

アトラス実験アップグレードに向けた p型ピクセルセンサーおよびストリップセンサー の陽子線照射試験

総合研究大学院大学 (高工研) 三井真吾

海野義信, 池上陽一, 寺田進, 田窪洋介, 東城順治,
近藤敬比古, 原和彦^A, 陣内修^B, 高嶋隆一^C,
中野逸夫^D, 花垣和則^E, 寄田浩平^F

総研大(高工研), 筑波大数理^A, 東工大^B,
阪大^C, 岡山大^D, 京都教育大^E, 早大理工^F

SLHC (Super Large Hadron Collider)

LHC (陽子陽子衝突型加速器 最大瞬間ルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

⇒ 2021年頃にルミノシティをさらに10倍にするSLHCを計画

- ・LHC加速器の検出器の一つであるATLASの内部飛跡検出器をすべてシリコン検出器にする。
- ・現行のPIXEL、SCT(シリコン飛跡検出器)をより放射線耐性が優れたものと交換。

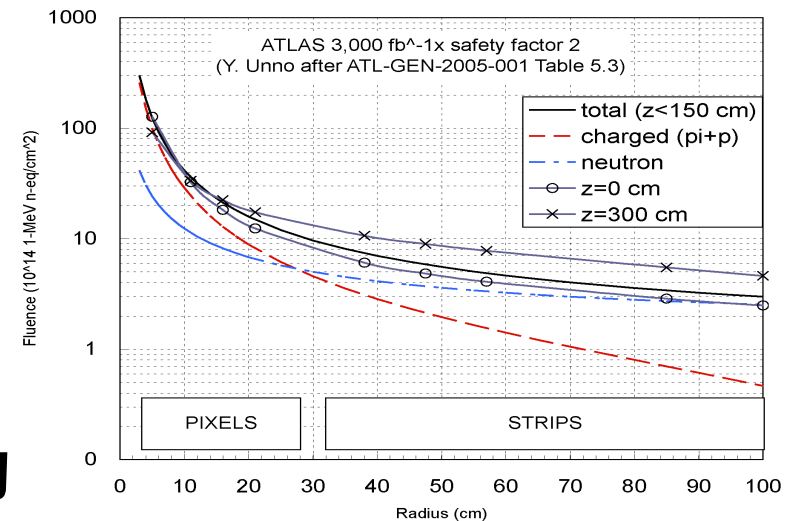
PIXEL領域

最大 $\sim 2 \times 10^{16}$ 1-MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ の放射線量

SCT領域

最大 $\sim 1 \times 10^{15}$ 1-MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ の放射線量

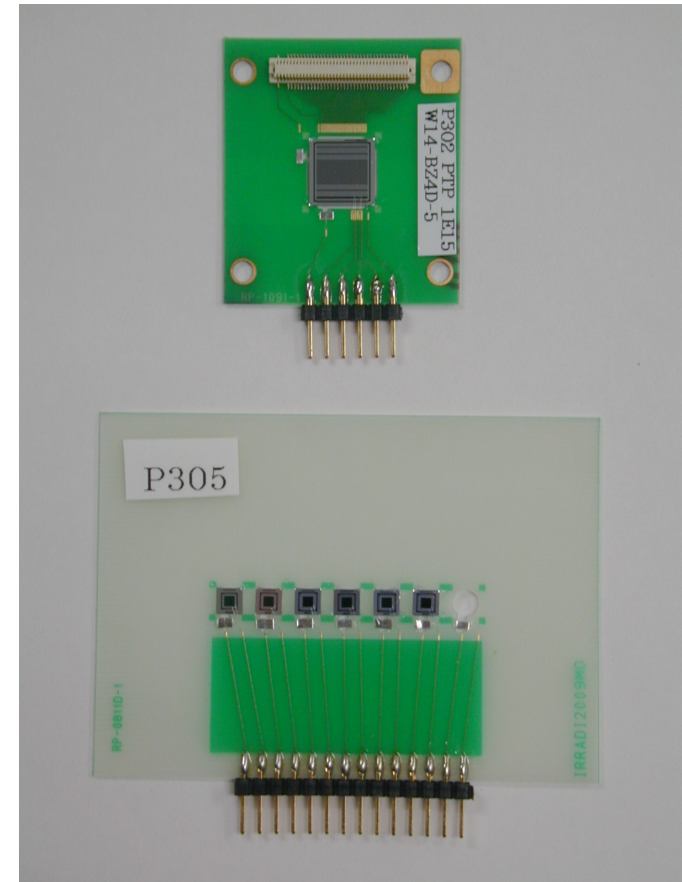
本研究の目的



高放射線耐性のp型ピクセルセンサー、ストリップセンサーを開発する。
センサーサンプルに陽子線を照射し、放射線耐性を評価する。

照射実験 東北大CYRIC

- エネルギー: 70 MeV
- 照射量: $5.7e12$, $1.1e13$, $1.2e14$, $1.2e15$ 1-MeV n_{eq}/cm^2
- 照射サンプル 浜松ホトニクス社製
- Punch Trough Protection
 - ミニチュアストリップセンサー(1cm x 1cm)
- Slim Edge
 - ダイオード (4mm x 4mm)
- Multi Guard
 - ダイオード (4mm x 4mm)



新型Punch Through Protection

Punch Through Protection

ビームロスによりインプラント電極に大電流が流れた際に、電流をバイアスリングへ逃がすことにより、インプラント電極の電位が下がるのを防ぎ、絶縁膜を保護する構造。

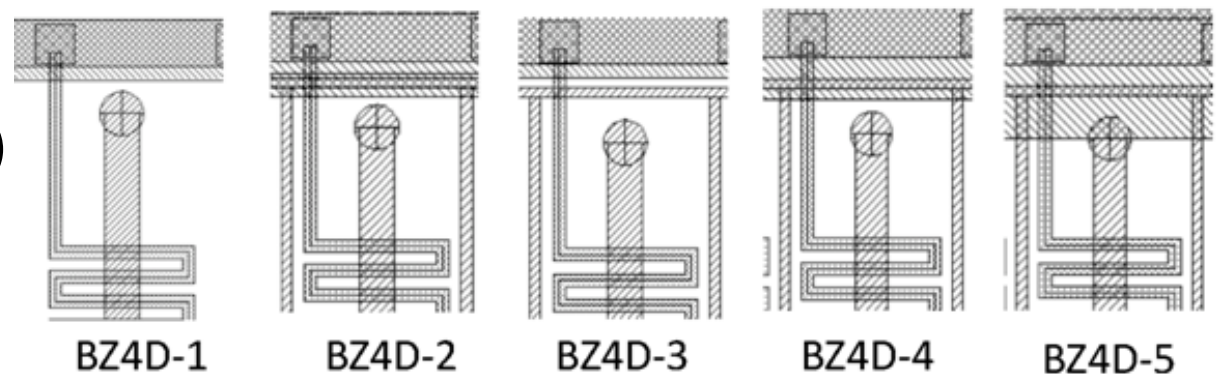
P-stop

ストリップ間に高濃度のp型不純物をドーピングすることにより、ストリップ電極を電氣的に分離する構造。

サンプル(p型)

- バイアスリングAIを延長
- BZ4D

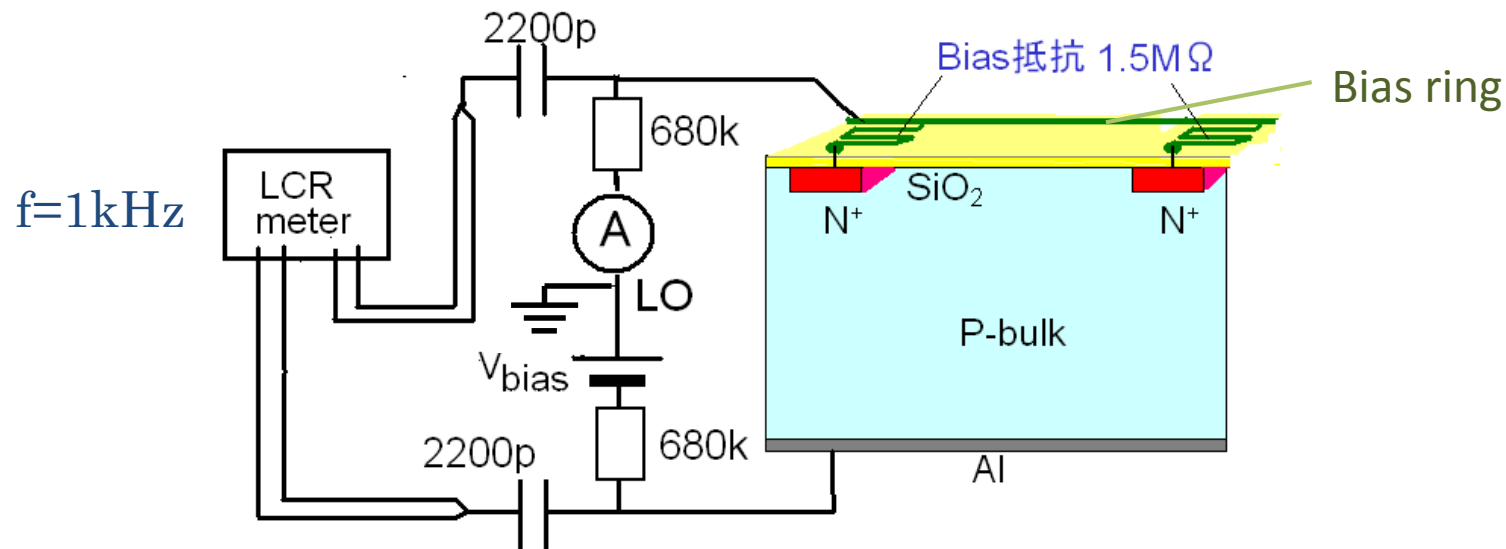
- 1: No p-stop
- 2: Over p-stop (narrow)
- 3: No extension
- 4: Over p-stop (wide)
- 5: Full extension



I-V・C-V測定 測定方法

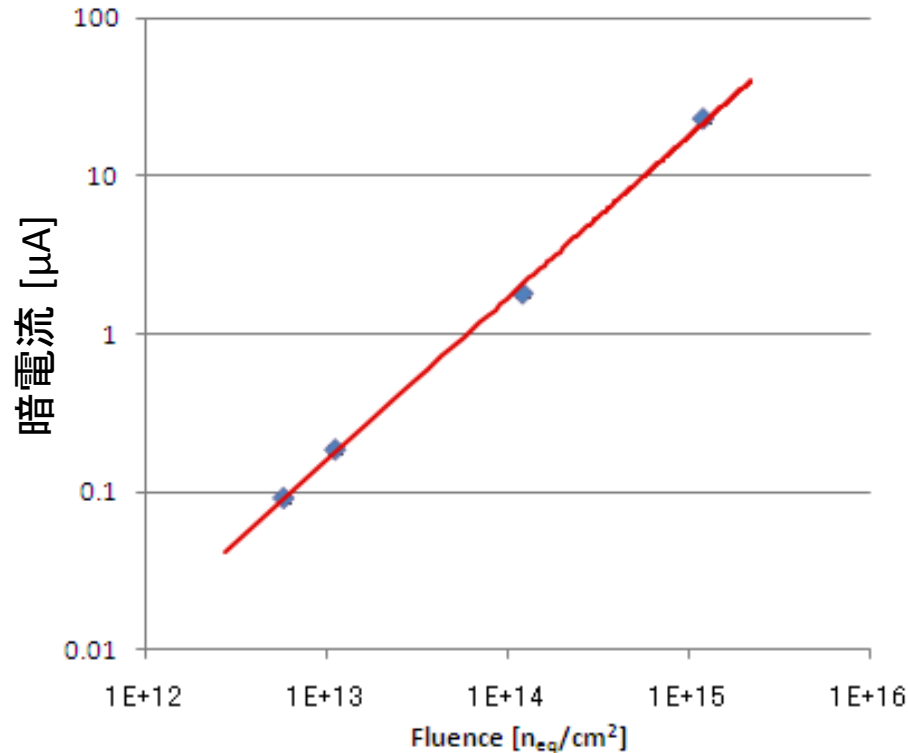
- IV測定 ($V_{bias} = 0 \sim -1000V$)
 - 暗電流を測定し、マイクロ放電発生電圧を評価する。
- CV測定 ($V_{bias} = 0 \sim -1000V$)
 - バルク部の静電容量を測定し、全空乏化電圧を評価する。
- PTP測定 ($V_{bias} = -300V$ 一定)
 - バイアスリング-DCパッド(インプラントストリップ)間に電圧を印加し、抵抗値を測定する

アニーリング前 (アニーリング後は測定中)、温度: $-20^{\circ}C$



暗電流 (アニーリング前)

暗電流 @全空乏化電圧



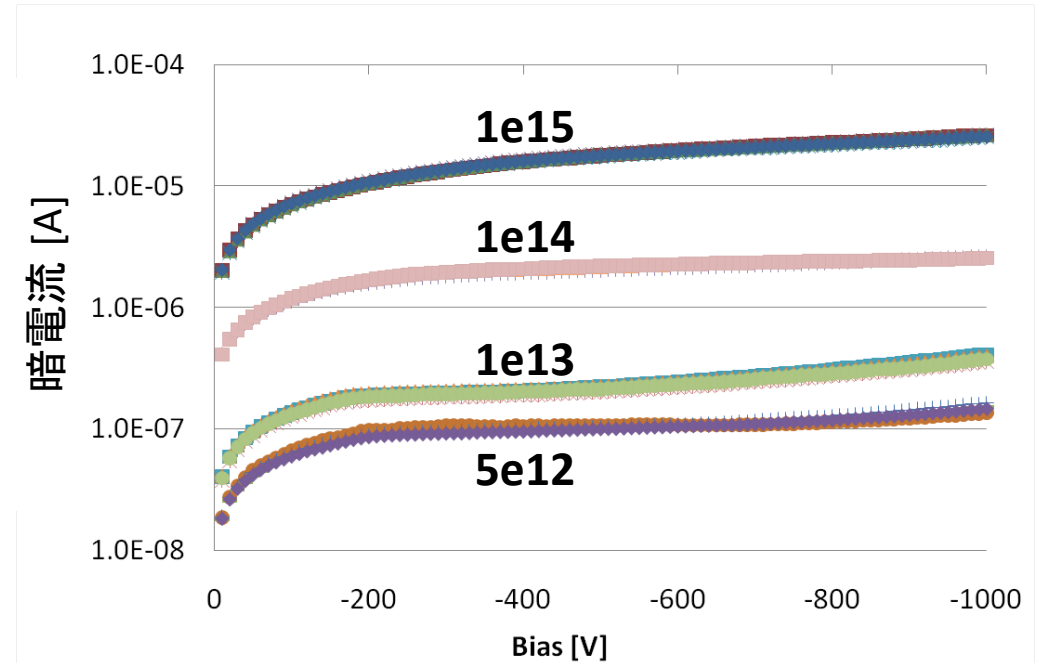
$$\Delta I = \alpha \times \Phi \times V$$

ΔI = 電流、 α = 損傷係数、 Φ = 照射量、 V = サンプル体積

損傷係数: $\alpha = (4.6 \pm 0.1) \times 10^{-17} \text{ A/cm}$

=>n型の既知の値: $\alpha = 5.5 \times 10^{-17} \text{ A/cm}$ より低い

暗電流 @-20°C

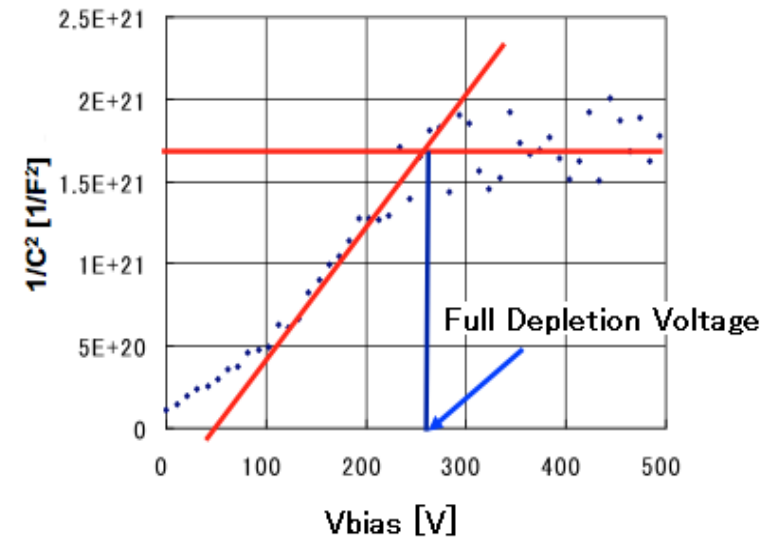
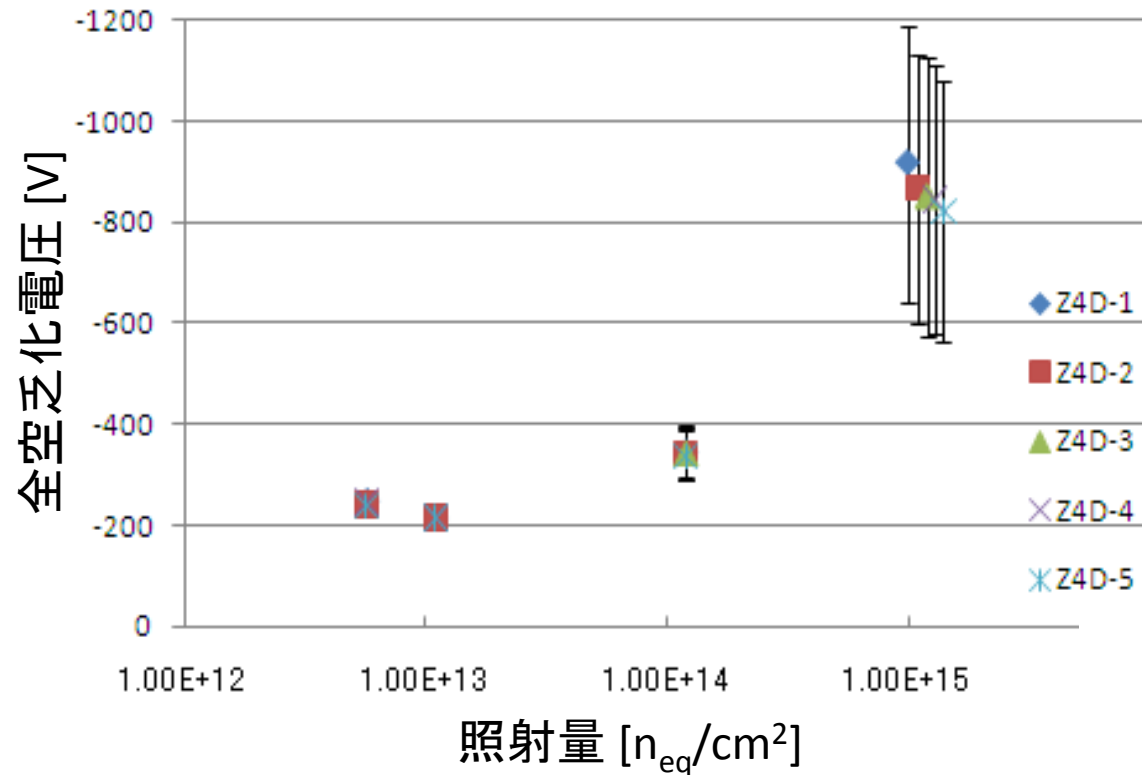


-1000 Vまでマイクロ放電は起きていない。

マイクロ放電

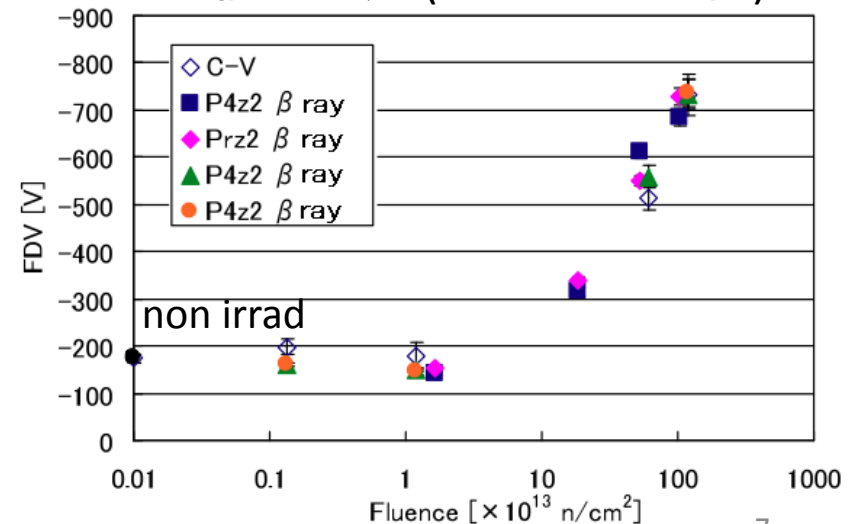
局所的に電場が強くなり、電子雪崩が起きて急激に暗電流が増加する現象。

全空乏化電圧 (アニーリング前)

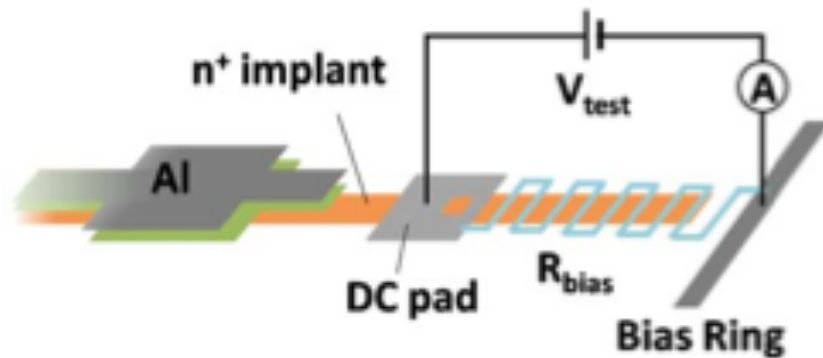
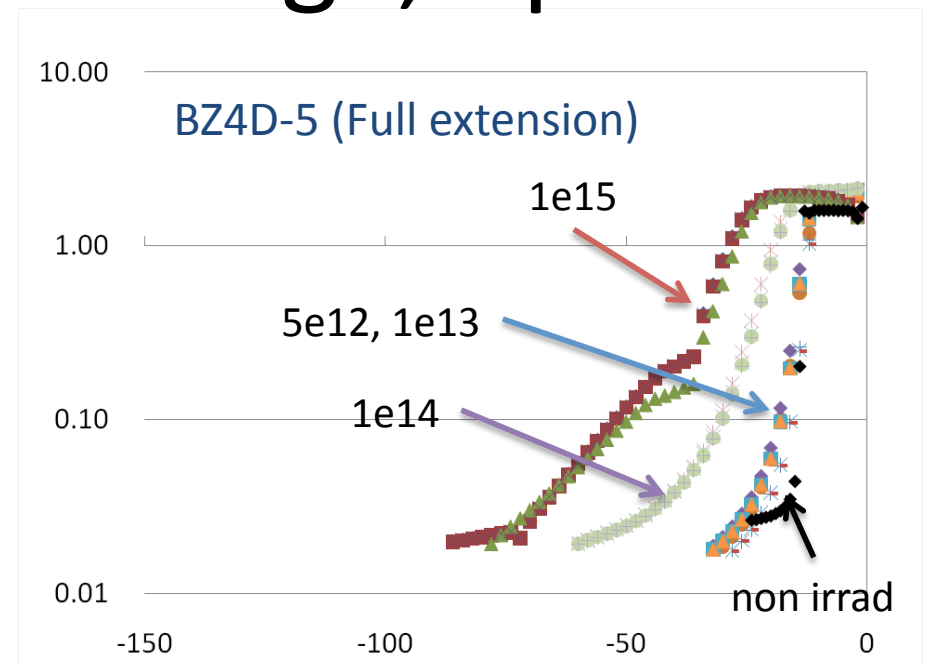
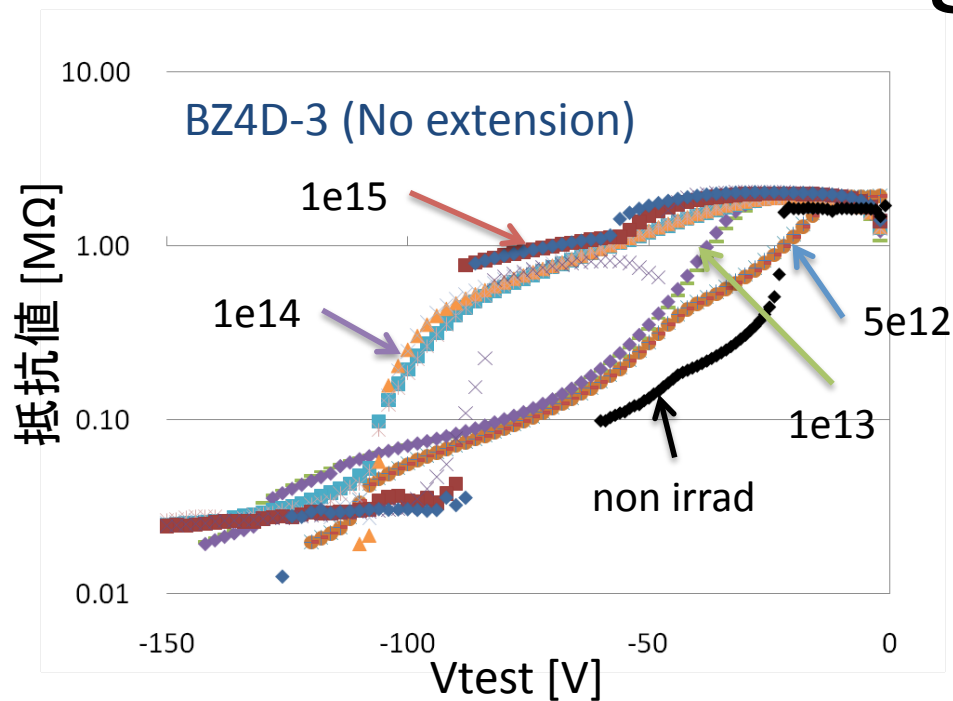


- $1/C^2$ は V_{bias} に比例し、全空乏化後は一定となる。
- 全空乏化電圧: 10^{15} n/cm²で-860 V
=>以前の測定と誤差の範囲で一致。

以前の測定 (アニーリング後)

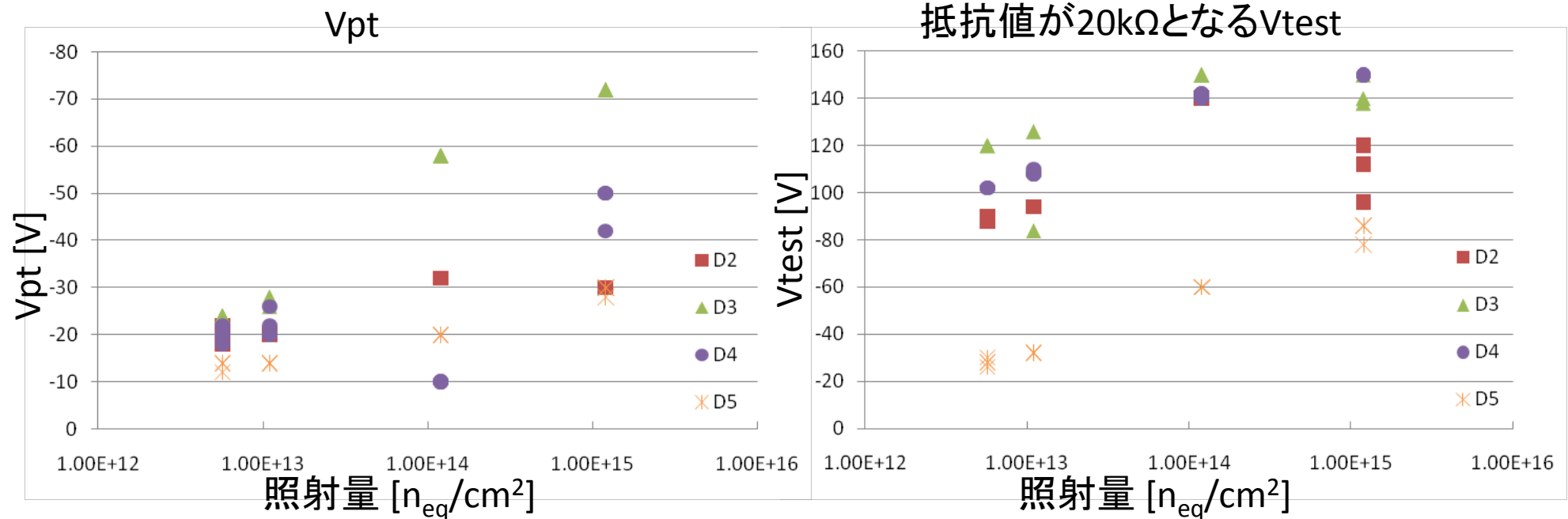


Punch Through Voltage, V_{pt}



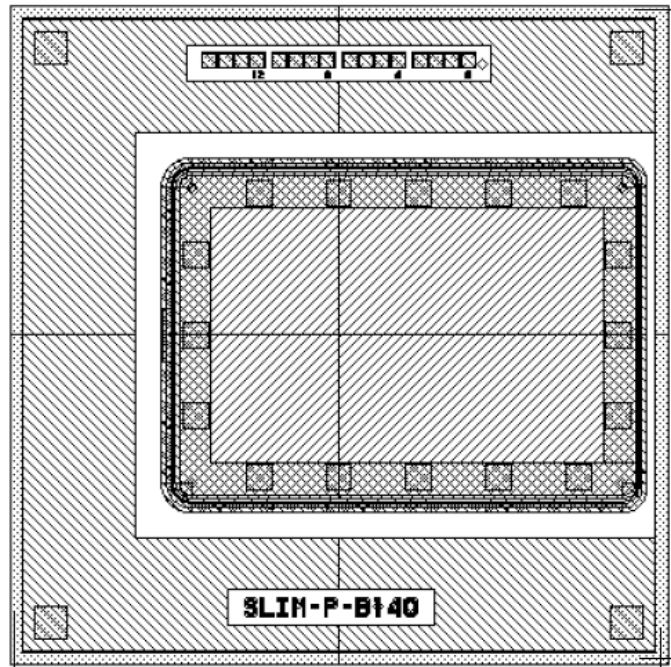
- $V_{test} = 0 \sim -150$ V、 $V_{bias} = -300$ V (一定)
- バイアスリング-DCパッド間の抵抗値を測定した。
- 照射量が増加すると V_{pt} (バイアス抵抗の50%となるテスト電圧)が上昇。
- 延長したAlにより、 V_{pt} が下がっている。

Punch Through Voltage



- BZ4D-5は、全てのサンプル中で最も良い。
 - Vptが低い。
 - 抵抗値が20k Ω となるVtestが低い。
 - 1ストリップ当たり ~ 5 mA! (≡ ~ 10 kMIPS/25ns/strip)
 - ACカップリング絶縁膜(耐圧120 \sim 150 V)を保護できる可能性がある。

Slim Edgeの研究



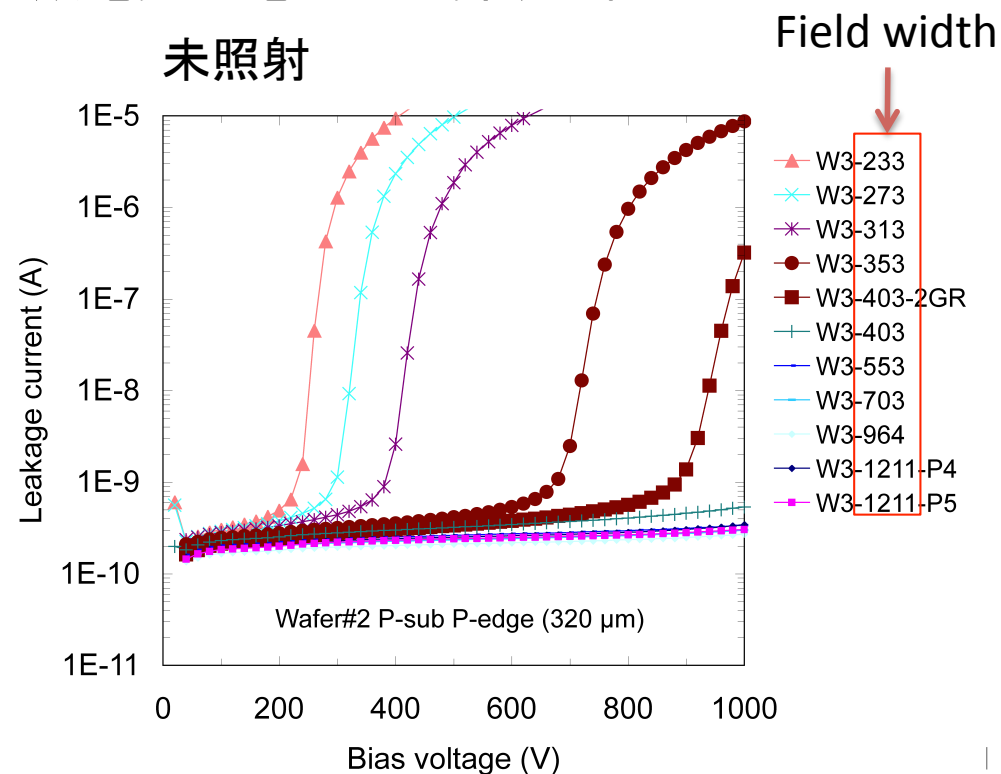
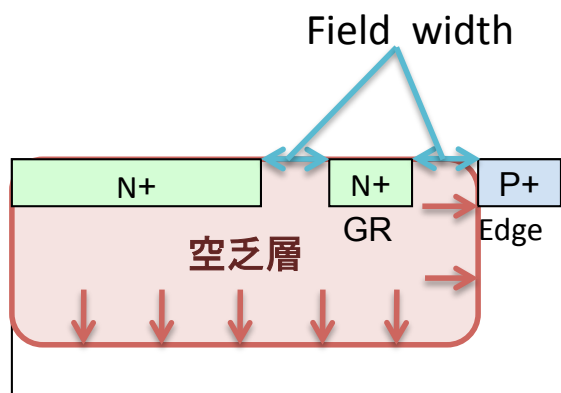
- 目的: 1000 Vの運転に耐えうるエッジの幅を決定する。
- 1辺のみ、80~1000 μm に振っている。

サンプル

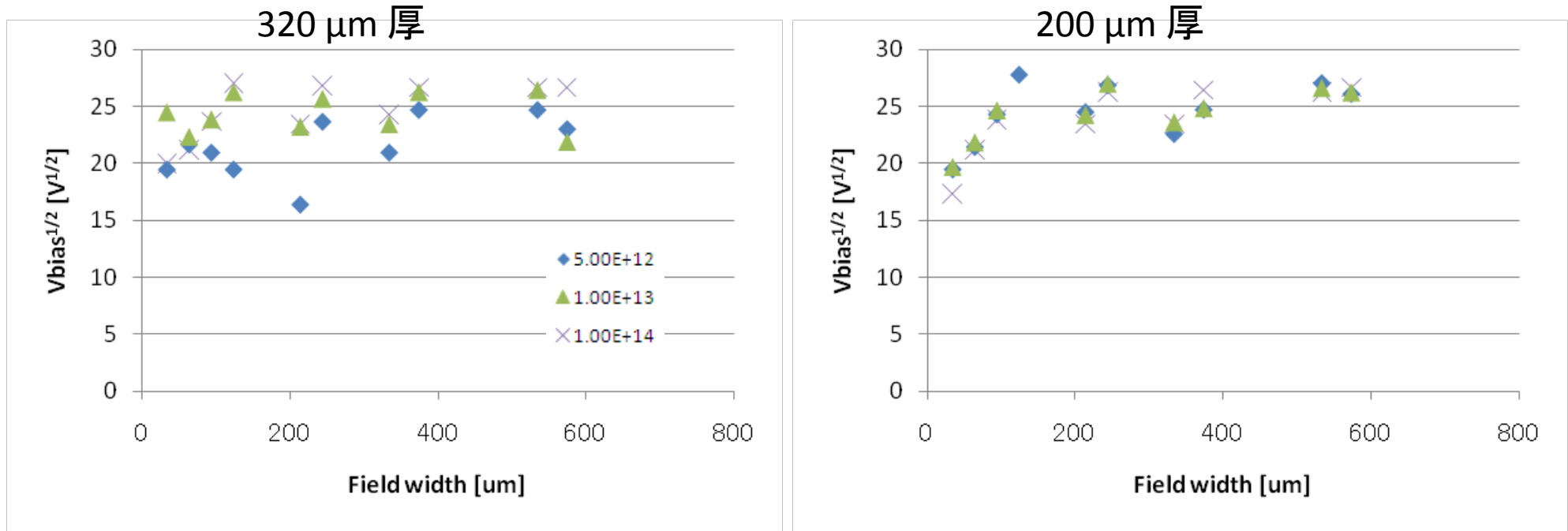
- p型: preliminary
 - n型: 320 \times 200 μm 厚、p-edge/n-edge
 - 照射量: 5.7e12, 1.1e13, 1.2e14 n/cm²
 - アニーリング: 60°C、80分
-
- “Field width” : インプラントを除いたバイアスリングからエッジまでの距離。
 - 34, 64, 94, 124, 214, 244, 334, 374, 534, 574 μm

Slim Edgeの研究 – 横方向空乏化

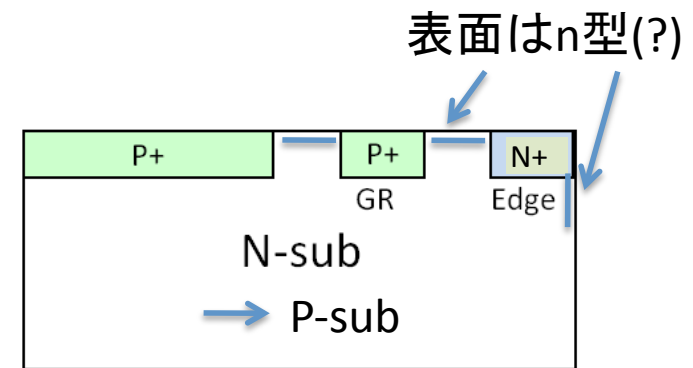
- Field widthとマイクロ放電発生電圧の関係を調べる。
 - 表面に沿って、横方向に空乏化が進む。
 - 空乏層がエッジに達すると、エッジ表面の電荷により暗電流が急激に増加し、マイクロ放電が発生する。
- IV測定により、マイクロ放電発生電圧を評価する。
 - Field widthが広いと、マイクロ放電発生電圧が上昇する。



Slim edge N-sub N-edge

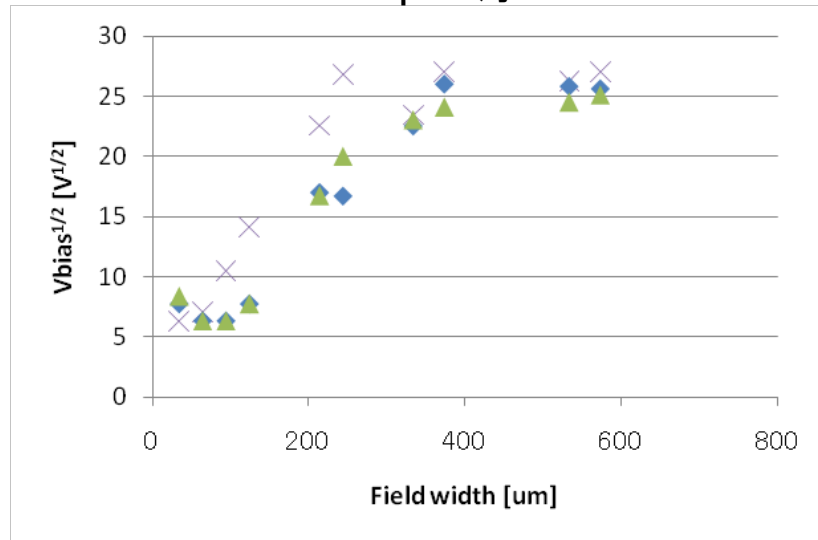


- ※ 10^{14} n/cm^2 以上で、p型に型反転している。
- 照射量による違いは見られない。
 - 10^{14} n/cm^2 でも、表面はn型のまま(?)
=>エッジにp-n接合はない。
- 空乏層がエッジに達していない。
 - マイクロ放電発生電圧が約600 V。

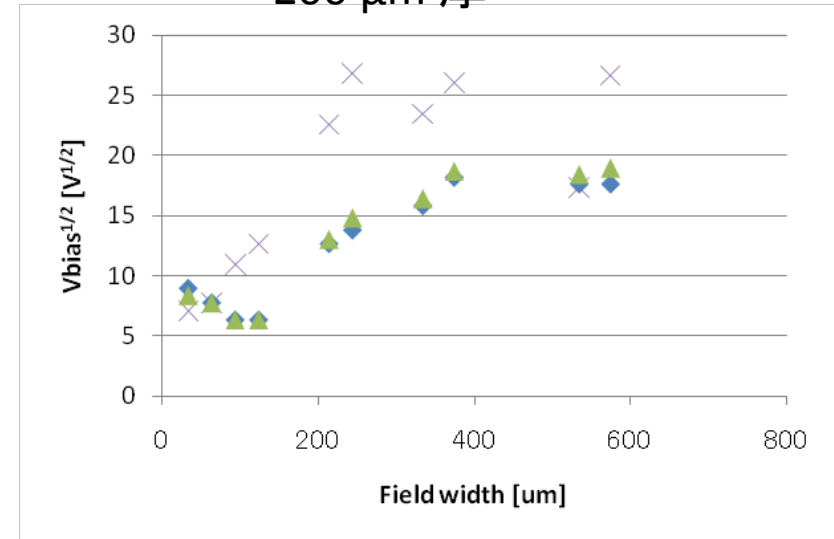


Slim edge N-sub P-edge

320 μm 厚



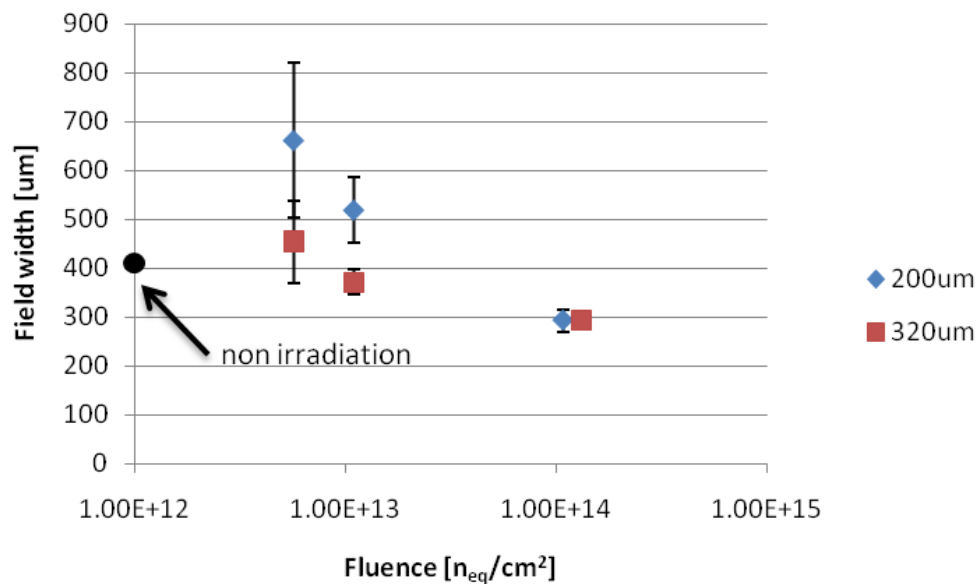
200 μm 厚



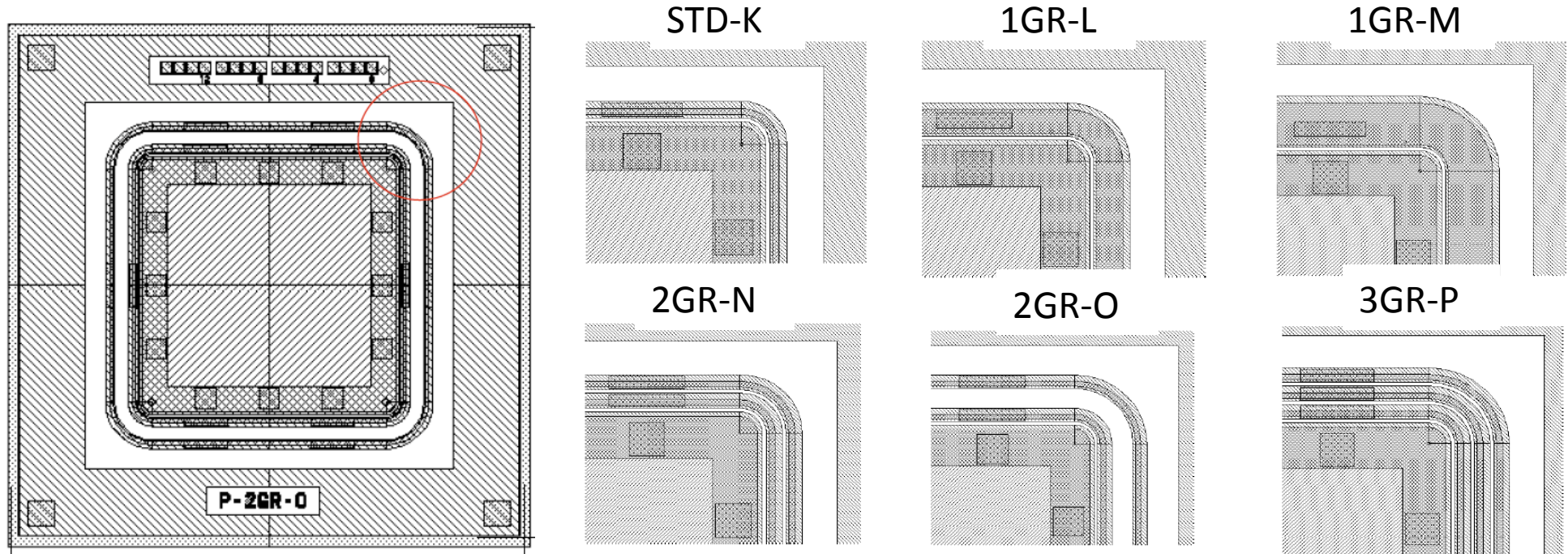
※ 10^{14} n/cm²以上でp型に型反転。

- 表面はn型。
- エッジがp-n接合になっている。

- 600 V以下でマイクロ放電が発生しているため、耐圧1000 Vに必要なField widthの値を推定して評価。
- 1000 Vの耐圧を得るために必要なField widthは約400 μm 。



Multi guardの研究



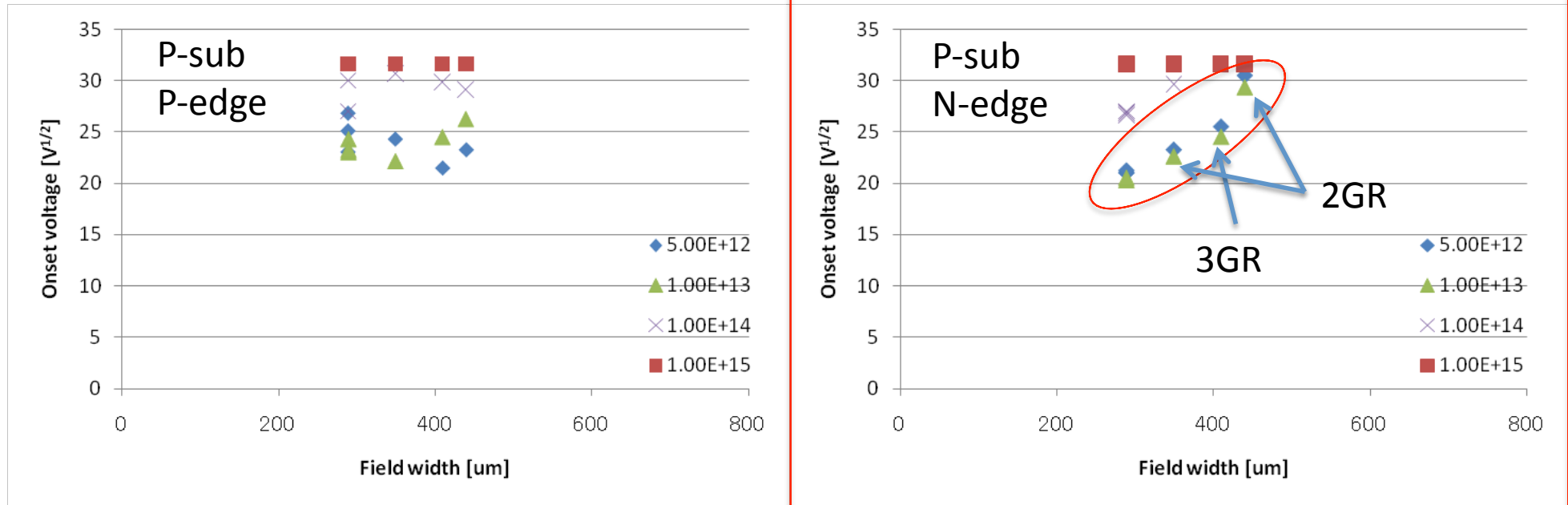
目的

- ガードリングの数、field widthの距離とマイクロ放電発生電圧の関係を調べる。

サンプル

- Field width
 - STD-K = 1GR-L = 1GR-M (289 μm), 2GR-N (349 μm), 3GR-P (409 μm), 2GR-O (439 μm)
 - ガードリングの数とField widthの距離は順に並んでいない。
- p型: 320 μm 厚、p-edge/n-edge
- n型: 320・200 μm 厚、p-edge/n-edge
- 照射量: 5.7e12, 1.1e13, 1.2e14, 1e15 n/cm²、アニーリング: 60°C、80分

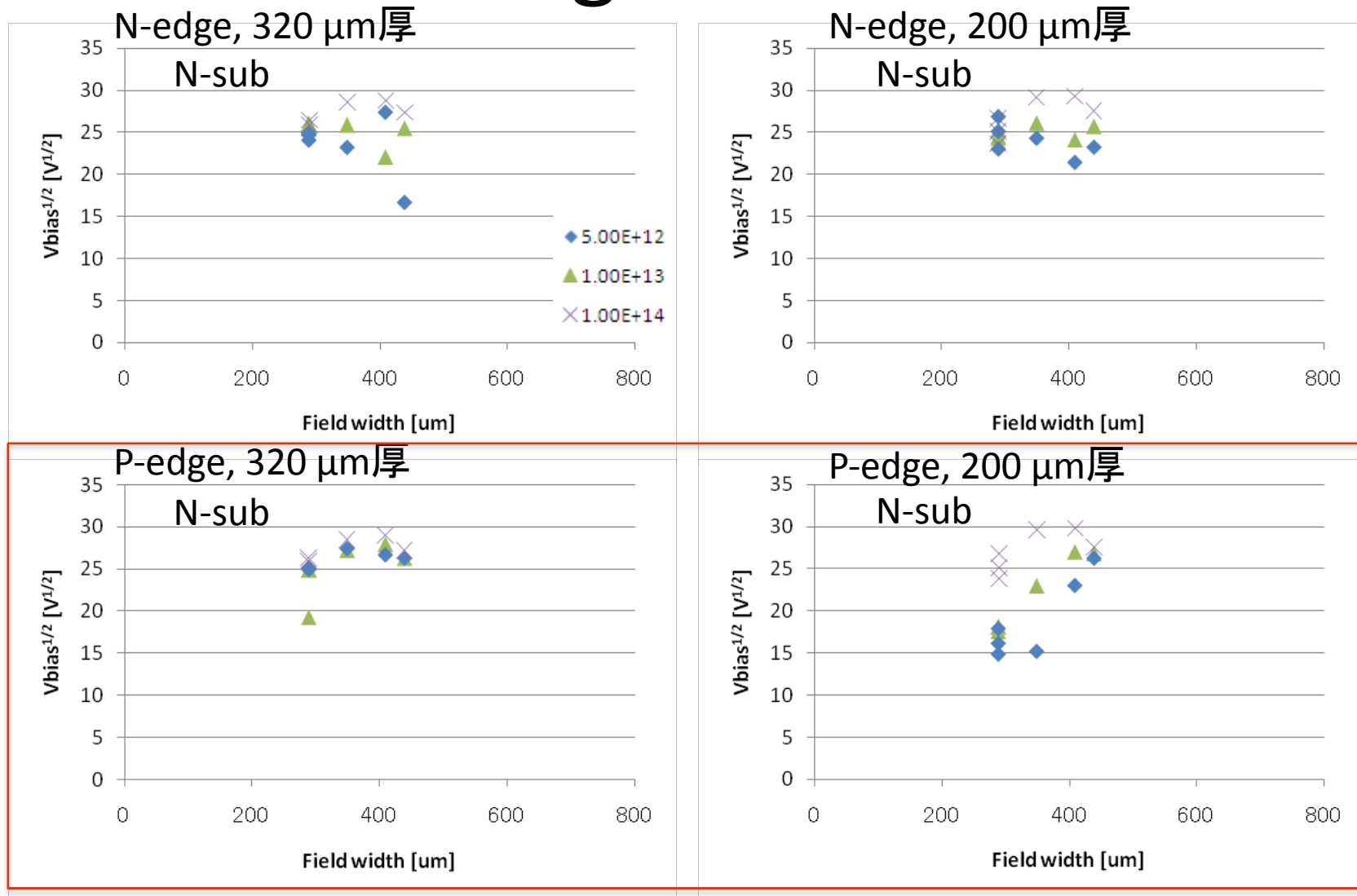
Multi guard P-sub 320 μm 厚



IV測定により、マイクロ放電発生電圧を評価する。

- p/n-edgeともに、照射量の増加によりマイクロ放電発生電圧は上昇する。
- P-sub/P-edge: 空乏層はエッジに達していない。
 - マイクロ放電発生電圧はガードリングの数に依存しない。
- P-sub/N-edge: 空乏層はエッジに達している。
 - 3GRは2GRより良いわけではない。

Multi guard N-sub



- ガードリングの数に依存しない。
- 薄型センサーはより広いfield widthを必要とする。

まとめ

センサーサンプルに陽子線を照射し、新型PTP構造の特性変化とSLHCの運転に耐えうるField widthの幅を評価した。

- **PTP**
 - BZ4D-5 (full extension)が全ての種類の中で最も良い。
- **Slim edge**
 - N型 N-edgeは、 $1 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ までField widthに依存せずバイアス電圧耐性を持つ。
 - N型、P型ともに、1000 Vの耐圧を達するために400 μm 以上のField widthが必要。
 - 薄型センサーは、より広いField widthを必要とする。
- **Multi guard**
 - マイクロ放電発生電圧は、ガードリングの数ではなくField widthに依存している。