



高エネルギー実験のためのSOI技術を用いた
PIXOR(PIXel OR)半導体検出器の研究開発
～ 修士論文賞・記念講演編 ～

東北大学 小野 善将

研究の歴史

B4, M1の歴史

2009	9	SOIPIXに出会う 半導体？なにそれ、おいしいの？
	10	放射線ダメージ試験開始
	11	KEK初訪問 構内の写真を記念にとりまくる 後から、いくらでも来るのに…
2010	3	物理学会デビュー 緊張とワキ汗の嵐
	5	TCAD始める
	6	Double SOI思う
		色々シンポジウムに行く 三者若手夏、B workshop、ICEPP ...
		↓ TCAD飽きる？

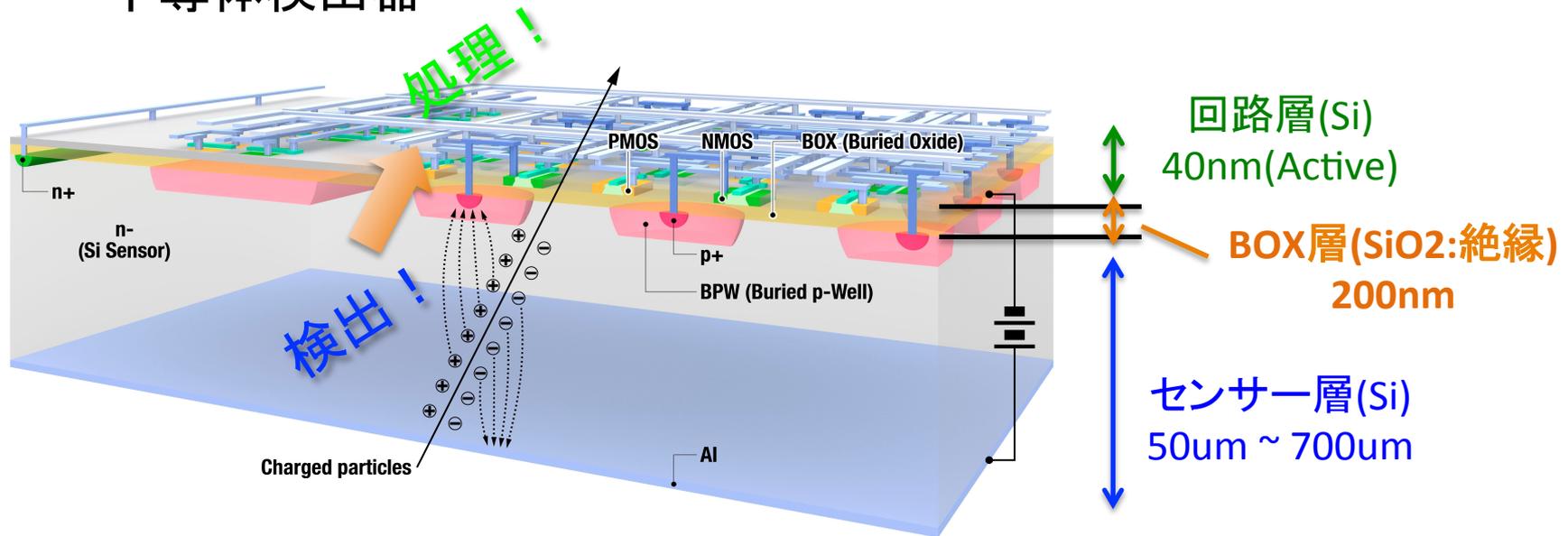
M2(+D1)の歴史

2011	4	PIXOR計画始動
	5	PIXOR思う とりあえず、やってみるかでスタート
	9	PIXOR1サブミット (株)A-R-Tec様に多大なご協力を…
	10	修論を書きそうに書かない
	11	修論本腰はいる 年明けから研究室が自宅になる。 シャンプー等は机に常備
2012	2	修論終結
	2	PIXOR1到着&評価開始 卒業旅行返上で試験
最近		PIXOR2考える PIXOR1評価サポート

※英字達は後のスライドでじっくり説明

SOIPIXとは？

- SOIPIX(Silicon On Insulator PIXel detector)
 - SOI基板のSubstrate部分をセンサーに使用したモノリシック型半導体検出器

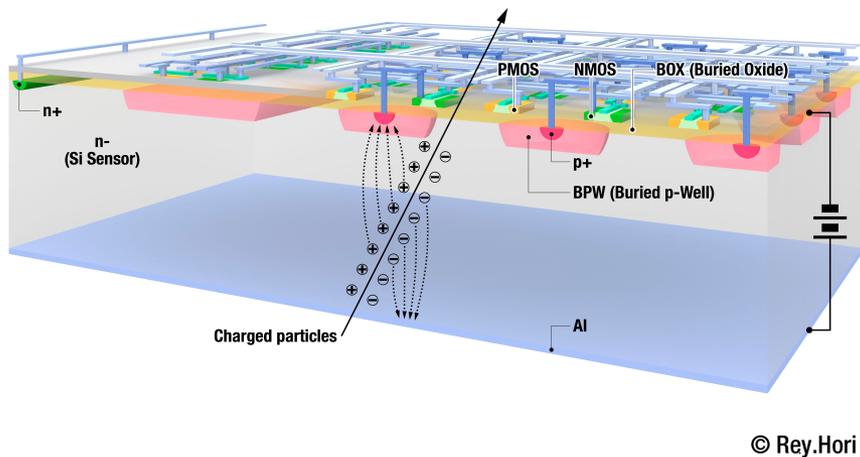


© Rey.Hori

センサー層と回路層がBOX (Buried OXide) 層で絶縁
センサー層と回路層を別の基板で作成→貼り合わせ

SOIPIXを使えば…

• SOIPIXの利点



- センサー基板を違う種類で作成
 - ❖ 空乏層が厚くできる
- モノリシック
 - ❖ 物質量少ない、コンパクト
 - ❖ コスト削減
 - ❖ 複雑な機能を搭載可能
 - ❖ S/N高い(センサー寄生容量小)
- SOI CMOSで読み出し処理
 - ❖ 低消費電力
 - ❖ ラッチアップなし/高いSEU耐性
 - ❖ 動作温度帯域広い

• 幅広い応用

異物検査

医療用センサー

質量解析

X線天文衛星

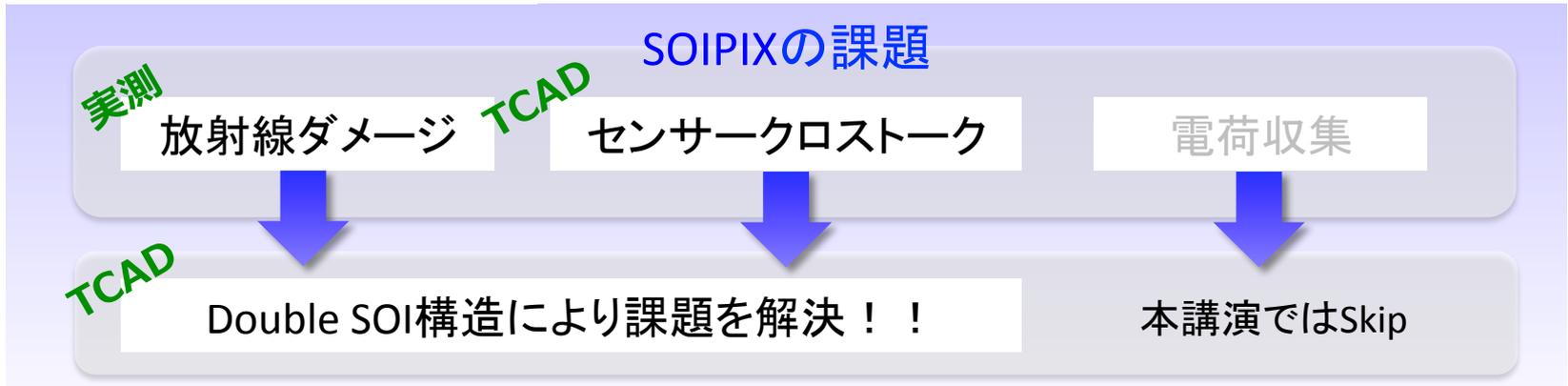
環境放射線モニター

高エネルギー実験

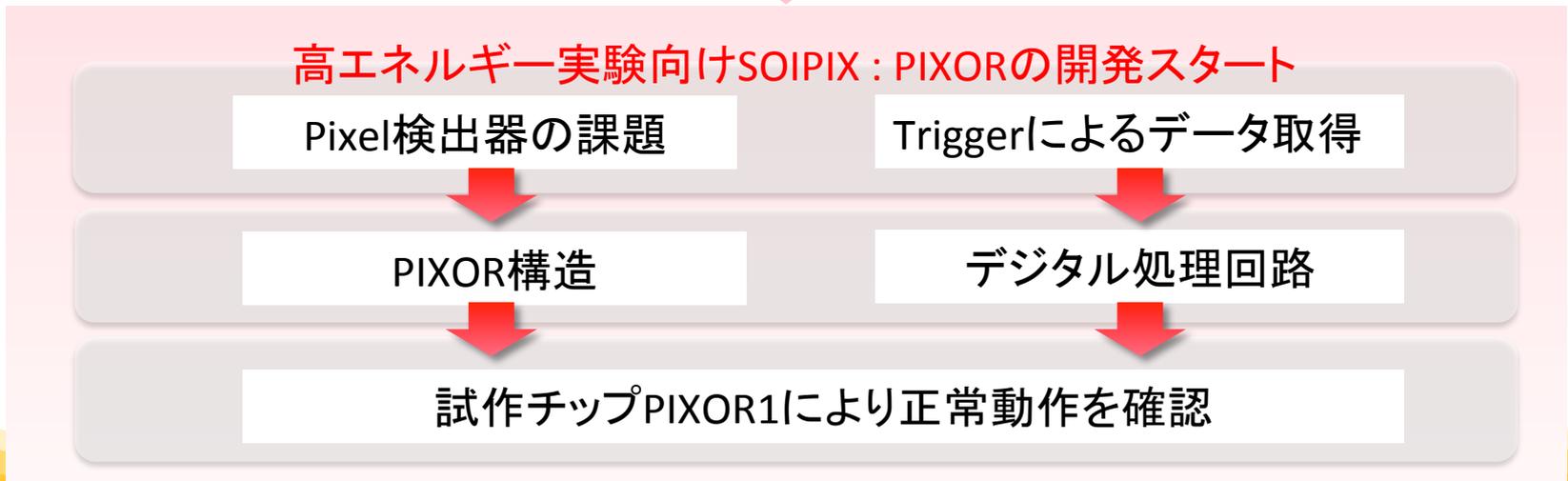
... etc

研究の流れ

SOIPIXの課題解決



PIXORの開発

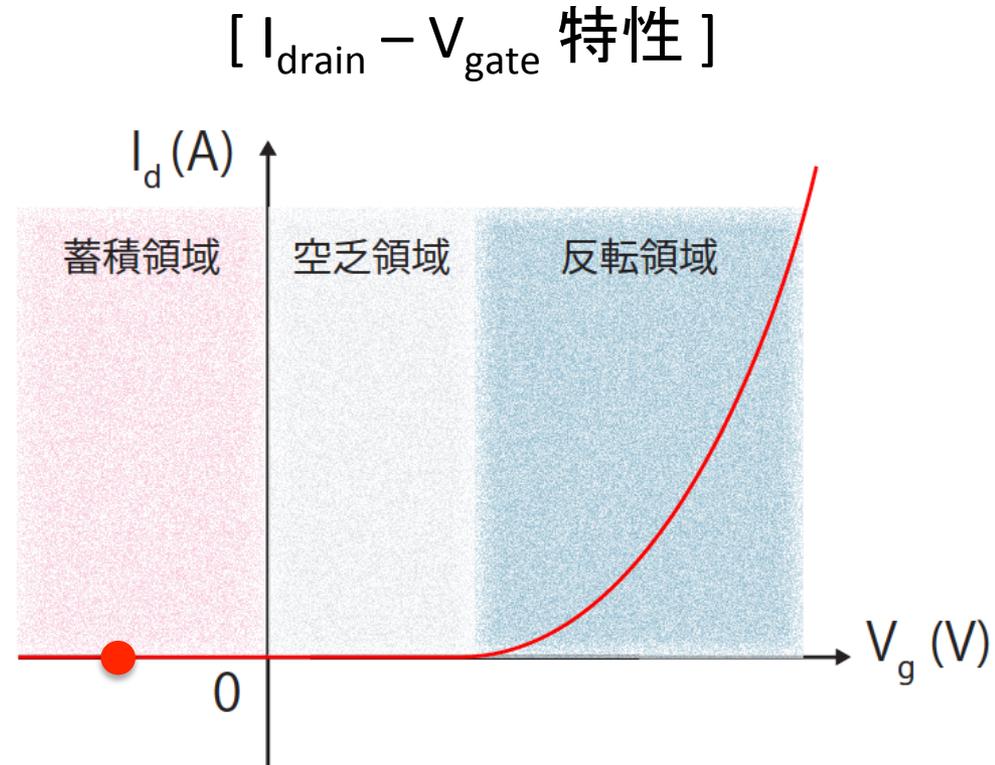
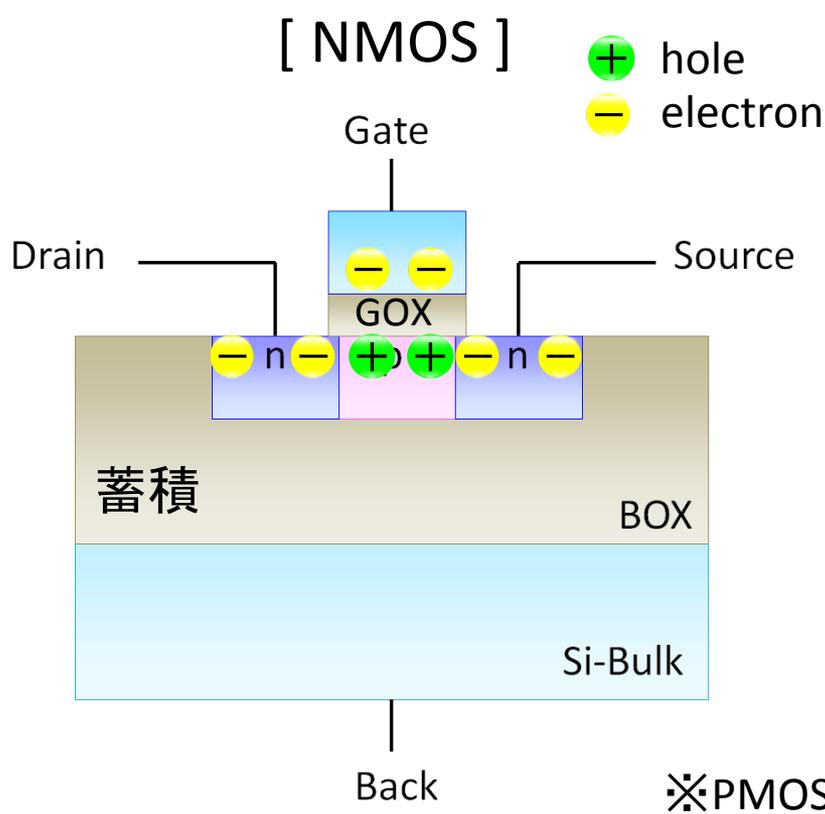


まずはSOIPIXの課題を解決

SOIPIXの課題解決

MOSFETの動作

Gate電圧操作 ⇒ スイッチ : Drain/Source間電流通す / 通さない

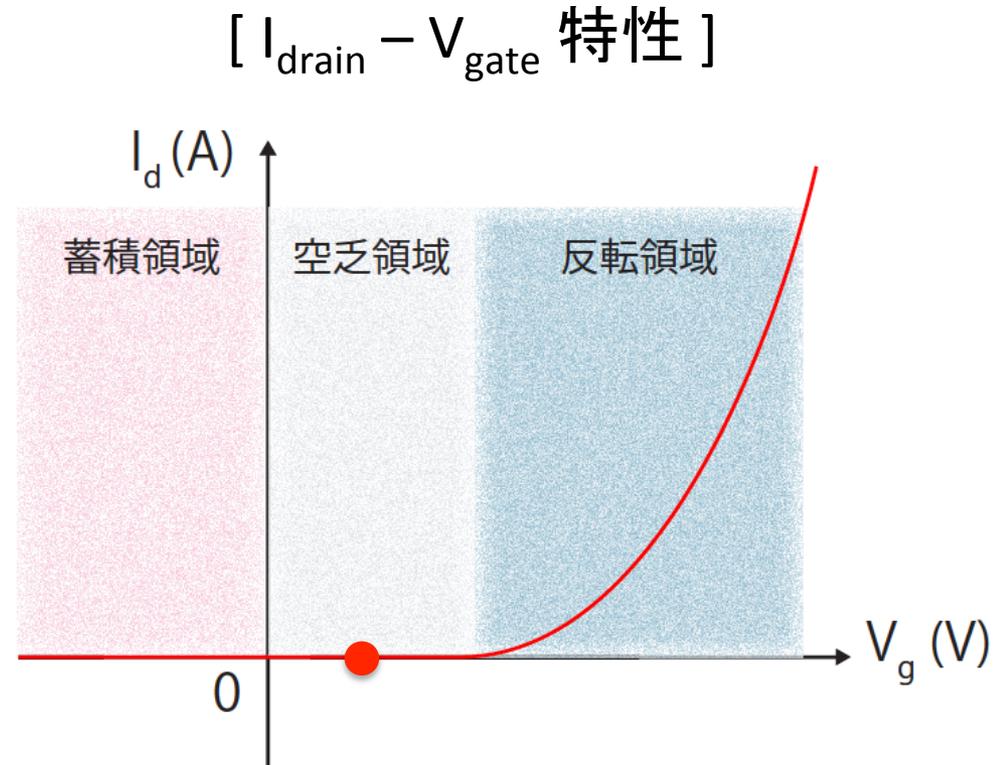
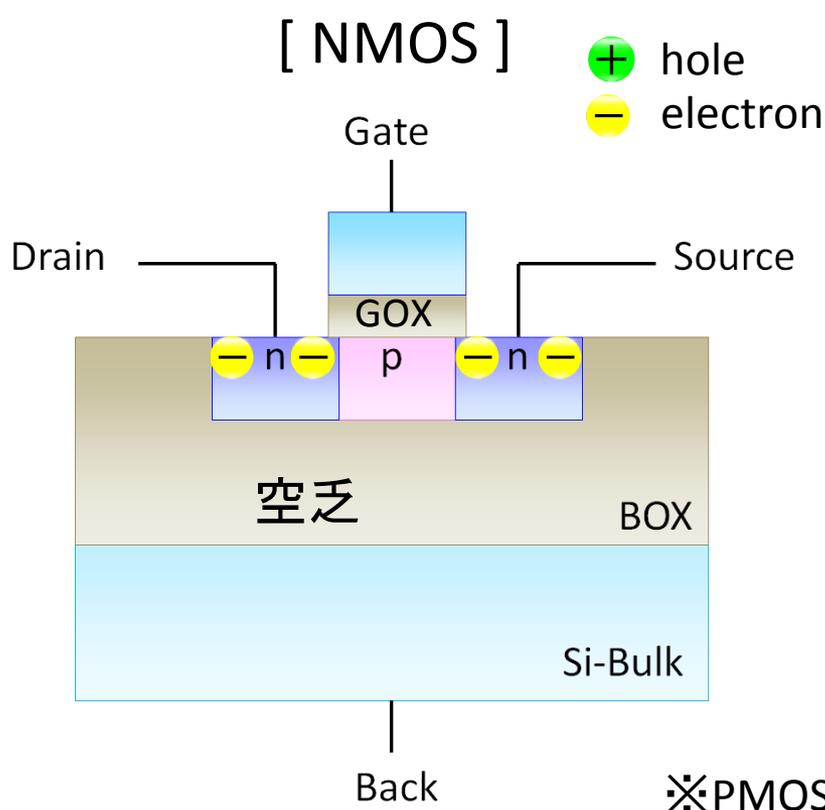


※PMOSは+-逆

ゲート電圧でGOX界面付近のキャリアを操作 ⇒ 電流操作

MOSFETの動作

Gate電圧操作 ⇒ スイッチ : Drain/Source間電流通す / 通さない

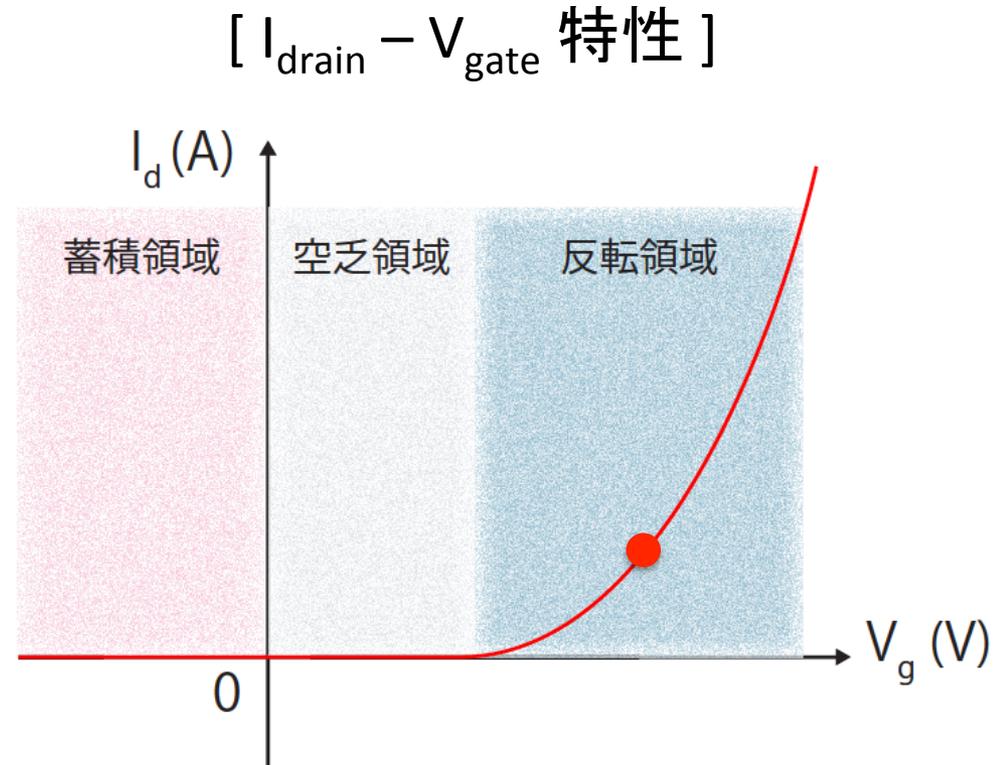
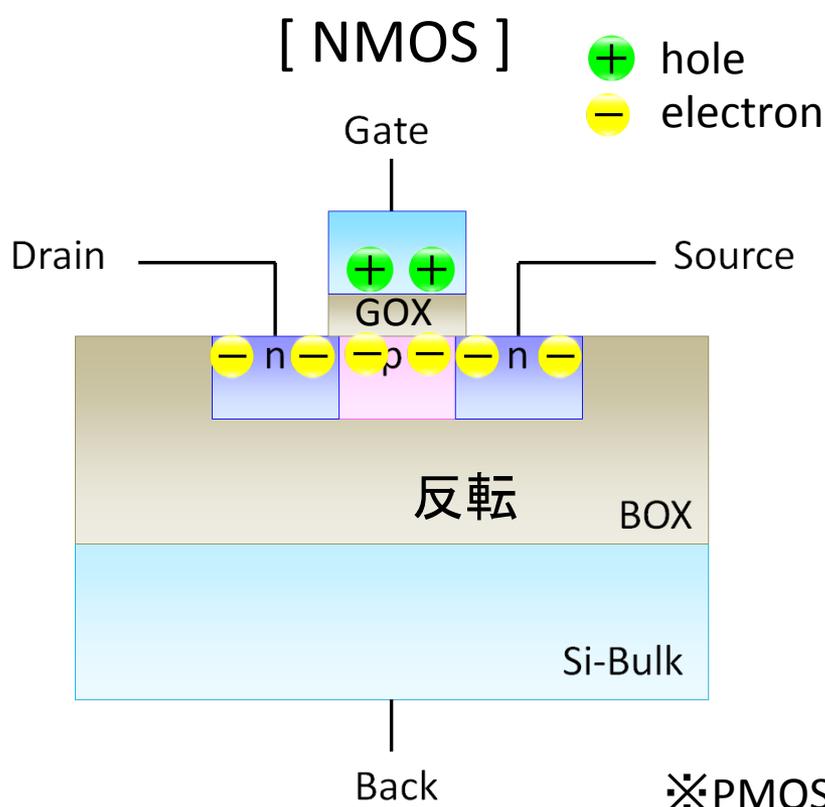


※PMOSは+-逆

ゲート電圧でGOX界面付近のキャリアを操作 ⇒ 電流操作

MOSFETの動作

Gate電圧操作 ⇒ スイッチ : Drain/Source間電流通す / 通さない



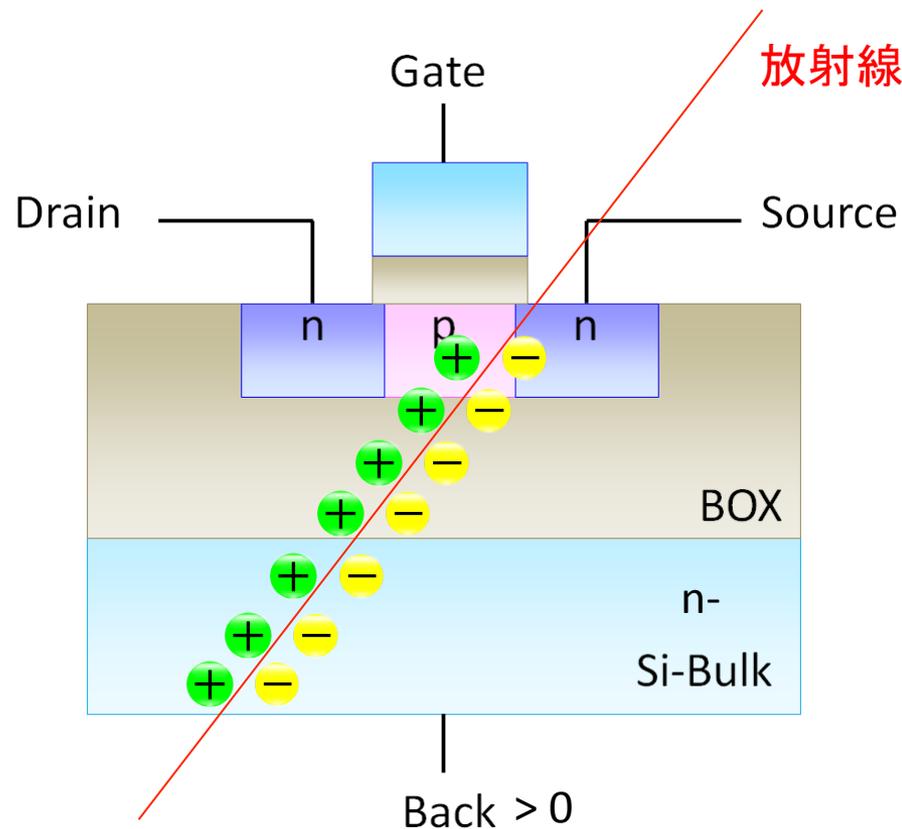
※PMOSは+-逆

ゲート電圧でGOX界面付近のキャリアを操作⇒電流操作

SOIにおける放射線ダメージ

TID(Total Ionizing Dose)効果:

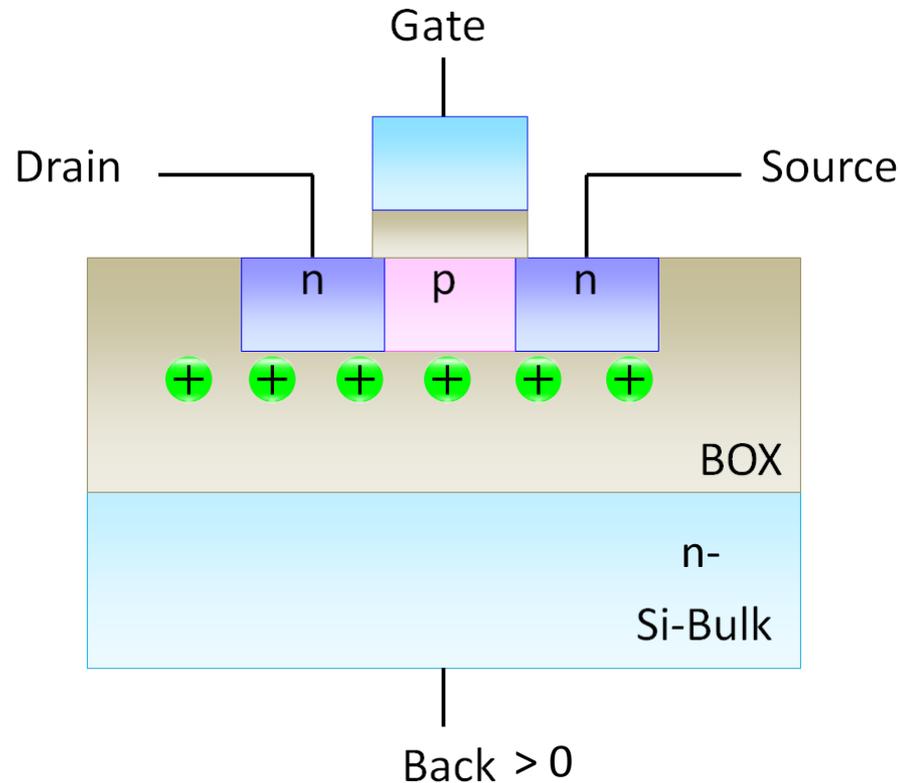
- 放射線蓄積によるBOX層でのホールトラップ
- トランジスタ閾値変動 → **読み出し回路が正常動作しない。**



SOIにおける放射線ダメージ

TID(Total Ionizing Dose)効果:

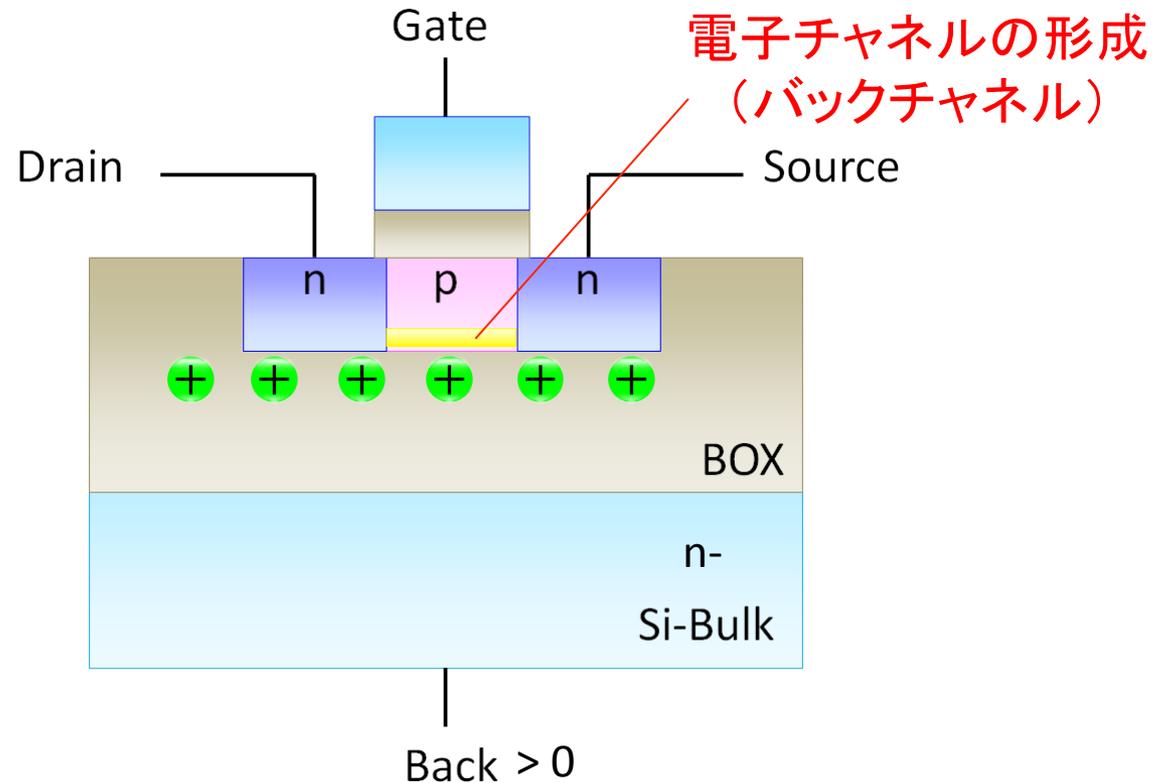
- 放射線蓄積によるBOX層でのホールトラップ
- トランジスタ閾値変動 → **読み出し回路が正常動作しない。**



SOIにおける放射線ダメージ

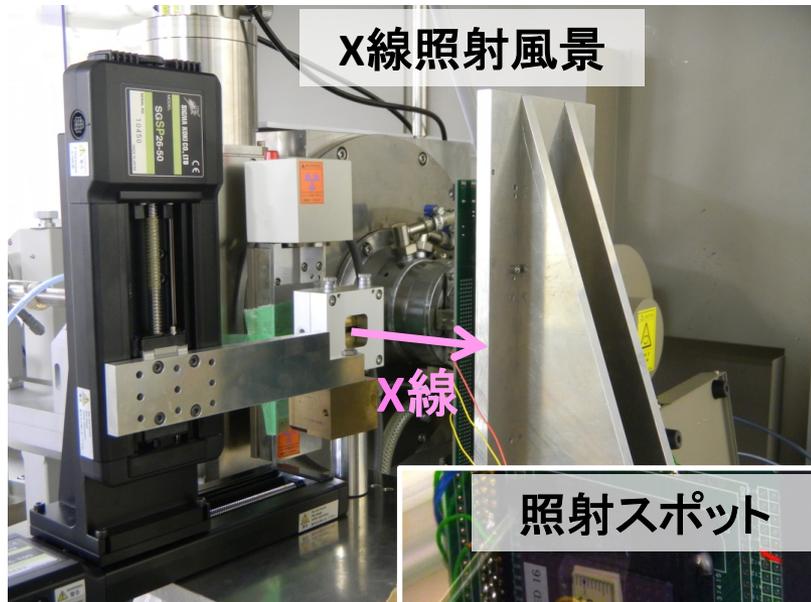
TID(Total Ionizing Dose)効果:

- 放射線蓄積によるBOX層でのホールトラップ
- トランジスタ閾値変動 → **読み出し回路が正常動作しない。**

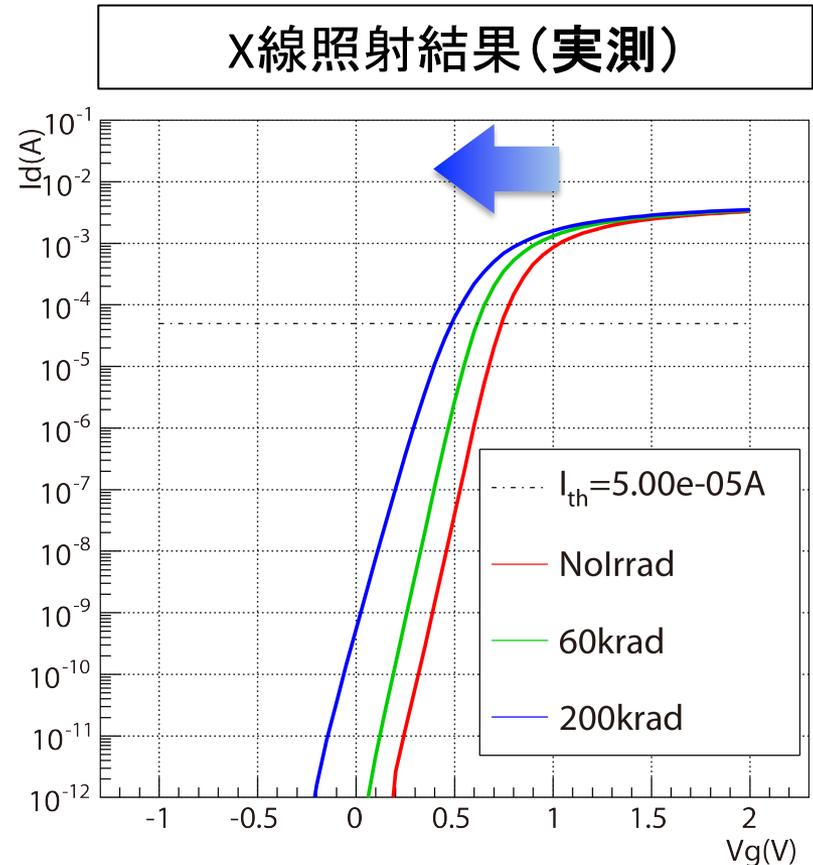


放射線ダメージを測定

X線ダメージによるトランジスタ特性の変化を測定



装置 : FR-D (リガク社)
X線 : CuK α 線 8keV



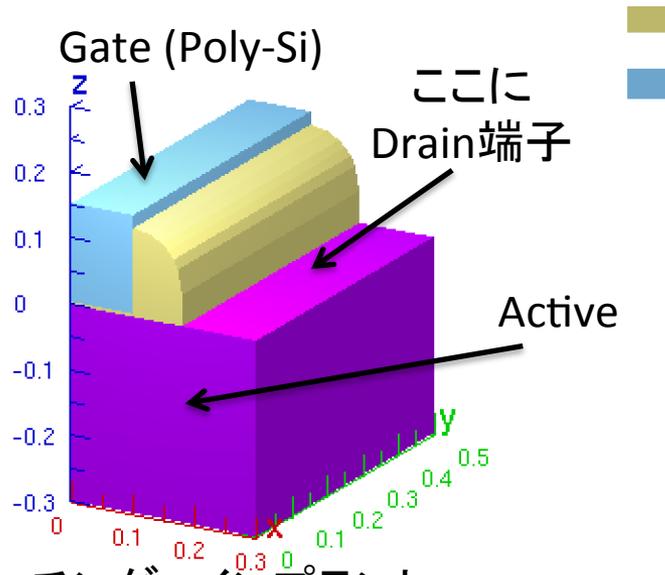
☹放射線ダメージによりトランジスタ特性がシフトする (NMOS)

TCADとは？

- TCAD = 半導体専門のシミュレーションソフト
 - 半導体プロセス / (作った) デバイスのシミュレーション

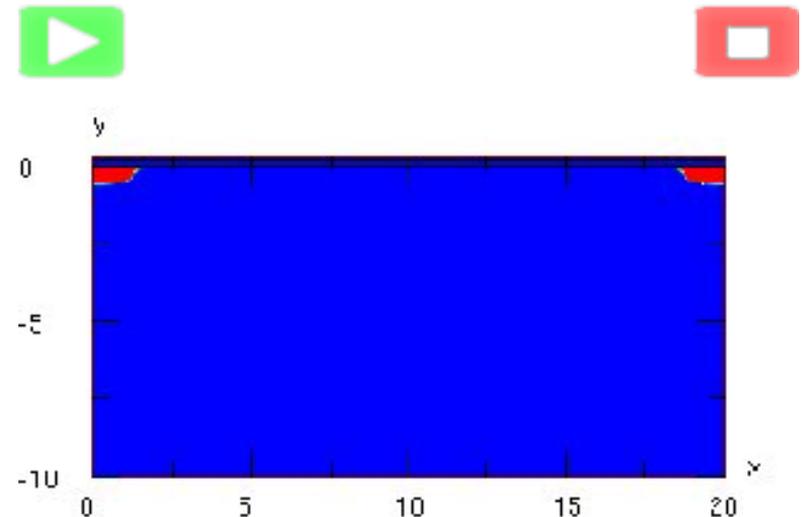
例えば、こんなことします↓↓↓

プロセス (3D MOSFETの半分)



エッチング、インプラント...
色々できますが、あまり使っていません。

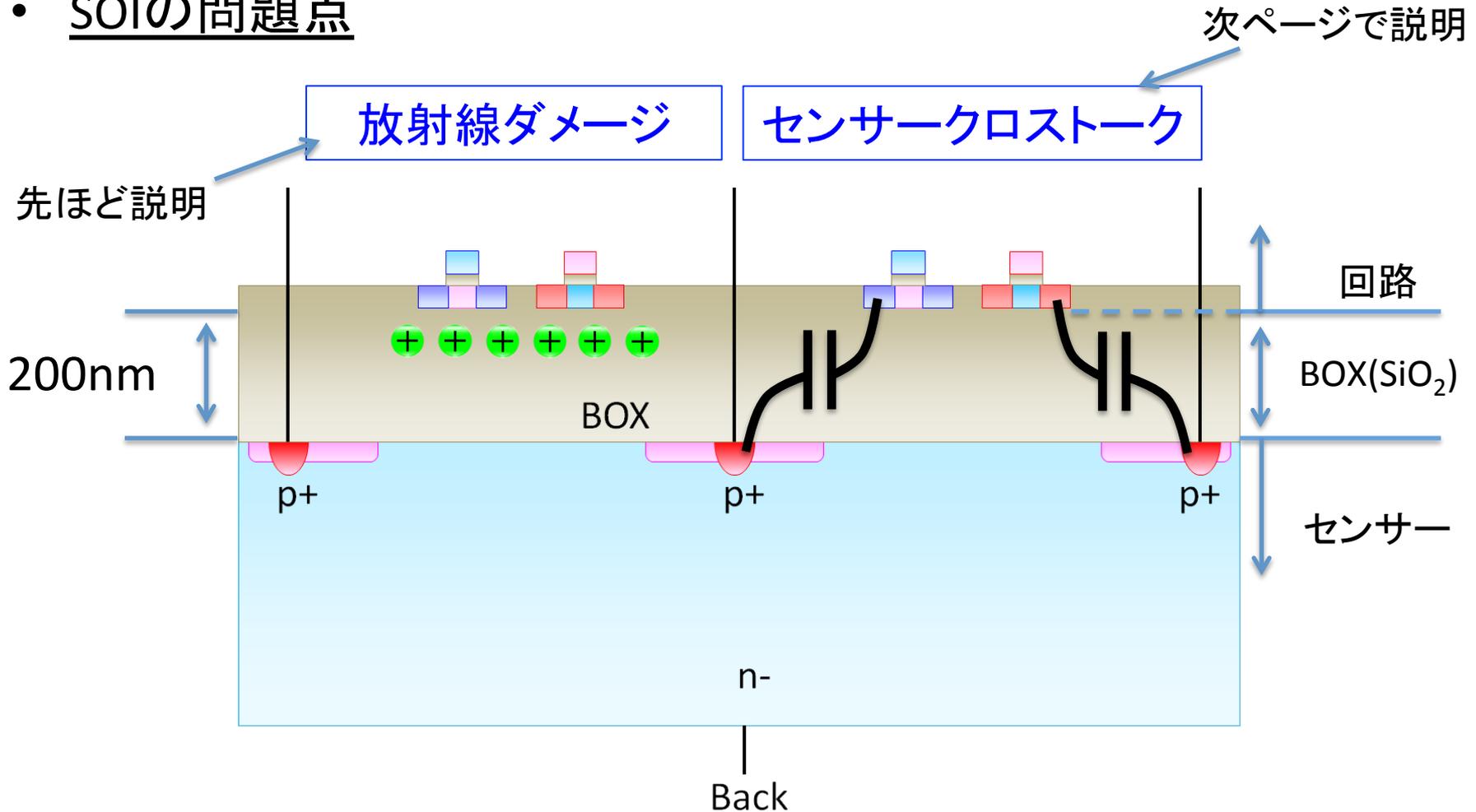
デバイス (電荷収集シミュレーション)



TCADシミュレーションでSOIの課題解決を確認します。

SOIの問題点

- SOIの問題点



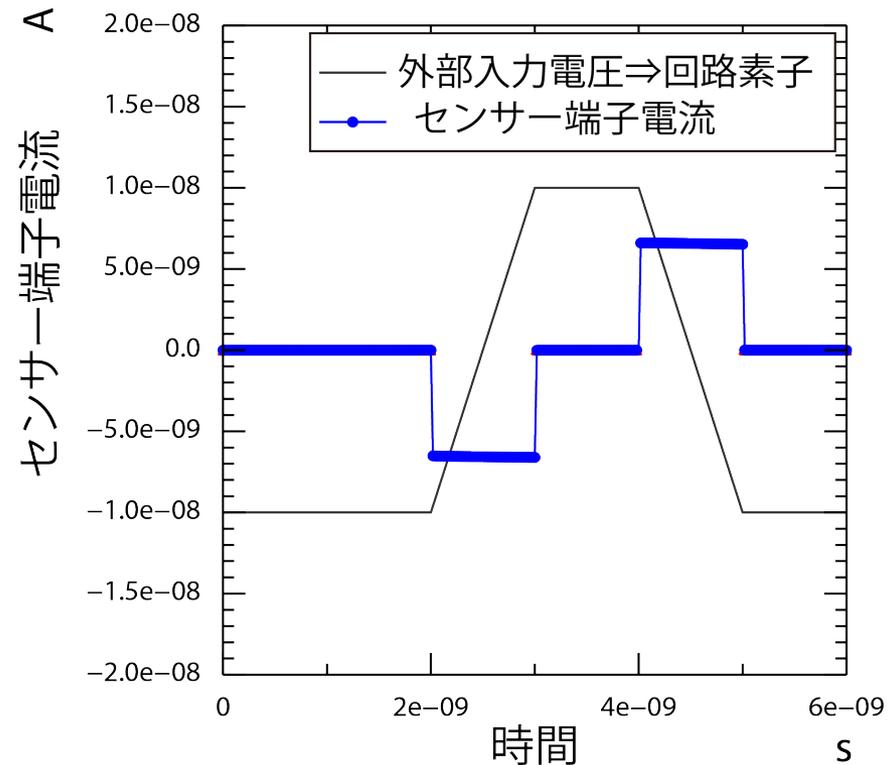
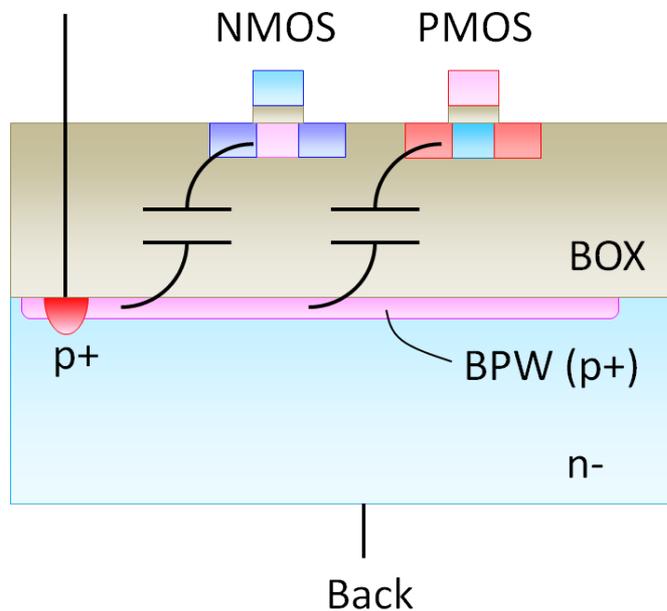
※他にもありますが、本講演ではこの2つを議論します。

センサークロストーク

- センサー／回路クロストーク

- センサーと回路が近接 ⇒ 回路とセンサー端子に寄生容量

容量性の干渉 $Q = CV$

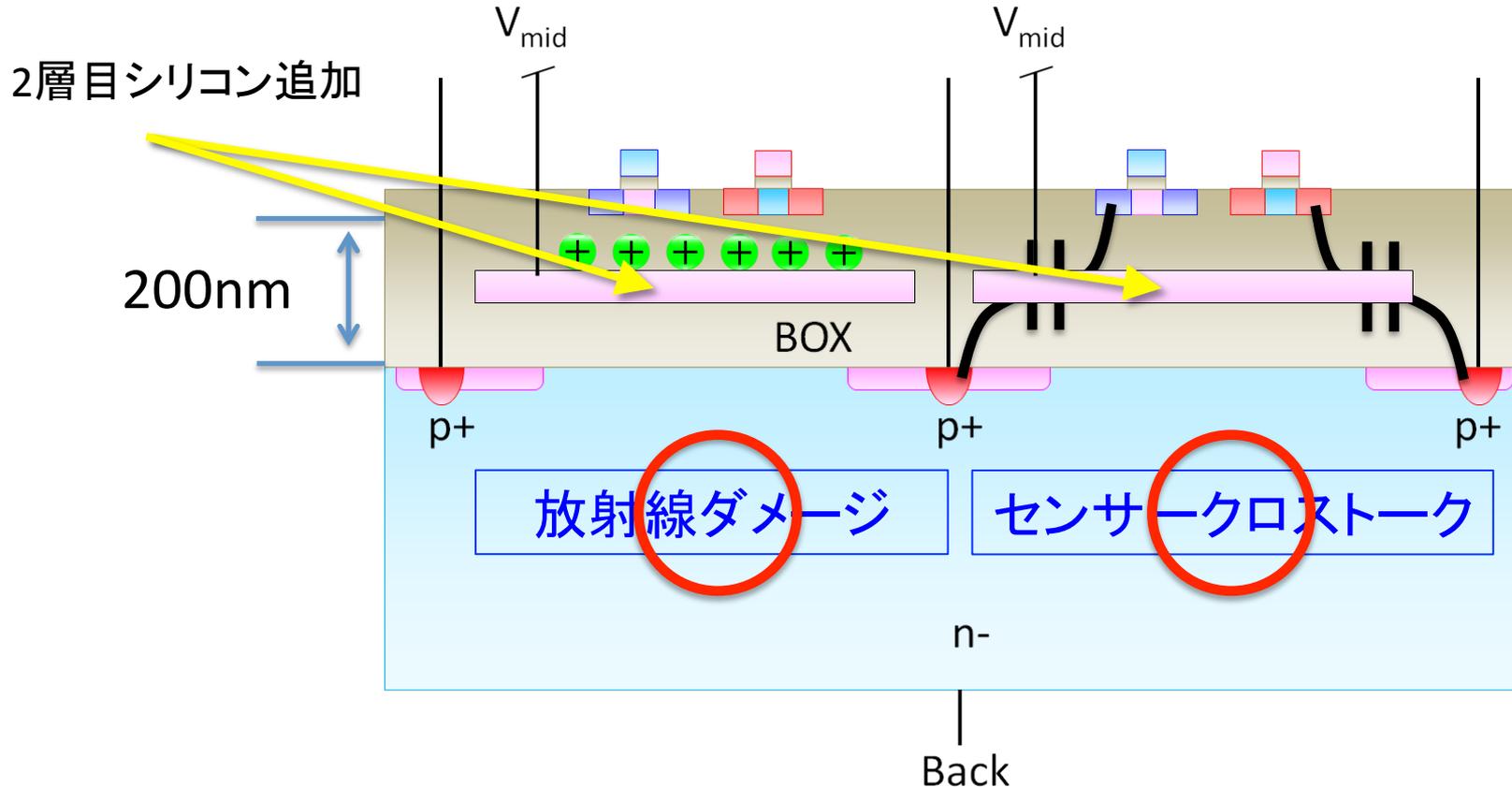


⊗回路の電圧変化⇒センサー端子に電流:センサークロストーク

Double SOIが解決します

- Double SOI構造

- SOI層とセンサー層に、もう1層シリコン層(電位固定)を挟む構造

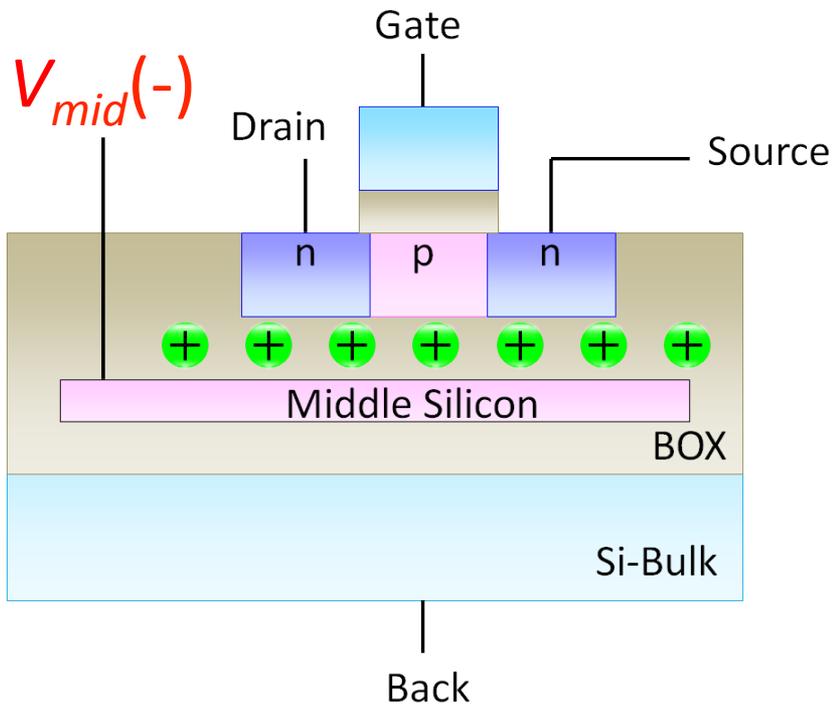


2層目シリコンを任意の電圧に固定 ⇒ 課題を解決
シミュレーションで確認してみます。

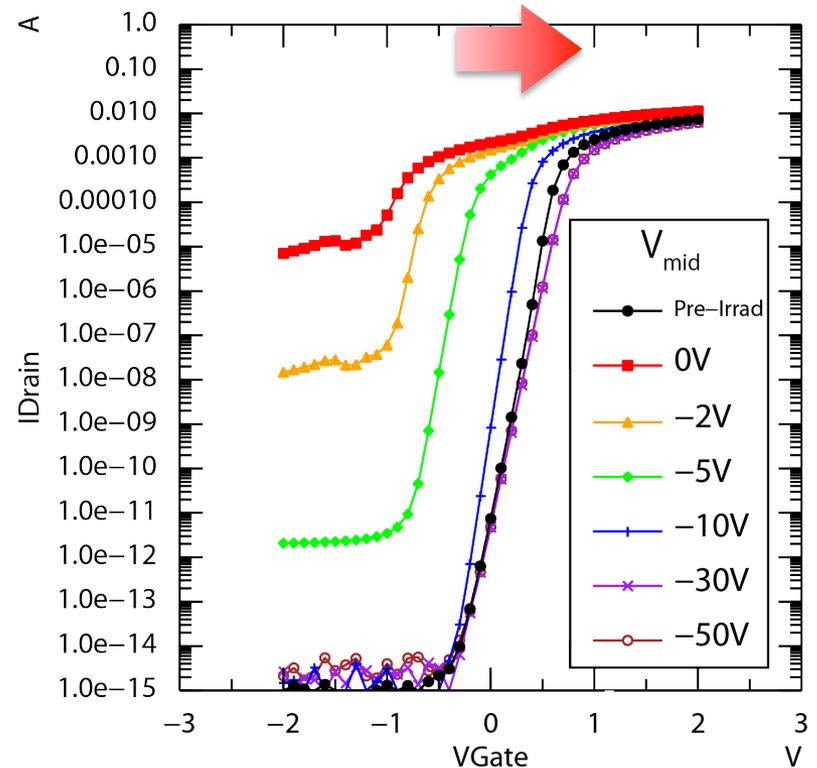
放射線ダメージ解決

- 放射線ダメージ

- 放射線蓄積⇒BOXにホール蓄積⇒トランジスタ特性変化



補償電圧 V_{mid} による変化(TCAD)



☺ホールトラップを相殺する補償電圧をかける → 特性戻す

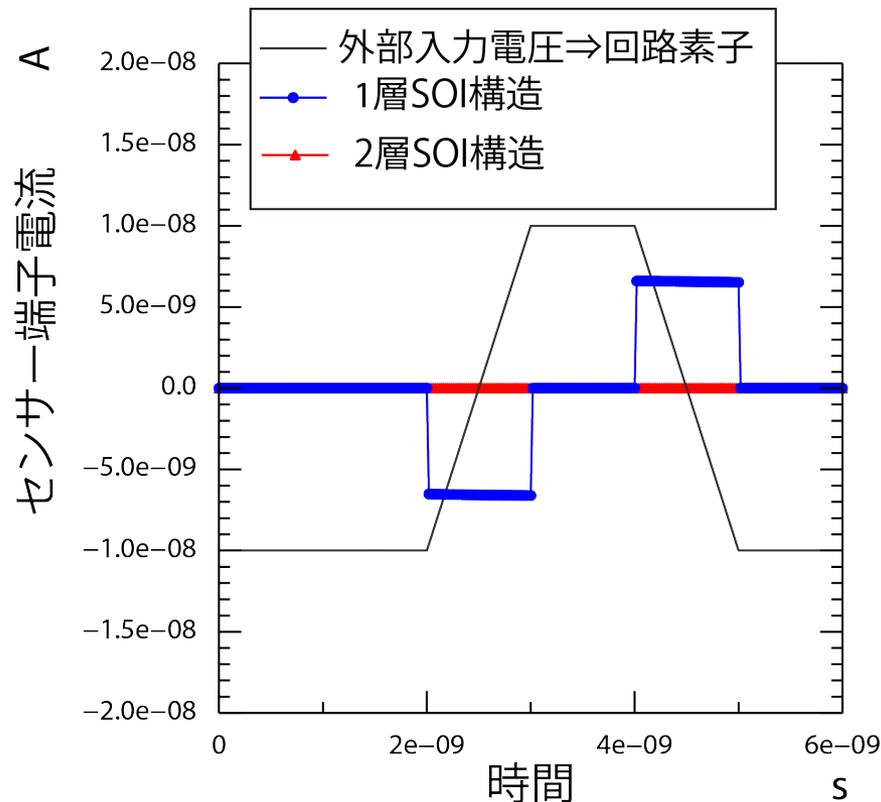
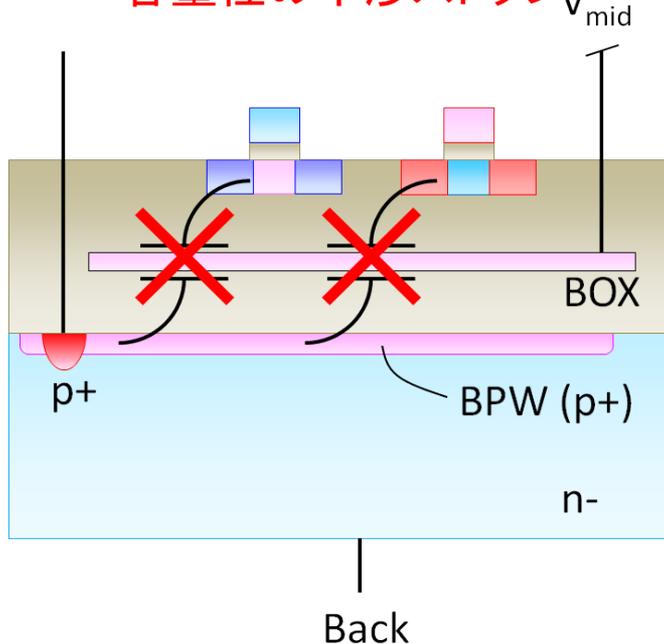
センサークロストーク解決

- センサークロストーク

- センサーと回路が近接 ⇒ 回路とセンサー端子に寄生容量

$$Q = CV$$

容量性の干渉ストップ V_{mid}

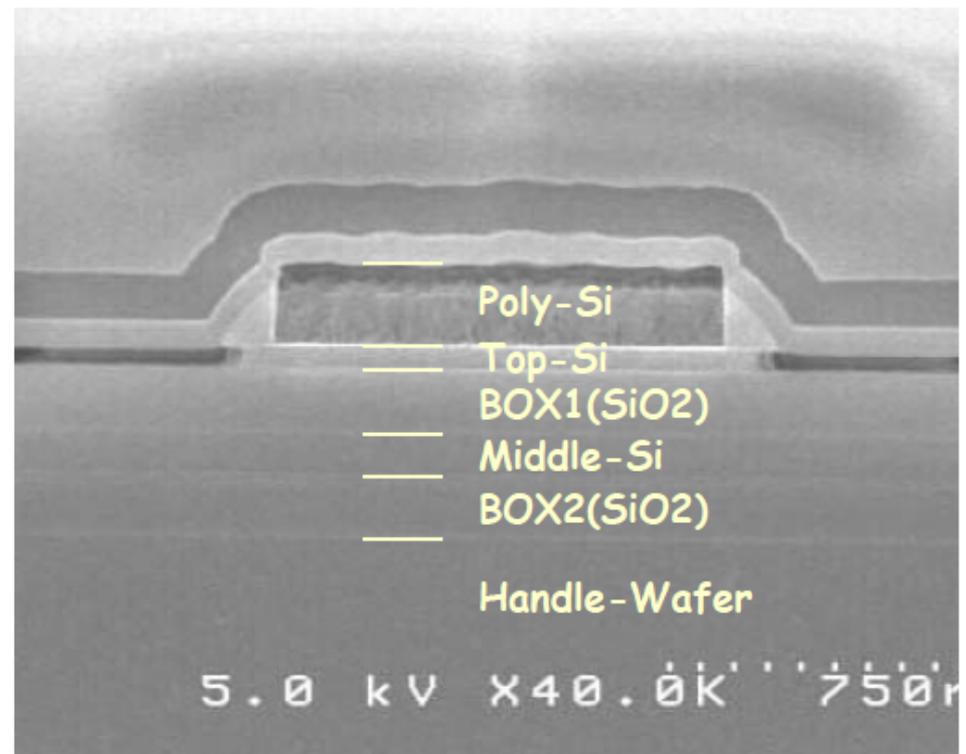
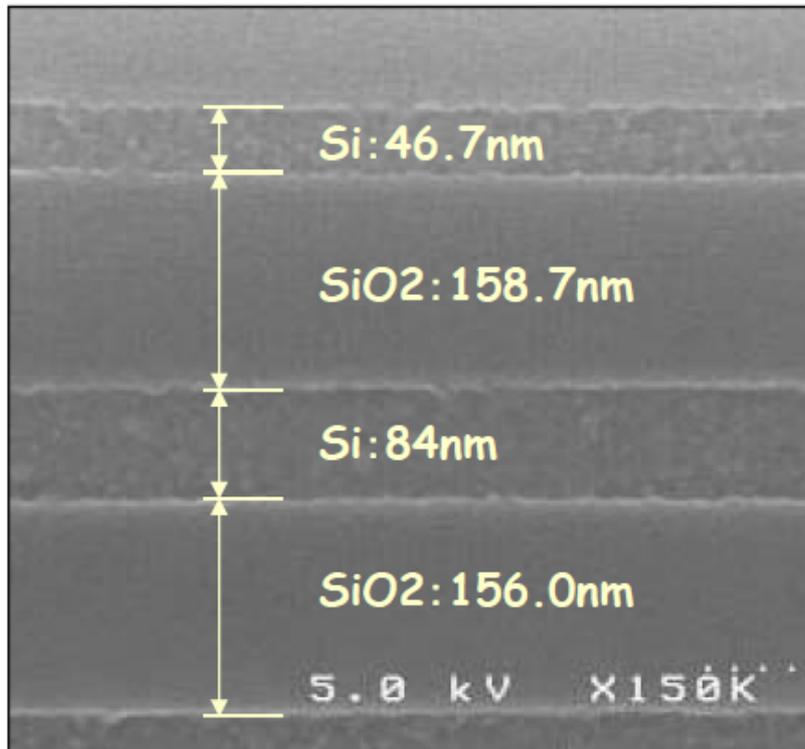


☺ Double SOIでセンサー/回路間の容量を切断

NEWS!! : Double SOI完成!

- ついに、Double SOI基板が完成・到着します(9月)!

電子顕微鏡写真(PIXEL2012新井先生のスライド~抜粋)



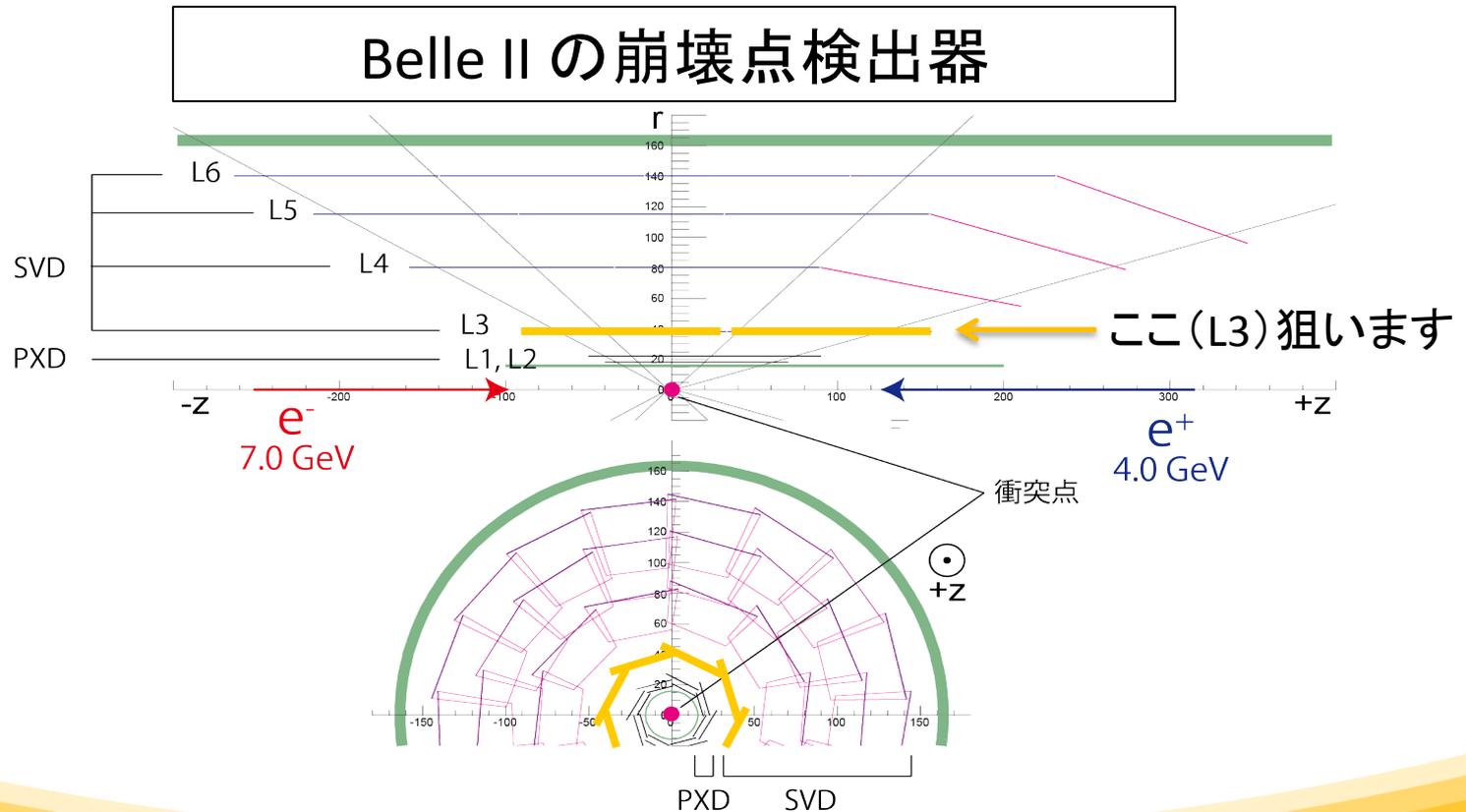
期待する性能が出るはずっ、出てくれー!!

SOIPIXの課題を解決 ⇒ 高エネ向けのSOIPIXの開発はじめました

PIXORの開発

PIXORをはじめました

- PIXOR
 - 読み方:ピクサー[piksər]
 - 標的: Belle II崩壊点検出器 (高エネルギー実験向け)

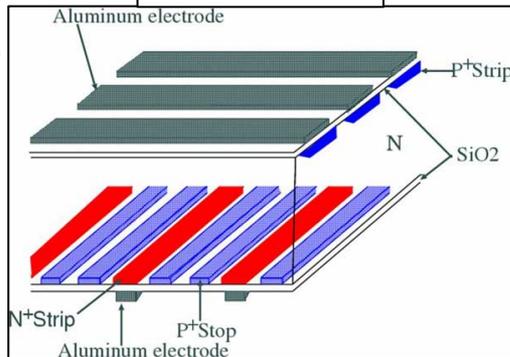


PIXORはじめました

- PIXOR

- 読み方 **DSSD** [piksər]

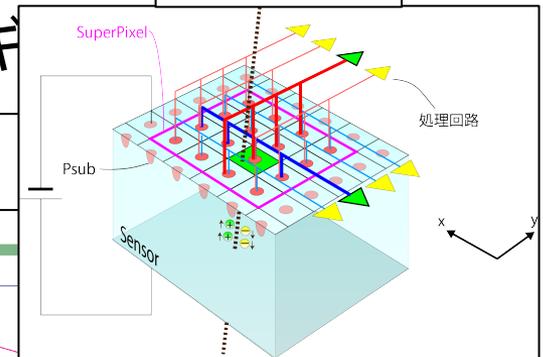
- 標



検出器 (高エネルギー)
の崩壊点検出器



PIXOR



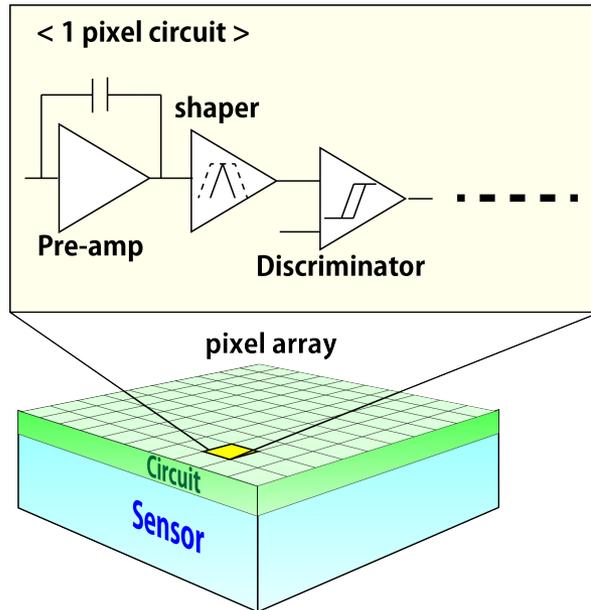
	DSSD + APV25
占有率	6.7 %
センサー厚	300 μm
センサーピッチ	$\phi:50, z:160 \mu\text{m}$
サンプリング周波数	42.33 MHz
読み出し形式	アナログ (~10bit)

	SOI PIXOR (16 OR)
占有率	0.035 %
センサー厚	100 μm
センサーピッチ	$\phi:35, z:70 \mu\text{m}$
サンプリング周波数	42.33 MHz
読み出し形式	バイナリ (1bit)

占有率・物質質量低下を狙う！！

PIXORへ...

- Pixel検出器(chip on sensor)では...



Pixelごとに処理回路をのせる

- ➡ 1 pixel = 1circuit
- ➡ pixel size = 回路面積
- ➡ 複雑な回路 ⇒ pixel size大
- ➡ **位置分解能低下**
(一方、ストリップでは占有率が高い)

	ストリップ	ピクセル
占有率	×: 高い	○: 低い
センサー寄生容量	×: 高い	○: 低い
ゴースト	×: 発生あり	○: 発生なし
読み出し量 (位置分解能)	○: 少ない (○: 高い)	×: 多い (×: 低い)

PIXOR : 新型センサー処理

PIXOR (PIXel OR)



1. センサーからの信号を2方向に分ける(X, Y)
↓
2. 2方向のピクセルでアナログ信号のORをとる(X, Y)
↓
3. ORされた信号は読み出し処理回路で処理
↓
4. 2次元のヒット情報を得る

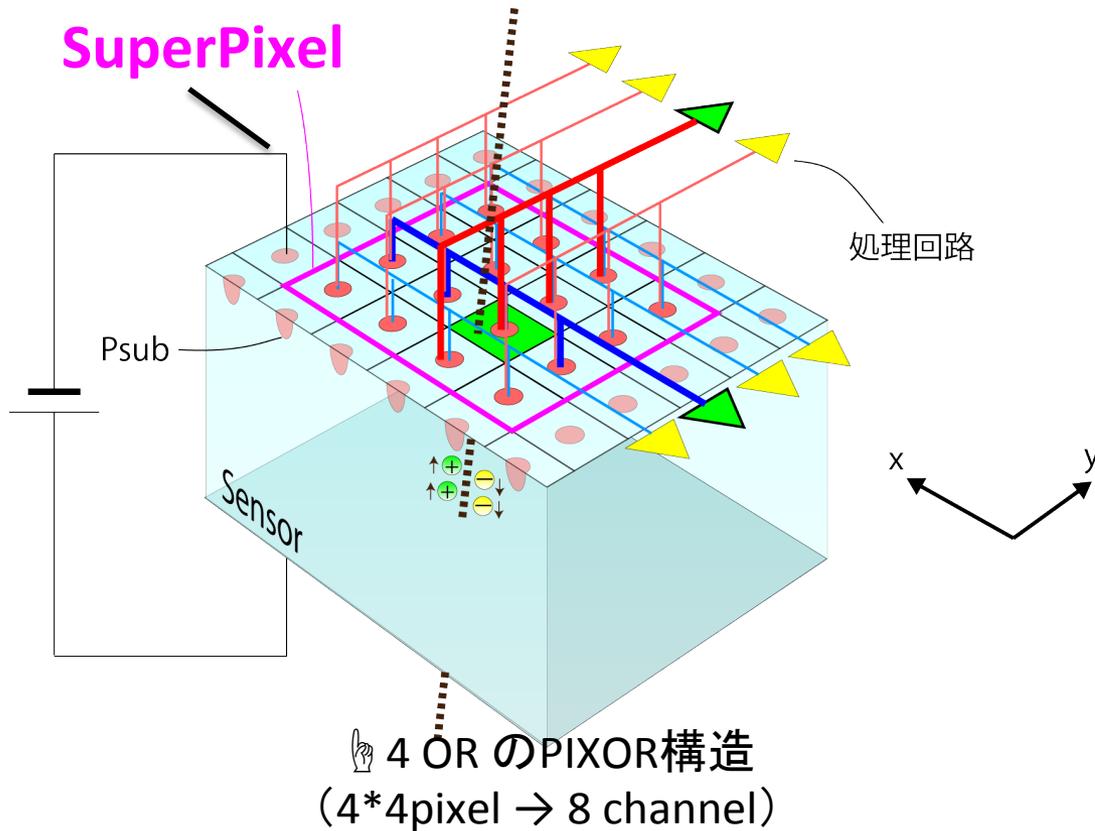
処理回路面積が減少

$$\begin{array}{ccc} n^2 & \rightarrow & 2n \\ \text{(pixel)} & & \text{(PIXOR)} \end{array}$$

複数ピクセルで回路面積を共有⇒位置分解能の制限を緩和
(OR数で調節可能！！)

PIXOR : 新型センサー処理

PIXOR (PIXel OR)



1. センサーからの信号を2方向に分ける(X, Y)
2. 2方向のピクセルでアナログ信号のORをとる(X, Y)
3. ORされた信号は読み出し処理回路で処理
4. 2次元のヒット情報を得る

処理回路面積が減少

n^2
(pixel)



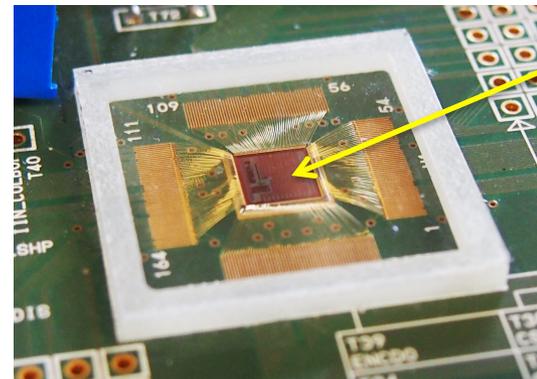
$2n$
(PIXOR)

複数ピクセルで回路面積を共有⇒位置分解能の制限を緩和
(OR数で調節可能！！)

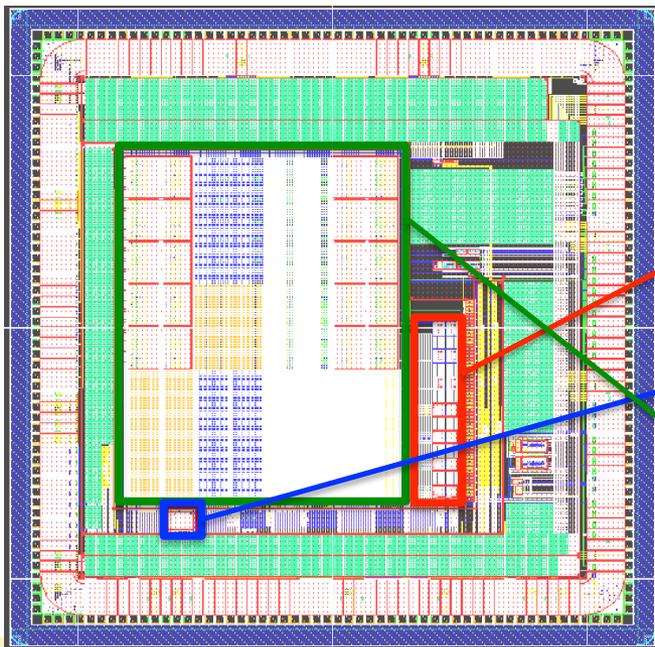
PIXOR1 was fabricated !!

- PIXOR1を試作 & さっそく評価

pixel pitch	25um * 40um
pixel OR数	16



PIXOR1



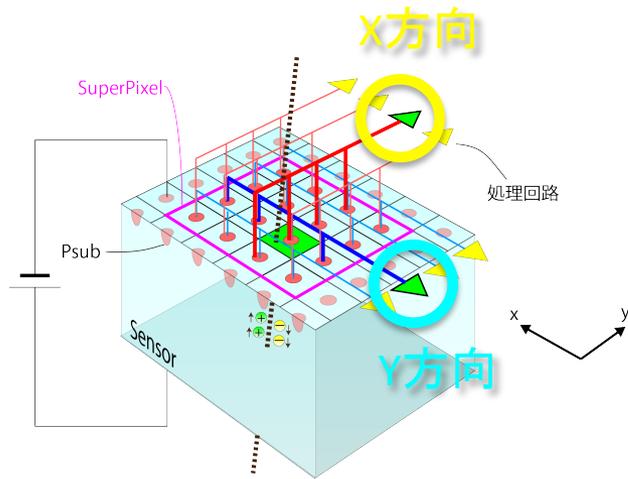
テスト項目

- 1. PIXOR処理後のアナログ信号**
→Pre-amp+Shaper出力をモニタ
- 2. トリガー処理用デジタル回路動作確認**
→トリガー時間ヒットを保存する回路
- 3. 大面積化して同時信号観測**
→パラレルなヒット信号をモニタ
(現在評価中...を
11aSH-1で講演: 篠田くん)

(株)A-R-Tec様によりレイアウト

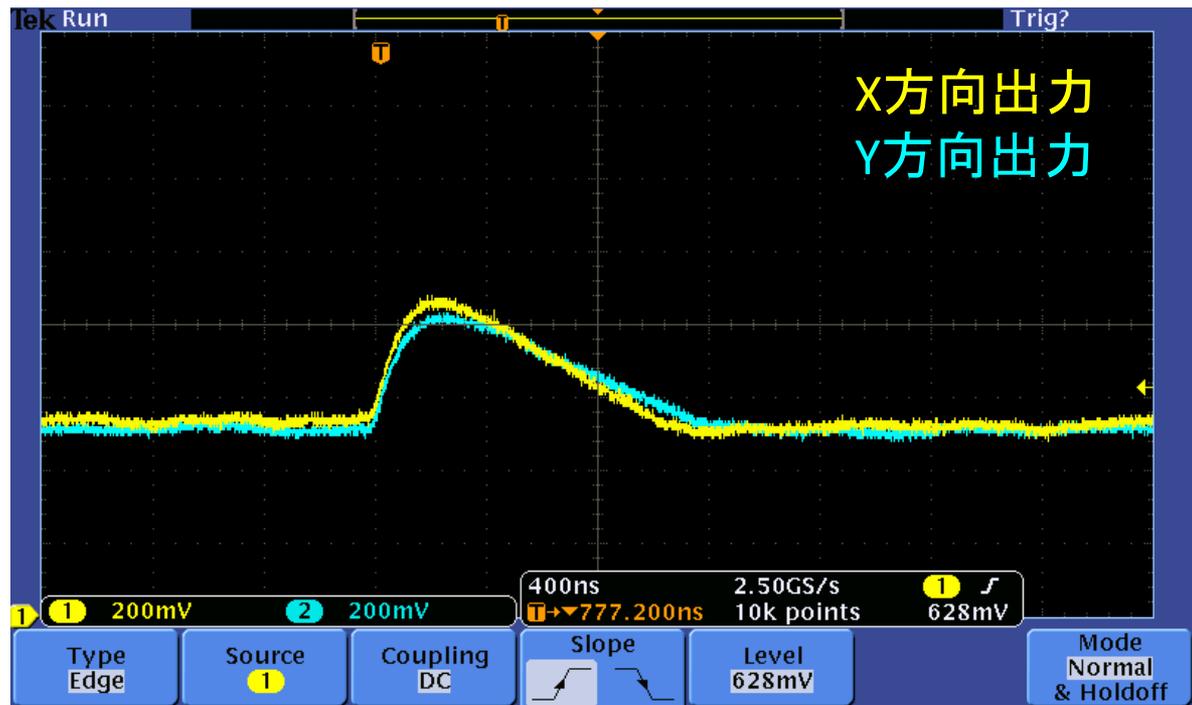
1. PIXOR構造 期待通りの動作

- PIXOR構造からの信号 → X,Yにヒット判定がかかる



処理回路:Pre-amp + Shaper

X線源Cd-109に対するアナログ(Shaper)出力



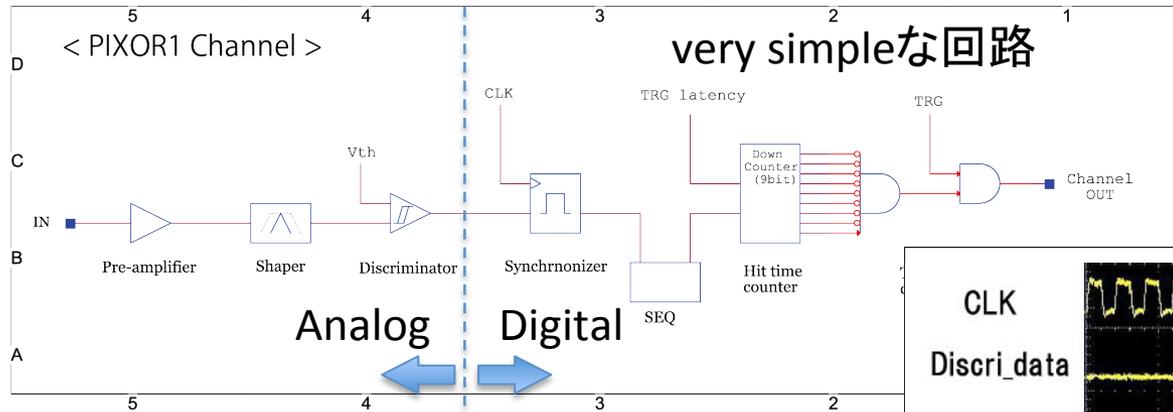
☺X, Y方向に同じShaper出力を確認 → PIXOR 正常動作

2. デジタル回路 期待通りの動作

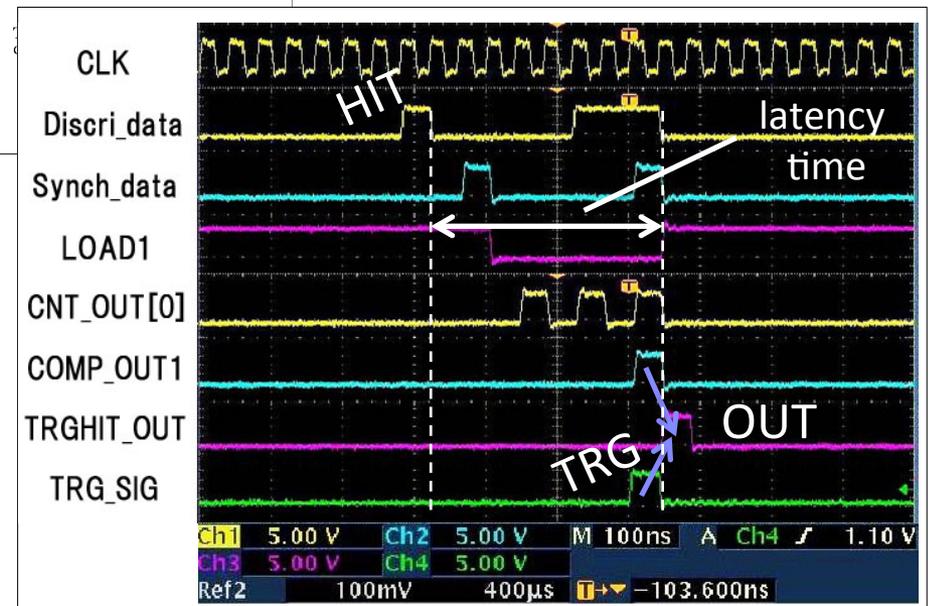
- トリガー信号でデータ取得

@高エネ

- トリガー信号は実際のイベント時間から遅れてくる (=trigger latency)



- ◆ verilogシミュレーション(設計)と一致。
- ◆ 25, 50MHzで動作を確認。
- ◆ ~10 μ sまで格納可能(CLK依存)。



☺ ヒット情報をTrigger Latency格納 → デジタル回路 正常動作

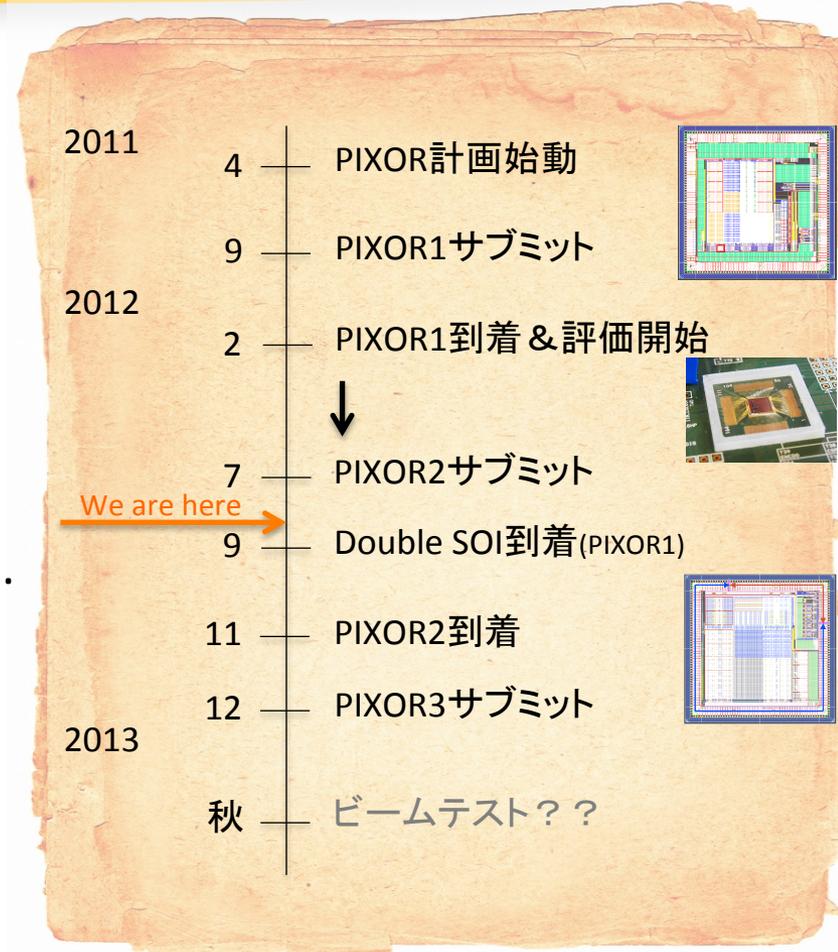
今後のPIXOR

• 現状

- PIXOR構造: 正常動作
- 簡単なトリガー処理回路: 正常動作

• 課題

- Double SOIでの正常動作
- アナログ回路最適化: shaping time...
- デジタル回路高度化:
- ビームテスト: MIPに対する応答
- 未知の課題たち...



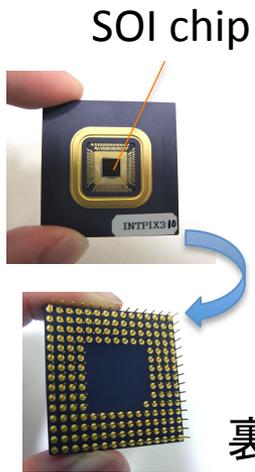
☹☹☹ PIXORの発展はまだまだこれからだっ！！

懺悔＋近況報告

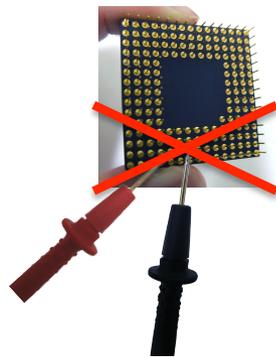
番外編

懺悔 (ざんげ)

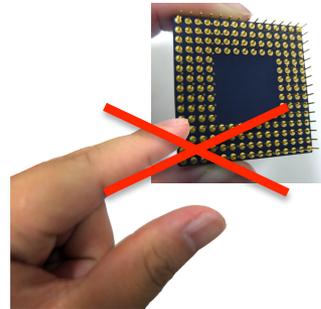
- トランジスタ大量に壊しました...@放射線ダメージ試験



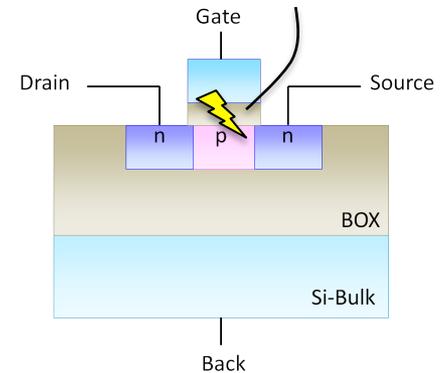
テスター
直づけ厳禁！！



素手厳禁！！

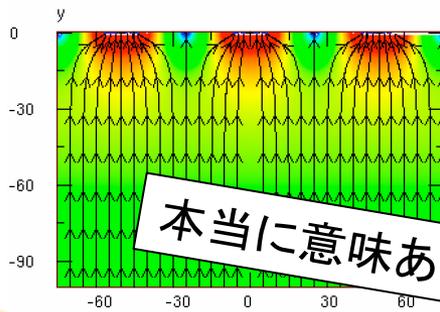


基本GOXが破壊されます

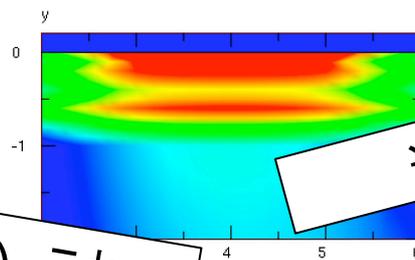


静電気グッズ
フル装備で挑みましょう！！

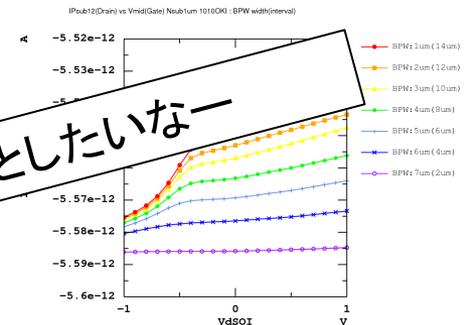
- TCAD飽きました...



本当に意味あるのか、これ？



違うことしたいなー



布教活動

- PIXEL2012(9/2 ~ 7)でPIXORを世界に発信。

ポスター発表

Development of the Pixel OR SOI Detector for High Energy Physics Experiment

Y. Ono, A. Ishikawa(Tohoku Univ), Y. Arai, T. Tsuboyama(KEK), Y. Onuki(Tokyo Univ), T. Imamura, T. Ohmoto, A. Iwata(A-R-Tec Corp)




Motivation ⇒ SOIPIX

Target : Vertex detector @ High Energy Experiment

- Search vertex point of the $B \rightarrow$ equal particle decay
- Reconstruct charged particle track
- Separate effective event from High background

WANTED

- High point resolution
- Low Occupancy
- Low Material Budget
- ...etc

SOIPIX detector (SOIPIX)

SOI(Silicon On Insulator) wafer substrate = "Sensor"

Monolithic detector

- Low material budget
- High SN
- Complex functions in a Pixel
- High yield (No beam loading)
- SOI CMOS readout
- Low power operation
- Stability for wide temperature
- No latch up / SEU

Suitable for vertex detector.

PIXOR Concept

But, a Monolithic(chip On Sensor) Pixel Detector is ...

- Pixel \Rightarrow high segmentation, S/N
- Low Occupancy
- Low Material Budget

Mounting many functionalities on the chip, pixel size is limited by its large circuit area

- Low point resolution

While, a Strip Detector is ...

- Strip \Rightarrow low segmentation, S/N (comparing to a Pixel detector)
- High Occupancy
- High Material Budget
- Large strip area \Rightarrow no constraint for strip pitch (generally off-sensor)
- High point resolution

~ New Readout Scheme ~

PIXEL OR (PIXOR)

- Divide signal into 2 direction (X, Y)
- Take OR along 2 direction pixel (X, Y)
- OR signal is processed by Readout circuit
- Get 2-dimensional hit information

Effective Circuit Number on a SuperPixel (n*n pixel)

By sharing the circuit area with logical OR pixels, we adjust

- High point resolution & Low Occupancy

PIXOR1 Evaluation

We fabricated first prototype named "PIXOR1", and checked following 3 contents.

PIXOR1 parameter

- Binary Hit Info (Large area)

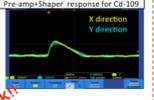
pixel pitch	25 μ m*40 μ m
pixel OR	16
Number of pix	5,632pix

Lays 0.20 μ m SOI process

- Shaper Output (small pixel OR block)

Shaper Output

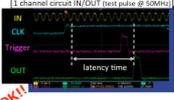
Pre-amp+Shaper response for Cd-109



OK!

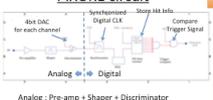
Trigger Circuit

1 channel circuit IN/OUT test pulse @ 50MHz



OK!

PIXOR1 circuit

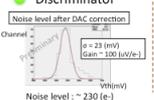


Analogue: Pre-amp + Shaper + Discriminator
 \Rightarrow Binary Readout (Hit or not)
 Digital: Store hit information for trigger latency time
 \Rightarrow Down Counter (Hit \rightarrow Count Down)

Discriminator

Signal is equally divided into 2 directions with 2 separation diode.

Noise level after DAC correction



Channel

$\sigma = 23$ (mV)
 $\text{Mean} = 120$ (mV/e⁻)

Noise level: ~ 230 (e⁻)

Future prospect

- Through a beam test, measure its efficiency, cluster size for MIP
- optimize the time constant of the Pre-amp + Shaper
- More complicated digital circuit for the trigger readout

33

まとめ・最後に

まとめ

- SOI検出器は次世代の半導体検出器。
- SOI検出器の課題はDouble SOI構造で解決可能予定。
- 高エネ実験向け: PIXORの開発スタート・順調である。

最後に

- 研究にあたって、強かにサポートしてくださいました測定器開発室の皆様、東北大の皆様、ありがとうございました。
- 今後は成果をあげることで、感謝の意を示したいと思います。
(残念ながらDr.は違う研究テーマですが、全力でサポートを...)

**皆様、SOIPIXとPIXORの
応援よろしくお願いいたします！！**