-1 : No Al extension, No p-stop

BZ4D-2 : Al extension up to p-stop

BZ4D-3 : No Al extension, p-stop

BZ4D-4 : Al extension over p-stop

BZ4D-5 : Full Al extension with p-stop

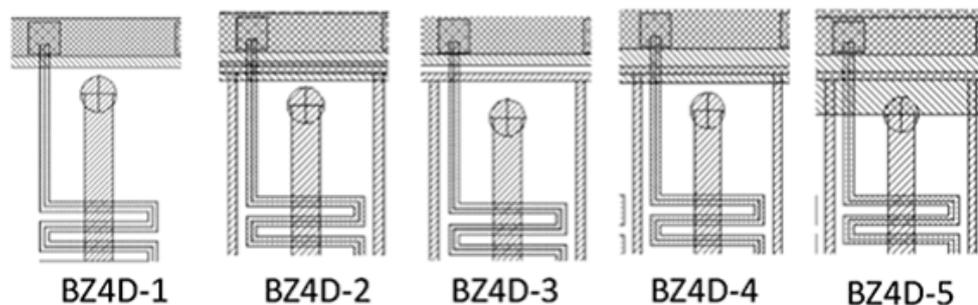


図 2.12: PTP 構造の種類 ブレイクダウン電圧が約 120 ~ 150 V のインプラントストリップと AC 結合しているキャパシタを保護する機構

## Slim Edge

シリコンセンサーの不感領域を最小化するために、耐圧 1000 V に必要な最小のエッジ幅を Slim Edge サンプルを用いて調査した。n-in-p センサーは空乏層がインプラントストリップから広がっていきダイシングエッジへ達するとダイシング表面の電荷により電流の急激な増加が起こる。そこで、逆バイアス電圧を 1000 V 以上印加しても、空乏層がダイシングエッジへ達しないエッジ幅を評価した。試験サンプルは、センサーの片側のみバイアスリングからダイシングエッジまでのエッジ幅が 80 ~ 964  $\mu\text{m}$  がある (図 2.13)。センサー表面のエッジ部分は p+、又は n+ をインプラントしている。エッジ領域の p-n 接合が逆バイアス電圧耐性にどのような影響を与えるか調べるために、p 型及び n 型基板で、p エッジ又は n エッジのセンサーの調査を行った。試験サンプルは、4 mm $\times$ 4 mm で、厚さは 150、200、320  $\mu\text{m}$  のダイオードである。バイアスリングからダイシングエッジまでで、ガードリングなどのインプラントを除いた距離を Field width と定義し、耐電圧との関係を調べた。

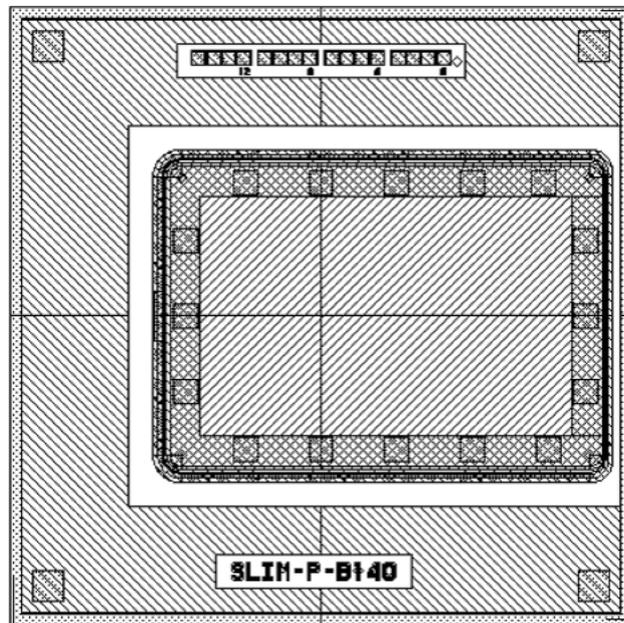
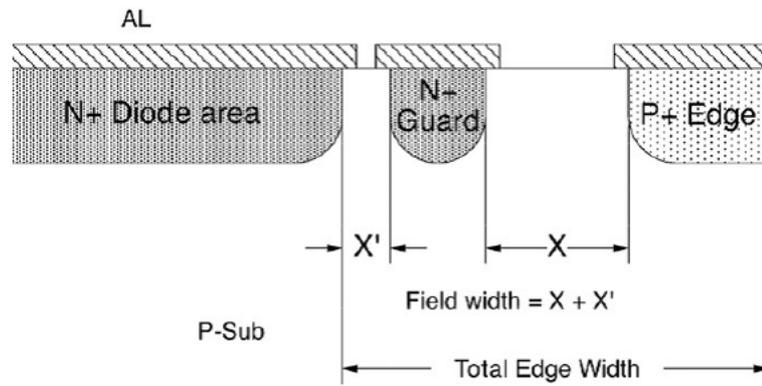


図 2.13: p 型スリムエッジサンプルと断面図 モニターダイオード表面は外側からエッジインプラント、Guard Ring、インプラント電極 (Bias Ring と接続) がインプラントされている。

### Multi Guard Ring

Guard Ring は、バイアスリングの周辺にインプラントされており、エッジ領域の電場を弱めることで高電圧によるブレイクダウンを防ぐ機構である。1000 V の耐圧を得るために必要な最適な Guard Ring 構造を求めするために、様々な Guard Ring の数や幅を持ったセンサーの耐電圧を調査した。p 型、n 型センサーともに 6 種類の Guard Ring (1GR-Narrow、1GR-Middle、1GR-Wide、2GR-Middle、2GR-Wide、3GR-Wide) について調べた。厚さは 150、200、320  $\mu\text{m}$  で、裏面 p+ の厚さが異なる FZ1、FZ3、エッジインプラントの異なる p エッジ、n エッジについて調査を行った。それぞれのサンプルの Field width の詳細は後述する。

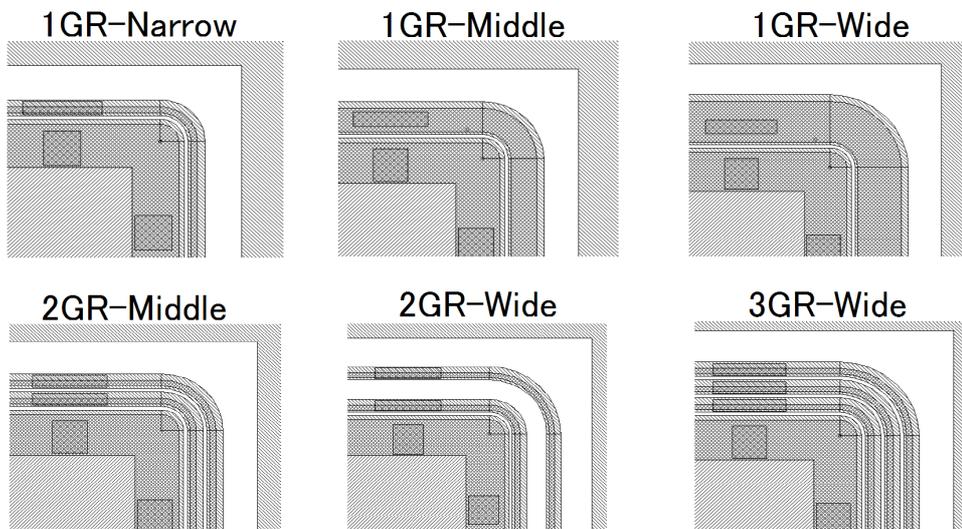
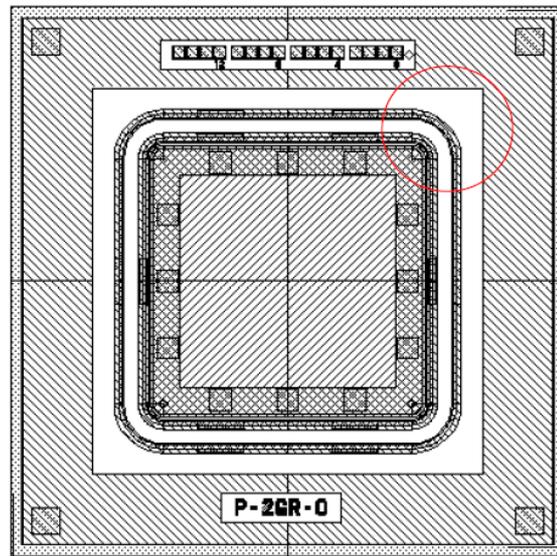


図 2.14: マルチガードリングの種類 1GR-Narrow、1GR-Middle、1GR-Wide は、ガードリング数は1本で、幅が異なる。2GR-Middle は1GR-Middleと同じ幅だが、ガードリングが2本に分かれている。2GR-Wide、3GR-Wide は1GR-Wideと同じ幅だが、ガードリングが2、3本に分かれている。

### 第3章 放射線照射試験



図 3.1: 930 型 AVF サイクロトロン

陽子線照射試験は、東北大学の陽子加速器 CYRIC[10] で行った。照射試験は、2010 年 7 月と 2011 年 2 月に実施した。照射した放射線量は、2010 年 7 月は、 $5.7 \times 10^{12}$ 、 $1.1 \times 10^{13}$ 、 $1.2 \times 10^{14}$ 、 $1.2 \times 10^{15}$ 、 $1.1 \times 10^{16}$   $n_{eq}/cm^2$ 、2011 年 2 月は  $1.1 \times 10^{14}$ 、 $1.2 \times 10^{15}$ 、 $5.7 \times 10^{15}$ 、 $1.2 \times 10^{16}$   $n_{eq}/cm^2$ 。照射量は、NIEL より 1 MeV 中性子の個数に換算されている。

陽子のエネルギーは 70 MeV で、加速器の電流値は 1 ~ 800 nA、ビームスポットのサイズは半値全幅 (Full-Width at Half-Maximum, FWHM) で約 7 mm。ビームプロファイルは、5 mm 幅のアルミのプロファイルモニターを X 軸、Y 軸方向にスキャンし、流入した陽子による電流を測定することで求めた。

裸のサンプルをクリーンペーパーとカプトンシートで包んだものを、ガラスエポキシ基板にカプトンテープで貼り付け照射ボードを作った (図 3.2)。サンプルは、陽子ビームのエネルギー損失を考慮して、 $320 \mu m$  の試験サンプルで 6 枚以下にした。サンプル間にはクリーンペーパーとカプトンシートを挟んでセンサー同士が傷付かないようにした。照射ボードを、サンプルボックスに固定し、サンプルボックスのビーム上流面に照射量測定のための 1 cm 角の高純度アルミニウム箔を貼りつけた (図 3.3)。

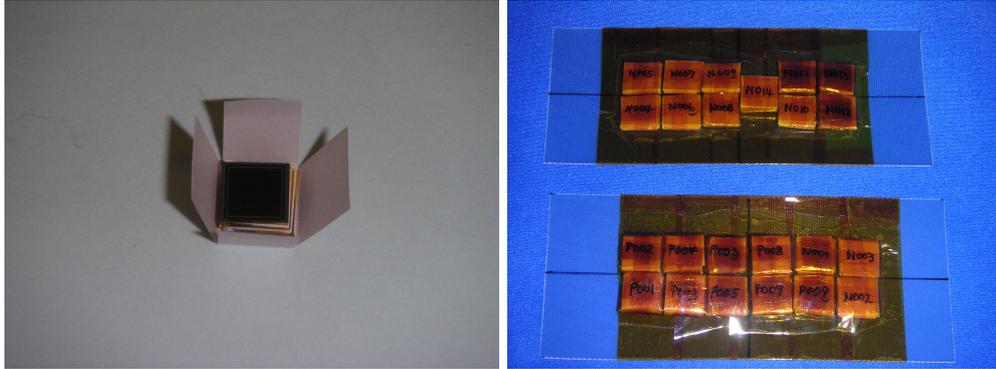


図 3.2: 照射サンプルと照射ボード 照射サンプルは、カプトンシートとクリーンペーパーを挟んで複数枚重ねており、無塵紙で包んでいる。照射ボード (ガラスエポキシ基板) 上に貼り付けて、カプトンテープで固定している。

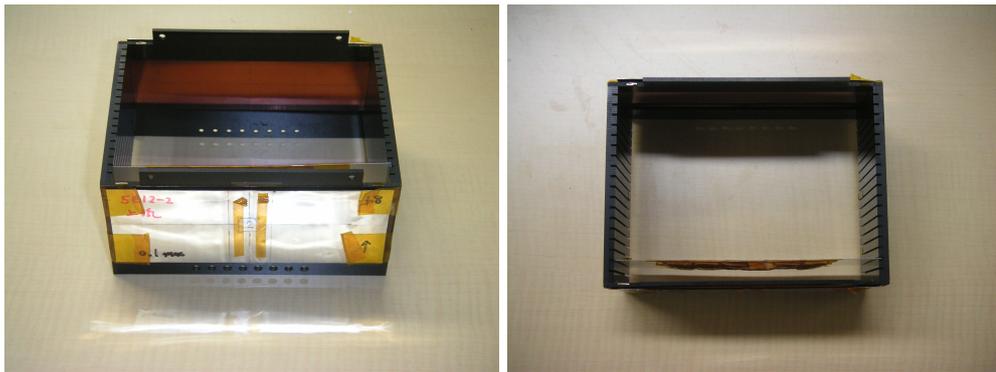


図 3.3: 照射ボックスと照射線量評価用アルミ箔 照射ボックス内に照射ボードを1枚挿入する。照射ボックス前面に照射量評価用  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  純アルミニウム箔を取り付けている。

照射中は、照射の均一性を保つために、可動式ステージでサンプルを入れたサンプルボックスをビームと垂直の X 軸、Y 軸方向に動かし、サンプルの端からビームサイズの  $2\sigma$  (6 mm) 広い範囲を 20 回以上スキャンした (図 3.4)。照射中に、ビームが止まった場合はその分照射時間を延長している。照射中のサンプルボックス内はペルチェ素子により冷やされ、冷却された空気をファンによりボックス内で循環させ、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  を保っている。照射後のサンプルは  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  の冷蔵庫に保管することでアニーリングが進行しないようにした。

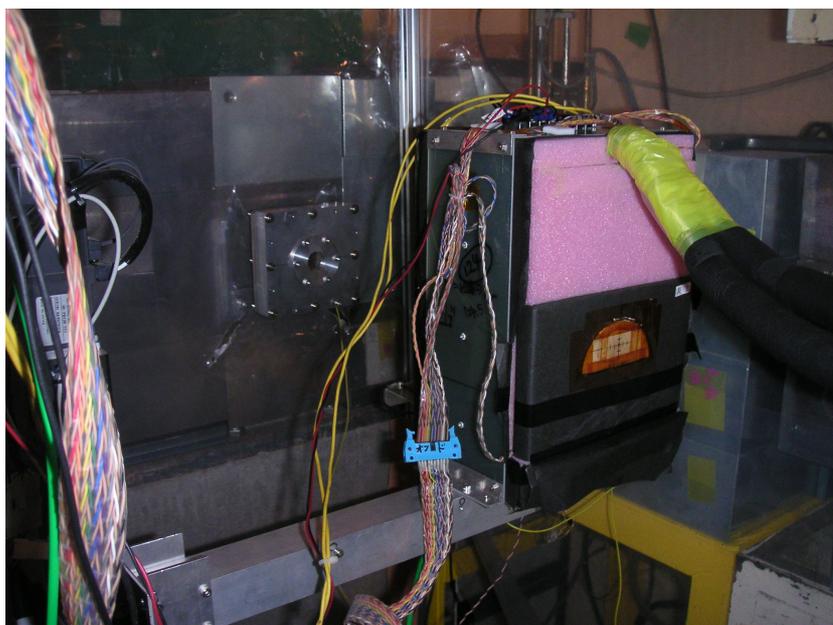


図 3.4: CYRIC32 コース及び、照射ボックス・XY ステージ 照射ボックスを XY ステージへ取り付けて照射範囲をスキャンする。

照射量は、照射量評価用  $1 \times 1\text{ cm}^2$  純アルミニウム箔を用いて、アルミニウムの破砕反応の生成断面積から求めた。アルミニウムは、陽子と以下のような破砕反応を起こし、 $^{24}\text{Na}$  を生成する。



$^{24}\text{Na}$  は、半減期 15 時間で  $1368.6\text{ keV}$  の  $\gamma$  線を放射する。この放射された  $\gamma$  線をゲルマニウム検出器で測定して陽子の照射量を見積もった (図 3.5)。ゲルマニウム検出器は、ベクレル数の分かっている校正用線源を用いて校正を行ってから使用した。照射量  $\Phi$  は、サンプルボックスに取り付けていた純アルミニウム箔を指定の距離にセットし、崩壊数をカウントして、以下の式から求めることが出来る。

$$\Phi = \frac{(N_{mes} \exp(\lambda \Delta t))}{(N_t \sigma \lambda E_{eff} \Gamma)} \quad (3.2)$$

ここで、 $N_{mes}$  は 1 秒当たりの  $\gamma$  線の計数、 $\lambda$  は  $^{24}\text{Na}$  の崩壊率 ( $1.29 \times 10^5\text{ 1/s}$ )、 $t$  はビームを停止してから測定までの時間、 $N_t$  は Al の原子数 ( $1\text{ cm}^2$ 、 $100\text{ }\mu\text{m}$  厚のアルミ箔で約  $6 \times 10^{20}$ )、 $\sigma$  は  $^{24}\text{Na}$  の生成断面積 ( $9.8\text{ mb}$ )、 $E_{eff}$  はゲルマニウム検出器の検出効率 ( $7.90 \times 10^{-4}$ )、 $\Gamma$  は崩壊分岐比 (= 1) である。典型的に照射量の見積もりには  $^{24}\text{Na}$  の生成断面積の不確かさからくる 10% の不確かさがある。

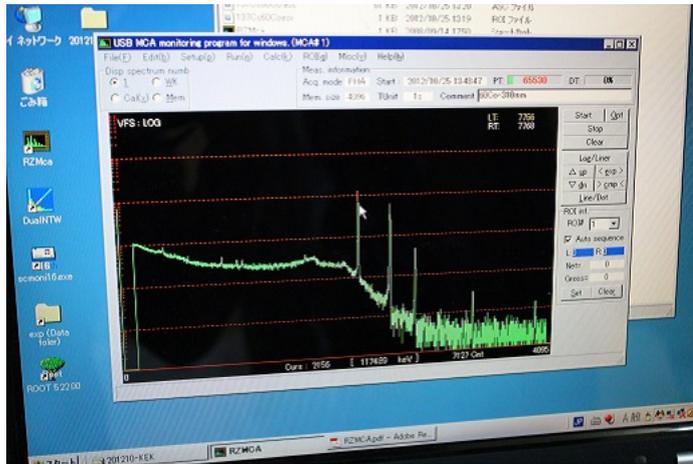


図 3.5: ゲルマニウム検出器 (上) と校正用  $^{60}\text{Co}$  のエネルギー分布 (下)

照射後サンプルは、通常-20℃の冷凍庫に保管しておりアニーリングは進まないが、2011年3月11日の東日本大震災により189時間の停電があったため、その間常温(20℃)にさらされていた。これは、60℃に換算すると65分相当であり、ほぼアニーリングが終わり逆アニーリングに変わる直前と考える。震災前に測定したものは60℃80分のアニーリングとなるが、震災後の測定は60℃65分相当となる。各サンプルにおけるアニーリング時間は測定結果ごとに示す。

最後に、照射したサンプル一覧を図3.6～3.12に示す。図3.6、3.7は2010年7月に照射したサンプルで、図3.8～3.12は、2011年2月に照射したサンプルである。表の構造の列は照射サンプルの構造、幅×長さ×厚さの列は照射サンプルの寸法を表す。放射線量のWは、ウエハーナン

バーを表すしており、空欄は該当サンプルが無いことを示す。

サンプル名は、構造の違いごとに付けた名称を表す。2010年7月照射サンプルにおいて、Multi Guard Ring の STD-K と Multi Guard-L、M、N、O、P (STD-K' と Multi Guard-L'、M'、N'、O'、P') は、それぞれ 1GR-Narrow、1GR-Middle、1GR-Wide、2GR-Middle、2GR-Wide、3GR-Wide を表す。また、Slim Edge の A、B、C、D、E、F、G、H、I、J (A'、B'、C'、D'、E'、F'、G'、H'、I'、J') は、それぞれ Field width が、34、94、214、334、64、124、244、374、574、534  $\mu\text{m}$  となる。

2011年2月照射サンプルにおいて、monitor diode は、バイアスリングと1本のガードリングのみで表面構造の無いスタンダードなダイオードを表す。Slim Edge の P、N はエッジインプラントの種類を表し、Q280、R320、S360、T400、U450、V600、W750、X1011、Y450 の数字はエッジ幅を表す。Field width は、Q280 が 160  $\mu\text{m}$ 、R320 が 200  $\mu\text{m}$ 、S360~X1011 が 240  $\mu\text{m}$  となる。

構造	幅×長さ×厚さ (cm <sup>3</sup> )	サンプル名	放射線量 (1-MeV n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )			
			5.7x10 <sup>12</sup>	1.1x10 <sup>13</sup>	1.2x10 <sup>14</sup>	1.2x10 <sup>15</sup>
Punch Through protection	1.0x1.0x0.032	BZ4B-1	W11	W12	W13	W14
		BZ4B-2	W11	W12	W13	W14
		BZ4B-3	W11	W12	W13	W14
		BZ4B-4	W11	W12	W13	W14
		BZ4C-1	W11	W12	W13	W14
		BZ4C-2	W11	W12	W13	W14
		BZ4C-3	W11	W12	W13	W14
		BZ4C-4	W11	W12	W13	W14
		BZ4D-1	W11	W12	W13	W14
		BZ4D-2	W11	W12	W13	W14
		BZ4D-3	W11	W12	W13	W14
		BZ4D-4	W11	W12	W13	W14
		BZ4D-5	W11	W12	W13	W14
p-stop電位 評価用	1.0x1.0x0.032	BZ3-30-2-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ3-75A-3-P2	W11	W12	W13	W14
		BZ3-100-2-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ3-75B-2-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ3-75C-2-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ3-75D-2-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ3-75E-2-P2	W11	W12	W13	W12
		BZ3-75F-2-P1		W12	W11	
		BZ3-75F-2-P2				W11
		BZ2-40-2-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ2-75A-3-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ2-100-2-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ2-75B-2-P1				W14
		BZ2-75B-2-P2	W11	W12	W13	
		BZ2-75C-2-P1	W11	W12	W13	W14
		BZ2-75C-2-P2	W11			
		BZ3-75A-3				W17
BZ3-75B-2			W17			
BZ3-75C-2		W17				
BZ3-75D-2	W17					
Multi guard p-edge	0.4x0.4x0.032	STD-K-P1	W11	W12	W13	W14
		Multi guard-L	W11	W12	W13	W14
		Multi guard-M	W11	W12	W13	W14
		Multi guard-N	W11	W12	W13	W14
		Multi guard-O	W11	W12	W13	W14
		Multi guard-P	W11	W12	W13	W14
Multi guard n-edge	0.4x0.4x0.032	N-STD-K'-P1	W17	W18	W19	W20
		Multi guard-L'	W17	W18	W19	W20
		Multi guard-M'	W17	W18	W19	W20
		Multi guard-N'	W17	W18	W19	W20
		Multi guard-O'	W17	W18	W19	W20
		Multi guard-P'	W17	W18	W19	W20

図 3.6: 2010 年 7 月照射サンプル一覧 (p 型基板)

構造	幅×長さ×厚さ (cm <sup>3</sup> )	サンプル名	放射線量 (1-MeV n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )			
			5.7x10 <sup>12</sup>	1.1x10 <sup>13</sup>	1.2x10 <sup>14</sup>	1.2x10 <sup>15</sup>
Slim Edge p-edge	0.4x0.4x0.032	Slim Edge-A	W2	W3	W4	
		Slim Edge-B	W2	W3	W4	
		Slim Edge-C	W2	W3	W4	
		Slim Edge-D	W2	W3	W4	
		Slim Edge-E	W2	W3	W4	
		Slim Edge-F	W2	W3	W4	
		Slim Edge-G	W2	W3	W4	
		Slim Edge-H	W2	W3	W4	
		Slim Edge-I	W2	W3	W4	
		Slim Edge-J	W2	W3	W4	
Slim Edge p-edge	0.4x0.4x0.02	Slim Edge-A	W11	W12	W16	
		Slim Edge-B	W11	W12	W16	
		Slim Edge-C	W11	W12	W16	
		Slim Edge-D	W11	W12	W16	
		Slim Edge-E	W11	W12	W16	
		Slim Edge-F	W11	W12	W16	
		Slim Edge-G	W11	W12	W16	
		Slim Edge-H	W11	W12	W16	
		Slim Edge-I	W11	W12	W16	
		Slim Edge-J	W11	W12	W16	
Slim Edge n-edge	0.4x0.4x0.032	Slim Edge-A'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-B'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-C'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-D'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-E'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-F'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-G'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-H'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-I'	W2	W3	W4	
		Slim Edge-J'	W2	W3	W4	
Slim Edge n-edge	0.4x0.4x0.02	Slim Edge-A'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-B'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-C'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-D'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-E'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-F'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-G'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-H'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-I'	W11	W12	W16	
		Slim Edge-J'	W11	W12	W16	
Multi Guard p-edge	0.4x0.4x0.032	Multi Guard-L	W2	W3	W4	
		Multi Guard-M	W2	W3	W4	
		Multi Guard-N	W2	W3	W4	
		Multi Guard-O	W2	W3	W4	
		Multi Guard-P	W2	W3	W4	
		STD-K-P1	W2	W3	W4	
Multi Guard p-edge	0.4x0.4x0.02	Multi Guard-L	W11	W12	W16	
		Multi Guard-M	W11	W12	W16	
		Multi Guard-N	W11	W12	W16	
		Multi Guard-O	W11	W12	W16	
		Multi Guard-P	W11	W12	W16	
		STD-K-P1	W11	W12	W16	
Multi Guard n-edge	0.4x0.4x0.032	Multi Guard-L'	W2	W3	W4	
		Multi Guard-M'	W2	W3	W4	
		Multi Guard-N'	W2	W3	W4	
		Multi Guard-O'	W2	W3	W4	
		Multi Guard-P'	W2	W3	W4	
		N-STD-K'-P1	W2	W3	W4	
Multi Guard n-edge	0.4x0.4x0.02	Multi Guard-L'	W11	W12	W16	
		Multi Guard-M'	W11	W12	W16	
		Multi Guard-N'	W11	W12	W16	
		Multi Guard-O'	W11	W14	W16	
		Multi Guard-P'	W11	W12	W16	
		N-STD-K'-P1	W11	W12	W16	

図 3.7: 2010 年 7 月照射サンプル一覧 (n 型基板)

構造	幅×長さ×厚さ (cm <sup>3</sup> )	サンプル名	備考	放射線量 (1-MeV n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )			
				1.1x10 <sup>14</sup>	1.2x10 <sup>15</sup>	5.7x10 <sup>15</sup>	1.2x10 <sup>16</sup>
monitor diode	0.4x0.4x0.032	P-STD-K-P4	p-edge	W2	W3	W5	W10
		P-STD-K-P5		W2	W3	W5	W10
		N-STD-K-P5	n-edge	W2	W3	W5	W10
Slim Edge	0.4x0.4x0.032	SLIM-P-Q280	p-edge	W2	W3	W5	W10
		SLIM-P-R320		W2	W3	W5	W10
		SLIM-P-S360		W2	W3	W5	W10
		SLIM-P-T400		W2	W3	W5	W10
		SLIM-P-U450		W2	W3	W5	W10
		SLIM-P-V600		W2	W3	W5	W10
		SLIM-P-W750		W2	W3	W5	W10
		SLIM-P-X1011		W2	W3	W5	W10
		SLIM-P-Y450	double GR	W2	W3	W5	W10
	SLIM-N-Y450	n-edge	W2	W3	W5	W10	
Multi Guard	0.4x0.4x0.032	P-STD-2ND-K	p-edge	W2	W3	W5	W10
		P-1GR-2ND-L		W2	W3	W5	W10
		P-1GR-2ND-M		W2	W3	W5	W10
		P-2GR-2ND-N		W2	W3	W5	W10
		P-2GR-2ND-O		W2	W3	W5	W10
		P-3GR-2ND-P		W2	W3	W5	W10
		N-STD-2ND-K	n-edge	W2	W3	W5	W10
		N-1GR-2ND-L		W2	W3	W5	W10
		N-1GR-2ND-M		W2	W3	W5	W10
		N-2GR-2ND-N		W2	W3	W5	W10
		N-2GR-2ND-O		W2	W3	W5	W10
		N-3GR-2ND-P		W2	W3	W5	W10

図 3.8: 2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ1 320 μm p-stop)

構造	幅×長さ×厚さ (cm <sup>3</sup> )	サンプル名	備考	放射線量 (1-MeV n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )			
				1.1x10 <sup>14</sup>	1.2x10 <sup>15</sup>	5.7x10 <sup>15</sup>	1.2x10 <sup>16</sup>
monitor diode	0.4x0.4x0.015	P-STD-K-P4	p-edge	W21	W22	W23	W24
		P-STD-K-P5		W21	W22	W23	W24
		N-STD-K-P5	n-edge	W21	W22	W23	W24
Slim Edge	0.4x0.4x0.015	SLIM-P-Q280	p-edge	W21	W22	W23	W24
		SLIM-P-R320		W21	W22	W23	W24
		SLIM-P-S360		W21	W22	W23	W24
		SLIM-P-T400		W21	W22	W23	W24
		SLIM-P-U450		W21	W22	W23	W24
		SLIM-P-V600		W21	W22	W23	W24
		SLIM-P-W750		W21	W22	W23	W24
		SLIM-P-X1011		W21	W22	W23	W24
		SLIM-P-Y450-2	double GR	W21	W22	W23	W24
	SLIM-N-Y450	n-edge	W21	W22	W23	W24	
Multi Guard	0.4x0.4x0.015	P-STD-2ND-K	p-edge	W21	W22	W23	W24
		P-1GR-2ND-L		W21	W22	W23	W24
		P-1GR-2ND-M		W21	W22	W23	W24
		P-2GR-2ND-N		W21	W22	W23	W24
		P-2GR-2ND-O		W21	W22	W23	W24
		P-3GR-2ND-P		W21	W22	W23	W24
		N-STD-2ND-K	n-edge	W21	W22	W23	W24
		N-1GR-2ND-L		W21	W22	W23	W24
		N-1GR-2ND-M		W21	W22	W23	W24
		N-2GR-2ND-N		W21	W22	W23	W24
		N-2GR-2ND-O		W21	W22	W23	W24
		N-3GR-2ND-P		W21	W22	W23	W24

図 3.9: 2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ1 150 μm p-stop)

構造	幅×長さ×厚さ (cm <sup>3</sup> )	サンプル名	備考	放射線量 (1-MeV n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )			
				1.1x10 <sup>14</sup>	1.2x10 <sup>15</sup>	5.7x10 <sup>15</sup>	1.2x10 <sup>16</sup>
monitor diode	0.4x0.4x0.015	P-STD-K-P4	p-edge	W39	W41	W42	W43
		P-STD-K-P5	p-edge	W39	W41	W42	W43
		N-STD-K-P5	n-edge	W39	W41	W42	W43
Slim Edge	0.4x0.4x0.015	SLIM-P-Q280	p-edge	W39	W41	W42	W43
		SLIM-P-R320		W39	W41	W42	W43
		SLIM-P-S360		W39	W41	W42	W43
		SLIM-P-T400		W39	W41	W42	W43
		SLIM-P-U450		W39	W41	W42	W43
		SLIM-P-V600		W39	W41	W42	W43
		SLIM-P-W750		W39	W41	W42	W43
		SLIM-P-X1011		W39	W41	W42	W43
		SLIM-P-Y450		double GR	W39	W41	W42
		SLIM-N-Y450	n-edge	W39	W41	W42	W43
Multi Guard	0.4x0.4x0.015	P-STD-2ND-K	p-edge	W39	W41	W42	W43
		P-1GR-2ND-L		W39	W41	W42	W43
		P-1GR-2ND-M		W39	W41	W42	W43
		P-2GR-2ND-N		W39	W41	W42	W43
		P-2GR-2ND-O		W39	W41	W42	W43
		P-3GR-2ND-P		W39	W41	W42	W43
		N-STD-2ND-K	n-edge	W39	W41	W42	W43
		N-1GR-2ND-L		W39	W41	W42	W43
		N-1GR-2ND-M		W39	W41	W42	W43
		N-2GR-2ND-N		W39	W41	W42	W43
		N-2GR-2ND-O		W39	W41	W42	W43
		N-3GR-2ND-P		W39	W41	W42	W43

図 3.10: 2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ3 150 μm p-stop)

構造	幅×長さ×厚さ (cm <sup>3</sup> )	サンプル名	備考	放射線量 (1-MeV n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )			
				1.1x10 <sup>14</sup>	1.2x10 <sup>15</sup>	5.7x10 <sup>15</sup>	1.2x10 <sup>16</sup>
monitor diode	0.4x0.4x0.032	P-STD-K-P6	p-edge			W15	
		P-STD-K-P7	p-edge			W15	
		N-STD-K-P5	n-edge			W16	
Slim Edge	0.4x0.4x0.032	SLIM-P-Q280	p-edge			W16	
		SLIM-P-R320				W15	
		SLIM-P-S360				W15	
		SLIM-P-T400				W15	
		SLIM-P-U450				W16	
		SLIM-P-V600				W16	
		SLIM-P-W750				W16	
		SLIM-P-X1011				W15	
		SLIM-P-Y450		double GR			W15
		SLIM-N-Y450	n-edge			W15	
Multi Guard	0.4x0.4x0.032	P-STD-2ND-K	p-edge			W15	
		P-1GR-2ND-L				W15	
		P-1GR-2ND-M				W15	
		P-2GR-2ND-N				W15	
		P-2GR-2ND-O				W15	
		P-3GR-2ND-P				W15	
		N-STD-2ND-K	n-edge			W15	
		N-1GR-2ND-L				W15	
		N-1GR-2ND-M				W15	
		N-2GR-2ND-N				W15	
		N-2GR-2ND-O				W15	
		N-3GR-2ND-P				W15	

図 3.11: 2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ1 320 μm p-spray)

構造	幅×長さ×厚さ (cm <sup>3</sup> )	サンプル名	備考	放射線量 (1-MeV n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )			
				1.1x10 <sup>14</sup>	1.2x10 <sup>15</sup>	5.7x10 <sup>15</sup>	1.2x10 <sup>16</sup>
monitor diode	0.4x0.4x0.015	P-STD-K-P6	p-edge			W35	
		P-STD-K-P7				W35	
		N-STD-K-P5	n-edge			W35	
Slim Edge	0.4x0.4x0.015	SLIM-P-Q280	p-edge			W35	
		SLIM-P-R320				W35	
		SLIM-P-S360				W35	
		SLIM-P-T400				W35	
		SLIM-P-U450				W35	
		SLIM-P-V600				W35	
		SLIM-P-W750				W35	
		SLIM-P-X1011				W35	
		SLIM-P-Y450	double GR			W35	
		SLIM-N-Y450	n-edge			W35	
Multi Guard	0.4x0.4x0.015	P-STD-2ND-K	p-edge			W35	
		P-1GR-2ND-L				W35	
		P-1GR-2ND-M				W35	
		P-2GR-2ND-N				W35	
		P-2GR-2ND-O				W35	
		P-3GR-2ND-P				W35	
		N-STD-2ND-K	n-edge			W35	
		N-1GR-2ND-L				W35	
		N-1GR-2ND-M				W35	
		N-2GR-2ND-N				W35	
		N-2GR-2ND-O				W35	
		N-3GR-2ND-P				W35	
							W35

図 3.12: 2011 年 2 月照射サンプル一覧 (p 型基板 FZ1 150 μm p-spray)

## 第4章 放射線損傷評価

東北大のCYRICにおいて、陽子線を  $1.2 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  まで照射したサンプルおよび非照射サンプルの基礎特性の測定を行い、放射線損傷の評価を行った。また、TCAD を用いてシリコンセンサーをシミュレーションし、放射線損傷を再現した。

### 4.1 全空乏化電圧

信号量は、空乏層の厚さに比例して増加するため、空乏層の厚さの逆バイアス電圧依存性や全空乏化電圧を知ることは、検出器の運転の上で重要な情報となる。そこで、シリコン検出器を、空乏層を挟んだ平行板コンデンサーと仮定し、C-V 測定で静電容量を測定することで全空乏化電圧を評価した。

#### 4.1.1 C-V 測定

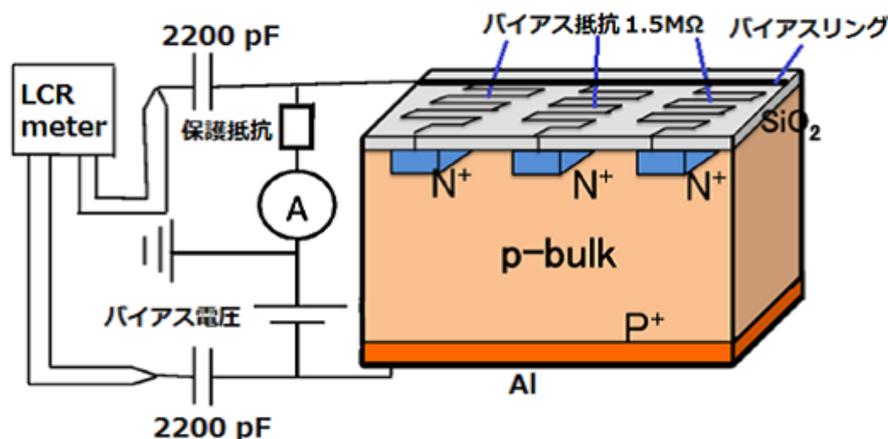


図 4.1: I-V、C-V 測定 測定方法

ミニチュアセンサーに逆バイアス電圧を  $0 \sim -1000 \text{ V}$  印加し、LCR メータの 4 端子法を用いてバルク部の静電容量を測定した。バルク部の静電容量と逆バイアス電圧の関係から全空乏化電圧を評価した。測定は環境試験器内で温度を一定にして窒素を流しながら行っており、外部からの光は遮断されている。測定時の温度は、非照射サンプルは  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、照射後は  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  に設定した。暗電流によるジュール熱で熱暴走が起こらないように、 $100 \mu\text{A}$  以下になるように制限した。センサーの保護抵抗として  $10 \text{ M}\Omega$  の抵抗が入っている。LCR メータの周波数は、全空乏化したセンサーの静電容量の絶対値が最も大きくなる  $1 \text{ kHz}$  に設定した [11]。LCR メータに高電圧が掛からないよう

にするために、2200 pF の高耐電圧コンデンサで切っである。このコンデンサの静電容量は、キャリブレーションにより補正した。式 1.12 より  $1/(\text{バルク部の静電容量})^2$  が逆バイアス電圧に比例し、全空乏化後に一定になることから全空乏化電圧を評価できる。図 4.2 は、典型的な  $1/(\text{バルク部の静電容量})^2$  の逆バイアス電圧依存性である。このグラフの低電圧領域の比例直線と高電圧領域の一定直線の交点から全空乏化電圧を求めることが出来る。更に、低電圧部の比例領域は、傾きの小さな領域と大きな領域に分かれている。これらそれぞれについて比例直線を考え、高電圧領域の一定直線との交点を求め、その中点を全空乏化電圧と定義し、差を誤差棒で表現した。なお、低電圧領域での傾きの異なる 2 つの比例直線は照射後センサーで顕著に現れるが、原因は分かっていない。また、交点付近で傾きが鈍っているのはストリップ構造によるものである。測定に使用したサンプルを図 4.3 に示す。

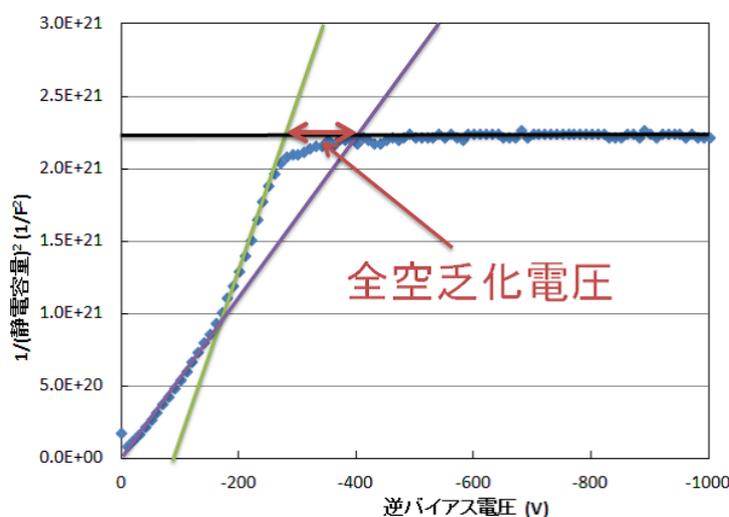


図 4.2: 全空乏化電圧の評価方法 サンプルは、zone 3、30  $\mu\text{m}$  間隔、照射量  $1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 。

試験サンプル	放射線量 ( $1\text{-MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ )			
	$5.7 \times 10^{12}$	$1.1 \times 10^{13}$	$1.2 \times 10^{14}$	$1.2 \times 10^{15}$
PTP、BZ4	D-1~5	D-1~5	D-1~5	D-1~5
p-stop、BZ2	40、75A~C、100	40、75A~C、100	40、75A~C、100	40、75A~C、100
p-stop、BZ3	40、75A~E、100	40、75A~F、100	40、75A~F、100	40、75A~F、100

図 4.3: 全空乏化電圧測定サンプル D-1~5 は PTP の構造の違い、p-stop サンプルの数字はストリップ間隔 ( $\mu\text{m}$ )、A~F は p-stop の位置が異なる (図 2.9 ~ 2.11)。

#### 4.1.2 全空乏化電圧の評価

1 cm $\times$ 1 cm、320  $\mu\text{m}$  厚の PTP サンプルと p-stop 評価用サンプルの p 型ストリップセンサーについて、C-V 測定から全空乏化電圧を評価した。p-stop 評価用サンプルは 60  $^{\circ}\text{C}$  65 分相当のアニーリングを行い、PTP サンプルはアニーリングを行っていない。図 4.4 に、p 型基板センサーの全空

乏化電圧の放射線量依存性を示す。アニーリング後の p-stop サンプルは、 $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  において約 600 V、アニーリング前の PTP サンプルは、約 800 V となった。図 4.5 の n 型の結果と比較すると、oxygen rich FZ は  $3.3 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  において約 200 V であるため、 $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  では約 600 V になると考えられる。つまり、 $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  における p 型の全空乏化電圧、有効不純物濃度は、oxygenated n 型と同様となった。そのため、FZ p 型基板には oxygenated n 型と同程度の酸素が含まれている可能性がある。

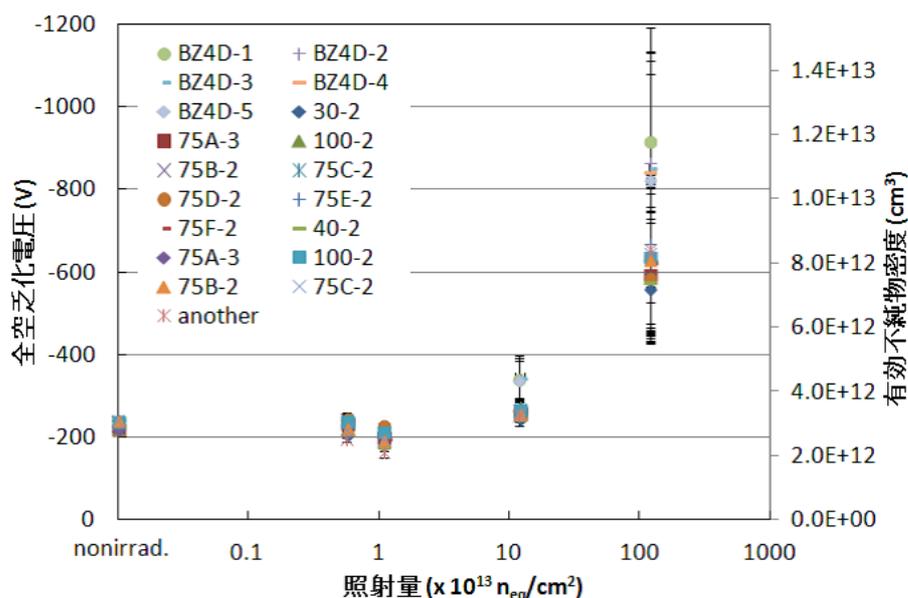


図 4.4: p 型シリコンセンサーの全空乏化電圧の放射線量依存性

## 4.2 損傷係数とエネルギーギャップ

### 4.2.1 I-V 測定

I-V 特性は、電源と電流計のみで比較的容易に測ることができ、マイクロ放電などにより明確に欠陥品を識別することが出来る。そのため、全てのサンプルについて I-V 測定を行っている。測定方法は、バイアスリングとバックプレーン電極間に逆バイアス電圧を 0 ~ -1000 又は -2000 V まで印加し、暗電流を測定した。静電容量と同時測定を行う際のセットアップは C-V 測定と同じである (図 4.1)。測定条件も、C-V 測定と同様である。

### 4.2.2 損傷係数

$1 \times 1 \text{ cm}^2$ 、 $320 \mu\text{m}$  厚の PTP サンプルについて I-V 測定を行った結果を示す。測定に使用したサンプルを図 4.6 に示す。図 4.7 は、各照射量における暗電流の逆バイアス電圧依存性である。-1000 V までマイクロ放電による暗電流の急激な増加が起こっていないことから、各照射量ともに 1000 V 以上の耐圧がある。この結果を元に、式 1.15 より各照射量の全空乏化電圧での電流値から損傷

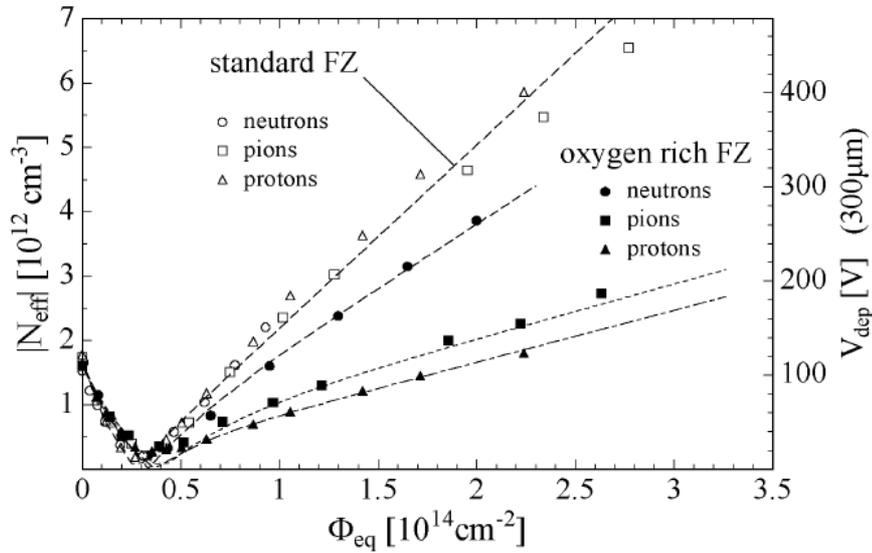


図 4.5: n 型シリコンセンサーの全空乏化電圧の放射線量依存性 [7]

係数を評価した。ここで、有効センサー体積  $V = 77.2 \text{ mm}^2 \times 320 \text{ } \mu\text{m}$  とした。有効センサー面積  $S_{\text{eff}} = 77.2 \text{ cm}^2$  は、C-V 測定の結果  $C_{\text{bulk}} = 25.43 \text{ pF}$ 、を用いて、 $C_{\text{bulk}} = \epsilon_{\text{si}} S_{\text{eff}} / d_{\text{FD}}$  から以下のように評価した。

$$77.2 \text{ mm}^2 = \frac{25.43 \text{ pF} \times 320 \text{ } \mu\text{m}}{11.9 \times 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}}$$

ここで、 $\epsilon_{\text{si}}$  はシリコンの誘電率で  $11.9 \times 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 、 $d_{\text{FD}}$  は空乏層の厚さで全空乏化時にはバルクの厚さとなるため  $320 \text{ } \mu\text{m}$  とした。

試験サンプル	放射線量 (1-MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ )			
	$5.7 \times 10^{12}$	$1.1 \times 10^{13}$	$1.2 \times 10^{14}$	$1.2 \times 10^{15}$
PTP, BZ4	D-1~5	D-1~5	D-1~5	D-1~5

図 4.6: 損傷係数評価サンプル 各照射量とも BZ4D-1~D-5 まで用いた。

図 4.8 は、横軸が照射量、縦軸が全空乏化時の暗電流のグラフである。このグラフの傾きから損傷係数を評価できる。アニーリング前の p 型シリコンセンサーの損傷係数  $\alpha = 4.6 (\pm 0.1) \times 10^{-17} \text{ A/cm}$  となった。図 4.9 は n 型センサーの損傷係数のアニーリング時間依存性であり、外挿してアニーリング前を評価すると約  $5.5 \times 10^{-17} \text{ A/cm}$  となる。よって、p 型シリコンセンサーの損傷係数は n 型と大きく異ならないと言える。

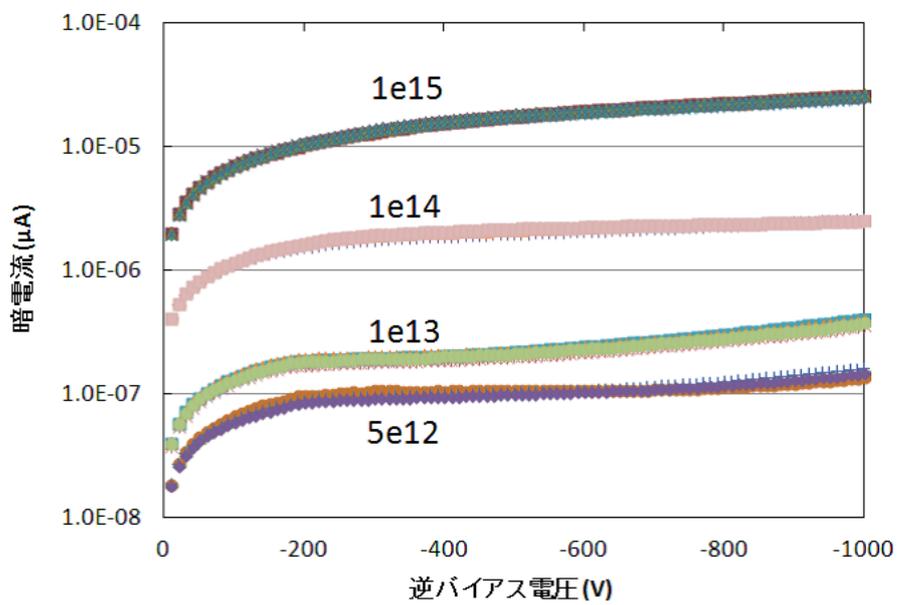


図 4.7: PTP サンプルの IV 曲線

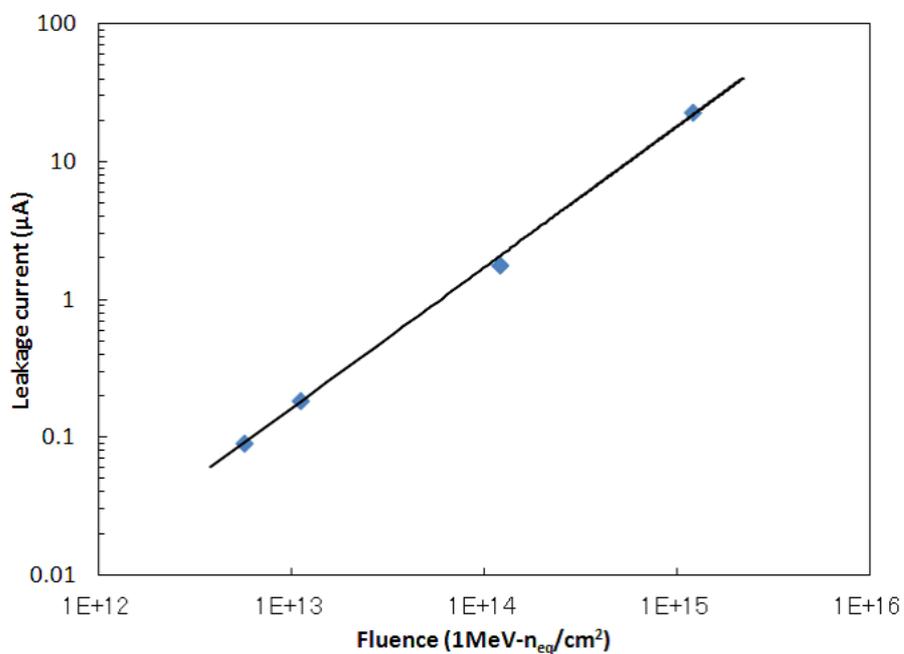


図 4.8: p 型センサーの損傷係数の評価

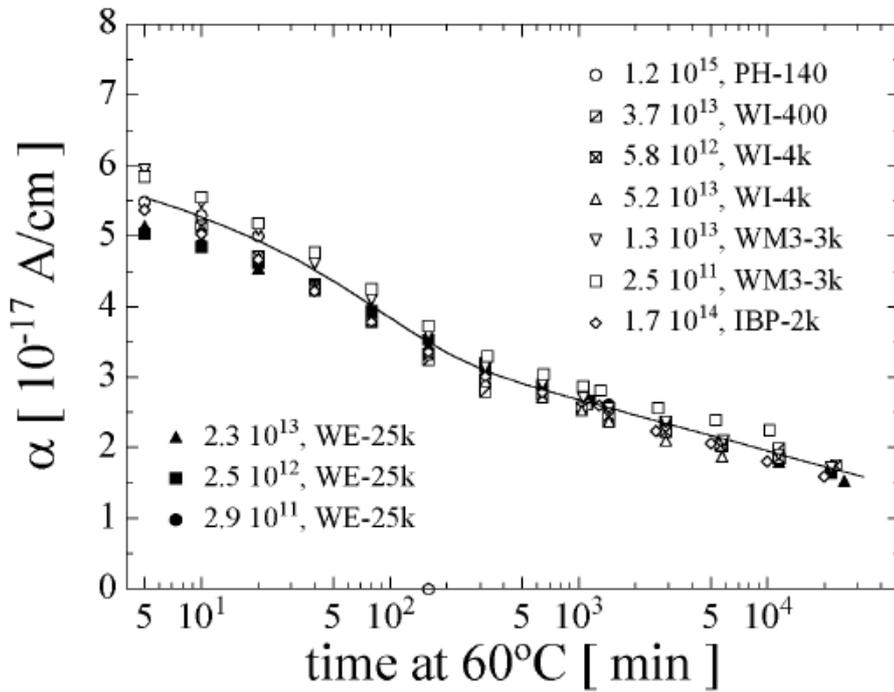


図 4.9: n型センサーの損傷係数のアニーリング時間依存性 [7]

#### 4.2.3 エネルギーギャップ

-60、-50、-40、-30、-20 °Cにおける暗電流を測定することで式 1.9 よりエネルギーギャップ相当の係数  $E_g$  を評価した。サンプルは、p 型基板、320  $\mu\text{m}$  厚、照射量は  $1.2 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の BZ4D-1 を用いた。センサー本体の温度をモニターするために、センサー裏面に PT100 を接触させて温度を測定した。その上で、逆バイアス電圧を 0 ~ -1000 V まで印加し、暗電流を測定した。図 4.10 に暗電流の温度依存性を示す。温度が上昇すると、暗電流が上昇していることが分かる。 $1.2 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  における全空乏化電圧である -860 V の電流値をプロットして、式 1.9 でフィットすることで  $E_g$  を評価した。参照温度は 20 °C とした。p 型基板の  $1.2 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  における  $E_g = 1.21 \text{ eV}$  となり、n 型の結果 (1.21 eV)[12] と一致した。

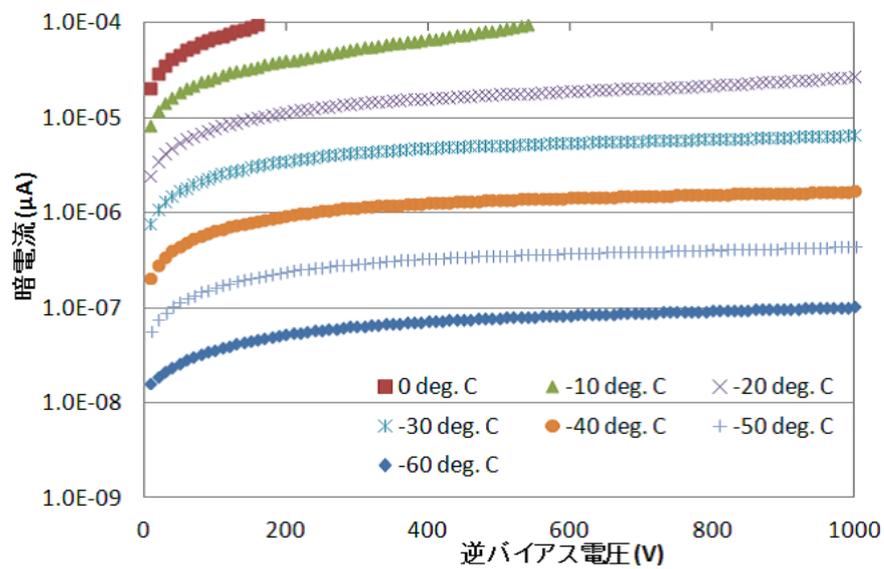


図 4.10: 暗電流の温度依存性

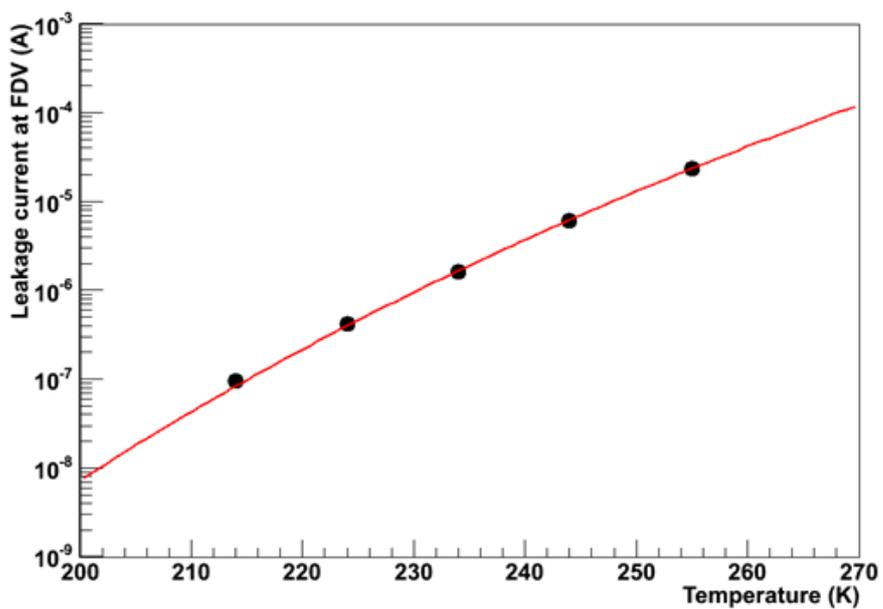


図 4.11: 全空乏化電圧時の暗電流の温度依存性

### 4.3 耐電圧の Field width 依存性

p型基板、n型基板それぞれのエッジインプラントがp型またはn型の Slim Edge と Multi Guard Ring サンプルについて耐電圧を評価した。特に、Field width やエッジ幅、エッジインプラントと耐電圧の関係を調査した。これにより、耐圧 1000 V に最適な構造を決定する。逆バイアス電圧を、n型 p/n エッジ、p型 n エッジサンプルは 0 ~ -1000 V、p型 p エッジサンプルは 0 ~ -2000 V まで印加し、暗電流を測定して耐電圧を評価した。急激な電流の増加からセンサーを保護するために 10 M $\Omega$  の保護抵抗を介して、センサーに電圧を掛けている。測定は、非照射が+20 °Cで照射後が-20 °Cで行った。n型 p/n エッジ、p型 n エッジサンプルは 60 °C 80 分、p型 p エッジサンプルは 60 °C 65 分相当のアニーリングを行った。

図 4.12 は、典型的なサンプルの横軸が逆バイアス電圧、縦軸が暗電流の I-V 曲線のグラフである。この I-V 曲線の低電圧領域における最小の傾きの 5 倍の点の逆バイアス電圧を耐電圧と定義した。

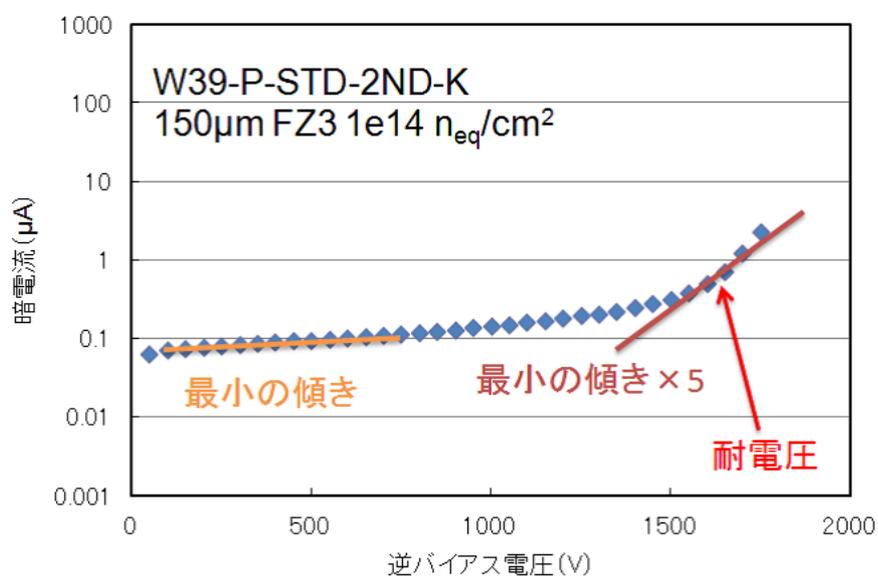


図 4.12: 耐電圧の評価方法

まず、耐電圧の温度依存性を調べた。図 4.13 は、3 Guard Ring の非照射サンプルの+20 °Cと-20 °Cにおける I-V 曲線である。どちらも約 1800 V で暗電流が急激に増加しており、温度によって耐電圧は変化しない。

次に、n型 p エッジサンプルの耐電圧の Field width 依存性を評価した。測定に使用したサンプルを図 4.14 示す。

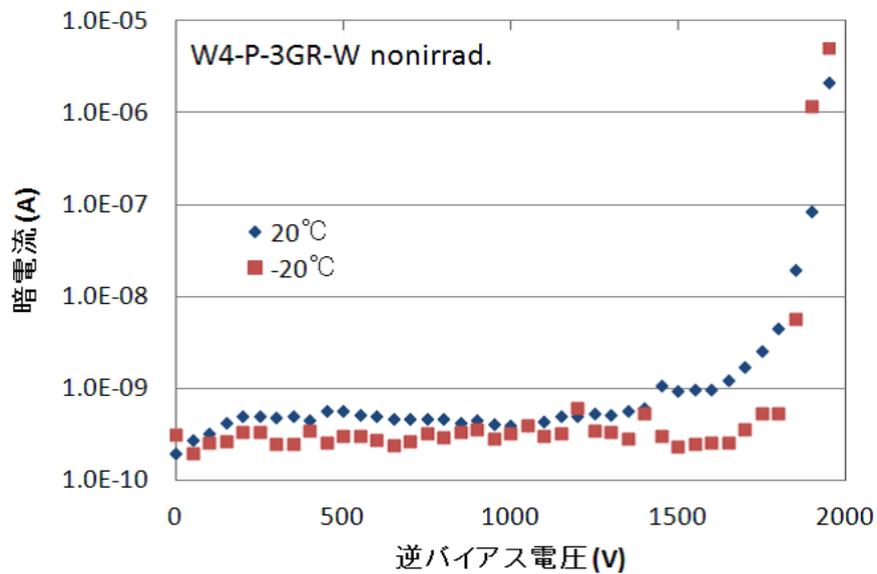


図 4.13: +20 °C (青) と -20 °C (赤) における暗電流の逆バイアス電圧依存性 (3 Guard Ring の非照射サンプル)

n型pエッジ Slim Edge			n型pエッジ Multi Guard Ring		
FZ1、320/200 μm厚、p-stop			FZ1、320/200 μm厚、p-stop		
サンプル名	Field width	エッジ幅	サンプル名	Field width	Guard Ring
A	34	80	K	289	1GR-Narrow
B	94	140	L	289	1GR-Middke
C	214	260	M	289	1GR-Wide
D	334	380	N	349	2GR-Middle
E	64	110	O	439	2GR-Wide
F	124	170	P	409	3GR-Wide
G	244	290			
H	374	420			
I	574	620			
J	534	620			

図 4.14: 耐電圧の Field width 依存性評価サンプル (n 型 p エッジサンプル)

空乏層は (逆バイアス電圧)<sup>1/2</sup> に比例して広がっていき、ダイシングエッジに達するとダイシング表面の結晶の乱れによる格子欠陥やキャリアにより暗電流が急激に増加する。そのため、Field width が広がると、空乏層がダイシングエッジに達するために必要な電圧が高くなり、耐電圧が上昇する。図 4.15 のように、縦軸を (耐電圧)<sup>1/2</sup>、横軸を Field width にとると Field width が狭い領域では比例直線となり、広い領域では耐圧 1000 V 以上となる。この比例直線が 1000 V に達した点が耐圧 1000 V に必要な Field width である。図 4.15、4.16 に n 型 p エッジサンプルの耐電圧の Field width 依存性を示す。十分広い Field width を持っていて約 700 V でマイクロ放電が発生したため、耐圧 1000 V に必要な Field width は 1000 V まで外挿して評価を行った。

n 型 p エッジサンプルは、エッジインプラント部に p-n 接合を持っている。p-n 接合は、キャリア同士の拡散により空乏層が形成されており、その空乏層はエッジまで広がっている。センサーに逆バイアス電圧を印加し、空乏層がエッジインプラントに達すると、エッジインプラントとバルク間の狭い空乏層に逆バイアス電圧による電位差が生じ、高電場が発生する。その電場によりダイシングエッジで暗電流の急激な増加が起こると考えられる。

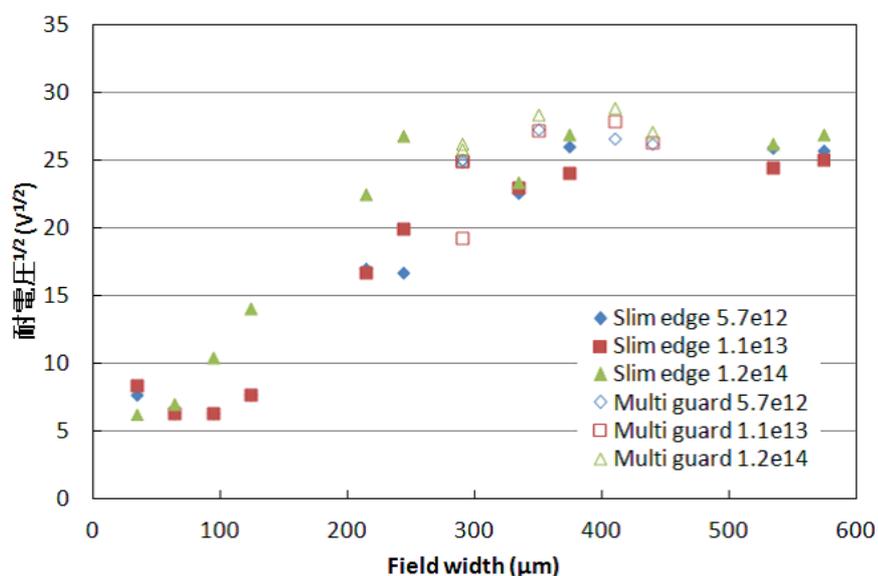


図 4.15: 耐電圧の Field width 依存性 (n 型 p エッジ、320 μm 厚、Slim Edge・Multi Guard Ring サンプル)

n 型 n エッジサンプルの耐電圧の Field width 依存性を図 4.18、4.19 に示す。測定に使用したサンプルを図 4.17 に示す。320、200 μm 厚ともに、Field width が狭くても良い耐電圧を示しており、Field width 依存性は見られない。エッジ領域に p-n 接合が存在せず、エッジインプラントがマイクロ放電の発生を抑制するため Field width が狭くても良い耐電圧を示している。

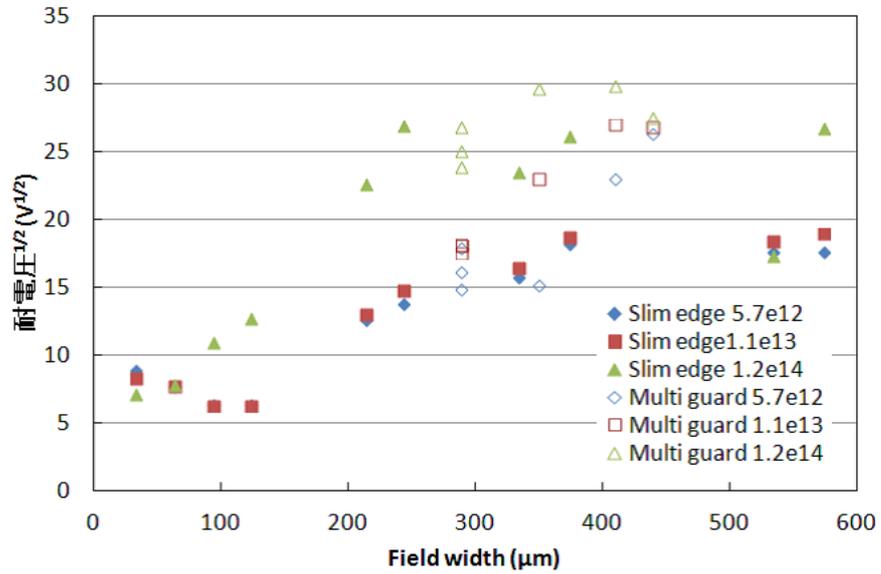


図 4.16: 耐電圧の Field width 依存性 (n 型 p エッジ、200 μm 厚、Slim Edge・Multi Guard Ring サンプル)

n型nエッジ Slim Edge			n型nエッジ Multi Guard Ring		
FZ1、320/200 μm厚、p-stop			FZ1、320/200 μm厚、p-stop		
サンプル名	Field width	エッジ幅	サンプル名	Field width	Guard Ring
A	34	80	K	289	1GR-Narrow
B	94	140	L	289	1GR-Middke
C	214	260	M	289	1GR-Wide
D	334	380	N	349	2GR-Middle
E	64	110	O	439	2GR-Wide
F	124	170	P	409	3GR-Wide
G	244	290			
H	374	420			
I	574	620			
J	534	620			

図 4.17: 耐電圧の Field width 依存性評価サンプル (n 型 n エッジサンプル)

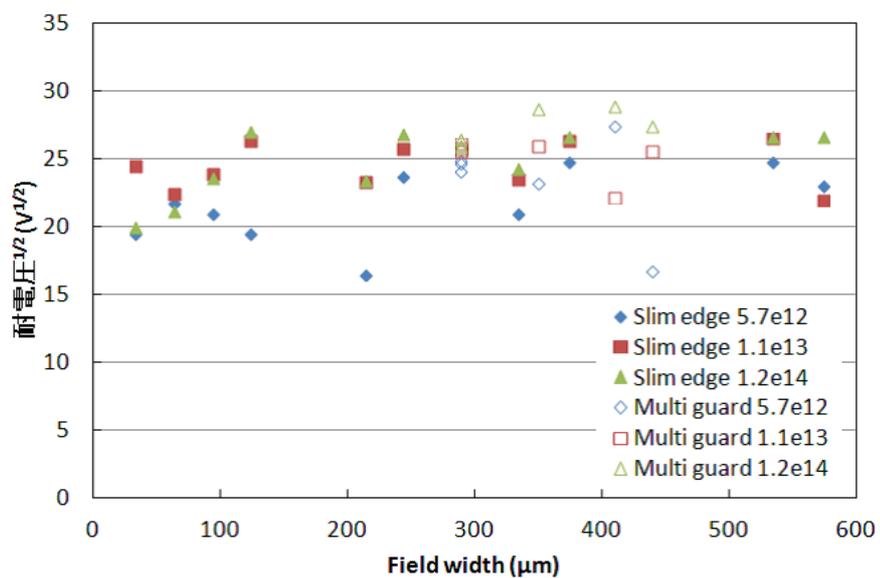


図 4.18: 耐電圧の Field width 依存性 (n 型 n エッジ、320 μm 厚、Slim Edge・Multi Guard Ring サンプル)

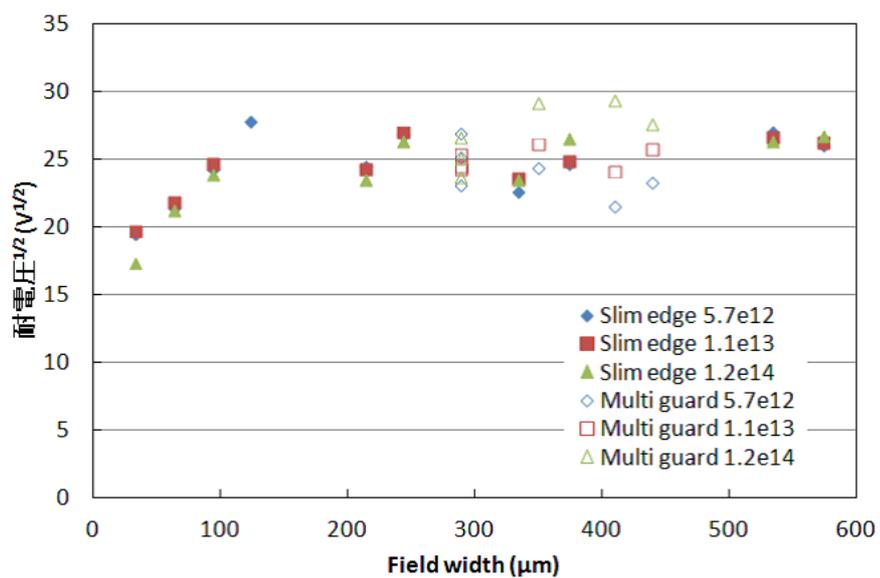


図 4.19: 耐電圧の Field width 依存性 (n 型 n エッジ、200 μm 厚、Slim Edge・Multi Guard Ring サンプル)

p型pエッジサンプルの耐電圧のField width依存性を図4.21～4.23に示す。測定に使用したサンプルを図4.20に示す。p型pエッジサンプルのエッジ領域にはp-n接合は存在しないが、より高電圧の-2000Vまで調査しているためブレイクダウンが見えている。このグラフから、耐圧1000Vに必要なField widthを評価した。Field widthが広がると、耐電圧が上昇する様子が分かる。また、Slim Edge サンプルには、6つの異なるエッジ幅で240 $\mu\text{m}$ の同じField widthを持つサンプルがある。全てのサンプルは同じ逆バイアス電圧でブレイクダウンしているため、耐電圧はエッジ幅によらず、Field widthにのみ依存すると考えられる。

p型pエッジ Slim Edge		
FZ1、320/150 $\mu\text{m}$ 厚、p-stop/p-spray		
FZ3、150 $\mu\text{m}$ 厚、p-stop		
サンプル名	Field width	エッジ幅
Q	160	233
R	200	273
S	240	313
T	240	353
U	240	403
V	240	553
W	240	703
X	240	964

図 4.20: 耐電圧のField width依存性評価サンプル (p型pエッジサンプル)

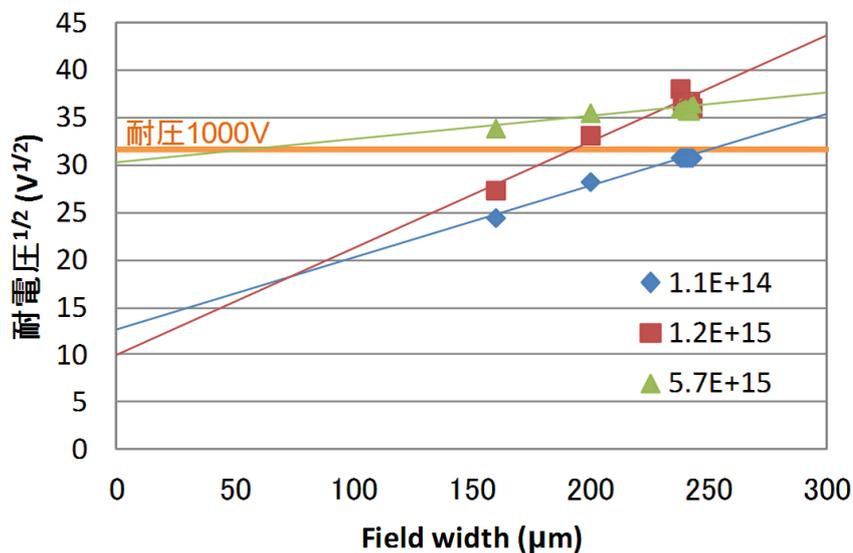


図 4.21: 耐電圧のField width依存性 (p型pエッジ、320 $\mu\text{m}$ 厚、p-stop、FZ1、Slim Edge サンプル)

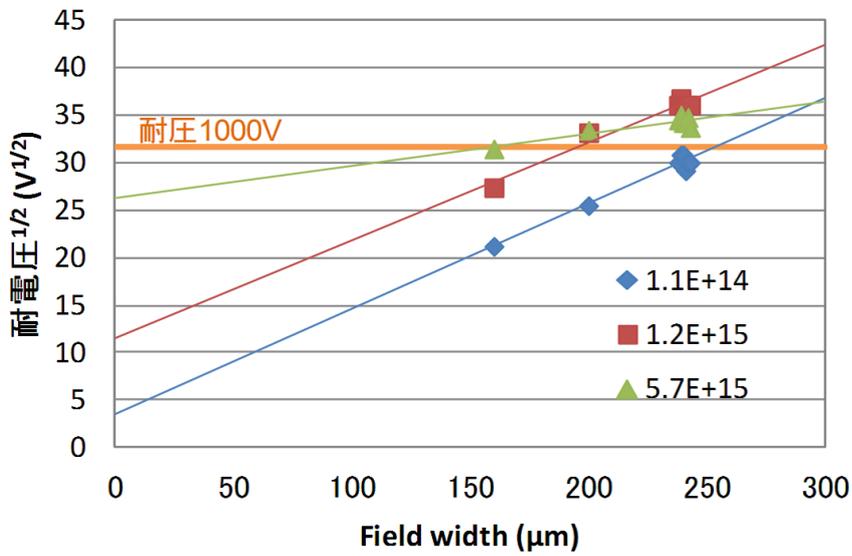


図 4.22: 耐電圧の Field width 依存性 (p 型 p エッジ、150 μm 厚、p-stop、FZ1、Slim Edge サンプル)

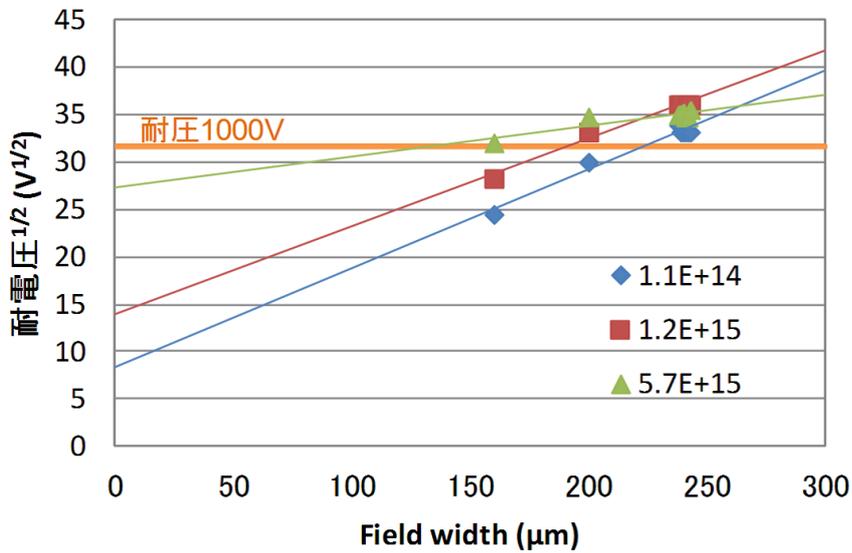


図 4.23: 耐電圧の Field width 依存性 (p 型 p エッジ、150 μm 厚、p-stop、FZ3、Slim Edge サンプル)

図 4.24 の縦軸は、p 型 p エッジと n 型 p エッジの耐圧 1000 V に必要な Field width の照射量依存性を示している。照射量が  $1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  を超えると、n 型基板は p 型に型反転するが、依然として n 型 p エッジでは狭い Field width でブレークダウンが起これ、n 型 n エッジは良い耐電圧を示している。そのため、表面は型反転せず n 型のままであると考えられる。 $1 \times 10^{13} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  までの低放射線量では、耐圧 1000 V に必要な Field width は  $450 \mu\text{m}$  以上であるが、全空乏化電圧が低いため運転電圧も低く設定され、運転電圧で空乏層がエッジに達することはない。従って、 $450 \mu\text{m}$  以上の Field width があればダイシングエッジでのブレークダウンを防ぐことができる。ゆえに、n 型、p 型基板 ( $200, 320 \mu\text{m}$  厚) とともに、1000 V の耐圧を得るために  $450 \mu\text{m}$  以上の Field width が必要となると結論付けた。

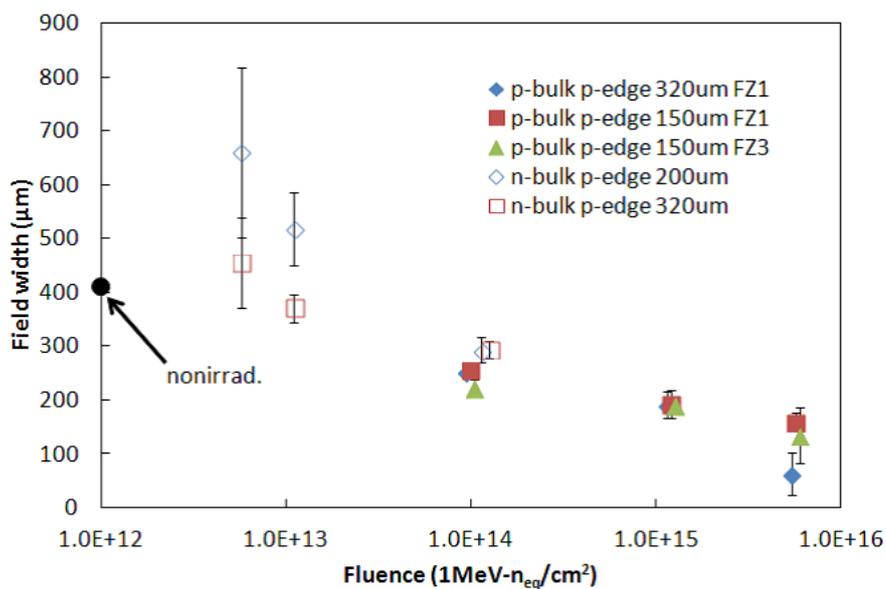


図 4.24: 耐圧 1000 V に必要な Field width の評価

## 4.4 Multi Guard Ring の耐電圧

Multi Guard Ring の本数や幅、位置の異なるサンプルの耐電圧を調査し、最適な構造を決定する。測定方法は、Multi Guard Ring サンプルに逆バイアス電圧を 0 ~ -2000 V まで印加し、暗電流を測定した。そして、得られた I-V 曲線から耐電圧を評価した。センサーには、10 M $\Omega$  の保護抵抗を介して逆バイアス電圧を印加している。温度は非照射が+20 °Cで照射後が-20 °Cで行った。アニーリングは、60 °C 80 分行った。測定に使用したサンプルを図 4.25 に示す。Slim Edge と同様に I-V 曲線の最小の傾きの 5 倍の点を耐電圧と定義した。

p型p/nエッジ Multi Guard Ring		
FZ1、320 $\mu$ m厚、p-stop		
FZ1、150 $\mu$ m厚、p-stop		
FZ3、150 $\mu$ m厚、p-stop		
サンプル名	Field width	Guard Ring
K-2ND	350	1GR-Narrow
L-2ND	350	1GR-Middke
M-2ND	350	1GR-Wide
N-2ND	350	2GR-Middle
O-2ND	350	2GR-Wide
P-2ND	350	3GR-Wide

図 4.25: Multi Guard Ring の耐電圧の評価サンプル

図 4.26 は、p 型 p エッジサンプルの耐電圧の照射量依存性である。照射前は、Multi Guard Ring (2GR、3GR) は Single Guard Ring より耐電圧が良かった。しかし、照射後には、違いが現れなかった。150  $\mu$ m 厚と 320  $\mu$ m 厚、FZ1 と FZ3 の違いに関わらず、同様の傾向を示した。

図 4.27 は、p 型基板、n エッジサンプルの耐電圧の照射量依存性である。p エッジの結果を薄く表示して比較を行った。照射後は、p エッジに比べ相対的に耐電圧が悪くなっている。これは、エッジ領域に p-n 接合が現れていることで理解できる。

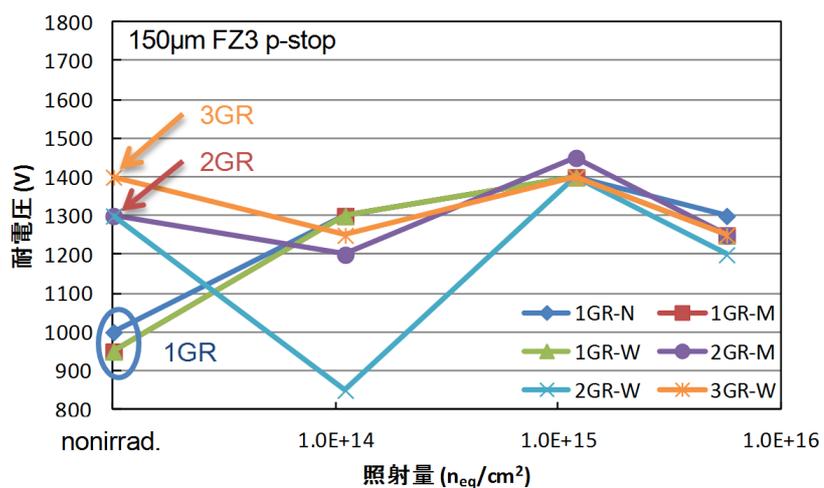
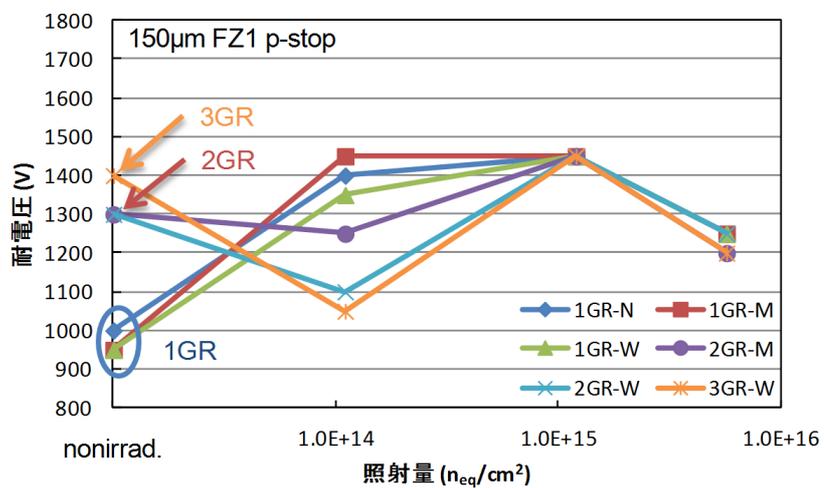
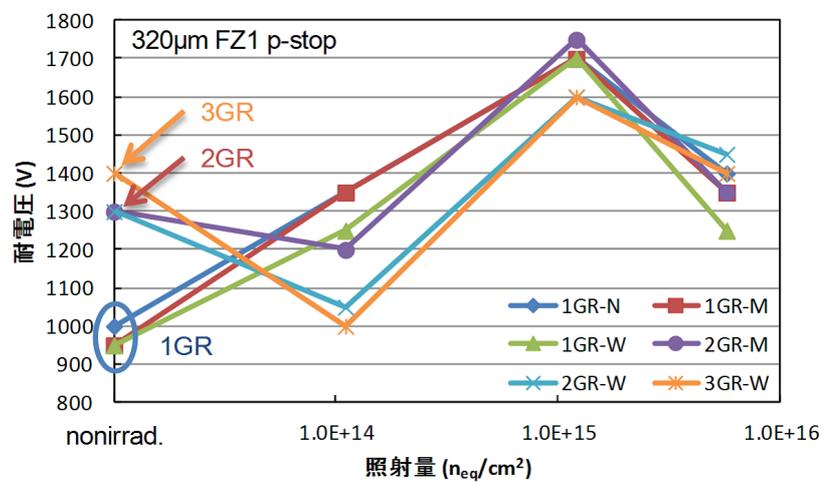


図 4.26: p 型 p エッジ Multi Guard Ring サンプルの耐電圧の照射量依存性

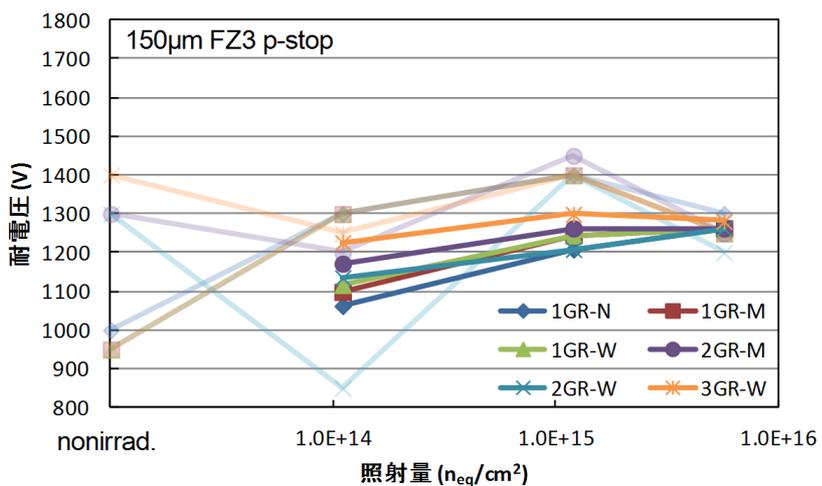
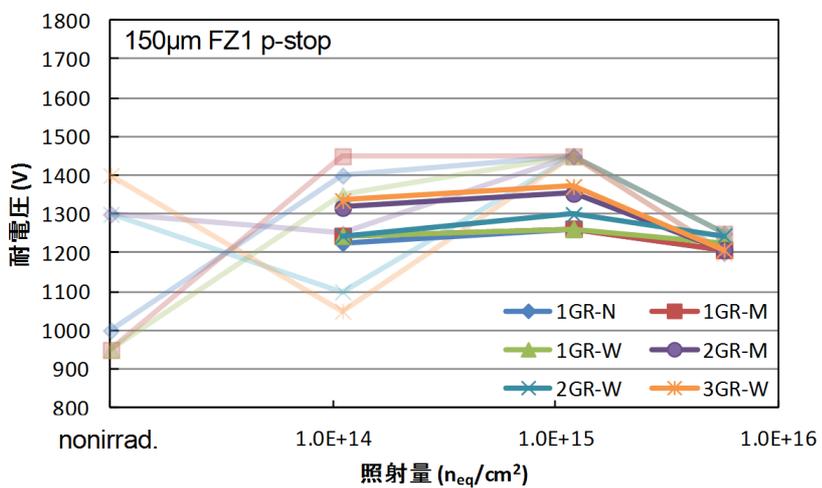
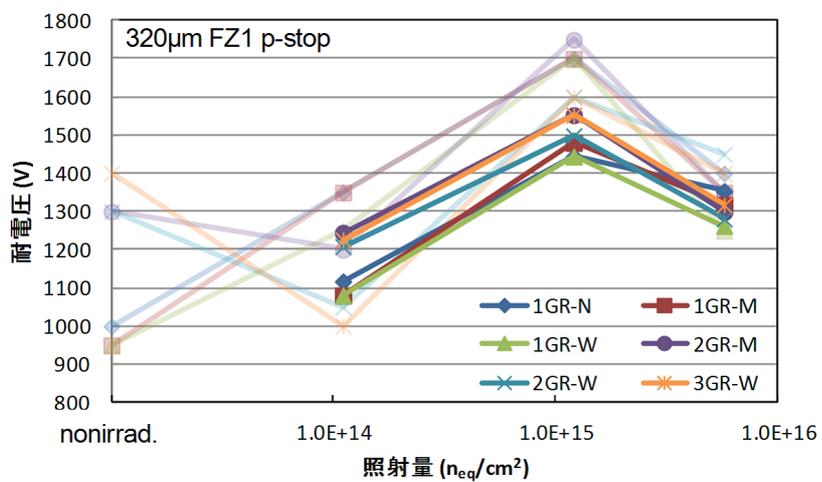


図 4.27: p 型 n エッジ Multi Guard Ring サンプルの耐電圧の照射量依存性

## 4.5 Punch Through Protection (PTP)

### 4.5.1 Punch Through Protection 測定

突発的なビームスプラッシュなどによる大電流をバイアスリングへ逃すことで、絶縁膜を保護する PTP 構造の有効性を評価した。バイアスリングと同電位の延長 Al の長さの異なる 5 種類の PTP 構造について調査した。バイアスリング-DC パッド間にテスト電圧  $V_{\text{test}} = 0 \sim -150 \text{ V}$  を印加し、電流を測定することでバイアスリング-DC パッド間の有効抵抗値を測定した (図 4.28)。PTP 機構が働きインプラントストリップとバイアスリング間で放電が起こると、この有効抵抗値が急激に減少するため PTP 機構の有効性を評価できる。測定は 4 本のストリップについて行い、有効抵抗値が  $20 \text{ k}\Omega$  以下になるか、 $V_{\text{test}}$  が  $-150 \text{ V}$  に達するまで行った。測定温度は  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、逆バイアス電圧は  $-300 \text{ V}$  で一定にしている。サンプルは、p 型基板、 $320 \mu\text{m}$  厚の BZ4D-1 ~ BZ4D-5、照射後のアニーリングは行っていない。

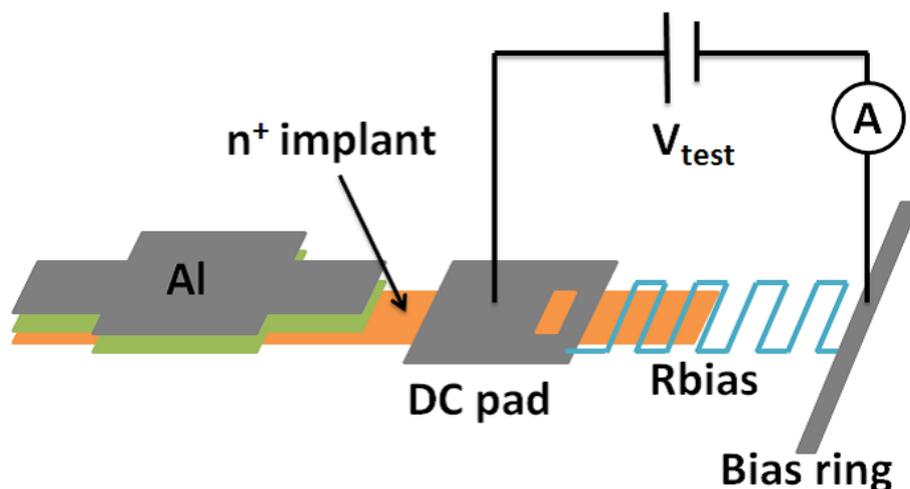


図 4.28: PTP 測定方法

### 4.5.2 Punch Through Protection の評価

PTP 構造が働いていないときは、有効抵抗値はバイアス抵抗の値  $1.5 \text{ M}\Omega$  となる。インプラント電極 (DC パッド)-バイアスリング間の電位差が大きくなると、ストリップ端とバイアスリング間に放電が起こり直接電流が流れ有効抵抗値は急激に減少する。図 4.29 ~ 4.33 に各構造の有限抵抗値のテスト電圧依存性を示す。ここで、有効抵抗値がバイアス抵抗の半分の値となった時のテスト電圧をパンチスルー電圧  $V_{\text{pt}}$  と定義した。

照射量が増加するに連れて、オンセット電圧と  $V_{\text{pt}}$  は上昇している。BZ4D-5 は  $V_{\text{pt}}$  が低く、カットオフも鋭く、達成抵抗値も低いなど最も良い性能を示した。つまり、延長 Al が広いほど低い  $V_{\text{pt}}$  と達成抵抗値を示す。延長 Al の最も長い BZ4D-5 は、 $V_{\text{pt}} < 100 \text{ V}$  で達成抵抗値  $20 \text{ k}\Omega$  以下、1 ストリップあたり約  $5 \text{ mA}$  (約  $10 \text{ kMIPS}/25\text{ns}/\text{strip}$ ) を示した。これは突発的なビームスプラッシュから AC 結合キャパシタを保護することが出来る性能である。

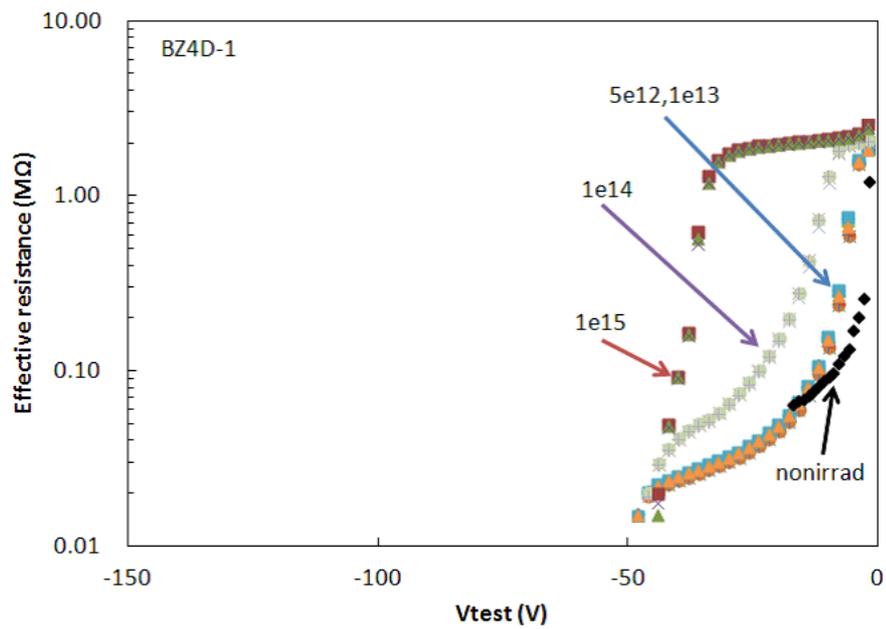


図 4.29: PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-1)

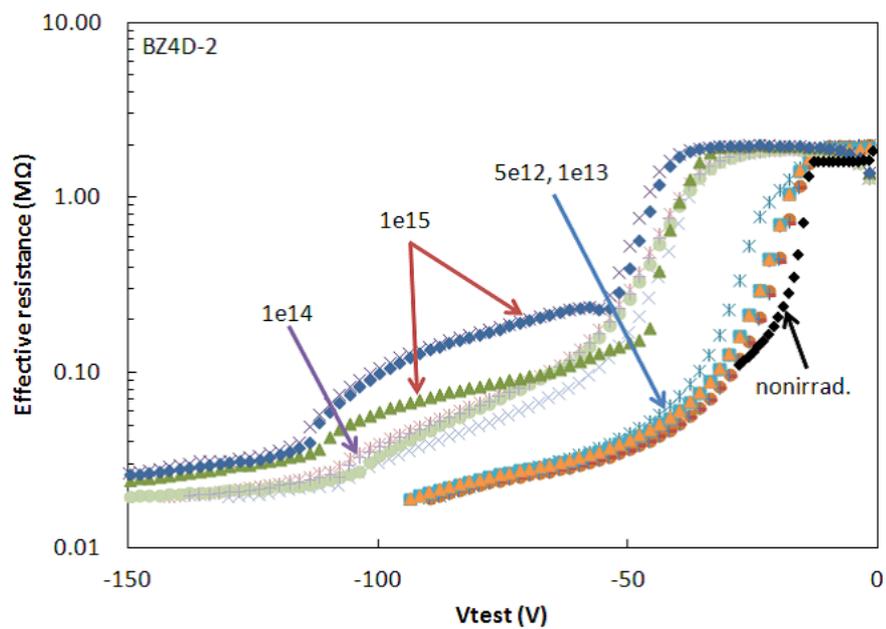


図 4.30: PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-2)

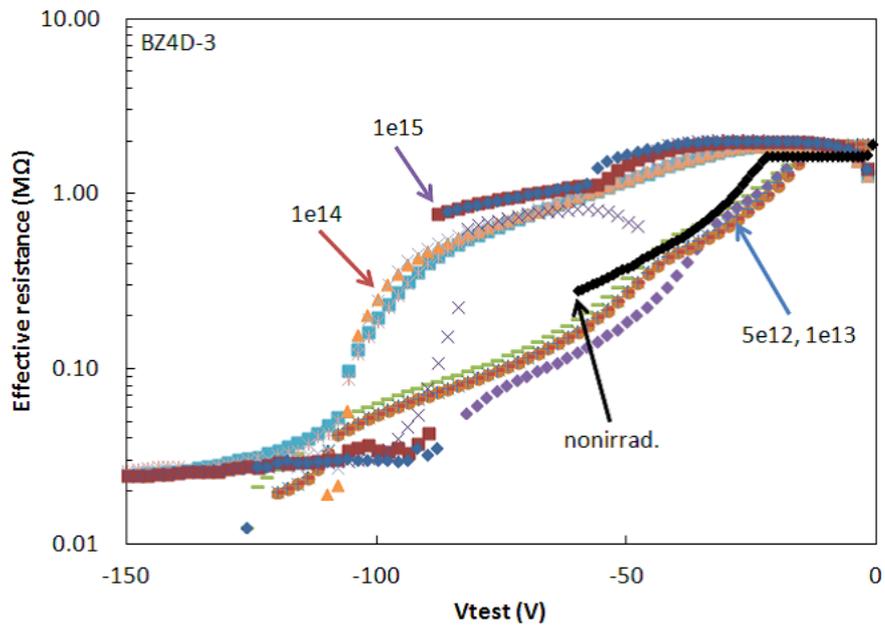


図 4.31: PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-3)

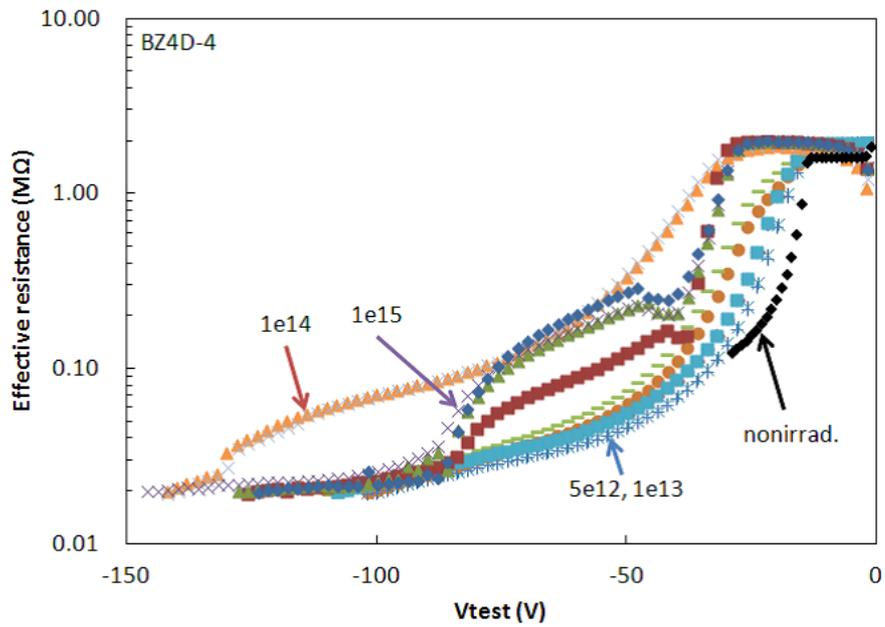


図 4.32: PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-4)

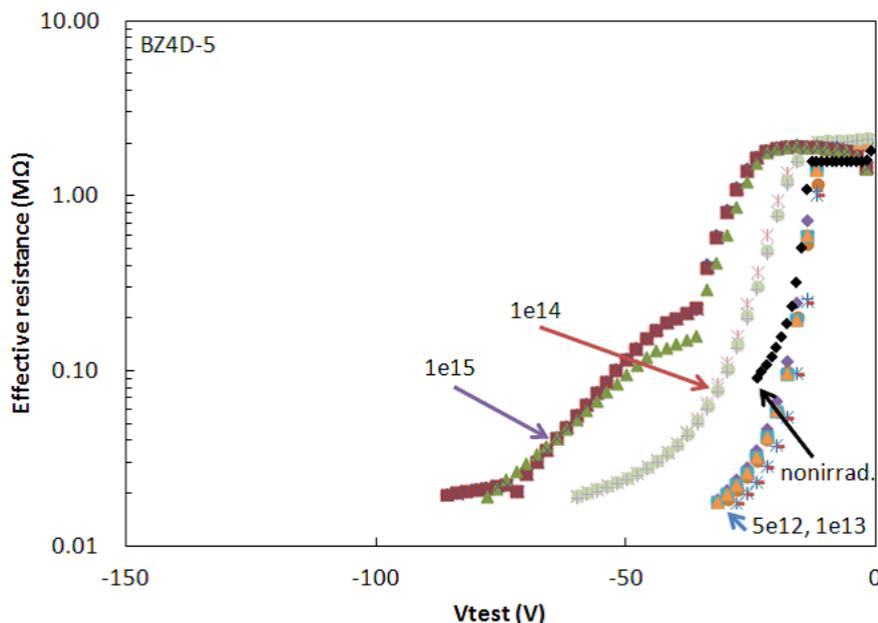


図 4.33: PTP 構造の有効抵抗値のテスト電圧依存性 (BZ4D-5)

## 4.6 ストリップ間抵抗

### 4.6.1 ストリップ間抵抗測定

ストリップ間抵抗の低下は、電極間分離の悪化やノイズの原因となるため 100 MΩ 以上の十分高い値となることが望まれる。そこで、ストリップ間抵抗を評価した。中央のストリップの DC パッドに ±5 V を印加し、左右のストリップの DC パッドとバイアスリング間の電圧を測定した。バイアス抵抗とストリップ間抵抗の抵抗分割回路となっており、測定された電圧からストリップ間抵抗  $R_{int}$  を評価できる。

$$R_{int} = R_{bias} \times \frac{5 - (V_{\pm 5} - V_0)}{V_{\pm 5} - V_0} \quad (4.1)$$

ここで、 $V_{\pm 5}$ 、 $V_0$  は ±5、0 V 印加したときの測定された電圧、 $R_{bias}$  はバイアス抵抗で実際に測定された値 2 MΩ とした。逆バイアス電圧は、0 ~ -1000 V まで変化させた。サンプルは、p 型基板、150 又は 320 μm 厚で、FZ1 又は FZ3 の 1 × 1 cm<sup>2</sup> ストリップセンサーを用いた。測定温度は -20 °C で、60 °C 65 分相当のアニーリングを行った。

### 4.6.2 ストリップ間抵抗の評価

図 4.35 は、75 μm 間隔、p-stop 幅 6 μm の典型的なサンプルのストリップ間抵抗の逆バイアス電圧依存性である。すべてのサンプルについて同様の傾向を示した。ストリップ間抵抗は、 $1 \times 10^{13}$  n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup> までは 100 GΩ 以上の高い抵抗値を示すが、照射量が増加すると減少する。これは、照射量の増加により暗電流が増加したため、ストリップ間抵抗が減少したと考えられる。

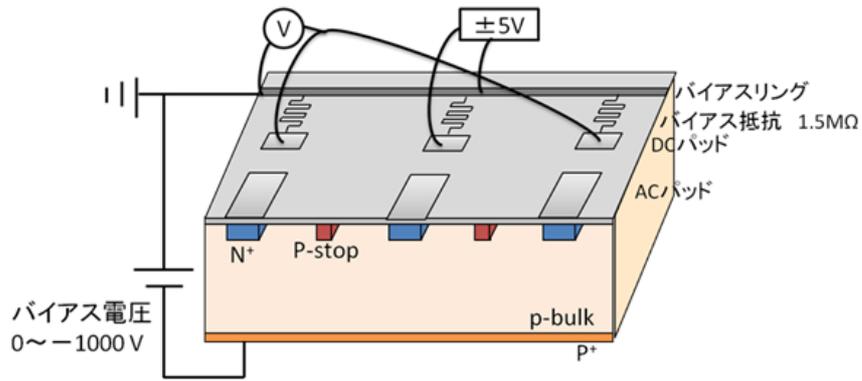


図 4.34: ストリップ間抵抗測定

図 4.36 に、 $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 、BZ3、75  $\mu\text{m}$  間隔 (W14-BZ3-75A-3-P2) の-200 Vにおけるストリップ間抵抗の温度依存性を示す。温度が上昇するとストリップ間抵抗が減少している。これは、温度の上昇により暗電流が増加したため、ストリップ間抵抗が減少したと考えられる。以上から、ストリップ間抵抗の減少は暗電流の増加が関係すると言える。暗電流とストリップ間抵抗の関係の TCAD による再現を 4.10 で述べる。

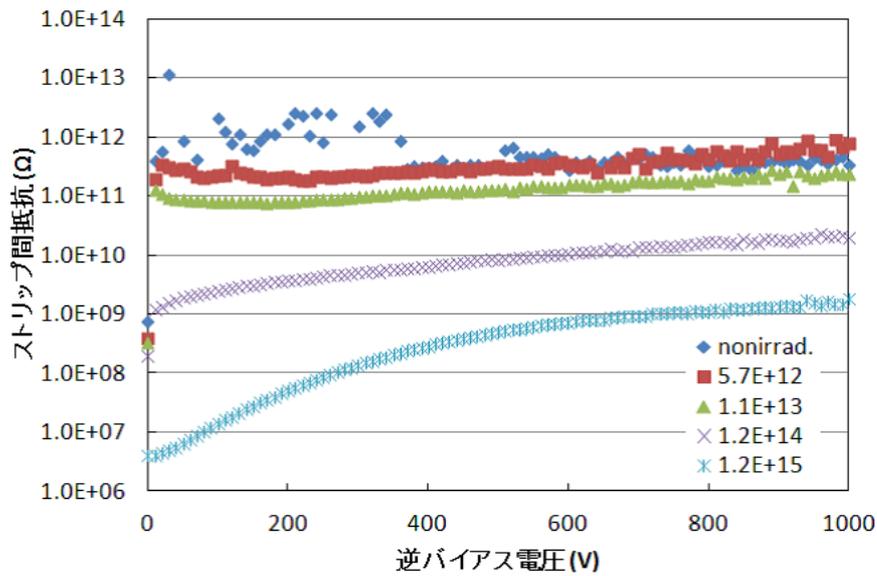


図 4.35: ストリップ間抵抗の評価 75  $\mu\text{m}$  間隔、p-stop 幅 6  $\mu\text{m}$

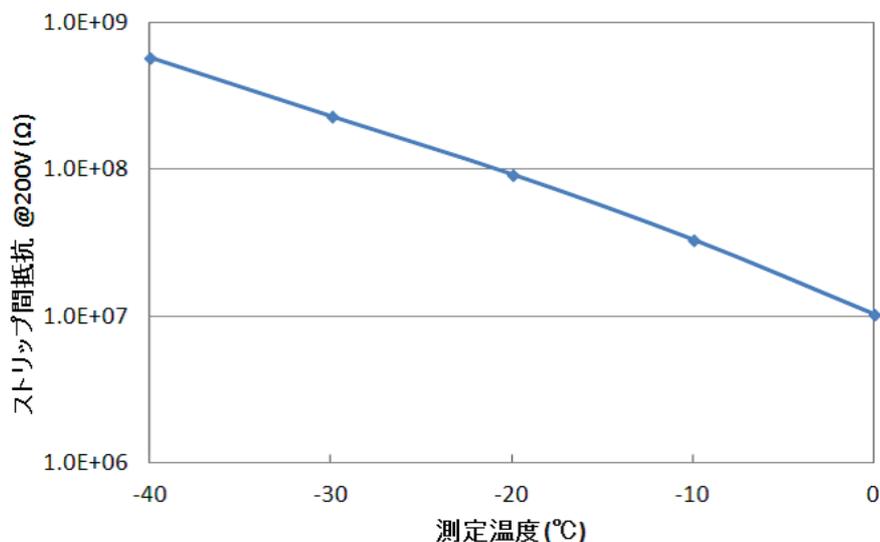


図 4.36: ストリップ間抵抗の温度依存性

## 4.7 マイクロ放電の発生点

ホットエレクトロン撮影を行って、マイクロ放電の発生点を特定した。赤外領域に感度を持つ裏面入射型 CCD カメラを用いて、マイクロ放電によって発熱して発生した赤外光を撮影することで、マイクロ放電の発生点を特定することが出来る。図 4.37 は、逆バイアス電圧が 1800 V と 1900 V のときの  $1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の照射を行った Multi Guard Ring サンプルの写真である。暗電流は約  $10 \mu\text{A}$  流れている。撮影は、約  $-10^\circ\text{C}$  で行った。アニーリングは、 $60^\circ\text{C}$  80 分行った。1800 V の時、始めにバイアスリング (右辺と下辺) でブレイクダウンが起こり、1900 V まで逆バイアス電圧が上がるとガードリング (左下の角) でブレイクダウンが起こった。図 4.38 に、Guard Ring や照射量の異なるサンプルのホットエレクトロン写真を示す。Guard Ring の数や幅に関わらず、全てのサンプルについて、始めにバイアスリングでブレイクダウンが起きた。原因については、TCAD を用いて調査した結果を 4.10 に述べる。

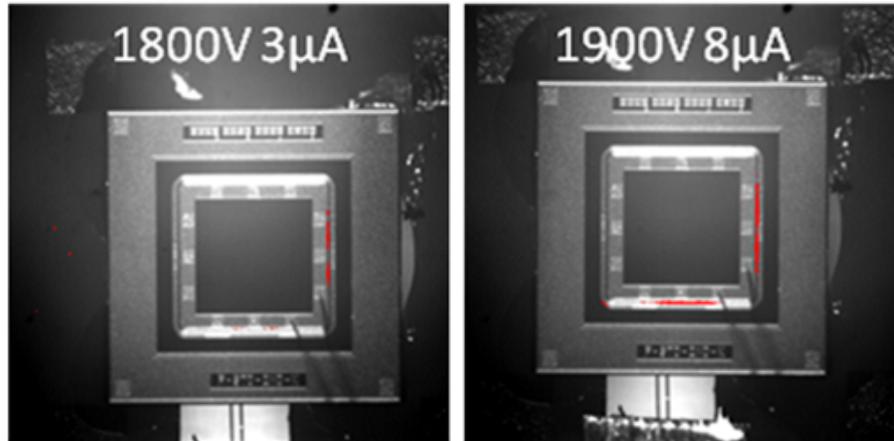


図 4.37: 1800 V、1900 V におけるホットエレクトロン撮影

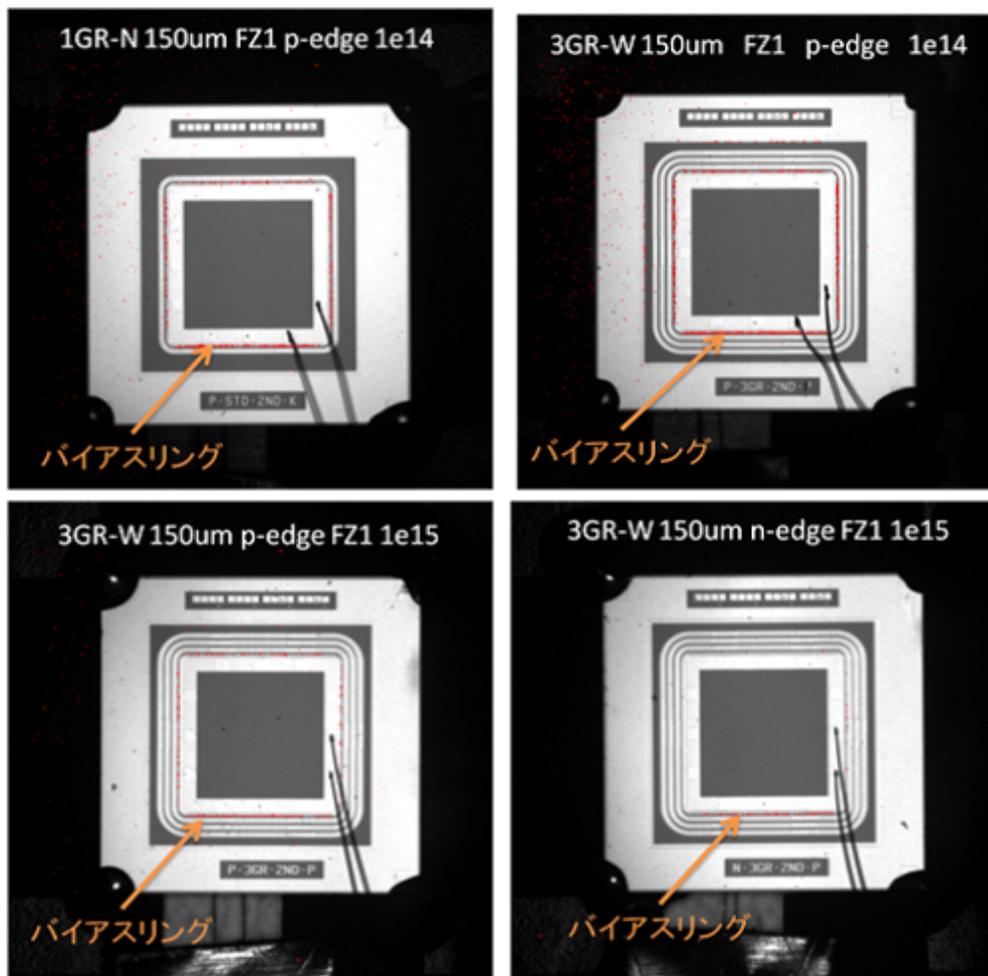


図 4.38: Multi Guard Ring サンプルのホットエレクトロン撮影

## 4.8 p-stop 電位

### 4.8.1 p-stop 電位測定

p-stop 付近でのマイクロ放電の発生を抑制するために p-stop 電位は低いことが望まれる。そこで、p-stop からパッドを引き出し、10 TΩ の抵抗を介して流れる電流を測定することで、p-stop の電位を評価した (図 4.40)。測定を行ったパッドは、ストリップを囲む p-stop の 4 隅とセンサー中央の p-stop に取り付けられている。逆バイアス電圧は、0 ~ -1000 V 変化させた。サンプルは、p 型基板、150 又は 320 μm 厚、FZ1 又は FZ3 の 1 × 1 cm<sup>2</sup> ストリップセンサーで、照射後のアニーリングは 60 °C 65 分相当行った。測定温度は、非照射が +20 °C、照射後が -20 °C で行った。測定に使用したサンプルを図 4.39 に示す

試験サンプル	放射線量 (1-MeV n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> )			
	5.7 × 10 <sup>12</sup>	1.1 × 10 <sup>13</sup>	1.2 × 10 <sup>14</sup>	1.2 × 10 <sup>15</sup>
p-stop, BZ2	40, 75A~C, 100	40, 75A~C, 100	40, 75A~C, 100	40, 75A~C, 100
p-stop, BZ3	40, 75A~E, 100	40, 75A~F, 100	40, 75A~F, 100	40, 75A~F, 100

図 4.39: p-stop 電位評価サンプル 各数字はストリップ間隔 (μm) を表す。A ~ F は、p-stop の位置が異なる (図 2.9 ~ 2.11)。

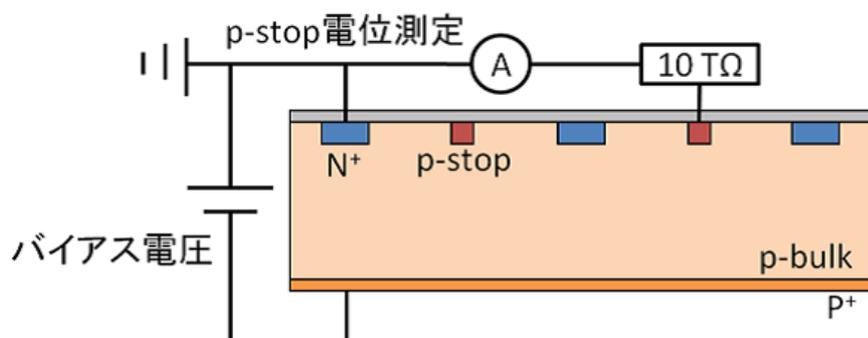


図 4.40: p-stop 測定 測定方法

### 4.8.2 p-stop 電位の評価

図 4.41 は、p-stop 電位の全空乏化電圧に対する割合の照射量依存性である。非照射時の各サンプルの違いは p-stop の幅によるもので、幅が広いほど p-stop 電位の全空乏化電圧に対する割合は大きくなっている。照射量が増えると p-stop 幅による違いが小さくなり、全空乏化電圧に対する割合は減少する。つまり、照射により p-stop の電位は表面のグラウンド電位に近づいている。これは、放射線損傷による表面電荷の増加によるもので 4.10 で詳しく述べる。

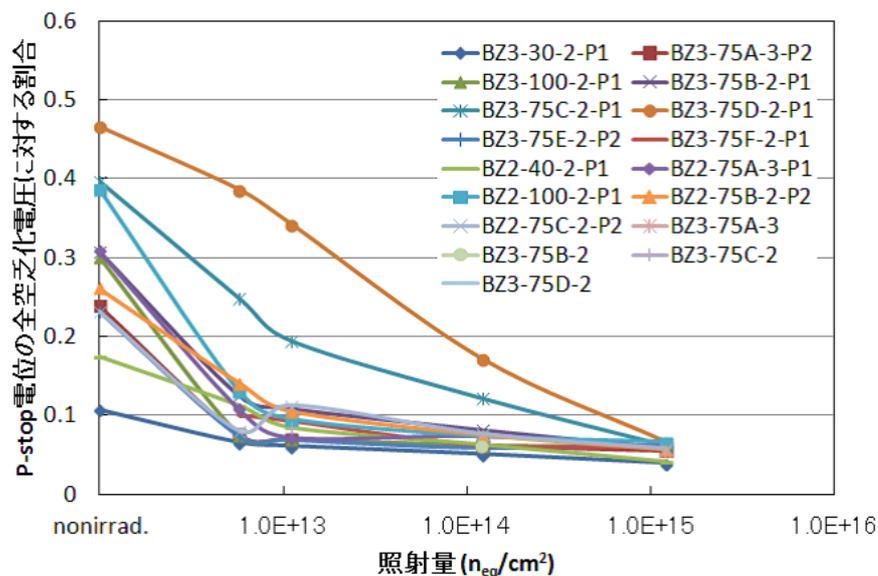


図 4.41: p-stop 電位の全空乏化電圧に対する割合

## 4.9 収集電荷量

### 4.9.1 $\beta$ 線を用いた収集電荷量測定

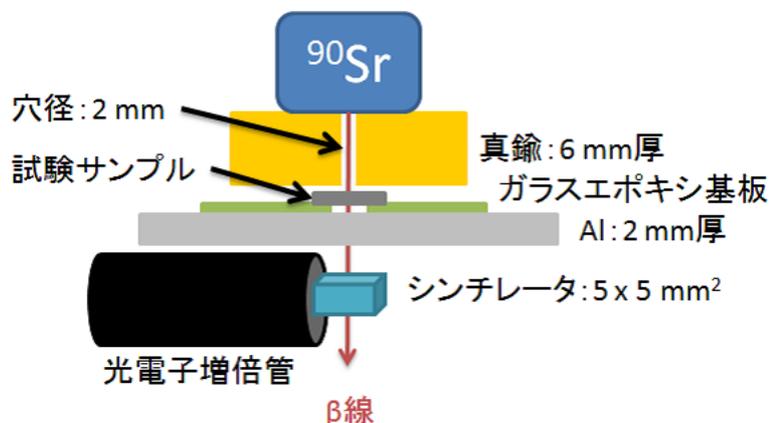


図 4.42:  $\beta$  線照射システム 断面図

収集電荷量は S/N に直接関係し、非常に必要な情報となる。そこで、 $^{90}\text{Sr}$  から出る  $\beta$  線を試験サンプルに入射し、収集される電荷量を測定した。 $\beta$  線源となる  $^{90}\text{Sr}$  のチェックソースを直径 2 mm の穴が開いた 6 mm 厚の真鍮の上に固定し、ここを通る  $\beta$  線のみを取り出す (図 4.42)。線源から出た  $\beta$  線は、センサーを通り、2 mm 厚の Al を通過した後に  $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$  のトリガー用シンチレータへ入射する。 $\beta$  線のエネルギーは最大 2.3 MeV の連続スペクトルとなっているが、Al 板により高エネルギーの  $\beta$  線のみ取り出しているため、ほぼ MIP (Minimum Ionizing Particle、最

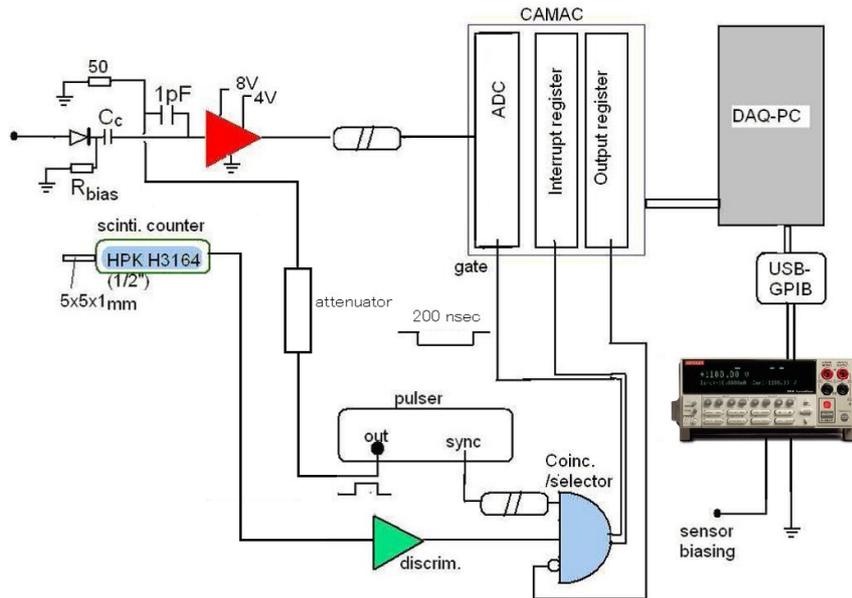


図 4.43:  $\beta$  線を用いた収集電荷量の測定方法

小電離粒子) と考えることが出来る。信号処理中に、入射した  $\beta$  線を破棄するためにゲートジェネレーターの VETO に CAMAC アウトプットレジスターからの出力を入れた (図 4.43)。CAMAC モジュールは、クレートコントローラーを介して、PC で制御した。信号レートを、数十 Hz に調整した。試験サンプルにより検出された信号は、アンプにより増幅されディレイを通過して CAMAC ADC へ入力する。

測定にあたって、まず光電子増倍管の動作電圧を決定するために、光電子増倍管のカウント数の動作電圧依存性を評価した。測定の際のディスクリミネータの値は十分低い 20 mV とした。動作電圧が低いと光電子増倍管の信号が十分に増幅されず、検出器で検出した粒子からの信号を落としてしまう。しかし、動作電圧が高すぎても熱ノイズによるカウントが急激に増加してしまう。そこで、熱ノイズが少なく可能な限り電圧の高い 1500 V を動作電圧とした (図 4.44)。また、1400 V でカウントがほとんど無く、1500 V でカウントが出るようにディスクリミネータの閾値を 70 mV と設定した

次に、ADC のゲート幅を決定する。ディレイを一定にして、ゲート幅を変化させて、ADC カウント数を測定した。300 nsec で最大になり、その後一定となった (図 4.45)。これは信号のパルス幅が約 300 nsec であることから分かる (図 4.46)。また、ENC (Equivalent Noise Charge) のゲート幅依存性を測定した。ゲート幅が広くなるに連れて、ENC も大きくなった (図 4.47)。これはゲート幅が広いとその分長い時間ノイズを拾うので予想通りの結果である。以上から、ADC カウント数が多く ENC が比較的少ない 300 nsec をゲート幅とした。

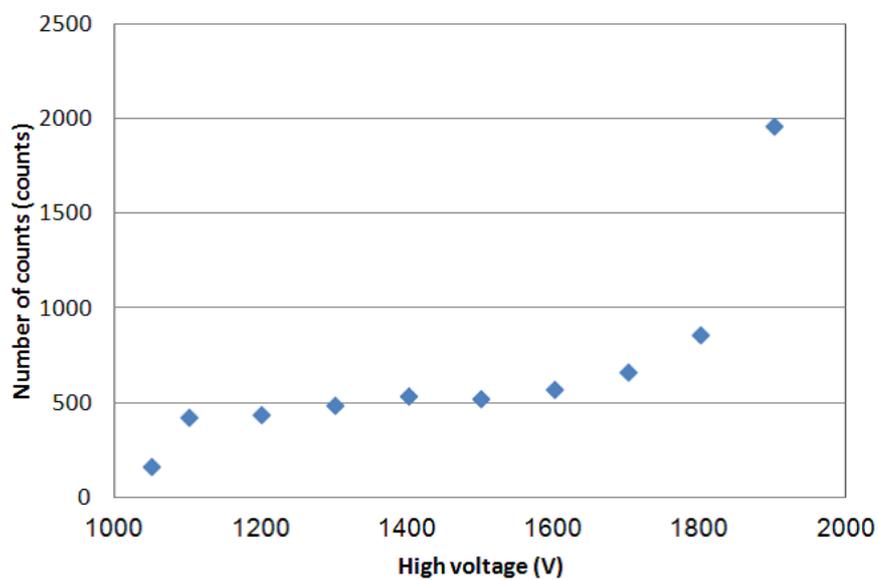


図 4.44: 光電子増倍管の High voltage の決定

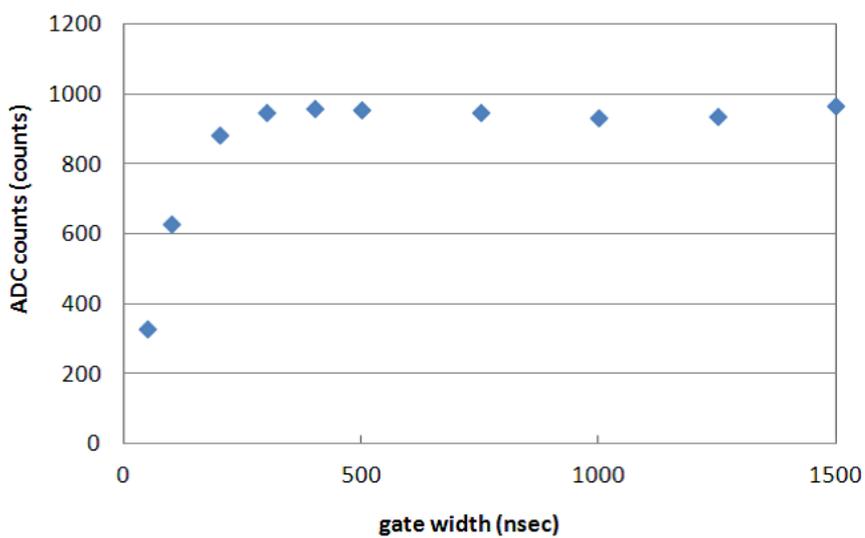


図 4.45: ADC カウントのゲート幅依存性

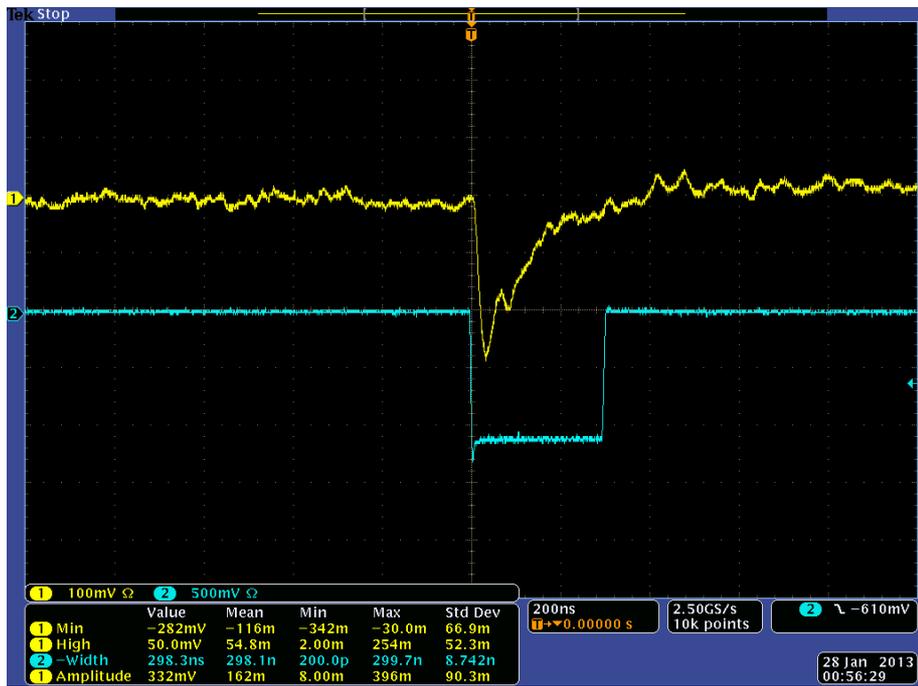


図 4.46: 1e14、150  $\mu\text{m}$  厚、スタンダードダイオード、1000 V の信号波形

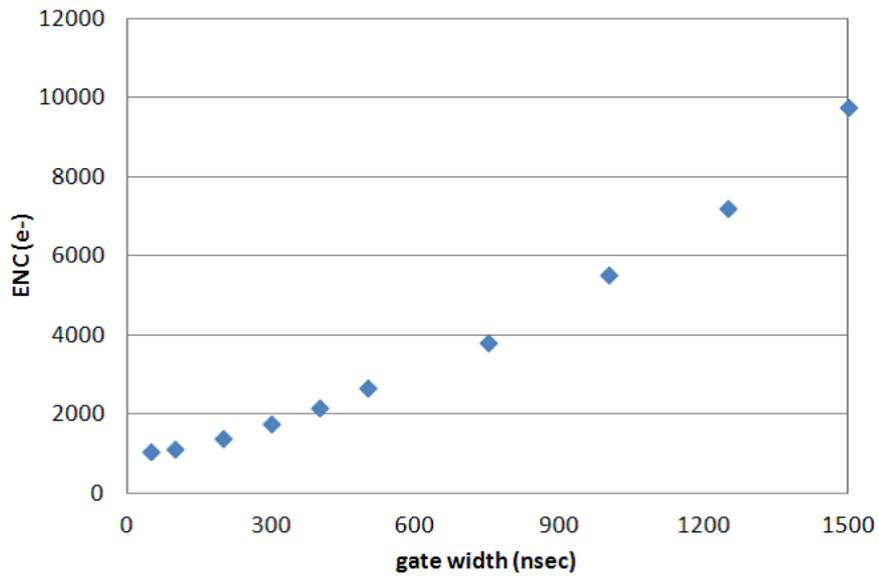


図 4.47: ENC のゲート幅依存性

アンプのゲインを測定を行った。アンプは同じ物を2つ用いた。測定は、パルスジェネレーターで生成した0.7～5 mVの矩形波を1 pFのコンデンサーに入力し、アンプを通してADCで読み出した。1 mV入力すると1 pFのコンデンサーにより1 fCの電荷に変換される。アンプのゲインは、1 fC当たり215.43 counts、226.53 countsとなった(図4.48)。それぞれ1 ADC count 当たりになると4.64 aC、4.41 aCとなった。

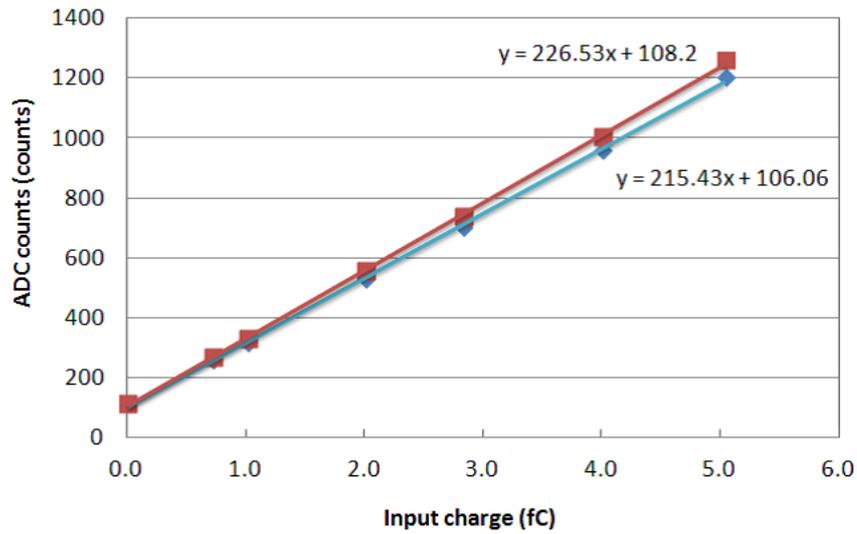


図 4.48: アンプのゲイン測定

収集電荷量測定は、センサーに逆バイアス電圧を0～-1000 Vまで印加し、収集された電荷をCAMACのチャージ積分型ADCで読みだした。測定サンプルの照射量は、 $1.1 \times 10^{14}$ 、 $1.2 \times 10^{15}$ 、 $5.7 \times 10^{15}$  neq/cm<sup>2</sup>と非照射である。測定温度は、非照射が+20℃、照射後が-20℃。測定には、Single Guard Ringとモニターダイオードの150、320 μm厚サンプルを用いた。アニーリングは、Single Guard Ringは60℃80分、モニターダイオードは60℃65分相当行った。図4.49に、非照射で320 μm厚の逆バイアス電圧-1000 Vの時のADC分布を示す。フィット関数は、ガウス関数とランダウ関数のコンボリューション関数である。逆バイアス電圧が0 Vのときをガウス関数でフィットしペDESTALとした。0 VのときのペDESTALのピークと各電圧でフィットしたコンボリューション関数の最頻値の差を収集電荷量と定義した。

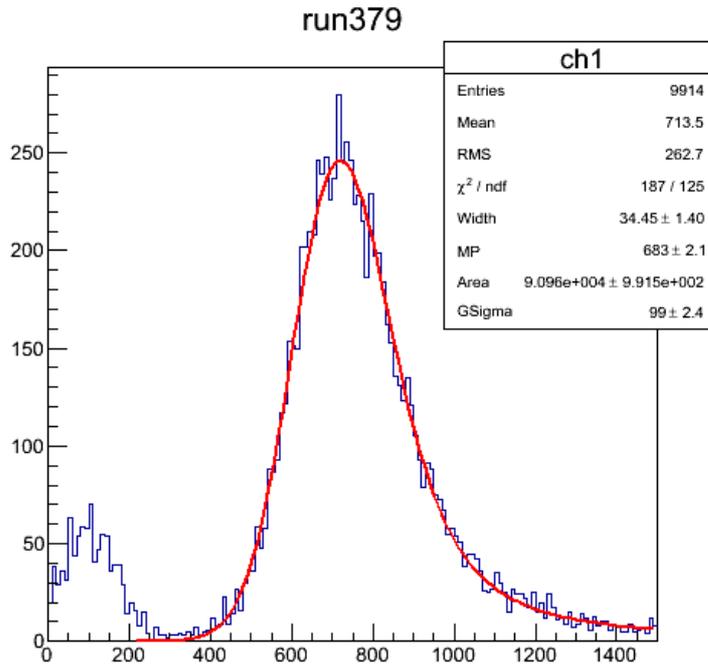


図 4.49: 320  $\mu\text{m}$  厚の非照射サンプル 1000 V における収集電荷量の ADC 分布

図 4.50 に各照射量ごとの電荷収集効率を示す。電荷収集効率は、各逆バイアス電圧での電荷収集量を、非照射の 320  $\mu\text{m}$  厚センサーの全空乏化時の収集電荷量で規格化した値である。塗りつぶしてあるのが 320  $\mu\text{m}$  厚で白抜きが 150  $\mu\text{m}$  厚である。誤差棒は、サンプル間の標準偏差とした。収集電荷量は、空乏層の厚さに比例するため、非照射において 320  $\mu\text{m}$  厚の収集電荷量は 150  $\mu\text{m}$  厚の約 2 倍になっている。

図 4.51 に逆バイアス電圧=-900 V における、収集電荷量の放射線量依存性を示す。非照射の 320  $\mu\text{m}$  厚センサーの全空乏化時の収集電荷量を典型的な値約 24500  $e^-$  として規格化した。放射線量が増加すると収集電荷量は減少している。これは、放射線損傷によりバルク部に格子欠陥が形成され電子捕獲が起き、易動度も減少するためであると考えられる。低放射線量では、320  $\mu\text{m}$  厚の方が収集電荷量が多いが、約  $3.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  以上の高放射線量では同程度となった。

図 4.52 に、浜松ホトニクス (HPK) センサーと MICRON センサーの逆バイアス電圧=-900 V の時の収集電荷量を示す [13]。浜松ホトニクスのセンサーは 320  $\mu\text{m}$  厚、MICRON センサーは 300  $\mu\text{m}$  厚である。MICRON センサーは、リバプールグループによって評価された。浜松ホトニクスセンサーは、既に評価済みのセンサーである。MICRON は 26 MeV、浜松ホトニクスは 70 MeV 陽子線を照射しているが、1 MeV の中性子相当に換算してある。リバプールのデータは、未アニーリングを含むために  $20 \pm 10\%$  少なく見積もられている。今回評価を行った 320  $\mu\text{m}$  センサーは、 $1.1 \times 10^{14}$ 、 $1.2 \times 10^{15}$ 、 $5.7 \times 10^{15}$  において、それぞれ約 23300、18800、6500  $e^-$  となっており、これらの結果と同程度となった。

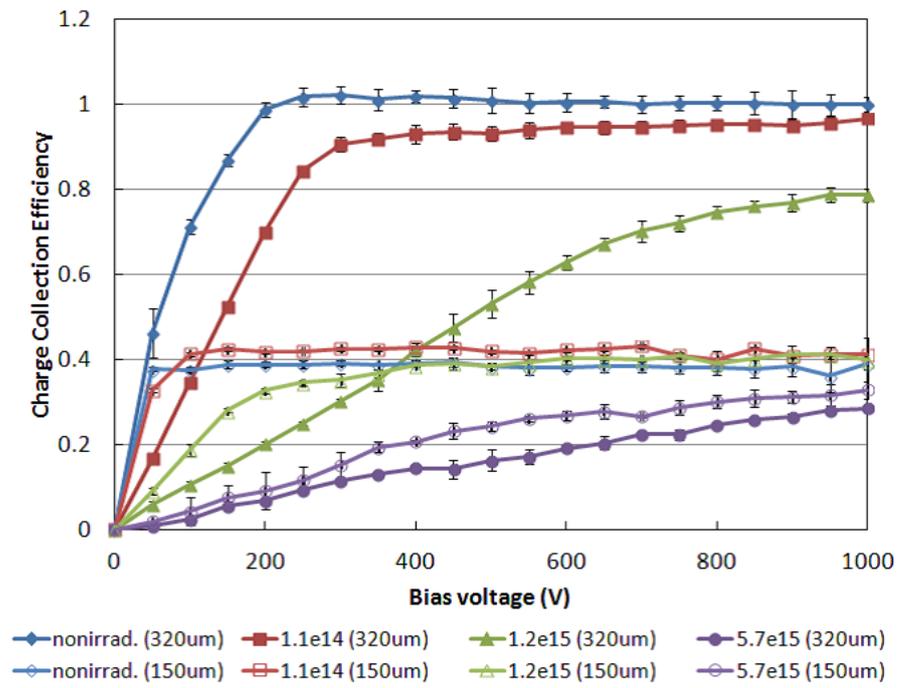


図 4.50: 電荷収集効率の逆バイアス電圧依存性

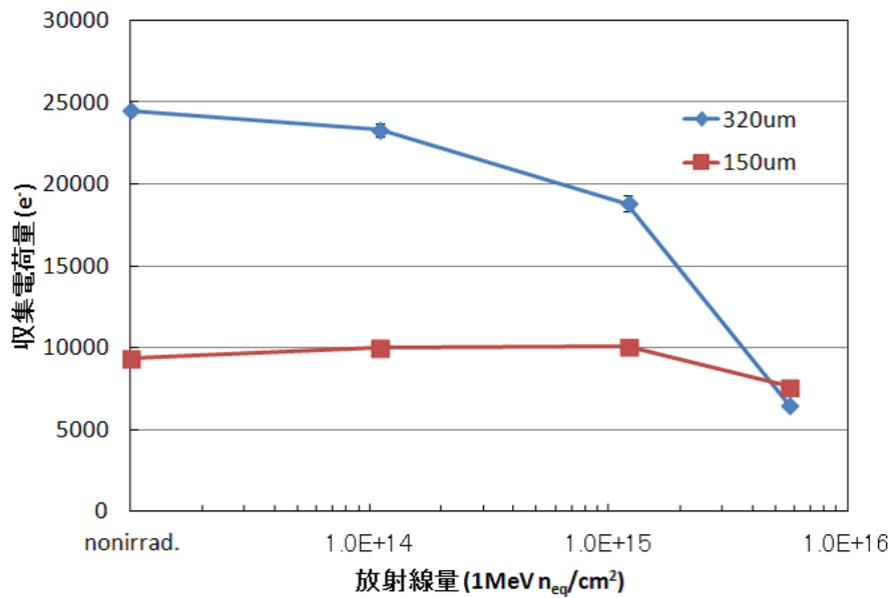


図 4.51: 320  $\mu$  厚と 150  $\mu$ m 厚センサーの収集電荷量の放射線量依存性 (900 V)

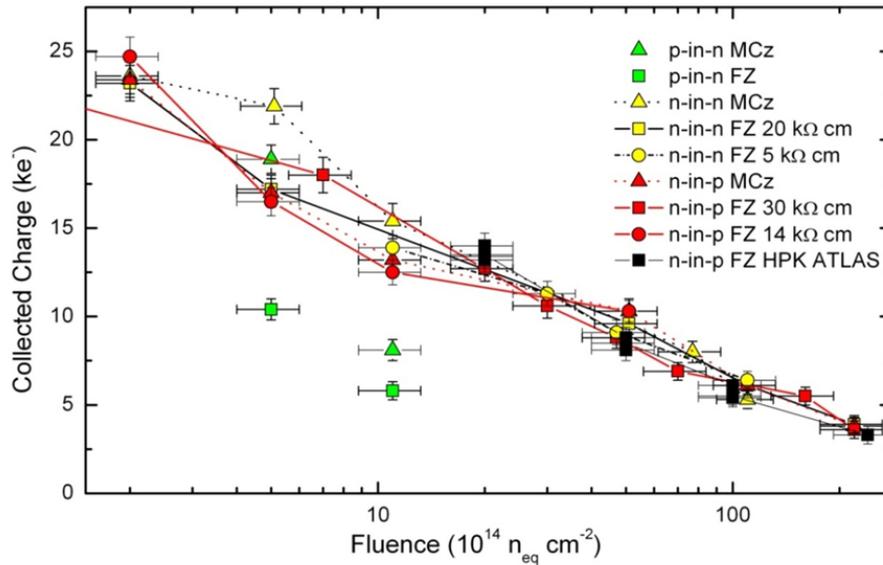


図 4.52: 浜松ホトニクスセンサー (320  $\mu\text{m}$  厚) と MICRON センサー (300  $\mu\text{m}$  厚) の収集電荷量 (900 V) [13]

## 4.10 TCAD による放射線損傷の評価

TCAD (Semiconductor Technology Computer-Aided Design tool) は、半導体のプロセスとデバイスを再現するシミュレーターである。TCAD を用いて、シリコンセンサーをシミュレーションし、放射線損傷を再現した。TCAD は日本の半導体メーカーが共同で設立した SELETE (半導体先端テクノロジーズ) の ENEXSS 5.5 を使用した。デバイスシミュレーターは、HyDeLEOS を使用した。n-in-p シリコンセンサーの構造は以下のように設定した。

- p 型基板、150  $\mu\text{m}$  厚
- ストリップ間隔：75  $\mu\text{m}$
- p-stop 濃度： $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
- 有効不純物密度  $N_{\text{eff}}$ ： $4.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
- 全空乏化電圧：80 V (150  $\mu\text{m}$  厚)

放射線損傷は以下のように仮定を行い設定した。

- アクセプタとして振る舞うエネルギー準位 → バルク抵抗の減少
- 暗電流の増加 → Shockley Read Hall モデル (SRH モデル) の調整
- 表面電荷 → 表面電荷の Fixed oxide charge の増加

### 4.10.1 暗電流

式 1.15 よりこのセンサーモデルでの放射線損傷後の暗電流を計算する。損傷係数を  $4 \times 10^{-17} \text{ A/cm}$ 、放射線量を  $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  とすると、 $(4 \times 10^{-17} \text{ A/cm}) \times (1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2) \times (0.0075 \text{ cm} \times 0.0150 \text{ cm} \times 0.0001 \text{ cm}) = \text{約 } 4.5 \text{ nA}$  と計算される。TCAD でこの電流値を再現するために、SRH

モデルのパラメータを変化させた。SRH モデルとは、格子欠陥等によるエネルギー準位での電子と正孔の捕獲・放出を記述するモデルである。SRH モデルによる電子・正孔の生成再結合  $U_{SRH}$  は以下で与えられる。

$$U_{SRH} = \frac{n_i^2 - pn}{\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + n_i)} \quad (4.2)$$

$$\tau_{n,p} = A_{n,p} \left( \tau_{min}^{n,p} + \frac{\tau_{max}^{n,p} - \tau_{min}^{n,p}}{1 + \left(\frac{N}{N_t^{n,p}}\right)^{B_{n,p}}} \right) \quad (4.3)$$

ここで  $n_i$  は真性キャリア濃度、 $n$ 、 $p$  は電子・正孔濃度、 $\tau_{max,min}^{n,p}$  は電子・正孔のライフタイムの最大値と最小値、 $N$  は不純物濃度 (ドナーとアクセプタの和)、 $N_t^{n,p}$  は再結合中心の密度、 $A_{n,p}$ 、 $B_{n,p}$  は定数である。この  $A_n$ 、 $A_p$  を変化させることで放射線損傷後の暗電流の増加を再現した。逆バイアス電圧-200 V における  $A_n$ 、 $A_p$  を変化させた時の暗電流の変化を図 4.53 示す。 $A_n$ 、 $A_p$  が  $10^{-8}$  以下になると暗電流は約 7 nA で飽和する。 $A_n$ 、 $A_p$  を変化させることにより、暗電流を 3 桁変化させることが出来た。

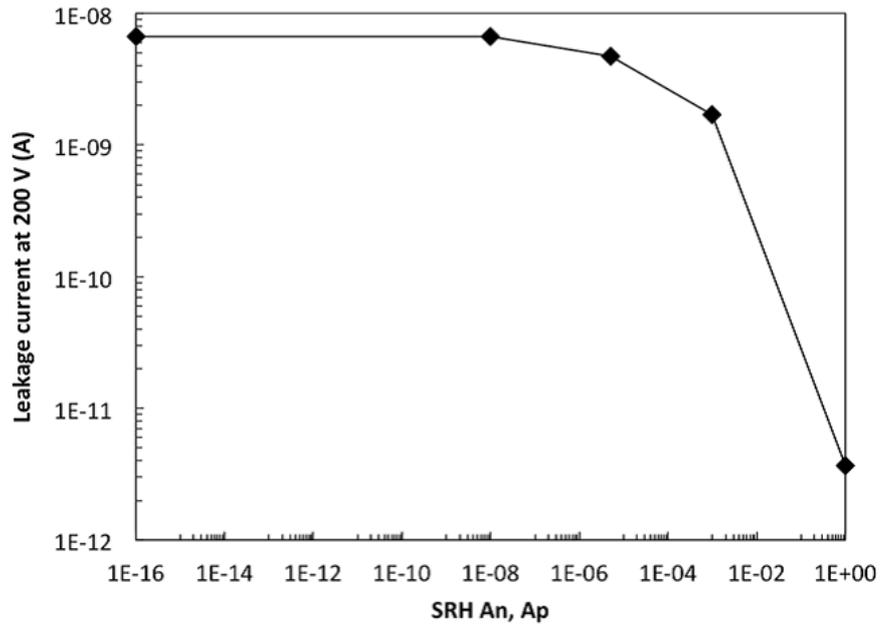


図 4.53:  $A_n$ 、 $A_p$  の調整による暗電流の変化

次に、暗電流の逆バイアス電圧依存性を調べた。図 4.54、4.55 に暗電流の逆バイアス電圧依存性を示す。 $A_n$ 、 $A_p$  のデフォルト値は 1 で、チューニング後は  $A_n$ 、 $A_p$  を  $10^{-8}$  とした。デフォルト値では、逆バイアス電圧-200 V のとき約 3.7 pA、チューニング後は約 6.7 nA となった。これにより、理論値とほぼ同一レベルの電流値が再現でき、放射線損傷後の I-V 特性を再現できた。

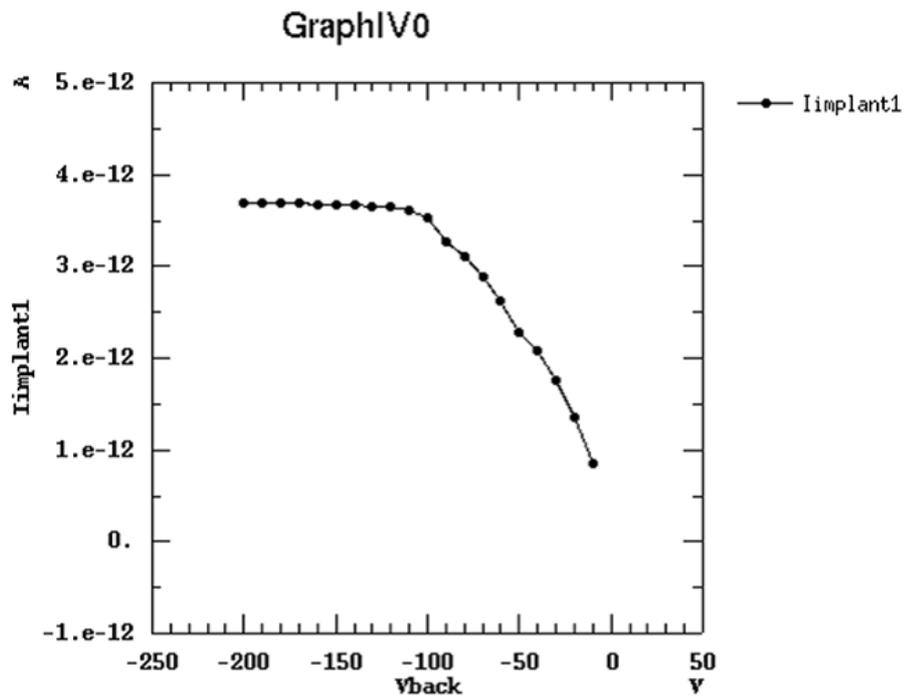


図 4.54: デフォルト値での IV 特性

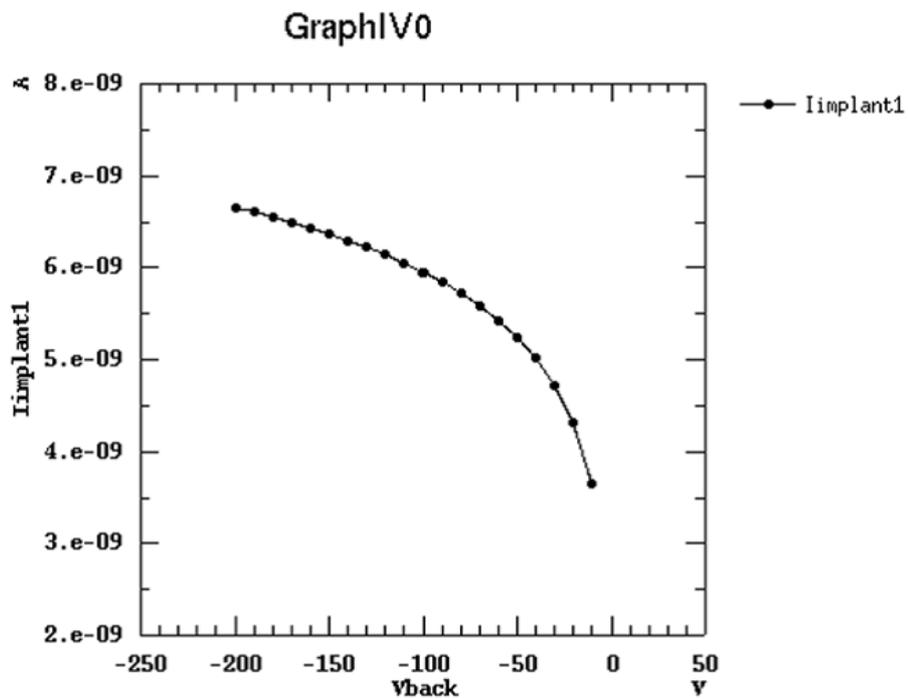


図 4.55: チューニング後の IV 特性

次に放射線損傷によるアクセプタ準位の増加を再現する。非照射では、 $A_n$ 、 $A_p=1$ 、有効不純物密度は  $4.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の照射後は  $A_n$ 、 $A_p=1 \times 10^{-8}$ 、有効不純物密度は  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  とした。図 4.56 は逆バイアス電圧-200 V の時のバルク中の電位で、黒が非照射、緑が照射後を表している。有効不純物密度は、TCAD 上でのバルク部の抵抗率と全空乏化に必要な逆バイアス電圧から算出した。照射後は、逆バイアス電圧-200 V において、空乏層が約  $125 \mu\text{m}$  までしか広がっていない様子が分かる。このときの暗電流は、照射後は非照射と比較して 3 桁程度上昇している (図 4.57)。以上より、放射線損傷による暗電流の増加と全空乏化電圧・不純物密度の増加は再現できた。

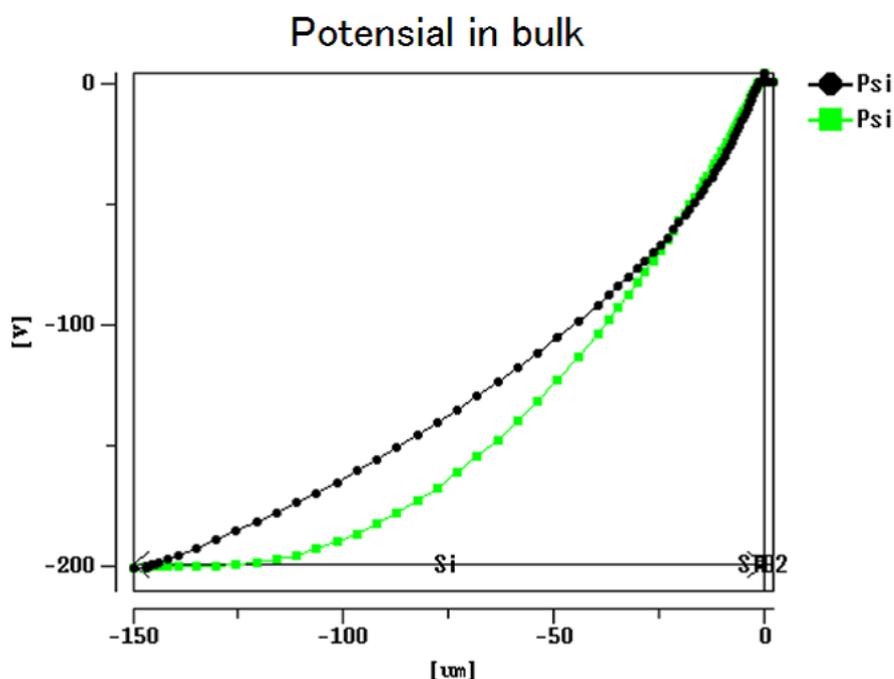


図 4.56: 逆バイアス電圧-200 V の時のバルク中の電位 縦軸は電位、横軸はバルクの深さを表す。

#### 4.10.2 ストリップ間抵抗

試験サンプルの測定結果から、放射線損傷によりストリップ間抵抗が減少することが分かった。これを理解するために、TCAD を用いてストリップ間抵抗の変化を再現した。図 4.58 に、逆バイアス電圧-200 V におけるストリップ間抵抗の暗電流依存性を示す。暗電流の増加により、ストリップ間抵抗が減少することが分かる。ストリップ間抵抗は基本的に空乏化したシリコン基材の抵抗であるが、放射線損傷によりストリップ間の暗電流が増加するため実際のストリップ間抵抗は減少していると考えられる。

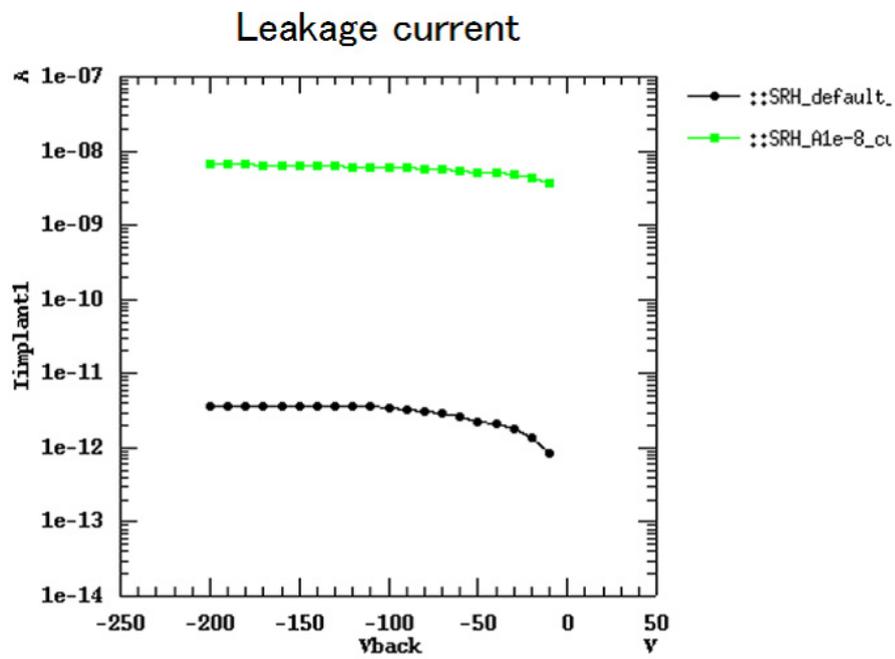


図 4.57: 放射線損傷による暗電流の増加

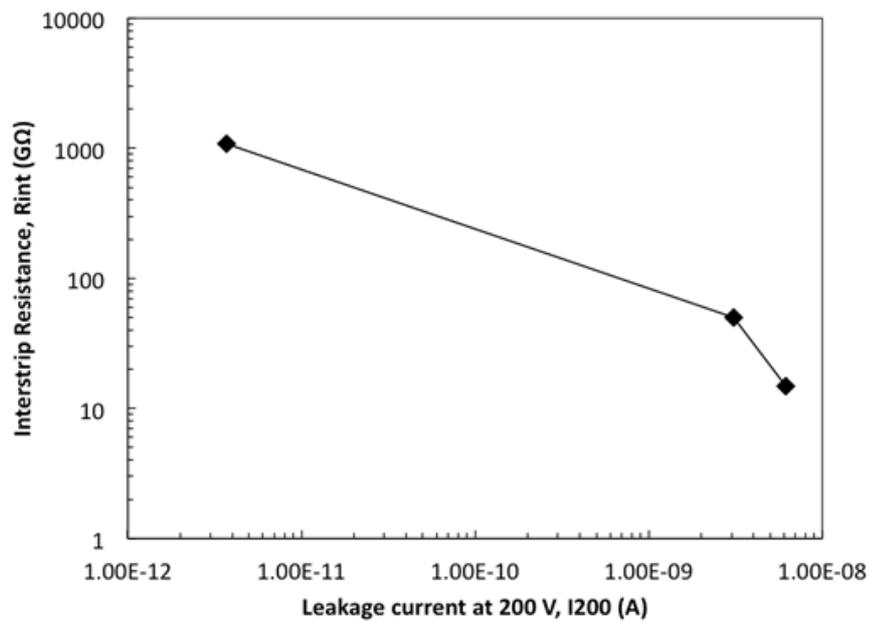


図 4.58: ストリップ間抵抗の暗電流依存性

### 4.10.3 p-stop 電位とブレークダウンポイント

放射線損傷により、p-stop 電位が表面電位に近づくことと常にバイアスリング (n インプラント) でブレークダウンが起こることを理解するために、表面電荷を変化させてシミュレーションを行った。まず、裏面電極には逆バイアス電圧-200 Vを印加し、p-stop の電位を評価した。図 4.59 はバルク中の電位分布である。左上、右上がインプラントストリップ、中央上が p-stop、下辺が裏面電極を表している。左図が非照射で、 $A_n, A_p=1$ 、有効不純物密度は  $4.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、表面電荷は  $+1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 、右図は  $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の照射後で、 $A_n, A_p=1 \times 10^{-8}$ 、有効不純物密度は  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、表面電荷は  $+1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  とした。p 型センサーは、典型的に製造過程で  $+1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  の表面電荷を蓄積することが知られているため、非照射時の表面電荷量を  $+1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  とした。放射線損傷後は、p-stop 電位が表面電位に近くなっており測定結果を再現することができた。

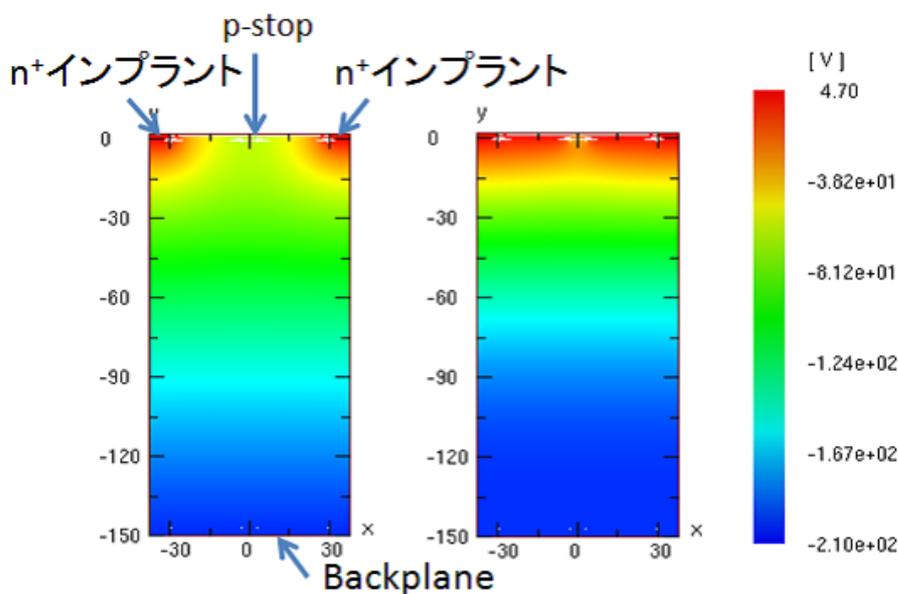


図 4.59: 放射線損傷によるバルク中の電位、p-stop 電位の変化

表面電荷の Fixed oxide charge は正であるが、Interface trapped charge は正負どちらも取り得るため、表面全体は正負どちらも取り得る。そこで、表面電荷の符号の違いによる p-stop 電位の違いを調べた。図 4.60 に表面電荷の違いによるセンサー表面の p-stop やインプラントストリップの電位の違いを示す。黒が表面電荷  $+1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 、青が  $-1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、緑が  $+1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  の時の表面電位である。正の電荷は p-stop 電位が表面電位に近づき、負の電荷は電位が深くなった。測定結果より p-stop 電位は表面電位に近づくので、放射線損傷による表面電荷の蓄積は正の電荷であることが分かった。

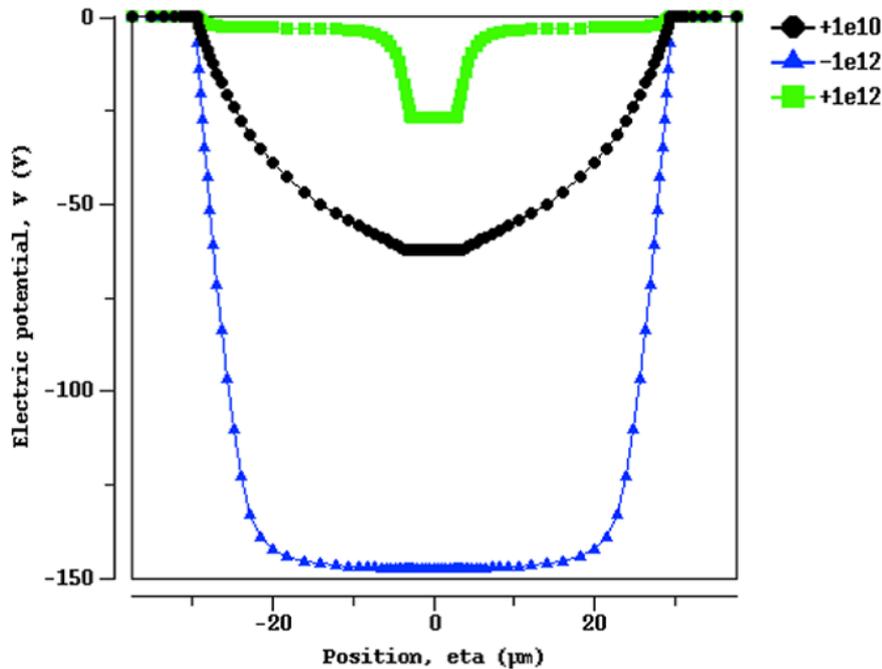


図 4.60: 表面電荷の違いによる p-stop の電位の違い

次に、ブレークダウンポイントが常にバイアスリング (n インプラント) であることを再現する。非照射と照射後の正または負の電荷が蓄積した際の表面の電場強度を図 4.61 に示す。正の電荷が蓄積すると p-stop (p インプラント) 付近の電場強度が最大となった。これでは、ホットエレクトロン撮影の n インプラントでブレークダウンするという結果と矛盾するため、更に高電圧まで調査を行った。図 4.62 に、逆バイアス電圧を -2000 V まで印加した時の I-V 特性を示す。-2000 V ではマイクロ放電は起きていないが、表面の電場強度 (図 4.63) をみると、電圧の上昇とともに p、n インプラントの電場強度は大きくなり、-2000 V では、n インプラントにおいてシリコンのブレークダウン電圧となる 300 kV/cm を超える (図 4.64)。つまり、高電圧では n インプラントでマイクロ放電が発生し、ブレークダウンが起こる。これは、ホットエレクトロン撮影と同一の結果である。

また、図 4.65 を見ると、電圧の上昇により Si バルク表面の電子層が排除されている様子が分かる。低電圧では、電子層により p インプラント付近まで低い抵抗値で繋がっており、p インプラント付近で電圧の降下が起こる。電圧を上げていくと、電子層が排除されて、n インプラント付近で電圧の降下が起こり電場強度が大きくなる。

以上から、正の表面電荷の増加が p-stop 電位を表面電位に近づけ、高電圧による Si バルク表面の電子層の排除が n インプラントでのブレークダウンを起こすことが分かった。

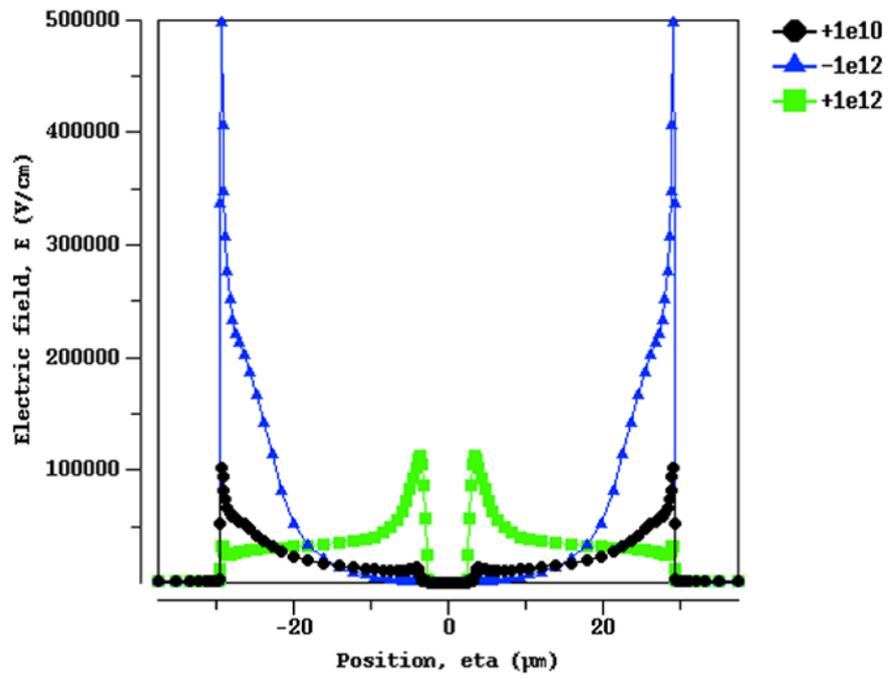


図 4.61: 表面電荷の違いによる電場強度分布の違い

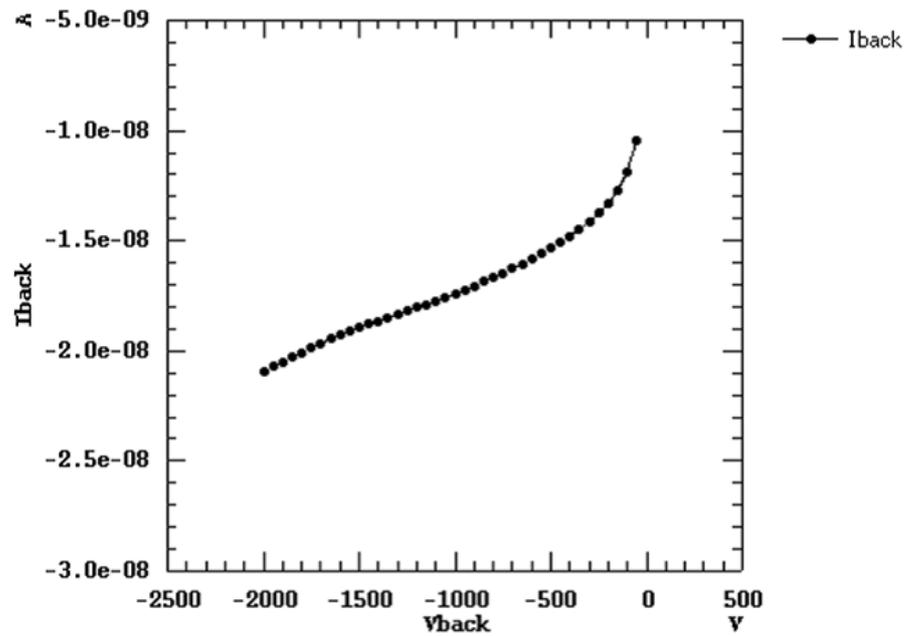


図 4.62: 高電圧まで印加した時の IV 曲線

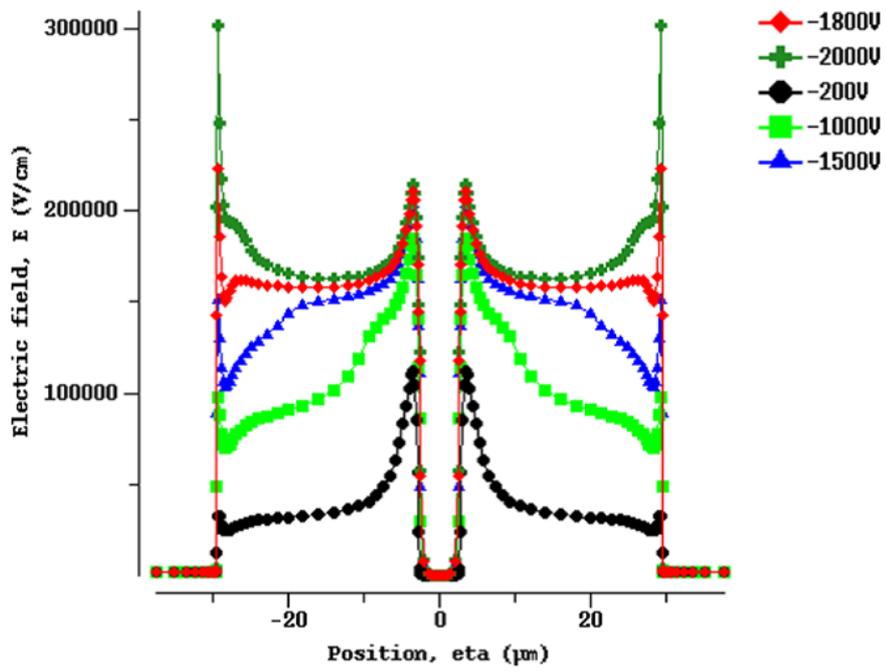


図 4.63: 高電圧での電場強度分布

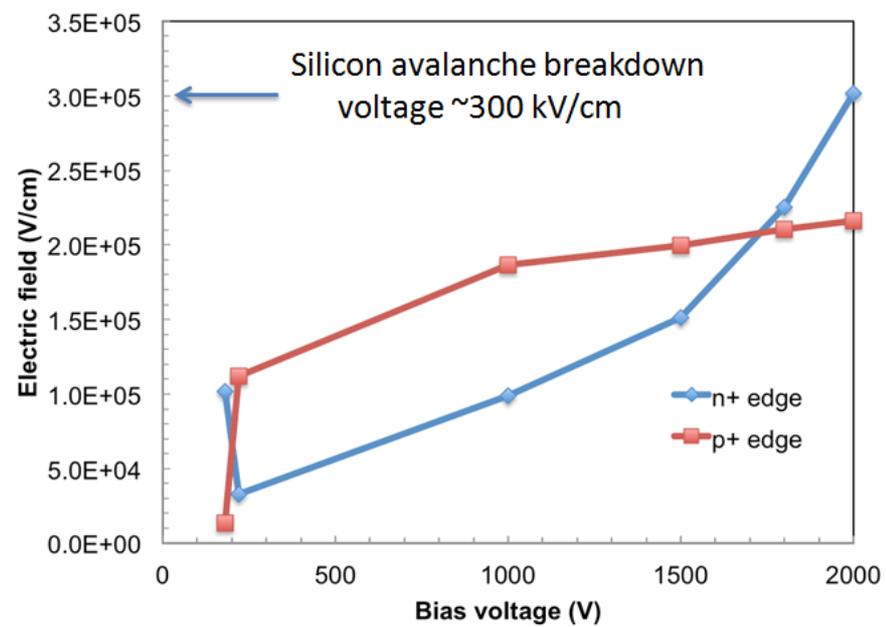


図 4.64: p、n インプラント (p、n エッジ) の電場強度の逆バイアス電圧依存性

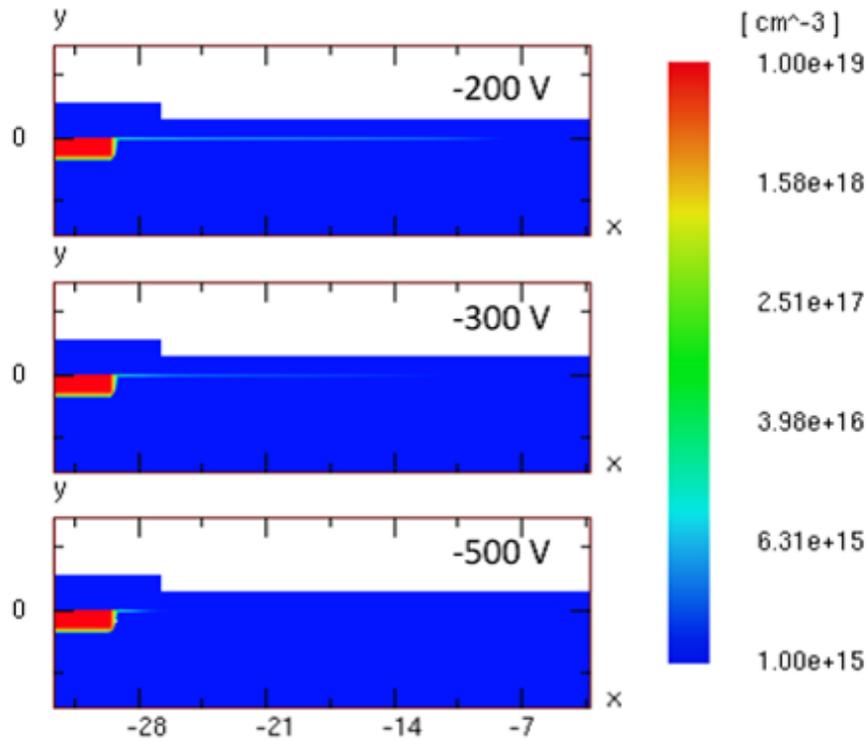


図 4.65: 逆バイアス電圧の上昇による電子層の排除

#### 4.10.4 Punch Through Protection (PTP)

インプラントストリップに負の電圧を印加し、Punch Through 発生電圧を再現した。図 4.66 は、 $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の照射後、逆バイアス電圧は-200 V、インプラントストリップに-50 V を印加し、Punch Through が発生した時のバルク内での電場強度分布である。左上にインプラントストリップ、中央上に p-stop、右上にバイアスリングがインプラントされており、シリコンバルクの上は  $\text{SiO}_2$  層がある。 $\text{SiO}_2$  層上には、バイアスリングと同電位の Al がインプラントストリップまで延びている (図 4.67)。NB/DB は Non/Damage Bulk で、有効不純物密度が  $4.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  と  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、LT/HT は Low/High Interface Charge で、表面電荷は  $+1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  と  $+1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、LC/HC は Low/High Current で、An、Ap=1 と  $1 \times 10^{-8}$  とした。図 4.66 より p-stop の外側で電場強度が上昇しているのが分かる。ここで、Punch Through が起きていると考えられる。

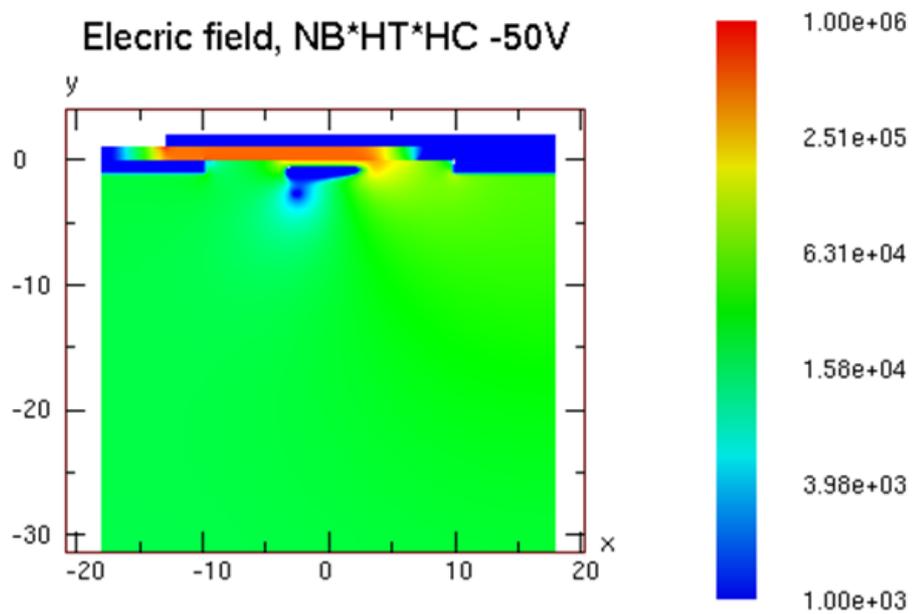


図 4.66: バルク内での電場強度分布

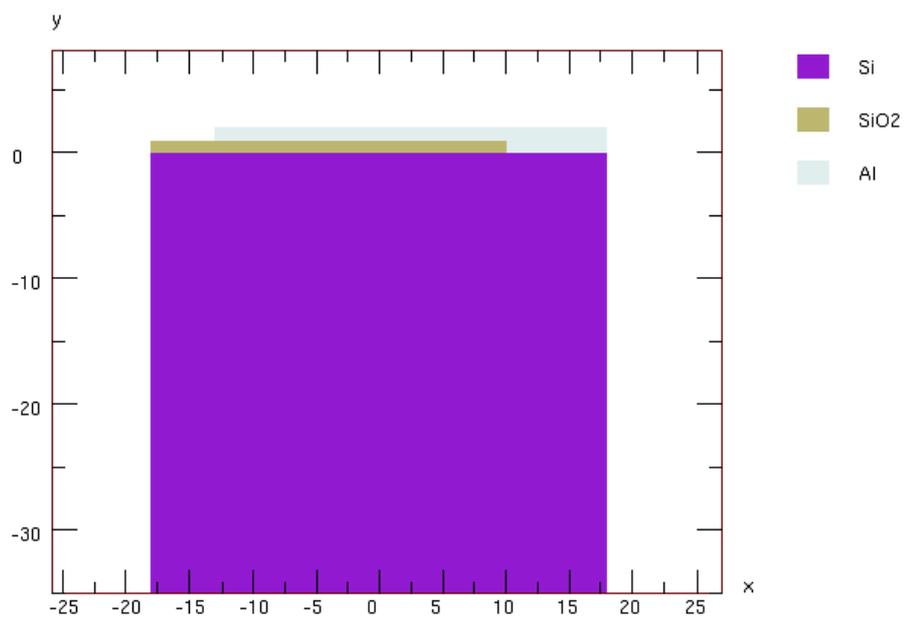


図 4.67: シミュレーションサンプルの構造

図 4.68 にパラメーターの変化による Punch Through 発生電圧の変化を示す。縦軸がインプラント電極に流れる電流で、横軸がインプラント電極に印加したテスト電圧である。黒が Al を延長していない非照射サンプル、色付きが延長 Al の最も長いサンプルを再現したもので、延長 Al により Punch Through 発生電圧が減少している。黄緑は非照射時、青は表面電荷のみ入れた時、赤が表面電荷に暗電流の増加を入れた時、緑が表面電荷と暗電流の増加にバルク損傷を加えた時である。Punch Through 発生電圧は、表面電荷の増加で減少し、バルク損傷で増加し、暗電流の増加では変化がなかった。これにより、Punch Through 発生電圧の放射線量依存性は、表面電荷の増加とバルク抵抗の減少によるものということが分かった。

試験サンプルの測定結果と TCAD の Punch Through 発生電圧の比較を図 4.69 に示す。同様の傾向を示しているがオフセットが存在している。このオフセットは 2D でシミュレーションをしたためであり、3D との違いであると考えられる。

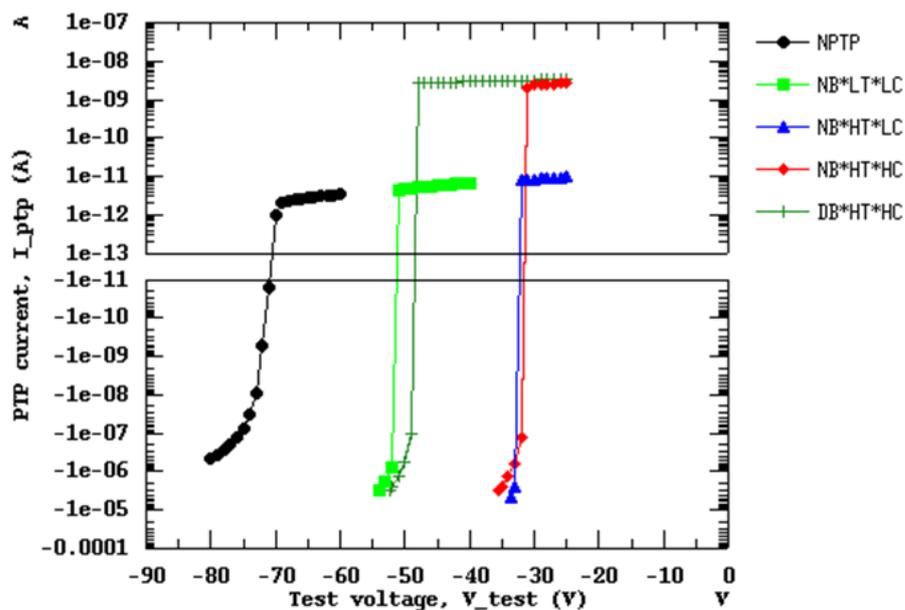


図 4.68: パラメータの変化による PTP の変化

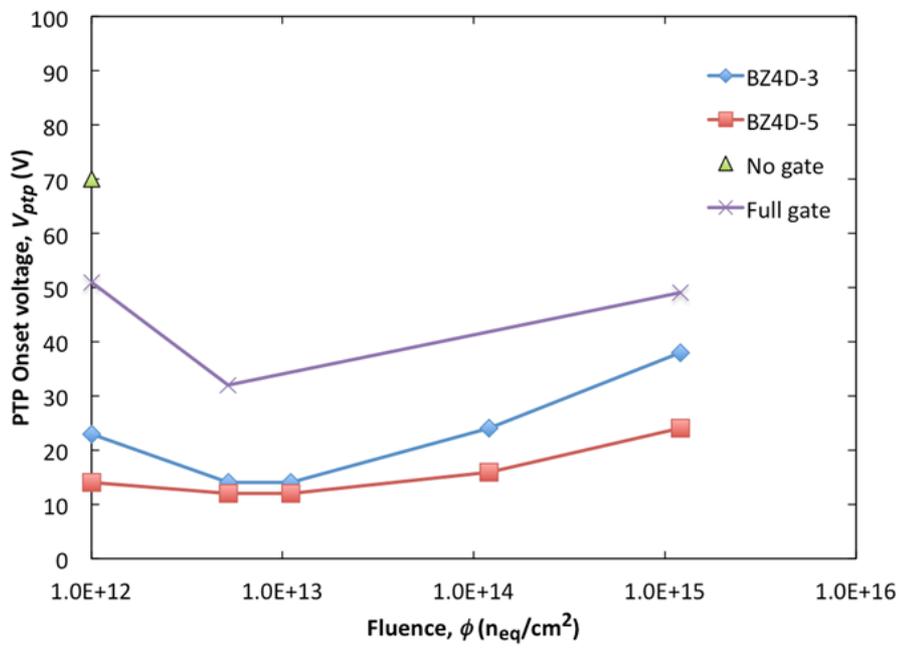


図 4.69: TCAD と測定結果の Punch Through 発生電圧の比較

## 第5章 結論

ATLAS アップグレードに向けた、p 型シリコンストリップセンサーとピクセルセンサーおよび試験センサーの設計・開発を行い放射線損傷の評価を行った。

センサーのバルク部の静電容量測定から全空乏化電圧を評価した。 $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の放射線量における 6 インチ高純度 p 型 FZ 基板シリコンセンサーの全空乏化電圧は、アニーリング後で約 600 V となり、oxygenated n 型 FZ 基板と同様となった。つまり、6 インチ高純度 p 型 FZ 基板は、oxygenated 基板と同等の oxygen が入っている可能性がある。暗電流の測定から、損傷係数や p 型シリコンのエネルギーギャップ相当の係数を評価した。p 型シリコンセンサーの損傷係数は  $\alpha = 4.6 (\pm 0.1) \times 10^{-17} \text{ A/cm}$  (アニーリング前)、エネルギーギャップ相当の係数  $E_g = 1.21 \text{ eV}$  となり n 型と同様の値となった。以上から、p 型シリコンセンサーのバルク部の放射線損傷は、n 型と同等であるといえる。

Slim Edge および Multi Guard Ring サンプルの暗電流測定により、1000 V の耐電圧を得るために必要なエッジ幅や Field width を評価した。p 型、n 型基板ともに 1000 V の耐電圧を得るためには、Field width は 450  $\mu\text{m}$  以上必要となった。また、耐電圧は Field width にのみ依存し、エッジ幅には依存しない。

Multi Guard Ring サンプルの暗電流測定を行い、最適な Guard Ring 構造を調べた。非照射では、Multi Guard Ring は Single Guard Ring より良い耐電圧を示したが、照射後に差は現れなくなった。照射後の p 型 n エッジは p エッジより相対的に耐電圧が低かった。これは、p 型基板 n エッジのエッジインプラント部に p-n 接合があり、高電圧によって p-n 接合部のエッジまで達している空乏層に高電場が発生し、マイクロ放電を起こしたためと考えられる。

ホットエレクトロン撮影により、照射後は、Guard Ring の数、幅に依存せず、p エッジ、n エッジに関わらず全てのサンプルにおいてバイアスリングでマイクロ放電が起きた。これは、TCAD により正の表面電荷の蓄積と逆バイアス電圧によるシリコンバルク表面の電子層の排除で理解できた。

5 種類の PTP 構造について有効性を評価した。延長 Al の最も長い BZ4D-5 は、全てのサンプル中で最も良い性能を示した。TCAD により、パンチスルー発生電圧の放射線量依存性は正の表面電荷の増加とバルク抵抗の減少によるものと理解できた。

ストリップ間抵抗の放射線量依存性を評価した。照射量が増加するとストリップ間抵抗は減少した。これは、TCAD により暗電流の増加により実際のストリップ間抵抗が減少していると考えられる。

p-stop 電位の放射線量依存性を評価した。放射線損傷によって、p-stop が表面電位に近づいた。これは、TCAD により正の表面電荷の増加によるものと理解できた。

収集電荷量の放射線量依存性を評価した。放射線損傷によりバルク部に格子欠陥が形成され、キャリアの捕獲や再結合が起こり、易動度も減少するため収集電荷量は減少した。非照射時及び低放射線量では、320  $\mu\text{m}$  厚の方が 150  $\mu\text{m}$  厚より収集電荷量は多いが、約  $3.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  以上の放射線量では同程度となった。

まとめると、

- p 型シリコンセンサーのバルク部の放射線損傷は n 型と同様である。
- Field width は 450  $\mu\text{m}$  以上必要である。
- Guard Ring は、非照射時においても Single Guard Ring で十分な耐圧を示し、Field width を最大に移ぎ、照射後は Single Guard Ring が最良である事から、Single Guard Ring を推奨する。
- Punch Through Protection は、延長 Al の最も長い BZ4D-5 が最も有効である。
- 放射線損傷は、TCAD により、バルク抵抗の減少、暗電流の増加、正の表面電荷の増加によるものと理解できる。

本研究により、 $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  の放射線量レベルで使用可能な新型 n-in-p シリコンストリップセンサー及びピクセルセンサーの基本構造及び設計指針が完成した。

## 謝辞

指導教官である海野義信教授には多大なご指導を受け多くのことを学びました。論文の執筆はもちろんのこと、実験指針、実験方法や物理の理論的内容まで研究に関わる全てのことをご指導頂きました。ご迷惑をお掛けすることもありましたが、熱心なご指導を頂き深く感謝致しております。高エネルギー加速器研究機構の寺田進先生、池上陽一先生には、実際の実験の際に多くご指導、ご助言を頂きました。実験装置の使い方から、物理的背景まで多くのことをご教示頂き、多くの知識や技術を身に付けることができました。深く感謝致しております。ATLAS JAPAN シリコングループの先生方には、ミーティングや共同実験を通して、多くのご指導、ご助言を賜りました。東京工業大学の陣内修先生、大阪大学の花垣和則先生、京都教育大学の高嶋 隆一先生、高エネルギー加速器研究機構の田窪洋介さん、中村浩二さん、筑波大学の原和彦先生を始め、多くの先生方からご指導頂き誠に感謝しております。先生方だけではなく、各大学と一緒に実験を行った学生達、時には辛く大変な実験を協力してこなし、時には楽しく歓談してきました。非常に充実した研究生活を送れたことに感謝致します。

最後になりますが、特に多くの苦労や心配を掛けてしまいました。最後まで暖かく見守ってくださった両親と家族、親族には心より感謝致します。

## 参考文献

- [1] G. Oakham, ATLAS UPGRADES, The 4th International Workshop "High Energy Physics in the LHC Era" (2012)
- [2] S. Baranov, M. Bosman, I. Dawson, V. Hedberg, A. Nisati, M. Shupe, ATL-GEN-2005-001 (2005)
- [3] The Review of Particle Physics 2009 Edition (2007) <http://pdg.lbl.gov/2009/>
- [4] Ioffe Physico-Technical Institute, <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/>
- [5] Jianguo Zhang, Surface Radiation Damage (Properties of surface charges and effects on silicon devices) (2011)
- [6] 京都大学工学研究科 義家研究室 HP <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/mre/research/research.html>
- [7] M. Moll, 1999, Radiation Damage in Silicon Particle Detectors, PhD Dissertation, Hamburg Univ.
- [8] The ROSE Collaboration, 3rd RD48 STATUS REPORT, CERN/LHCC 2000-009 (1999)
- [9] 浜松ホトニクス株式会社、静岡県浜松市東区市野町 1126-1
- [10] CYRIC、課題番号 9214 (2010 年 7 月)、9362 (2011 年 2 月)、宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
- [11] 井上考紀、SuperLHC-ATLAS 実験に用いる高放射線耐性シリコン飛跡検出器の開発研究 筑波大学修士論文 (2007)
- [12] ATLAS SCT Barrel Module FDR, SCT-BM-FDR-7 (2001)
- [13] K. Hara, et al., Nucl. Instr. Meth. A 636 (2011) S83-S89
- [14] ATLAS Collab., JINST 3 S08003 (2008)
- [15] Y. Unno, et al., Nucl. Instr. Meth. A 699 (2013) 72-77
- [16] Y. Unno, et al., Nucl. Instr. Meth. A 650 (2011) 129-135
- [17] Y. Unno, et al., Nucl. Instr. Meth. A 636 (2011) S24-S30
- [18] Y. Unno, et al., Nucl. Instr. Meth. A 636 (2011) S118-S124
- [19] Y. Unno, Nucl. Instr. Meth. A 612 (2010) 439-447

- [20] Y. Unno, et al., TCAD simulations of silicon strip and pixel sensor optimization, Proceedings of Science, Vertex 2011, 024 (2011)
- [21] Y. Unno, et al., Evaluation of test structures for the novel n+-in-p pixel and strip sensors for very high radiation environments, Nucl. Instr. Meth. A (in press)
- [22] Y. Takahashi, et al., Nucl. Instr. Meth. A 699 (2013) 107-111
- [23] H.F.W. Sadrozinski, et al., Nucl. Instr. Meth. A 658 (2011) 46-50
- [24] J. Bohm, et al., Nucl. Instr. Meth. A 636 (2011) 104-110
- [25] S. Lindgren, et al., Nucl. Instr. Meth. A 636 (2011) 111-117
- [26] A. Affolder, et al., Nucl. Instr. Meth. A 623 (2010) 177-179
- [27] A. Affolder, et al., Nucl. Instr. Meth. A 604 (2009) 250-253
- [28] E. Barberis, et al., Nucl. Instr. Meth. A 326 (1993) 373-380
- [29] G. Lindstrom, et al., Nucl. Instr. Meth. A 426 (1999) 1-15
- [30] S. Lindgren, et al., Nucl. Instr. Meth. A 636 (2011) S111-S117
- [31] W. Shockley, W.T. Read, et al., Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons, Phys. Rev. 87, 835-842 (1952)
- [32] ATLAS Collaboration, *INNER DETECTOR Technical Design Report*, CERN/LHCC/97-16 ATLAS TDR 4, 30 APR 1997.
- [33] Letter of Intent for the Phase-I Upgrade of the ATLAS Experiment, CERN-LHCC-2011-012 ; LHCC-I-020, Dec 2011
- [34] The Review of Particle Physics, Phys. Rev. D 86, 010001 (2012)
- [35] 大下英敏、ATLAS Thin Gap Chamber の中性子に対する動作特性の研究 (2008)
- [36] CERN webpage, <http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>
- [37] LHC webpage, <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
- [38] ATLAS webpage, <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/index.html>
- [39] ATLAS Japan webpage, <http://atlas.kek.jp>

