

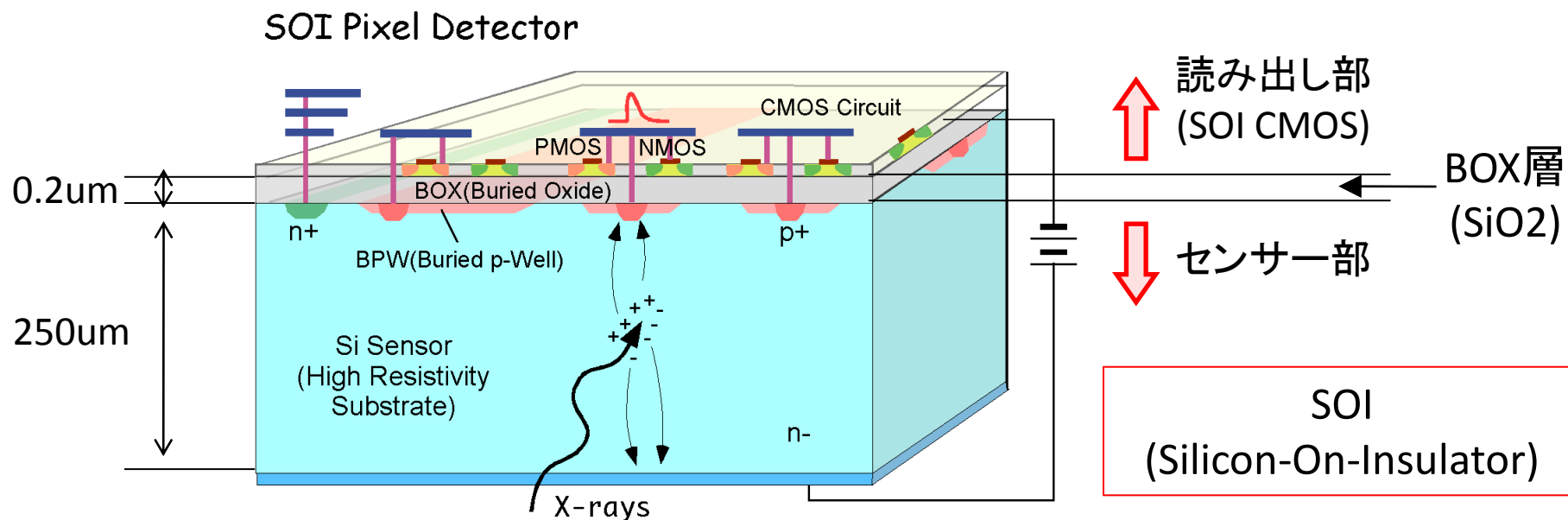
SOI検出器における X線損傷TID効果の軽減に関する研究



東北大学 小野善将 小貫良行 山本均
KEK 新井康夫 三好敏喜
その他 SOIPIXグループ

SOI検出器とは

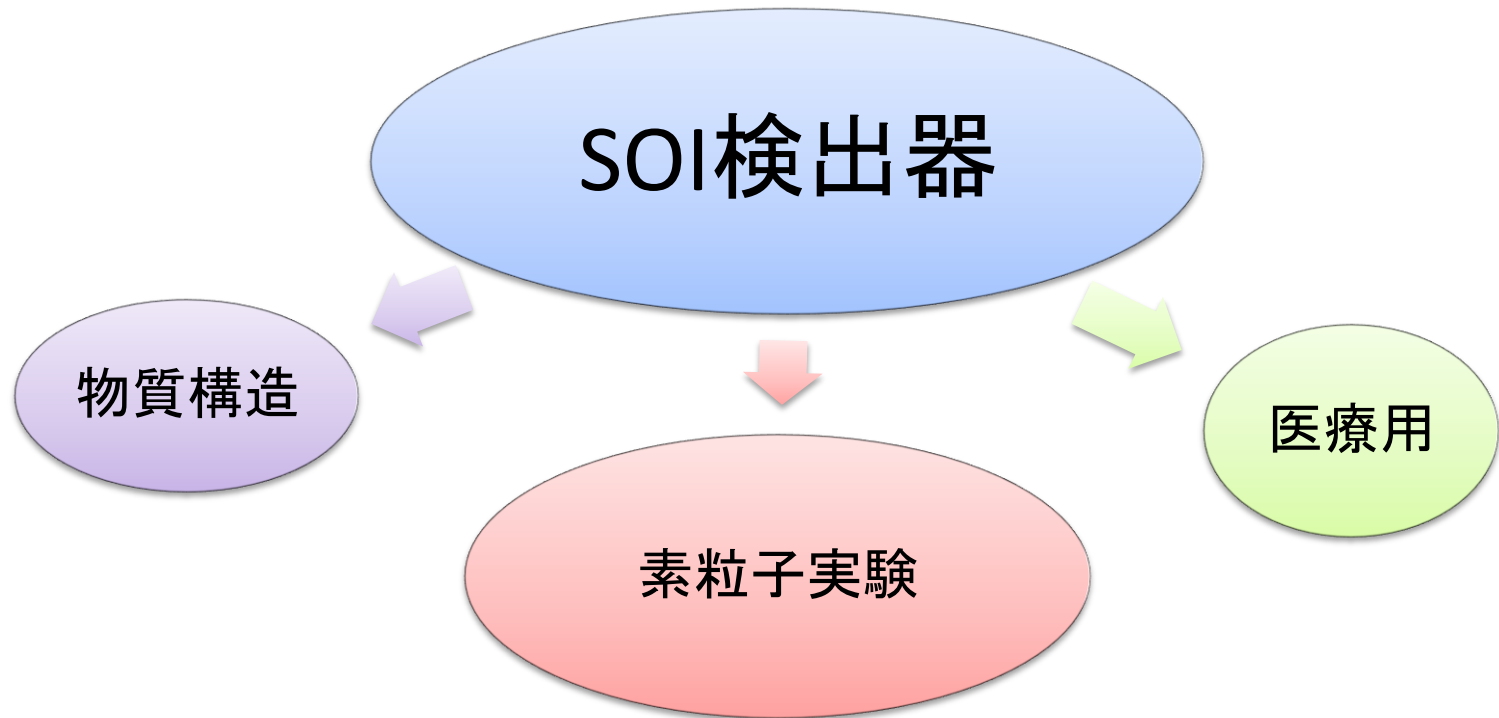
- SOI検出器とは、センサー部と読み出し部を絶縁層BOX(Buried OXide)で区切ったモノリシック型半導体検出器です。



- 金属バンプ不要 ⇒ 高速性、高集積性、低消費電力 etc...
- SOI CMOS ⇒ ラッチアップ耐性、容量低下 etc...

SOI検出器の用途

- SOI検出器は幅広い応用が可能です。



特に素粒子実験では検出器に**高いレベルの放射線耐性**が求められます。

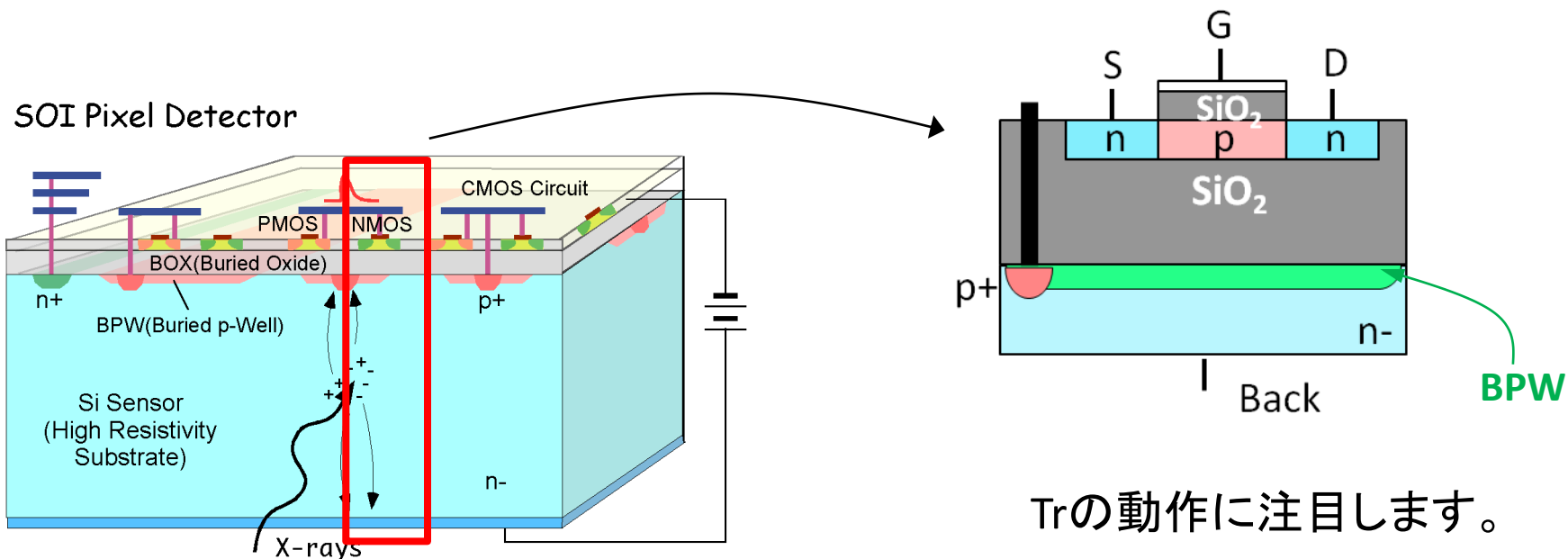
SOI検出器の課題

- Backgate 効果

センサー電圧がGate端子として働いてしまう効果
⇒ BPW (Buried P Well)により解決!!

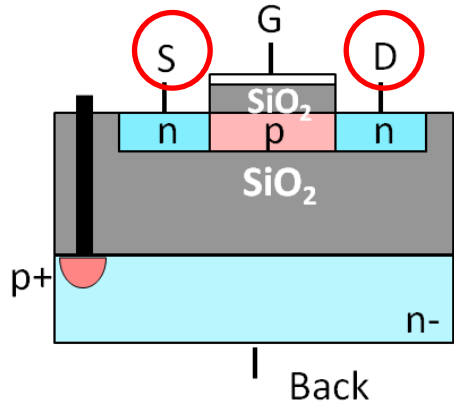
- 放射線耐性TID (Total Ionizing Dose) 効果

酸化層(SiO₂)または界面(Si/SiO₂)にホールが蓄積することで起こる効果
⇒ 今回の研究内容

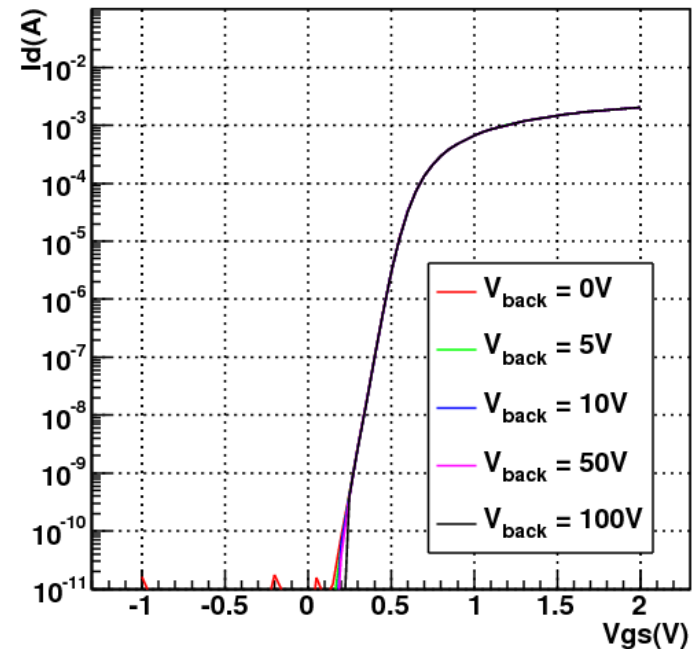
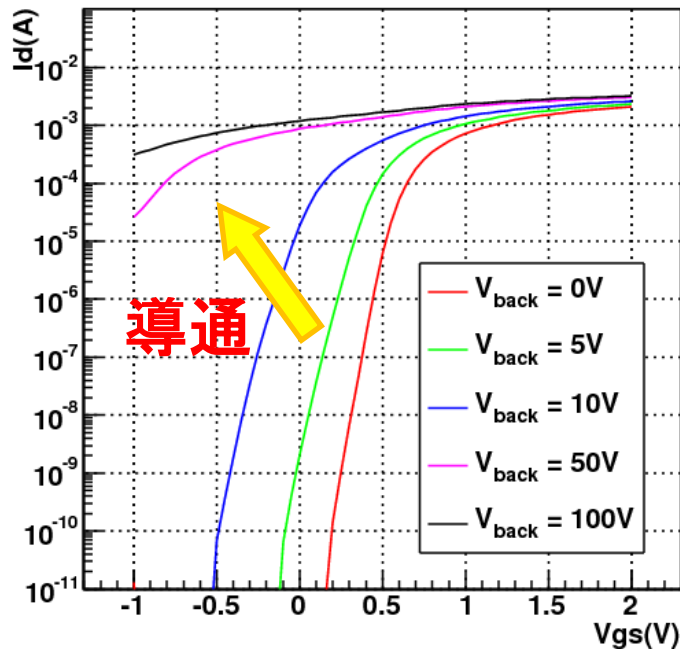
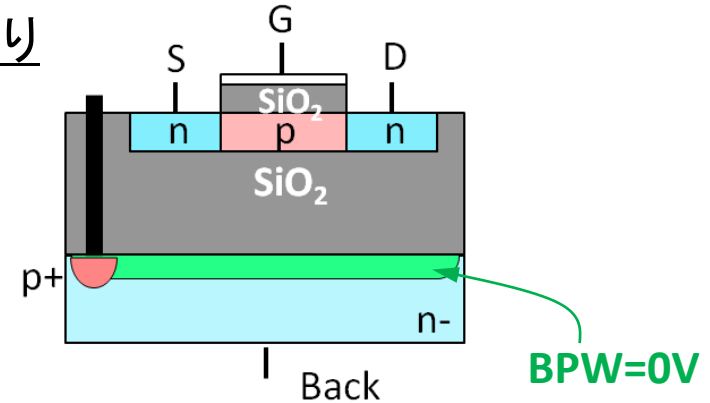


Backgate効果とBPW

BPWなし



BPWあり

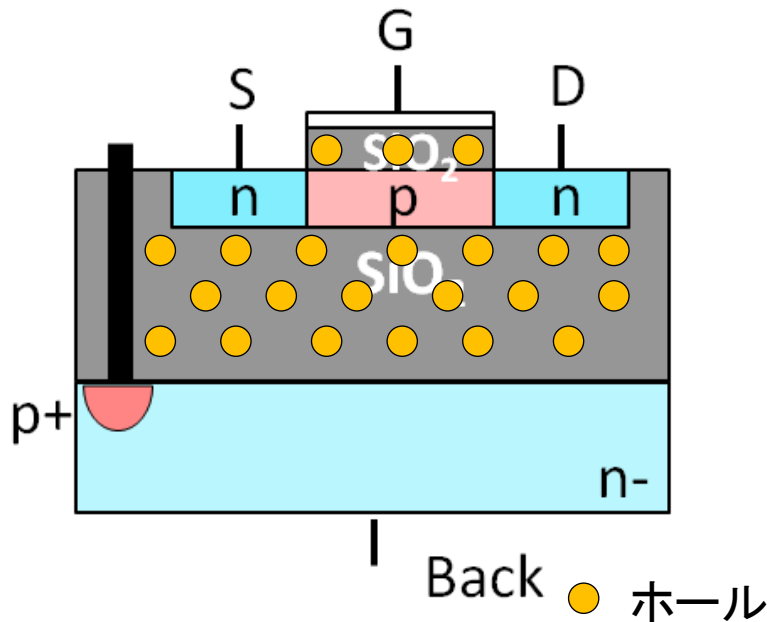


BPWによりBackgate効果が抑制されます。

放射線耐性TID効果

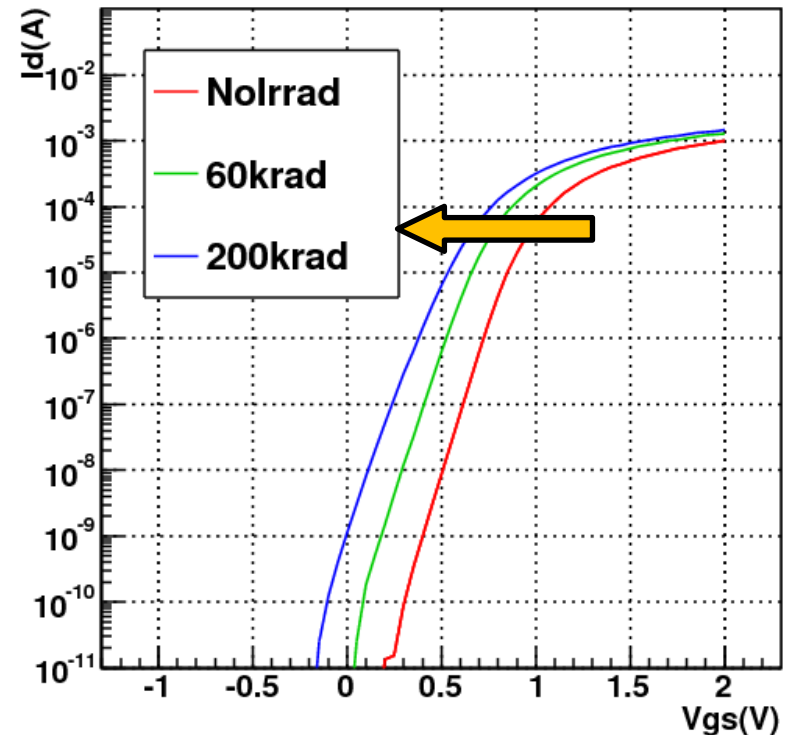
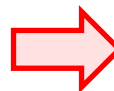
放射線損傷TID効果

- 酸化膜にホールがトラップ (Oxide Trap) 着目
- 界面 (Si/SiO₂) に新しい準位形成 (Interface Trap)



SOI検出器におけるTID効果

トランジスタ特性が変化、
正常動作しない。



読み出し回路が正常動作しない。

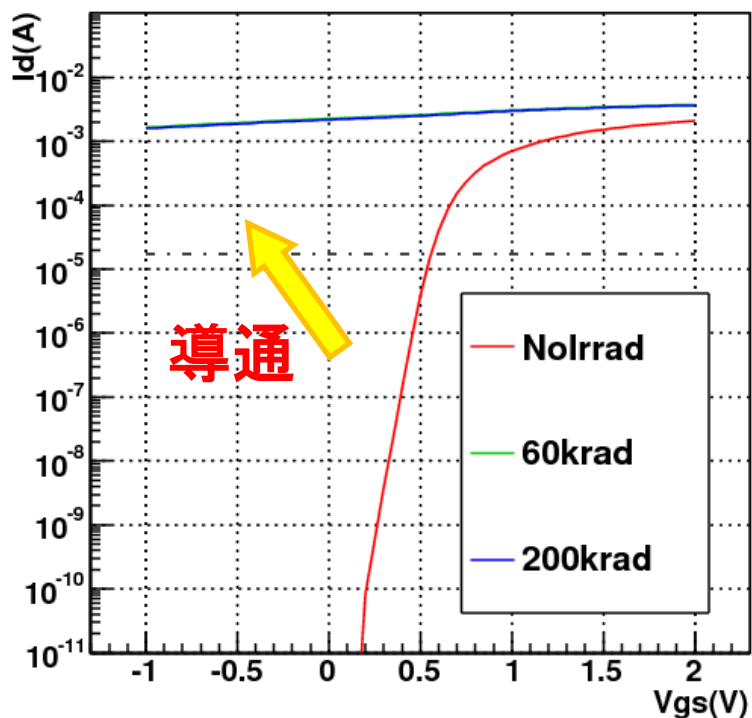
研究目的

- 放射線損傷を軽減するための試験を行いました。

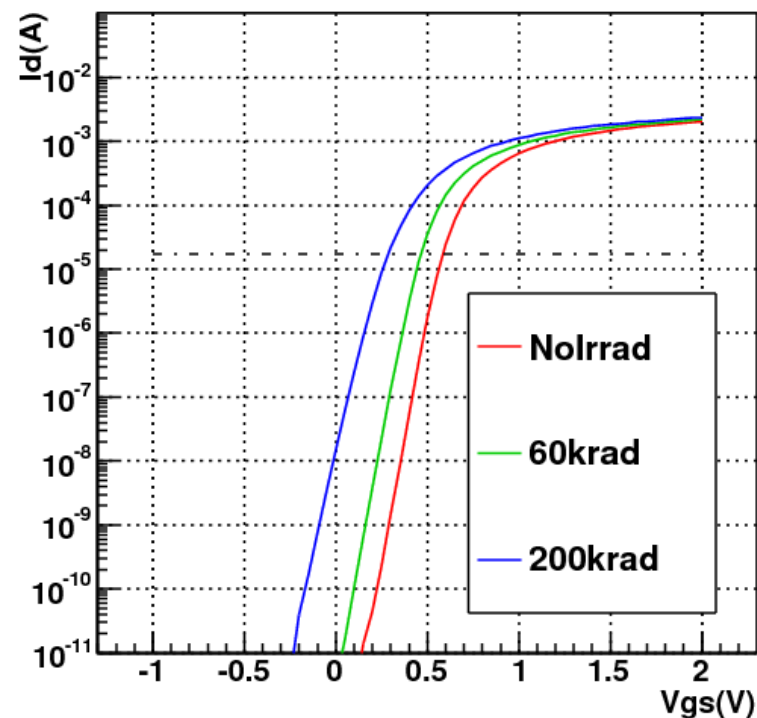
春季の物理学会にて

X線照射時にセンサー電圧 $V_{back}=100V$ をかけると
BPWなしでは損傷が大きくであることを報告しました。

BPWなし



BPWあり(0V)

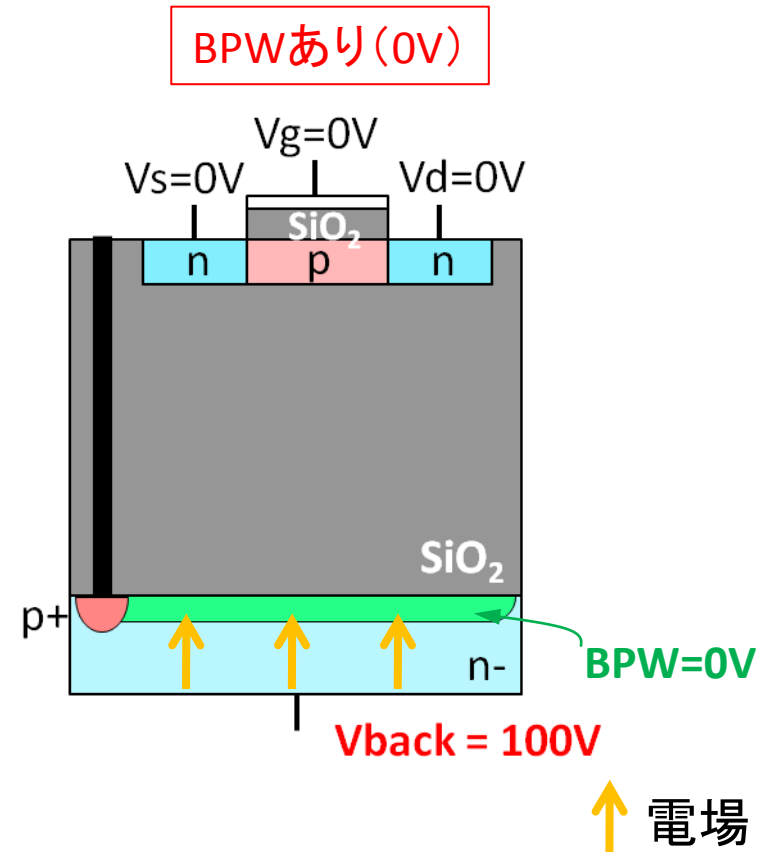
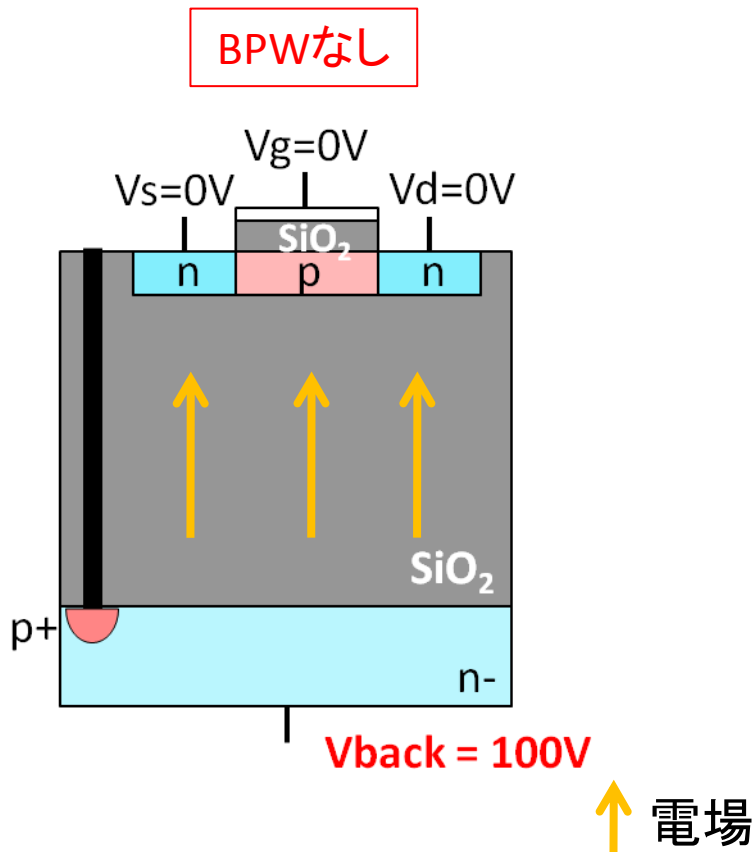


前回の試験

電場

X線照射時の電圧設定

注)実際の動作時は
 $V_g, V_s, V_d = 0 \sim 1.8V$



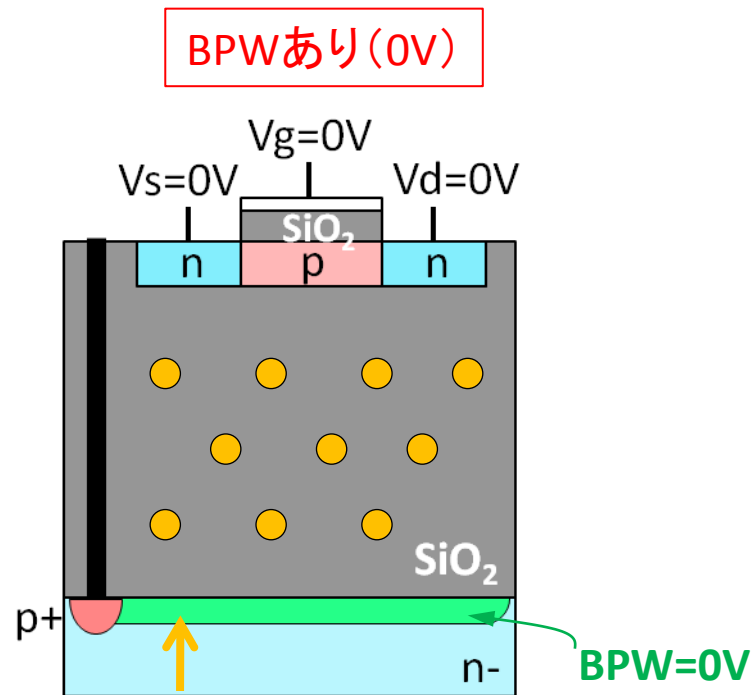
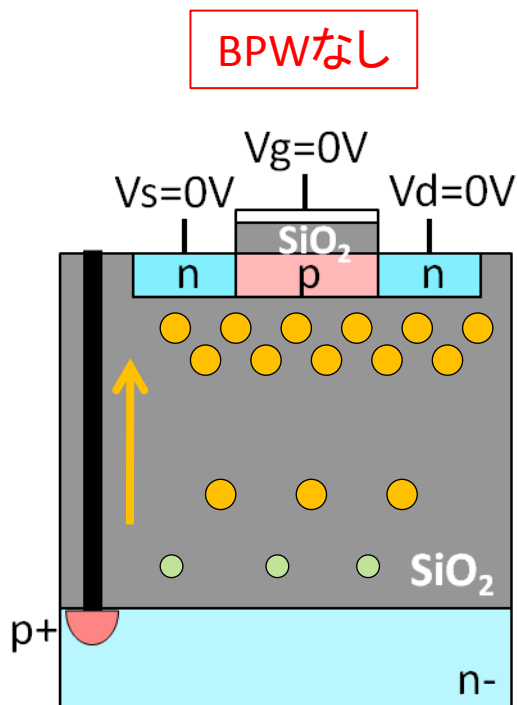
- BPWなしではBOX層にVbackからの電場がかかります。

前回の試験

ホール

X線照射時の電圧設定

注)実際の動作時は
 $V_g, V_s, V_d = 0 \sim 1.8V$



● ホール
● 電子

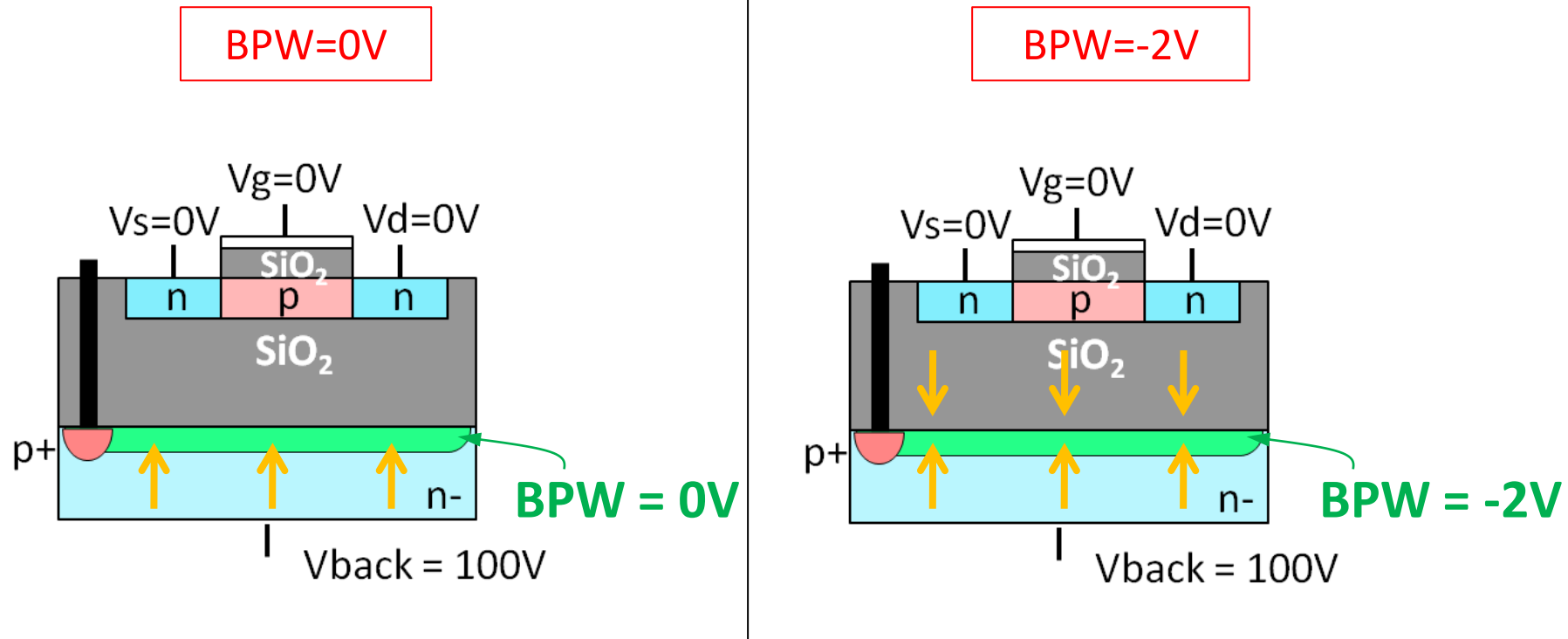
- BOX中の電場により、BOX中のホールの再結合率の低下、ホールがTr界面に集中によりBPWなしでは損傷が大きくでたと考えられます。

今回の試験

- 逆の電場状態を再現することで放射線損傷が小さくなると考えた。

X線照射時の電圧設定

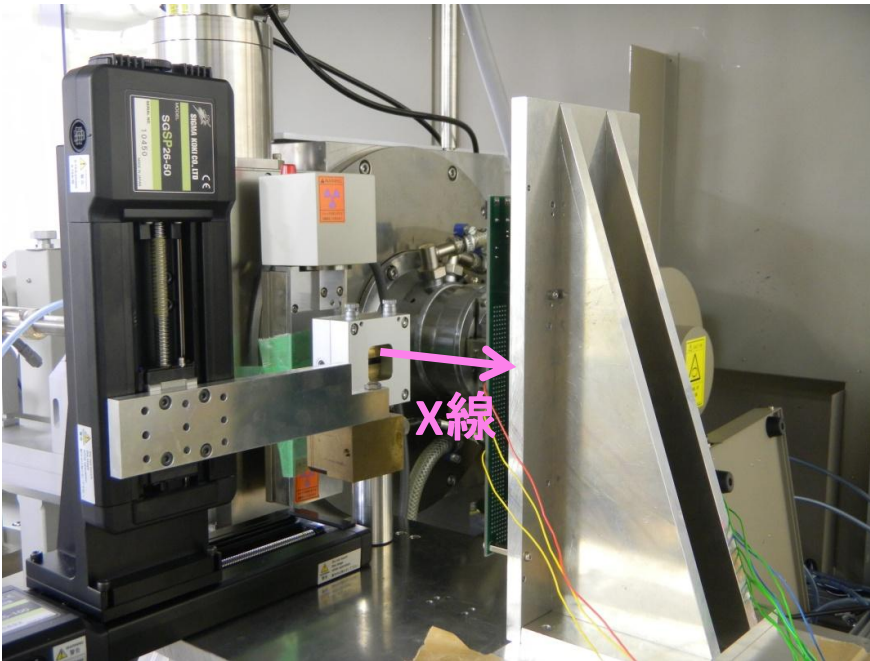
↑ 電場



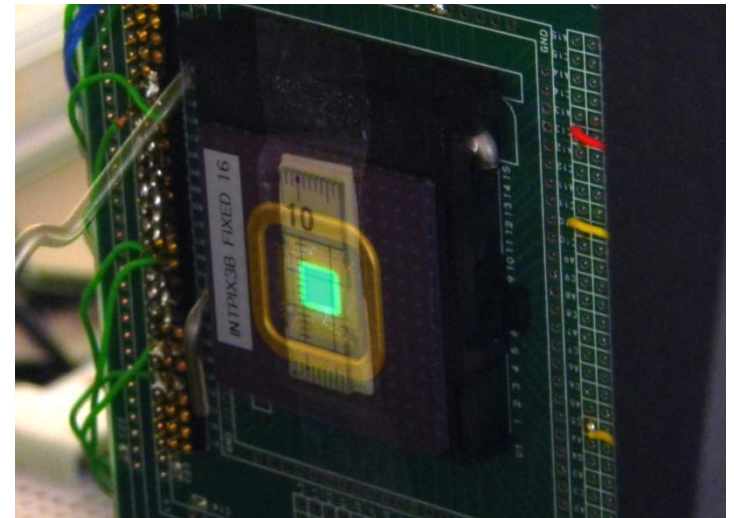
BPW = -2Vにより、ホールをTr界面に蓄積させないことで損傷が小さくなると思われます。またBPW=-2VではBackgate効果による影響はほとんどありません。

実験のセットアップ

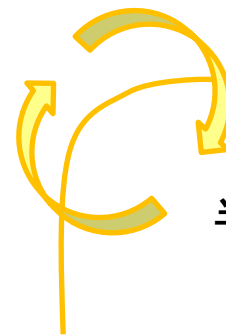
X線照射



X線照射装置 : FR-D (リガク社)
X線 : CuK α 線 8keV @KEK



X線の照射スポット

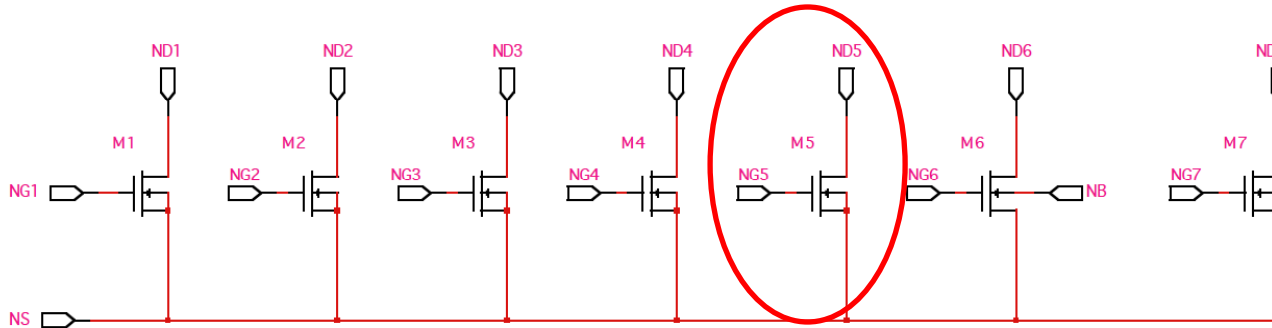


Tr特性測定
半導体パラメータアナライザ
Agilent社 4156A

- 設定した電圧状態でX線照射 \Leftrightarrow Tr特性測定 を繰り返しました。

試験したTr

異なった性質のtrを使って、試験をしました。



NMOS

Tr	L(um)	W(um)	Cell	Model	Comment
M1	0.20	100	nmos3	nch_convbf	normal Vt
M2	0.20	100	nmos3l	nch_colvbf	low Vt
M3	0.35	175	nmos3hiol	nch_ionvbf	IO high Vt
M4	0.35	175	nmos3io	nch_ionvbf	IO low Vt

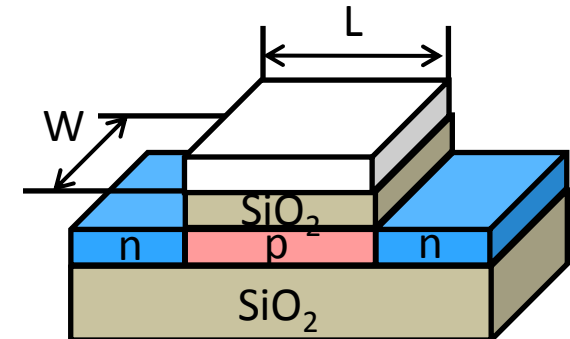
M5 | 1.00 | 175 | nmos3stio | nch_ionvst | IO S-Tie

M6	0.20	100	nmos4bt	nch_convbc	norm Vt, BodyTie
M7	10.0	100	dmos3io	nch_iodvbf	IO D-NMOS

PMOS

Tr	L(um)	W(um)	Cell	Model	Comment
M1	0.20	100	pmos3	pch_convbf	normal Vt
M2	0.20	100	pmos3l	pch_colvbf	low Vt
M3	0.35	175	pmos3hiol	pch_ionvbf	IO high Vt
M4	0.35	175	pmos3io	pch_ionvbf	IO low Vt
M5	1.00	175	pmos3stio	pch_ionvst	IO S-Tie
M6	0.20	100	pmos4bt	pch_convbc	norm Vt, BodyTie

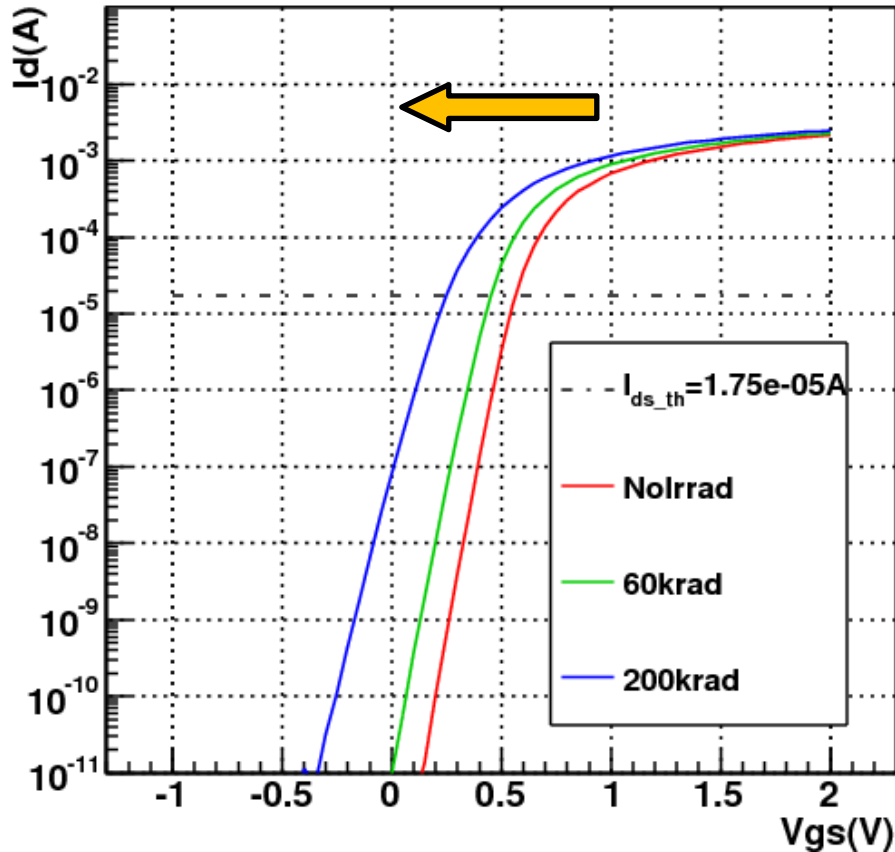
(実装チップ: INTPIX3B)



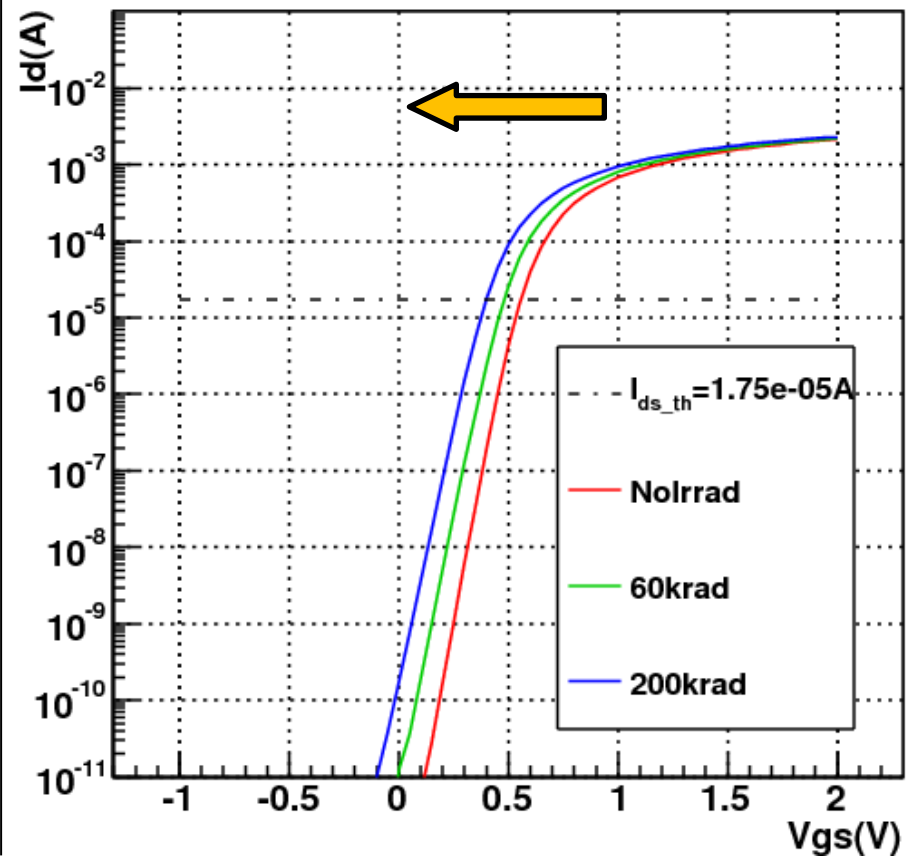
本発表ではNMOS Tr#5に注目して議論していきます。

結果(Tr特性の変化)

BPW=0V



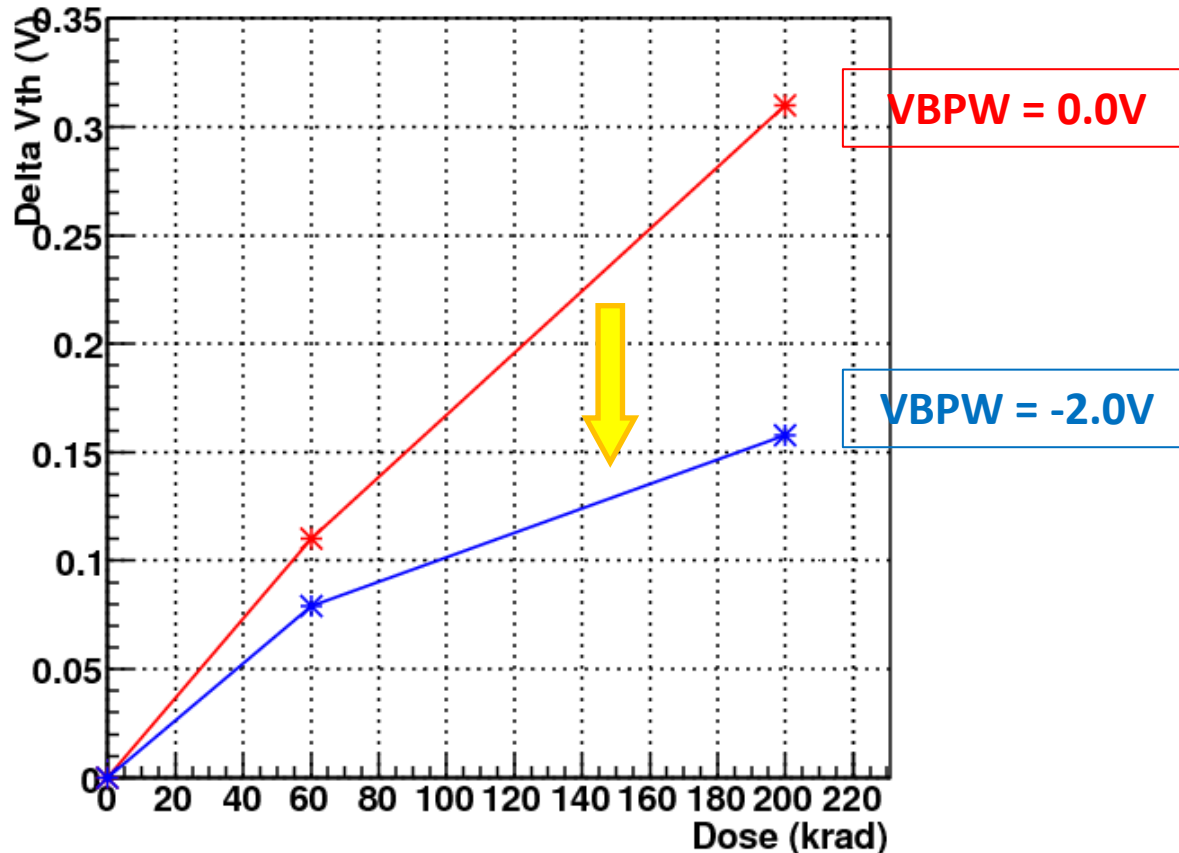
BPW=-2V



- X線照射時にBPW = -2Vとすることで放射線損傷が軽減が観測された。

結果(シフト量比較)

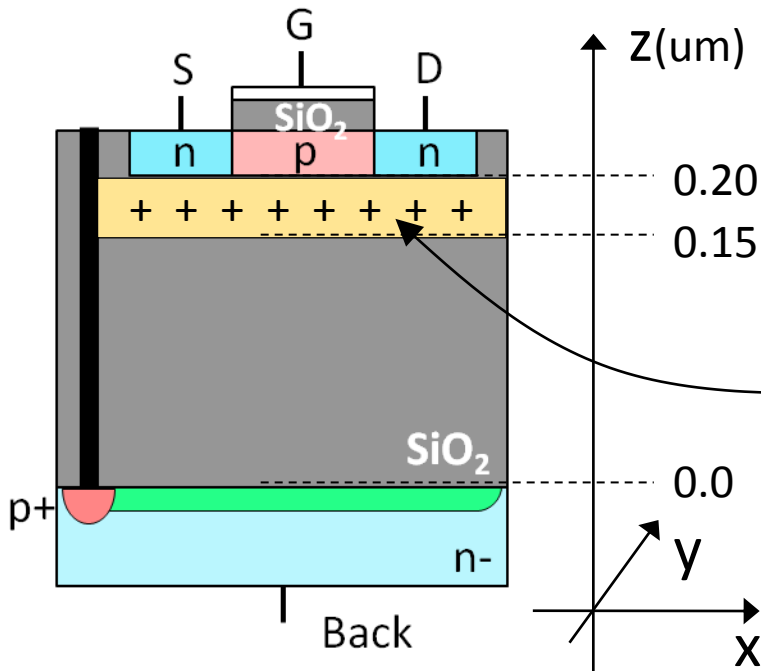
$I_{d_th} = 0.1 \times \frac{W}{L} (\mu A)$ となる電圧値を V_{th} として V_{th} の変化量を調べた。



- X線照射時にBPW = -2VとすることでV_{th}の変化が抑えられます。
- 他のTrでも同じような結果を得ました。

TCADによる補足

- BOX層にトラップされた電荷(+)分布の違いが、Tr特性のシフトにどのように影響してくるのかを、半導体シミュレーションソフトTCAD(Technology CAD)を用いて計算しました。



- 固定電荷を配置。
- 左図のzで分布の範囲を指定。
- xy平面での電荷面密度は同じ。

例) $z = 0.15 \sim 0.20 \text{ um}$

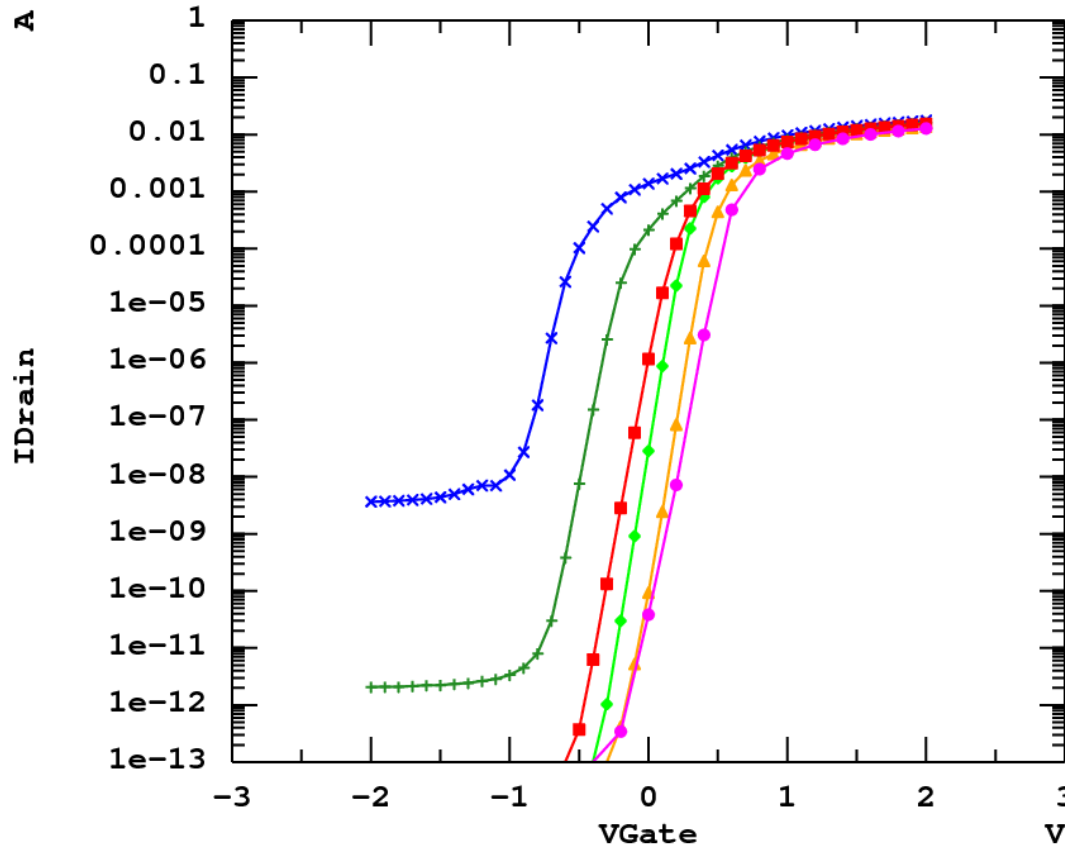
密度 : $4.0e+17 \text{ (/cm}^3\text{)}$

範囲 : 0.05 (um)

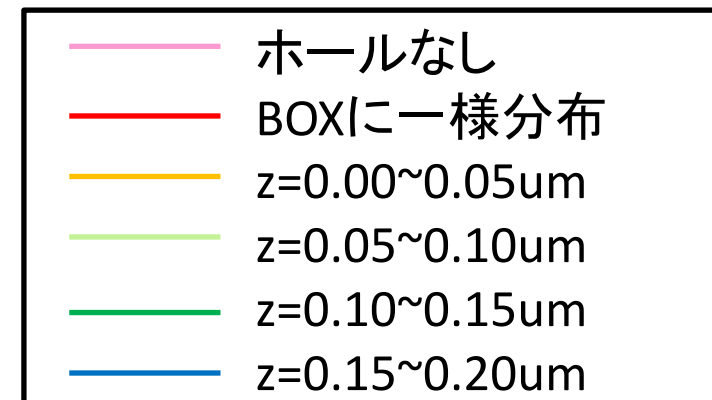
⇒xy面密度 : $2.0e+12 \text{ (/cm}^2\text{)}$

TCADの結果

BOX層のホール分布の違いによる特性の変化(TCAD)



電荷面密度 : $2e+12$ (/cm²)



- ホールの蓄積がTr界面より離れることで、同じ電荷面密度でも特性のシフトが小さくなります。予想を再現できた。

まとめ、今後

まとめ

- SOI検出器で課題となっている放射線損傷TID効果の軽減の研究を行った。
- トラップされるホールの位置をTr界面から遠くするために、BPWに弱い負電圧を与えたところ、放射線損傷を軽減することができた。
- TCADシミュレーションにより、BOX層内でのホール分布の違いにより特性のシフトが異なることを示しました。

今後

- さらに大きなDose量での特性の変化を調べる予定。
- BPW電圧を変えた場合の特性の変化を調べる予定。

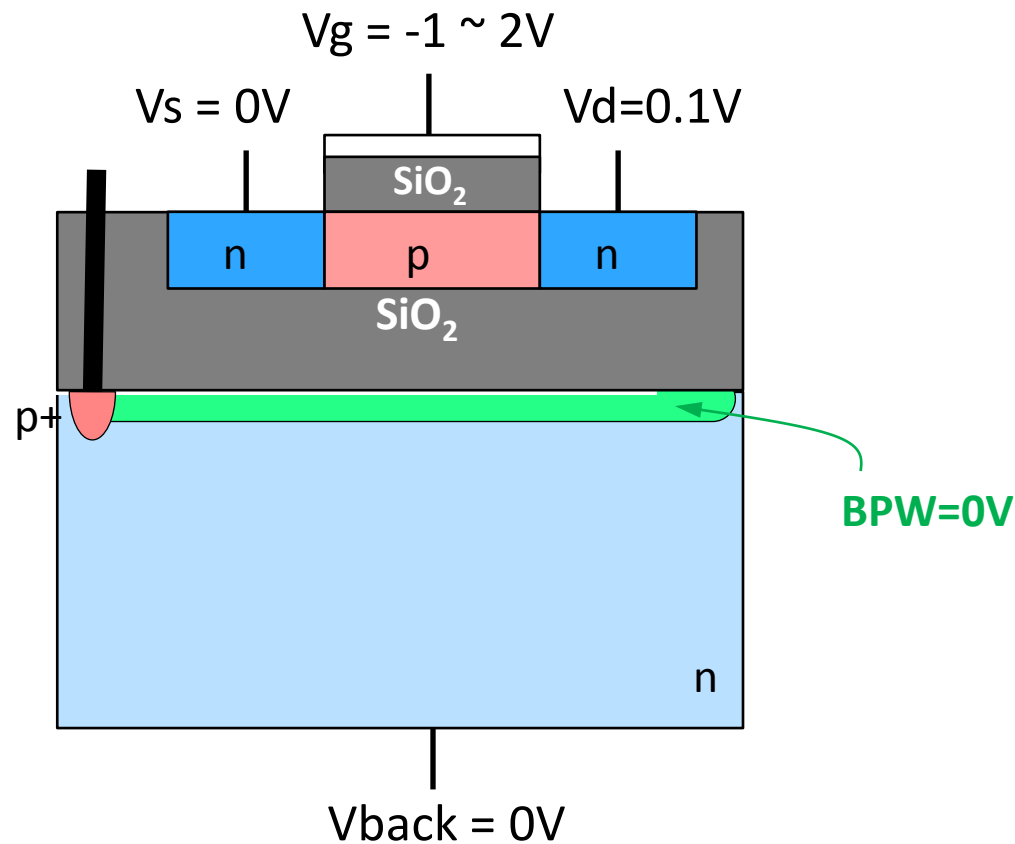
バックアップ

- 測定電圧
- 2層SOI構造
- 他のTrの結果
- PMOSの結果
- X線強度計算
- モノリシック型



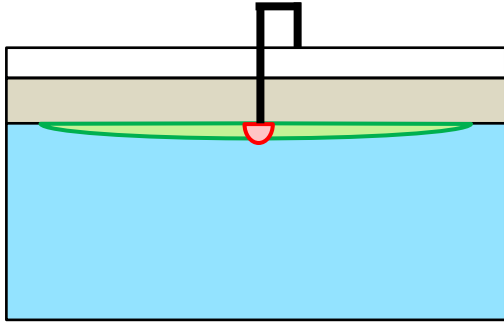
測定時の電圧設定

本発表で使ったTr特性(I_d - V_g)の測定時の電圧は以下のようにになっています。

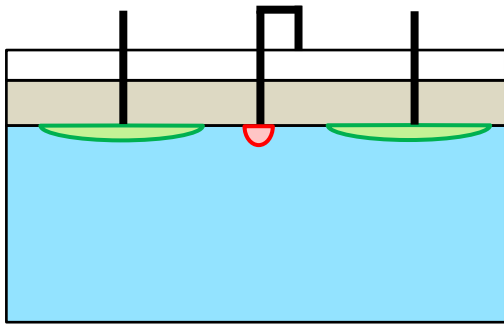


2層SOI構造

現在



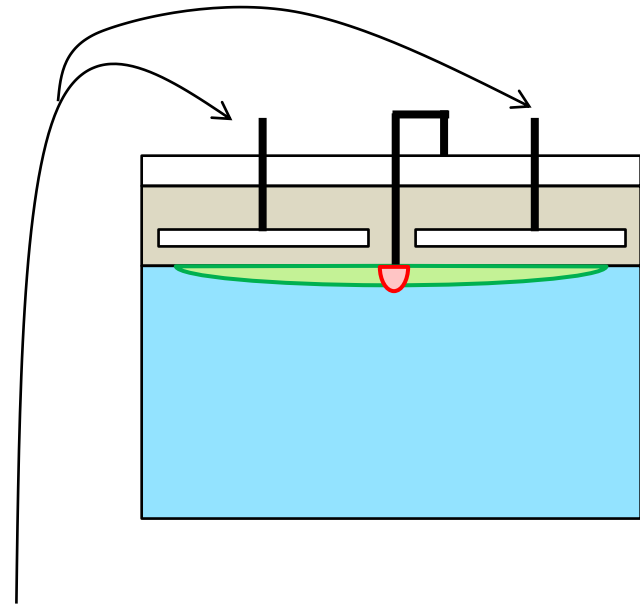
直接、SOI CMOSにつながっているの
でBOX層に電場をかけるのは難しい



これではBPWに電場を取られてしまっ
てシグナルが小さくなる



2層SOI構造



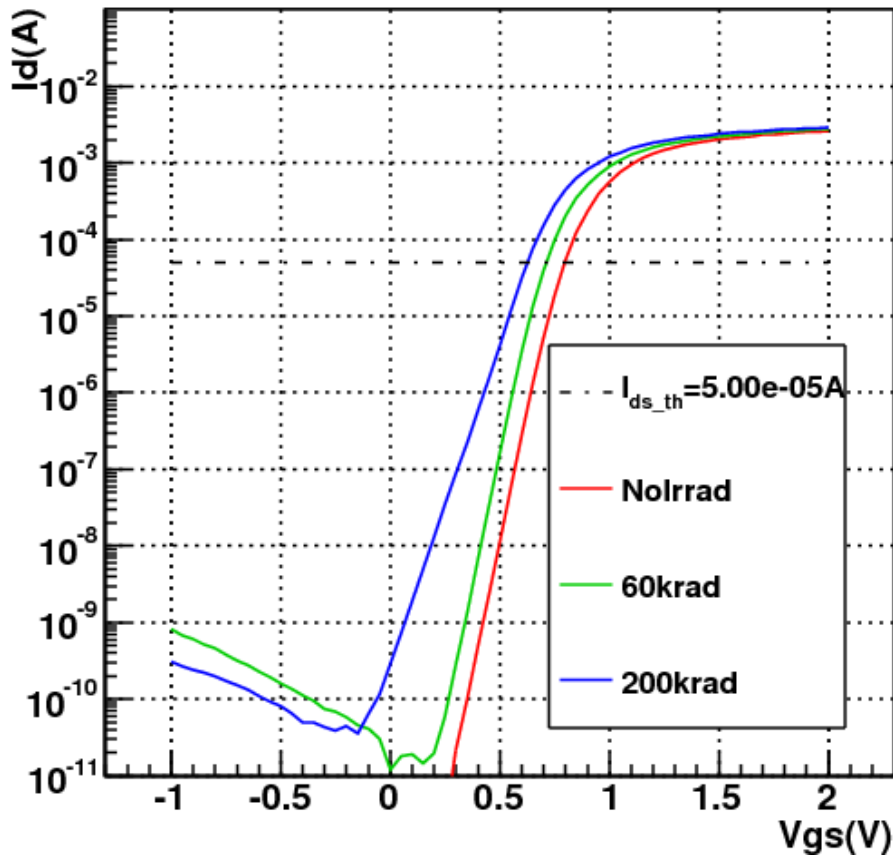
ここに損傷軽減用の電圧
(今回のBPWの電圧)をかけることで
問題が解決できます。

SOICMOS - センサー間のクロストーク
の軽減もできます

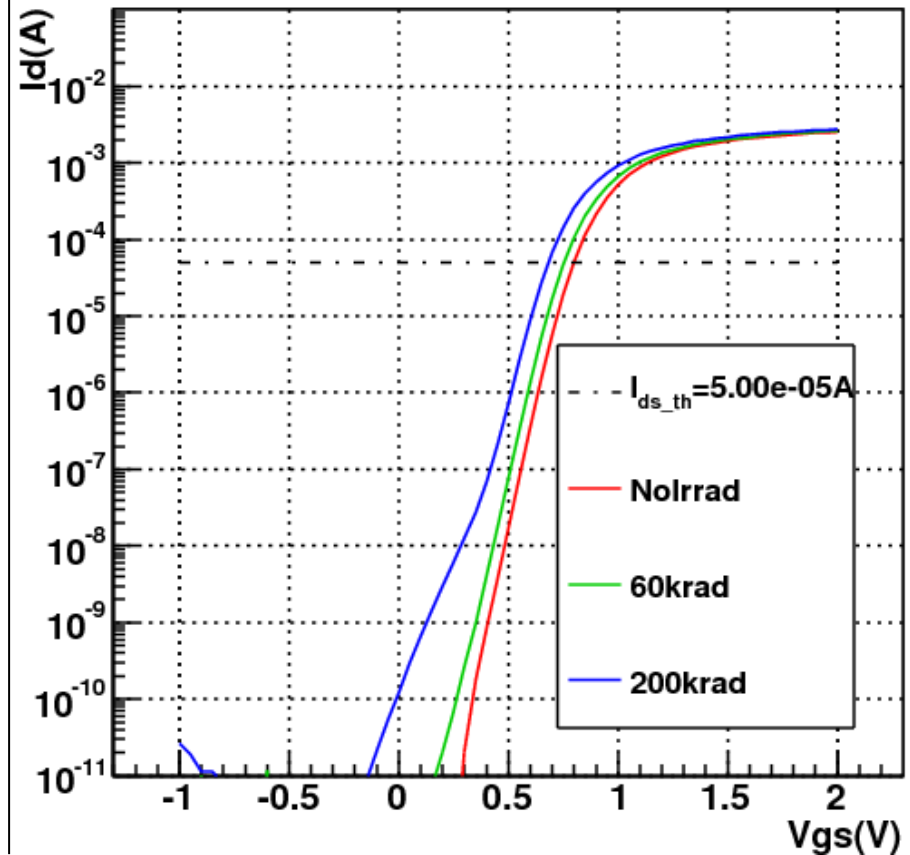
他のTrの結果 (Tr特性のシフト)

NMOSのTr#1の結果です(Tr特性のシフト)。

BPW=0V

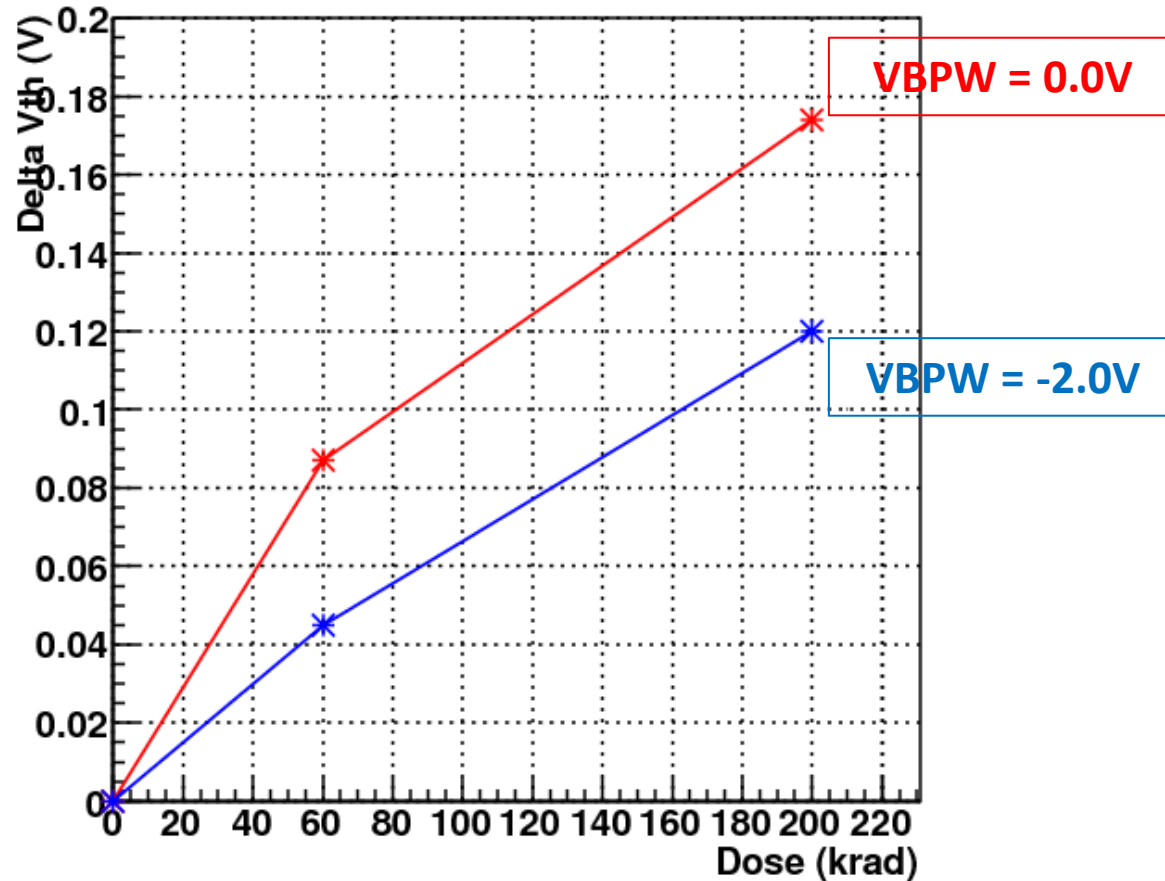


BPW=-2V



他のTrの結果 (シフト量比較)

NMOSのTr#1の結果です(シフト量比較)。



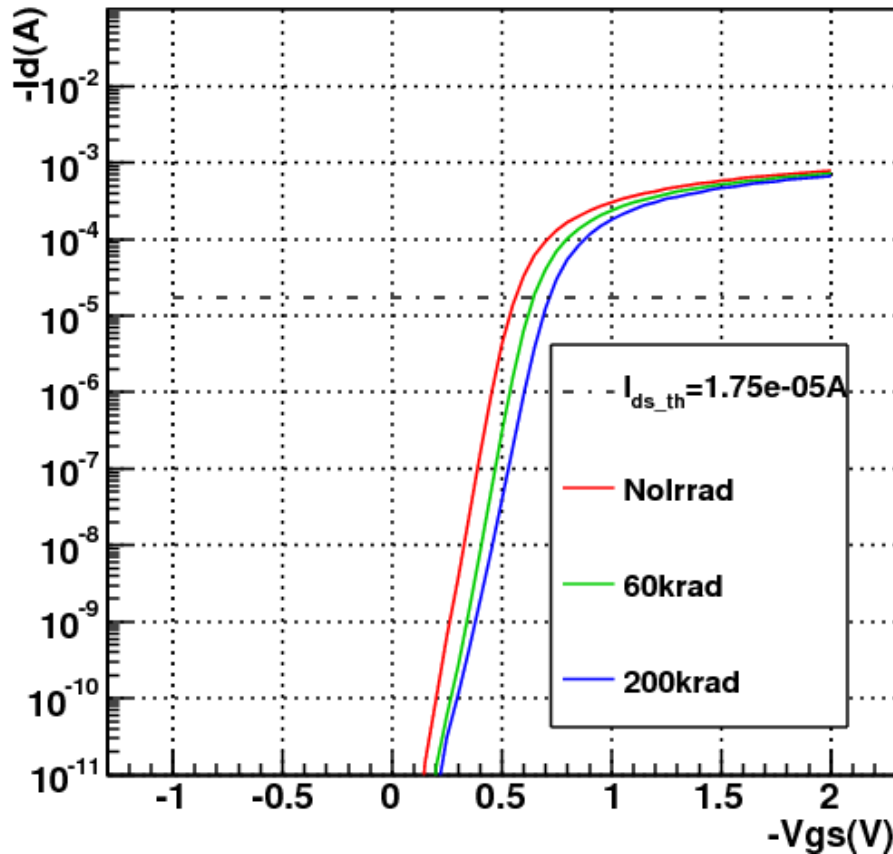
他のTrも200krad照射時にはBPW=-2Vの方がシフト量が小さいという結果を得ました。

PMOSの結果

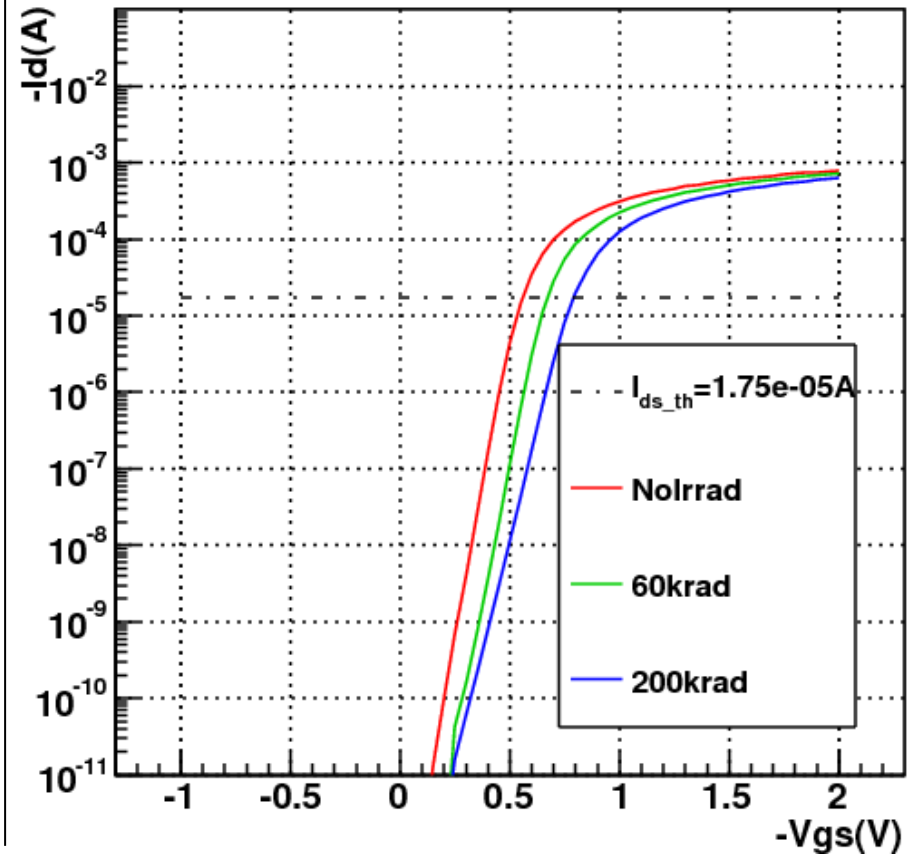
(Tr特性のシフト)

PMOSのTr#5の結果です(Tr特性のシフト)。

BPW=0V



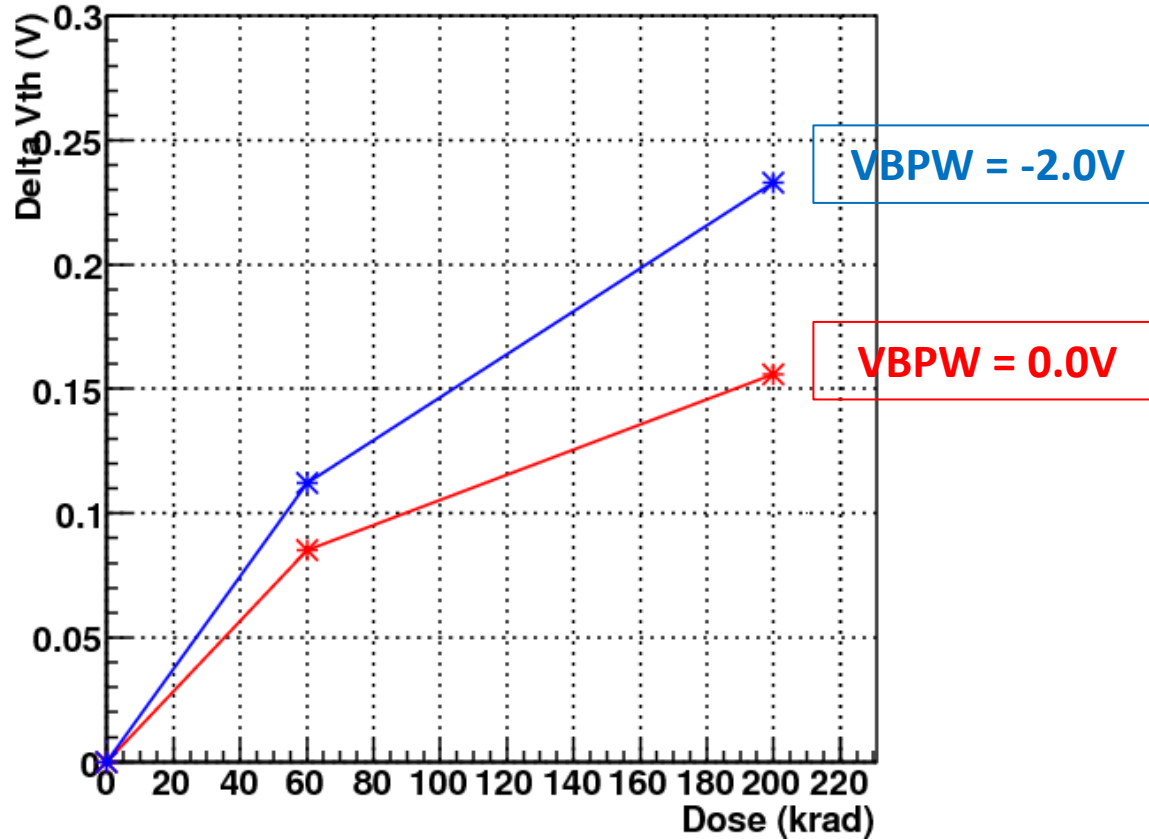
BPW=-2V



BPW=-2Vのほうが損傷が大きく出てしまいました。

PMOSの結果 (シフト量比較)

PMOSのTr#5の結果です(シフト量比較)。



ただしPMOSに関しては、NMOSと比較して放射線耐性が強いので問題ないかと考えています。

X線強度計算

物質に入射した光の強度 I は

$$I = I_0 \times 2^{-d/d_1/2} = I_0 \times 2^{-d/90(\text{um})}$$

よって、左図のBOX層で落とす光の強度は

$$\Delta I = I_0(2^{-6/90} - 2^{-6.2/90}) = 1.5 \times 10^{-3}$$

一方、フォトダイオードの応答についてCuK α 線8keVに対しては

$$4(\text{pA}/10^4\gamma) \rightarrow 2.5 \times 10^9(\gamma/\text{uA})$$

つまり、BOX中に落とすエネルギー ΔE はX線スポットサイズを $S(\text{mm}^2)$
PDの応答電流を $I_{PD}(\text{uA})$ として

$$\Delta E = 8(\text{keV}) * 1.6 \times 10^{-16}(\text{J}/\text{keV}) * \frac{2.5 \times 10^9(\gamma/\text{uA})}{S(\text{mm}^2)} * \Delta I * I_{PD}(\text{uA})$$

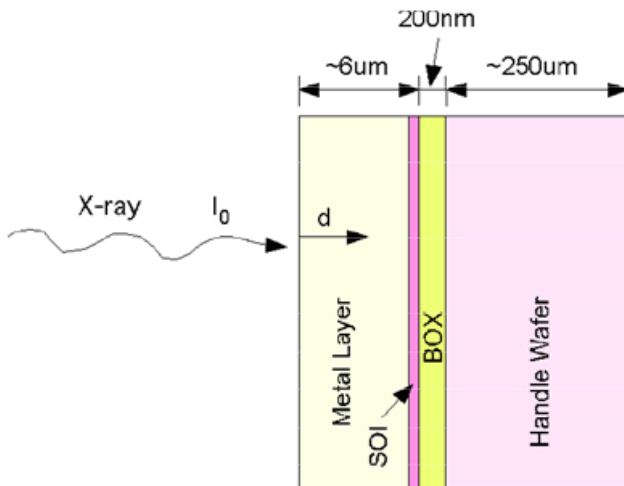
BOX層の 1cm^2 あたりの質量は

$$\sigma = 2.0 \times 10^{-5}(\text{cm}) * 2.2(\text{g}/\text{cm}^3) = 4.4 \times 10^{-5}(\text{g}/\text{cm}^2)$$

よって、単位質量あたり、単位時間で吸収するエネルギー ΔR は

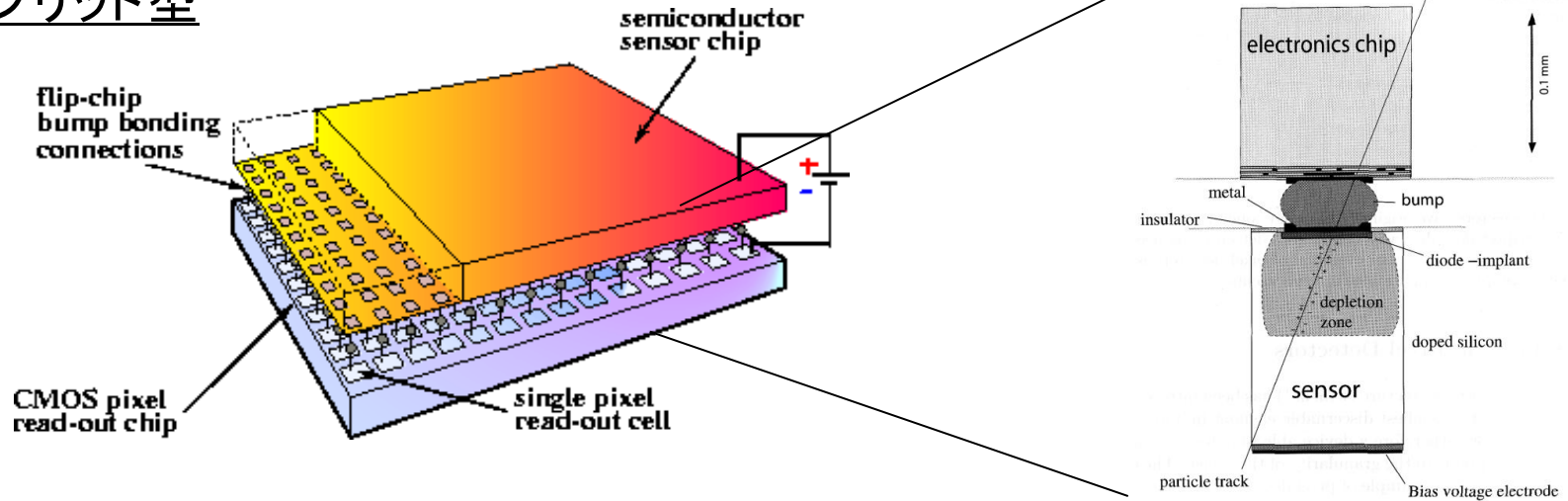
$$\Delta R = \frac{\Delta E(\text{J}/\text{mm}^2)}{\sigma(\text{kg}/\text{mm}^2)} = 11 \times \frac{I_{PD}}{S}(\text{Gy}/\text{s}) = 1.1 \times \frac{I_{PD}}{S}(\text{krad}/\text{s})$$

ここにPDの出力電流 I_{pd} , X線スポットサイズ S を代入して、単位時間当たりの照射線量を計算。そこから目的の照射線量分の時間だけ照射することで照射を行った。



ハイブリッド型とモノリシック型

ハイブリッド型



金属バンプ

- 容量発生
 - 読み出し速度低下、感度の低下
- ピクセルサイズに制限
 - 金属バンプ分の大きさで限界
- 余分な物質質量
 - 金属分の物質質量がある