

# SOI検出器の放射線ダメージ 測定と回復試験

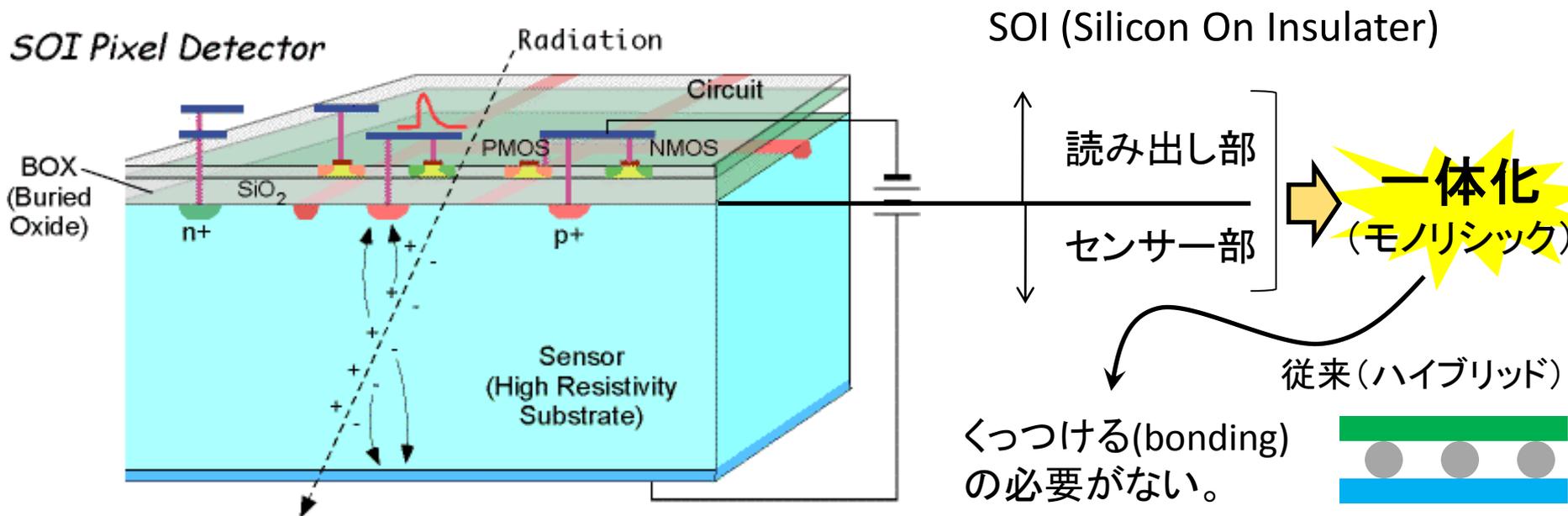


東北大学 素粒子実験グループ  
小野 善将

# 目次

- 研究内容：SOI検出器の放射線ダメージの研究
- SOIについて
- 研究内容
  - SOIのX線照射によるダメージの測定
  - 放射線ダメージの回復の試験
- 今後の予定

# SOI検出器とは？



## ○メリット

- ・高速な読み出し(境界面が少ない)
- ・物質量が少ない(bondingなし)
- ・放射線耐性Single eventに強い
- ・サイズを小さくできる

## ×デメリット

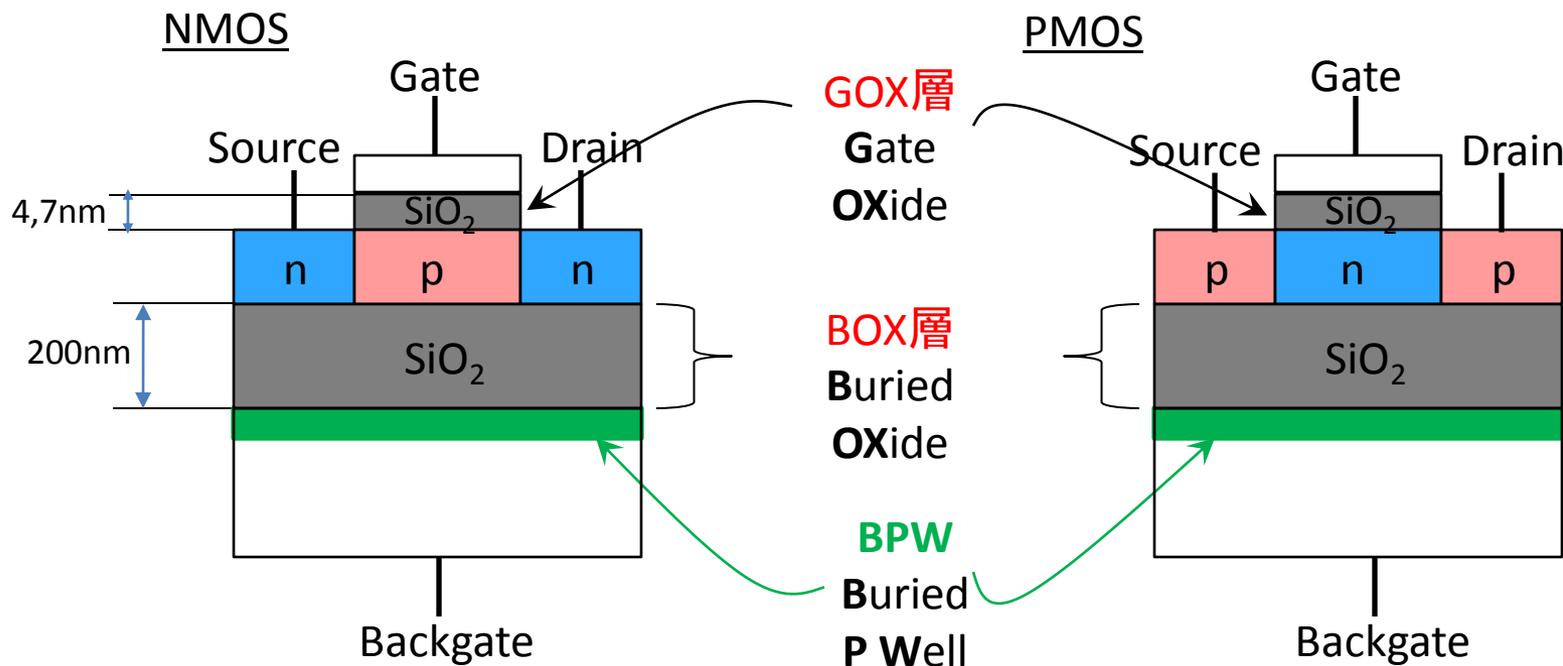
- ・センサー部が読みだし部に影響を及ぼす。  
ex:) **Backgate効果**
- ・**Total dose effect**に弱い

これを調べた。

# CMOS, SOI構造について

上部の読み出し回路では、**CMOSを使った読み出し**がされる。

CMOSとはNMOSとPMOSを組み合わせた回路のことで、この2つの組み合わせで様々な回路を作成することができる。

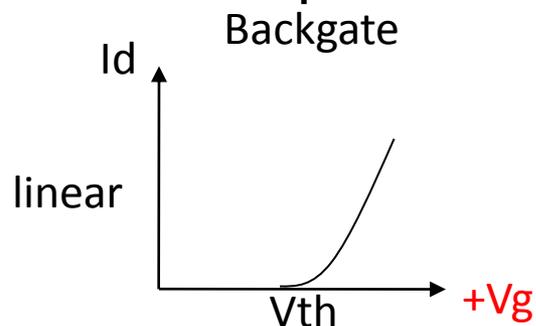
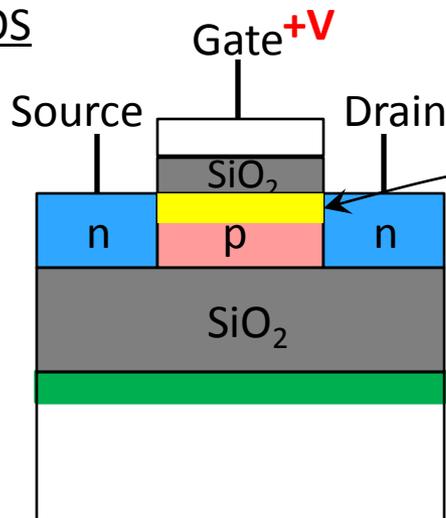


- 2つの酸化層GOX,BOX層が存在
- BPWはBackgate効果を抑制するためのものである  
(back gateからの電場を遮断する。)

# トランジスタの動作について

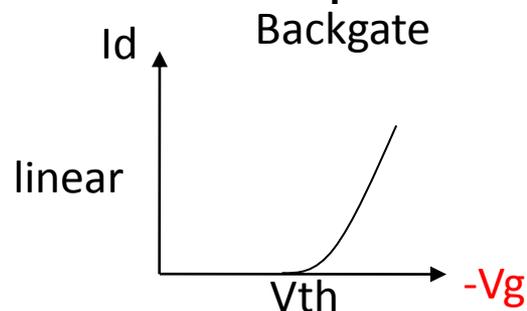
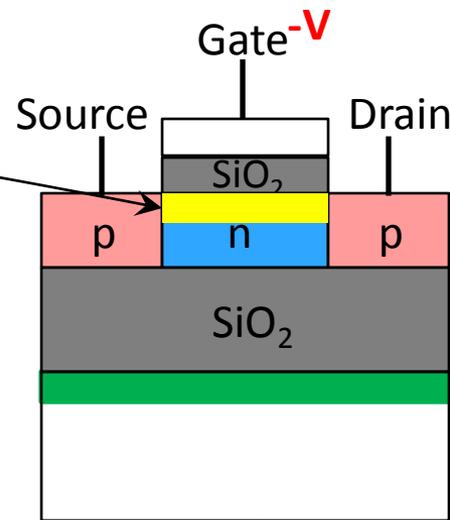
- 簡単にトランジスタのスイッチの動作を説明する。

NMOS



正電圧方向で動作

PMOS



負電圧方向で動作

Channel  
が形成

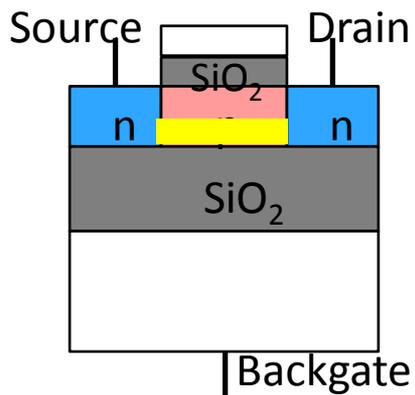
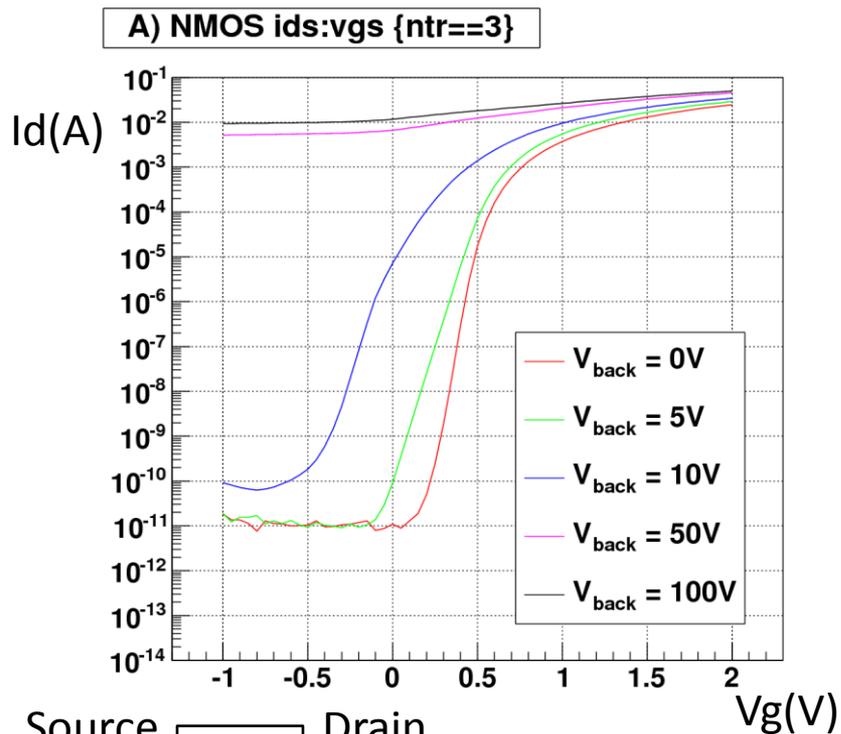


D,S間が導通

Back gate側も同じようなことが起こる。 ➡ Backgate 効果

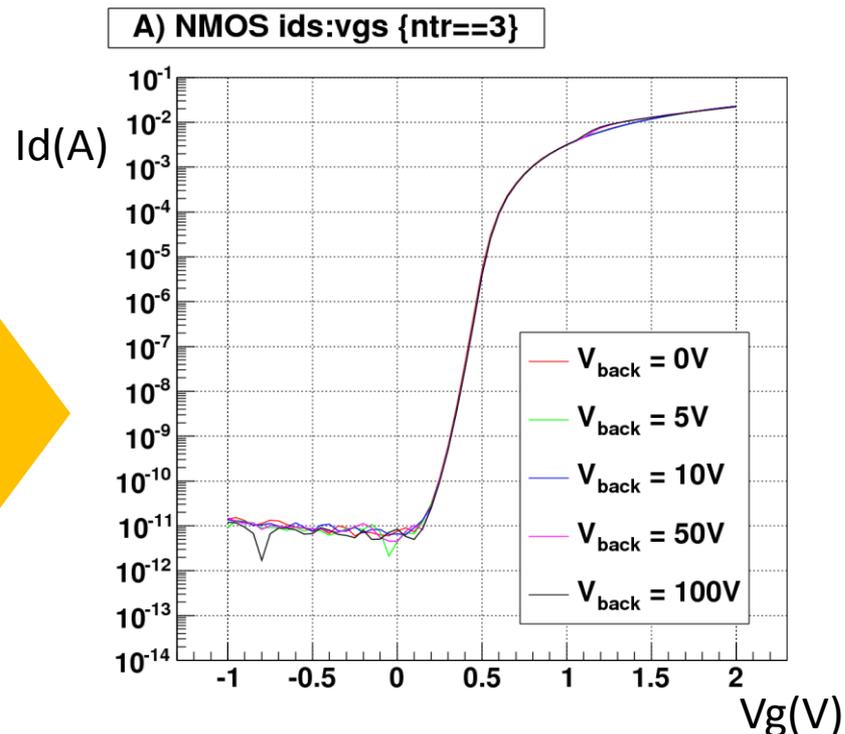
# Backgate効果、BPWの効果

## BPWなし NMOS



Gate(front)と同じようにchannel形成  
→D,S導通

## BPWあり NMOS



BPWがあることで、バックゲートを抑制することができ、トランジスタの特性が保たれる。

# 研究内容、目的

以下の研究を行いました。

- X線照射による放射線ダメージの測定

(OKIセミコンダクタ株式会社 倉知様より提案)

→①界面にトラップされた電荷の見積もり(GOX,BOX)

②放射線損傷によるBPWの有効性

- 放射線ダメージの回復

(OKIセミコンダクタ宮城 沖原様より提案)

→ 紫外線UV

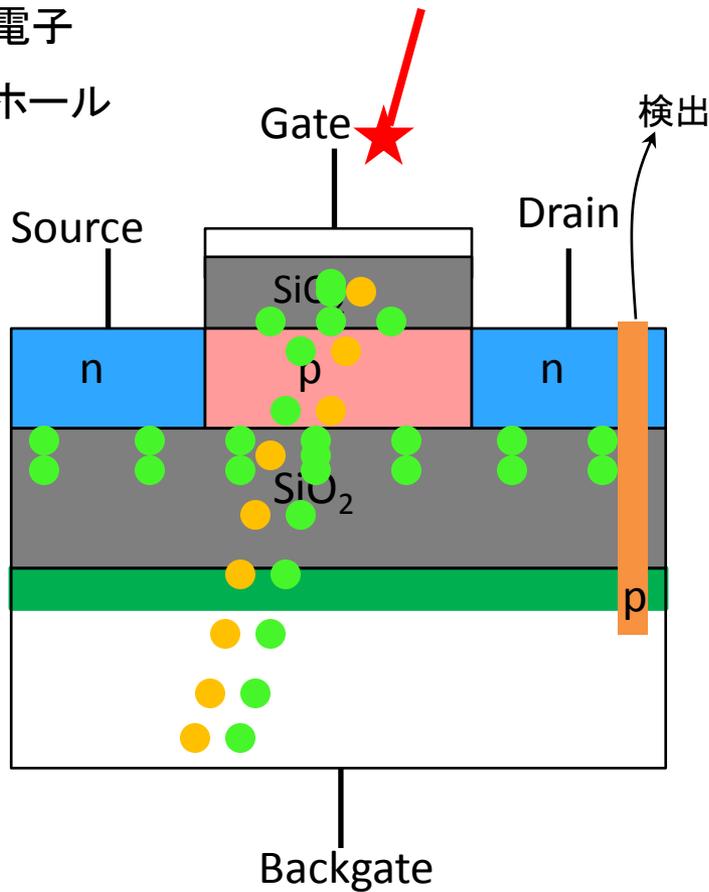
恒温槽(bake)

による回復試験

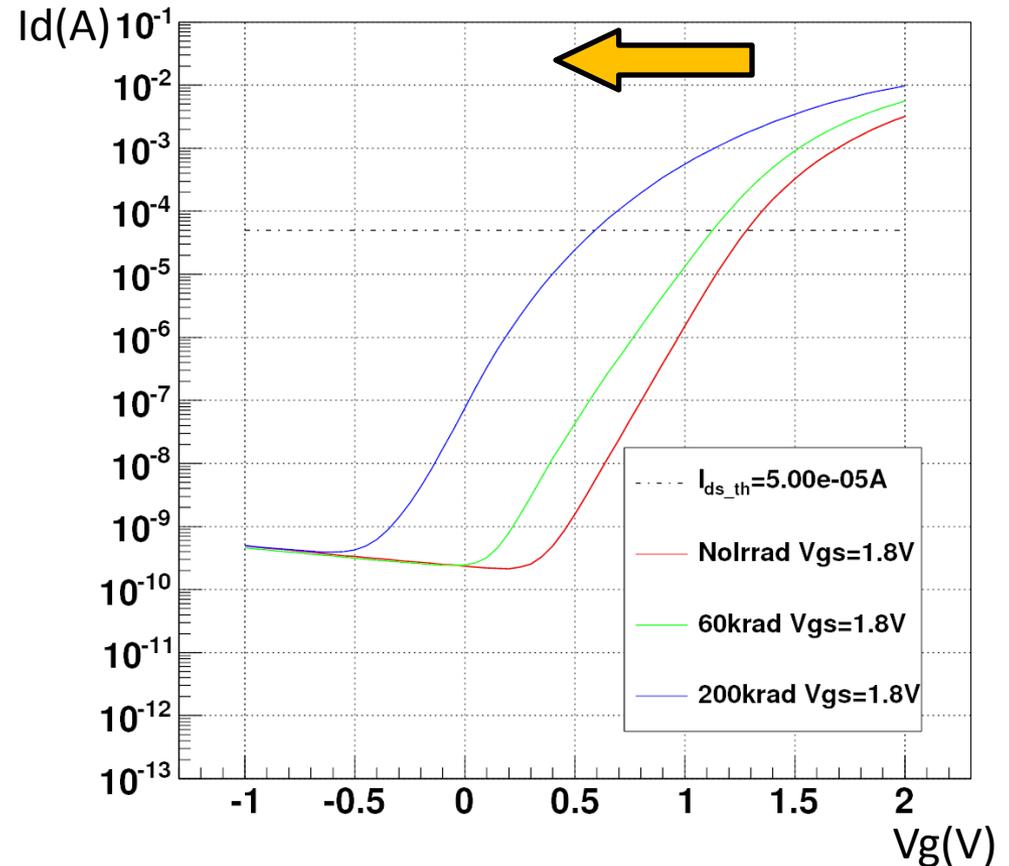
# 放射線損傷について

● 電子

● ホール



A) NMOS  $i_{ds}:v_{gs}$  {ntr==3}

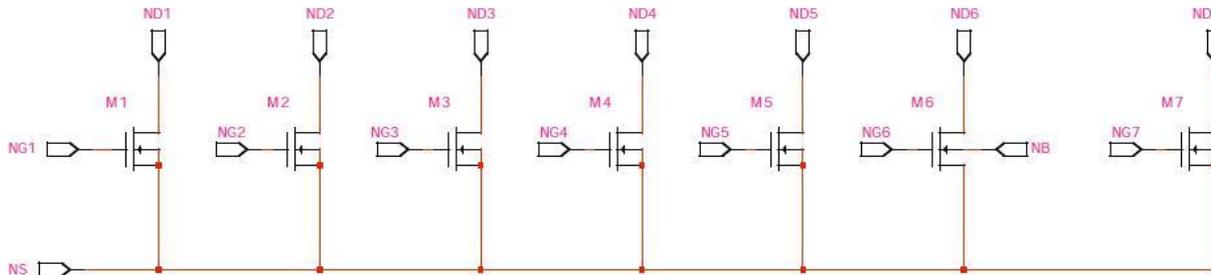


- 電離した電子、ホールペアのうちホールはモビリティが小さいため、酸化膜 ( $SiO_2$ ), または界面 ( $Si/SiO_2$ ) にトラップされる。

➡  $tr$  の特性を変化させる。 ➡ 読み出し回路が動作しない

# 使用したSOIチップ

積分型SOIチップ: INTPIX3上のtrを使って動作試験した。  
INTPIX3上には**異なった性質**のtrが実装されている。



## 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	nmos3hio	nch_iohvbv	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

× 2 (BPWあり、なし)

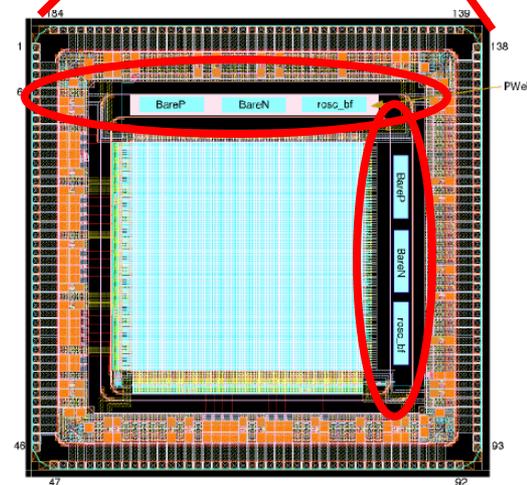
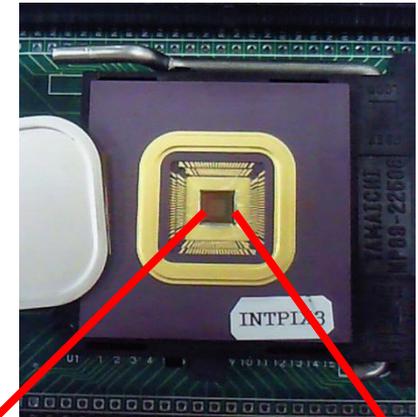
## PMOS

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	pmos3hio	pch_iohvbv	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

× 2 (BPWあり、なし)

計26種

このスライドではTr#3に注目して議論していきます。  
他の結果はバックアップに載せます。



# ダメージの評価 Vthの定義

## ダメージの評価

酸化膜をコンデンサと仮定して、蓄積(トラップ)電荷の変化分  $\rightarrow$  “放射線ダメージ”

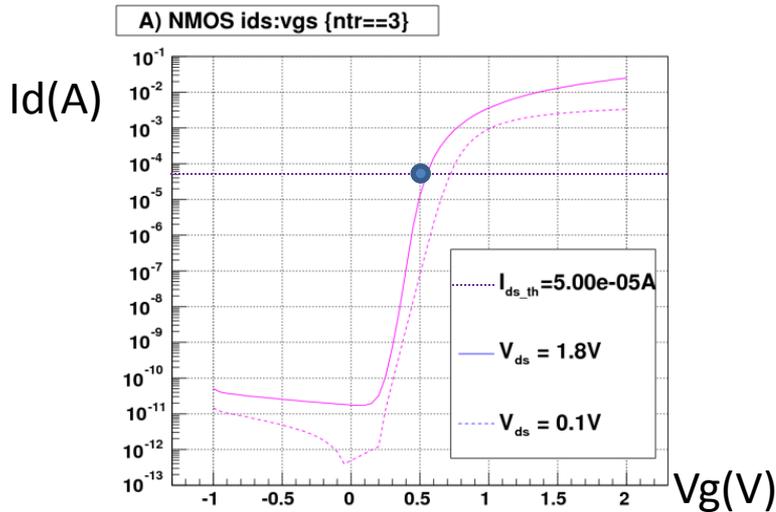
酸化膜、界面の電荷面密度の変化 $\Delta N_{ox}$ は

$$\Delta N_{ox} = \frac{C_{ox}}{q} \Delta V_{th} = \frac{\epsilon_0}{qt_{ox}} \Delta V_{th}$$

$t_{ox}$  : 酸化膜の厚さ  
 $\Delta V_{th}$  : trの動作電圧 $V_{th}$ の変位 $\downarrow$

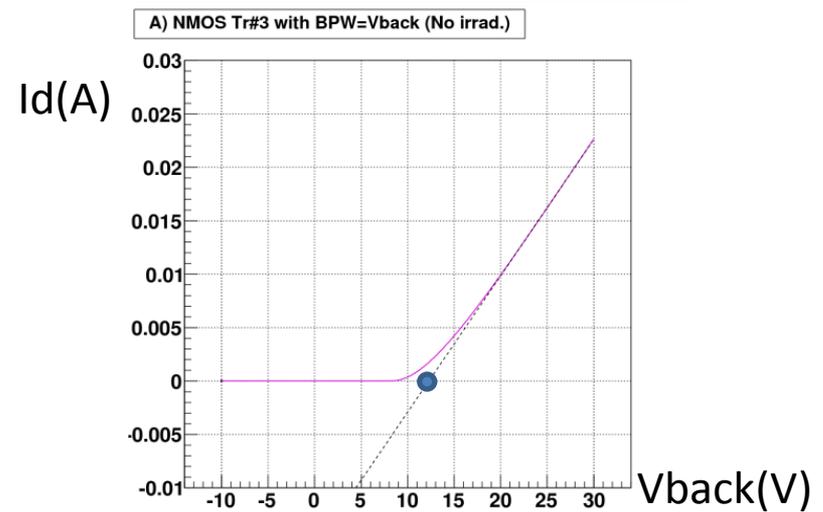
## Vthの定義

[Id-Vg特性]  $\rightarrow$  GOXの見積もり



$I_{d\_th} = \frac{w}{l} \times 10^{-7} (A)$  となる $V$   $V_{th}$

[Id-Vback特性]  $\rightarrow$  BOXの見積もり



線形フィットによる $I_{ds}=0(A)$ の交点 $V$   $V_{th}$

# X線照射による放射線ダメージ測定(損傷試験)

# 実験操作(損傷試験)

## 損傷試験の目的

- ①酸化膜(GOX,BOX)にトラップされた電荷面密度の計算
- ②放射線ダメージに対するBPWの有効性

各目的ごとに結果を比較する。

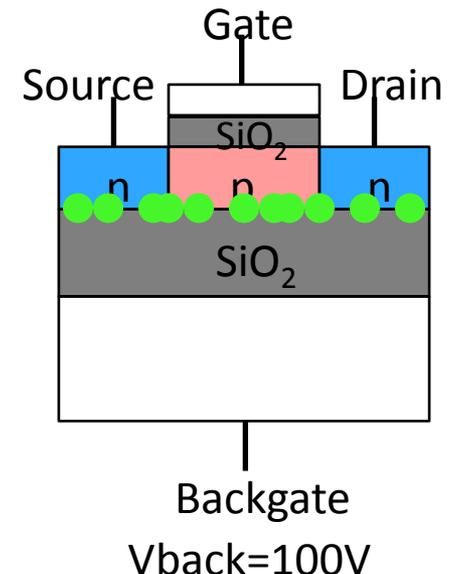
## ②について

**X線照射時のバイアス設定を変えた。**

- a) 全ての端子0V(GND)
- b)  $V_{back}=100V$ , 他の端子0V : 検出器を再現



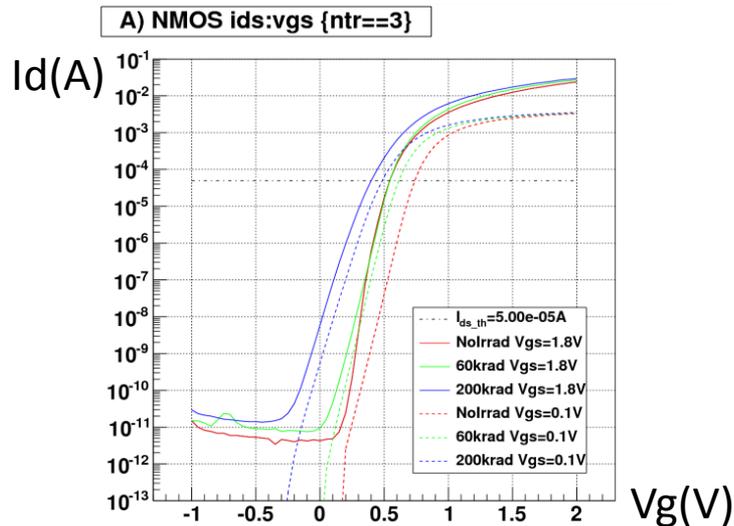
照射条件b)では  
BOXの界面にホールがトラップされやすくなり、  
放射線損傷がひどくなると予想される。



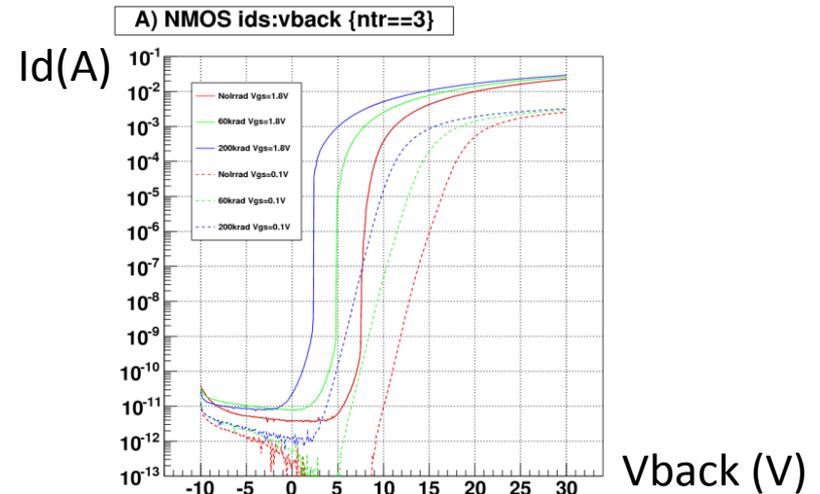
# 結果グラフ①(損傷試験)

照射条件a)のものを使用

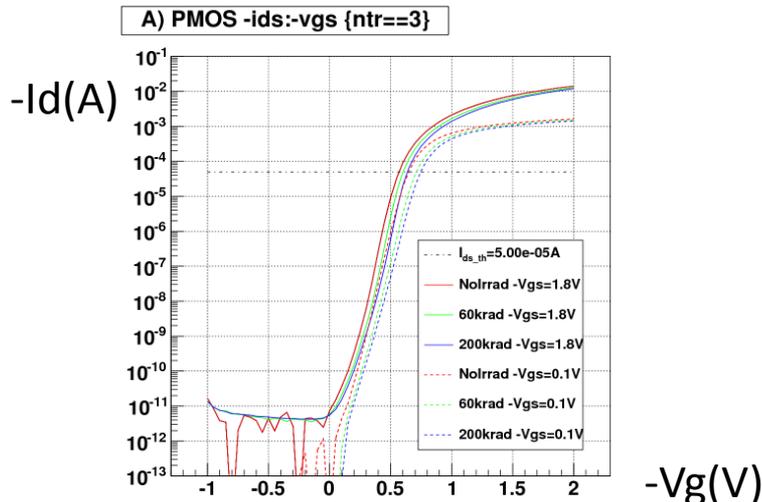
## [Id-Vg特性: NMOS]



## [Id-Vback特性: NMOS]



## [Id-Vg特性: PMOS]



グラフはBPWありのものを使用。

- ・PMOSの方が放射線耐性が強い
- ・PMOSは放射線によるシフトが逆
- ・Id-Vg, Id-Vback共に同じシフトの仕方をする。
- ・PMOSのback特性はできなかった。

# 電荷面密度の見積もり①(損傷試験)

[Id-Vg特性: NMOS]

	60krad	200krad
$\Delta V_{th}(V)$	0	0.141
$\Delta D(/cm^2)$	0	$8.189 \times 10^{11}$

[Id-Vback特性: NMOS]

	60krad	200krad
$\Delta V_{th}(V)$	3.267	6.074
$\Delta D(/cm^2)$	$3.795 \times 10^{11}$	$7.056 \times 10^{11}$

[Id-Vg特性: PMOS]

	60krad	200krad
$\Delta V_{th}(V)$	0.037	0.069
$\Delta D(/cm^2)$	$2.149 \times 10^{11}$	$4.007 \times 10^{11}$

- ・ **GOX,BOX共に $10^{11}$ オーダーの電荷面密度**をもっていることが分かる。
- ・ GOX側のほうが蓄積した電荷面密度が大きい。
- ・ PMOSの方が放射線損傷は少ない。

# 結果②(損傷試験)

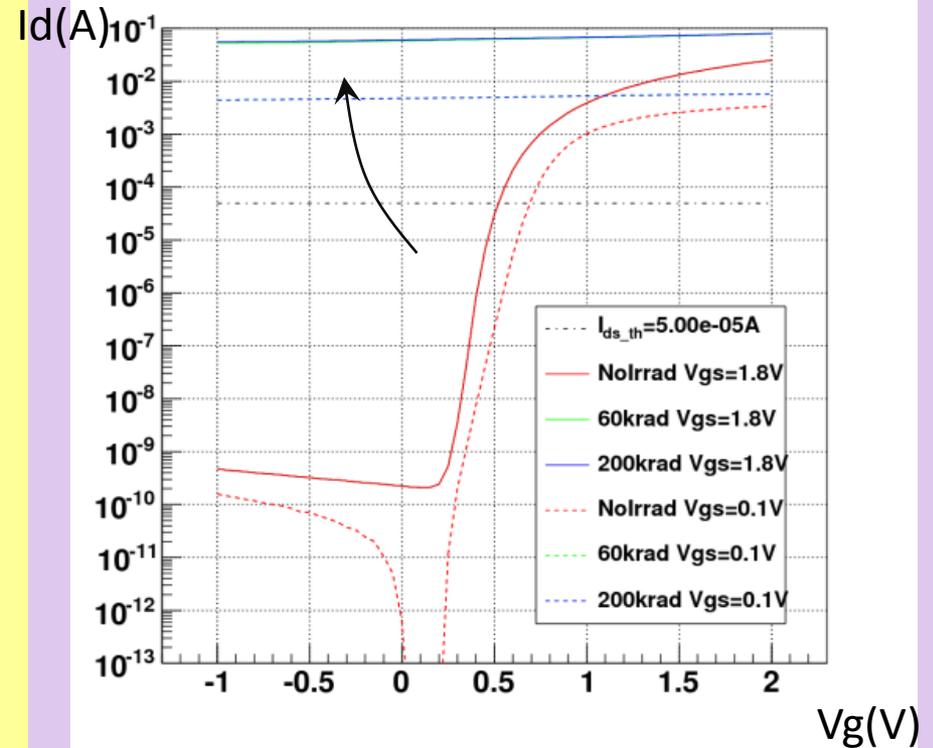
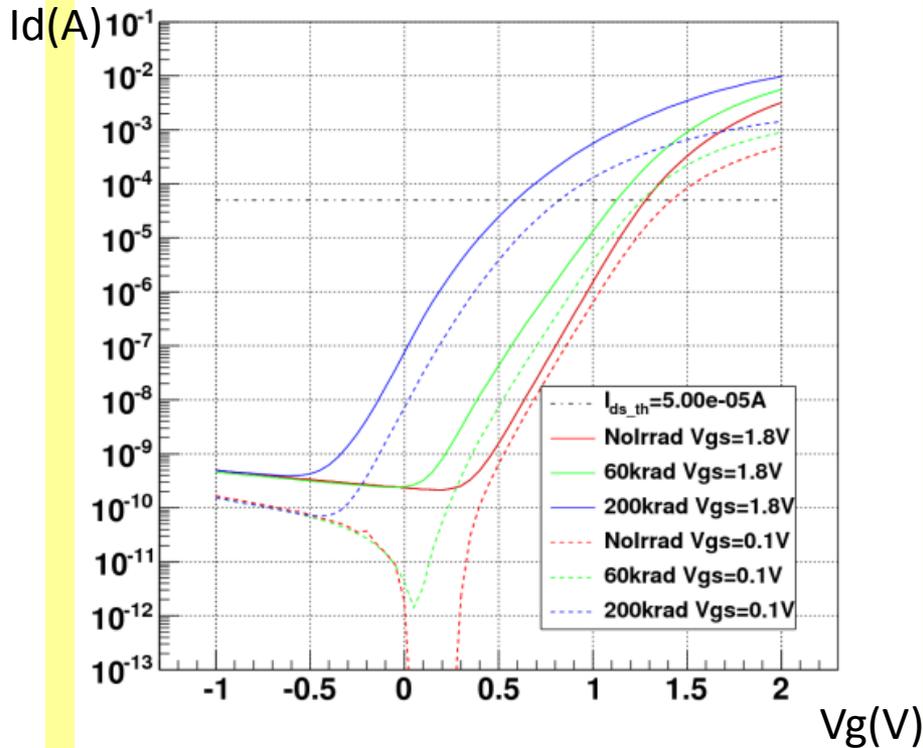
NMOS **BPWなし**  $I_d$ - $V_g$ 特性

照射条件a) 全端子0V

照射条件b)  $V_{back}=100V$ , 他0V (検出器)

A) NMOS  $i_{ds}:v_{gs}$  {ntr==3}

A) NMOS  $i_{ds}:v_{gs}$  {ntr==3}



- 照射条件b)の方では、BPWなしではD,S間が導通している。
- つまり**trが動作できていない**。

# 結果②(損傷試験)

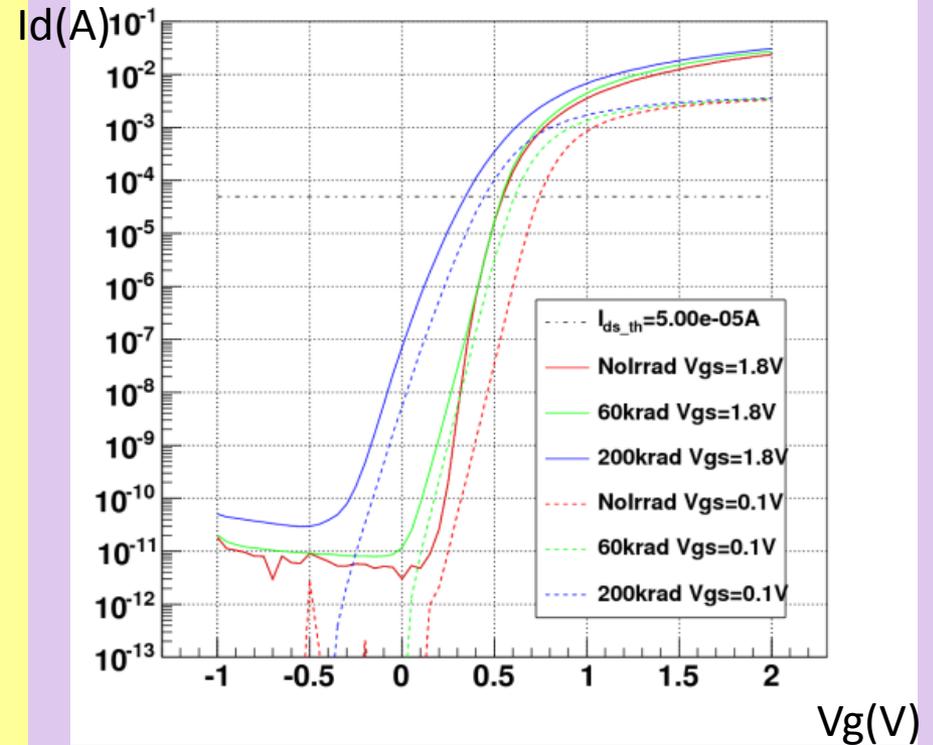
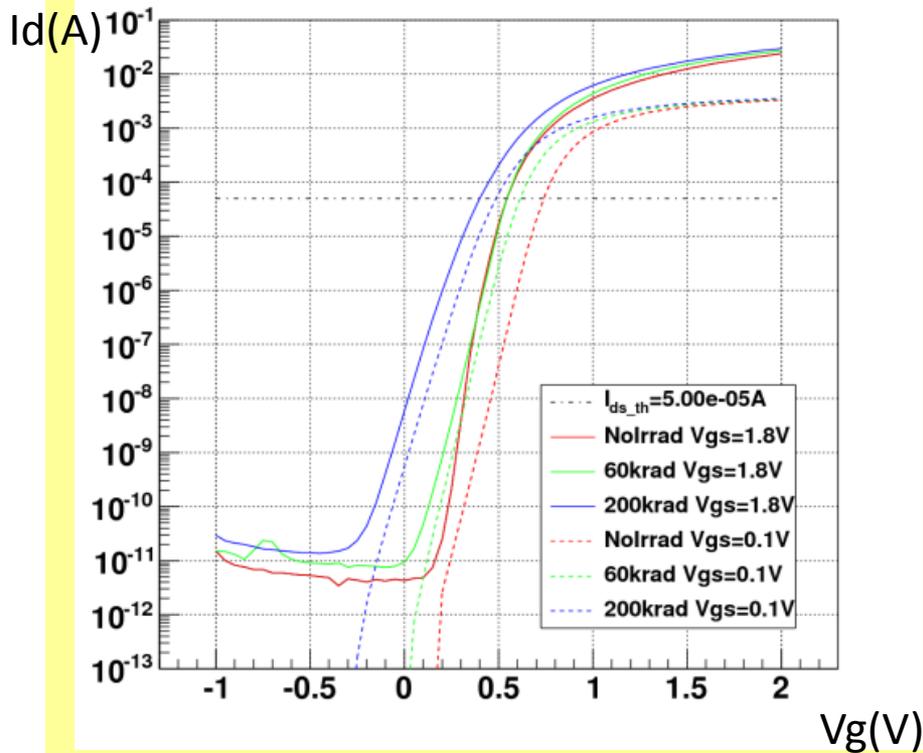
NMOS **BPWあり**  $I_d$ - $V_g$ 特性

照射条件a) 全端子0V

照射条件b)  $V_{back}=100V$ , 他0V (検出器)

A) NMOS  $i_{ds}:v_{gs}$  {ntr==3}

A) NMOS  $i_{ds}:v_{gs}$  {ntr==3}



- BPWなしの結果と比べて、特性の変化(損傷)が少ない。
- 検出器として使う際には**BPWが必要である**。

# まとめ(損傷試験)

- X線照射により $I_d$ - $V_g$ ,  $I_d$ - $V_{back}$ 特性が変化することを確認した。
- コンデンサと仮定した場合酸化膜、界面にトラップ電荷面密度の増加分は $10^{11}$ (/cm<sup>2</sup>)オーダーになる。
- PMOSはNMOSに比べ、放射線耐性が強いこともわかった。
- 照射時のバイアス設定により、検出器として作動させる際には、BPWが必要、有効であることが分かった。

# 放射線ダメージの回復 (回復試験)

回復試験については、秘密です。  
申し訳ございません。

# 今後の予定

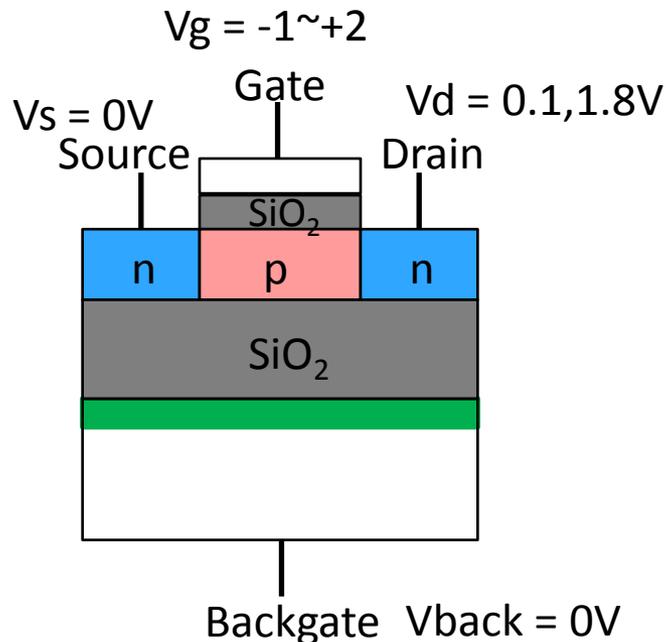
- 現在、Charge Pumping法による**界面のみ**にトラップされた電荷を測定を行っている。(→学会で発表予定)
- 電子線照射(核理研)による損傷の度合いも調べる予定。
- シミュレーションソフトTCADを用いてのBPWの最適化も行う予定。

バックアップ

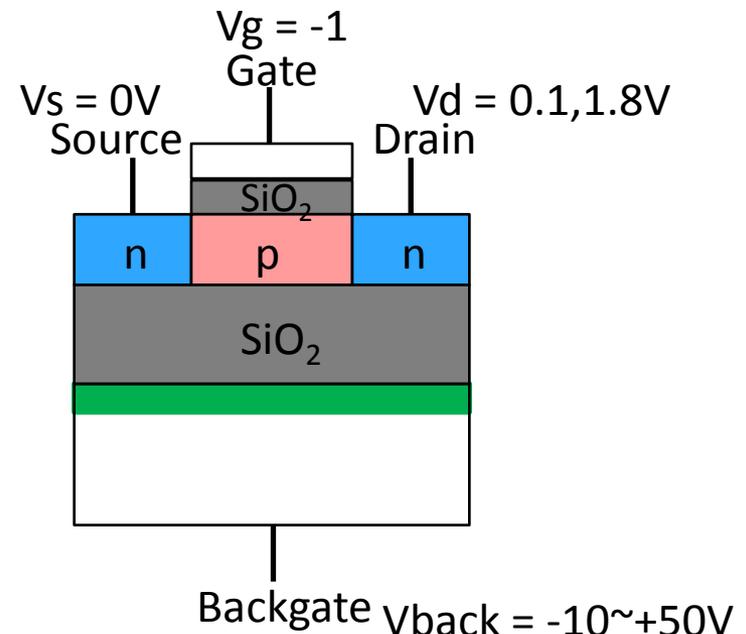
# 測定時のバイアス設定

- 損傷試験と回復試験とでは、下記のバイアス設定とは多少異なっている。  
(試験時間の都合上)
  - 損傷試験 →  $I_d$ - $V_{back}$ 特性:  $V_{back} = -10 \sim +30V$
  - 回復試験 → 両方の特性:  $V_d = 1.8V$ のみ
- 各特性の  $V_g, V_{back}$  には変化させない側で、D,S間を通じない設定にした。

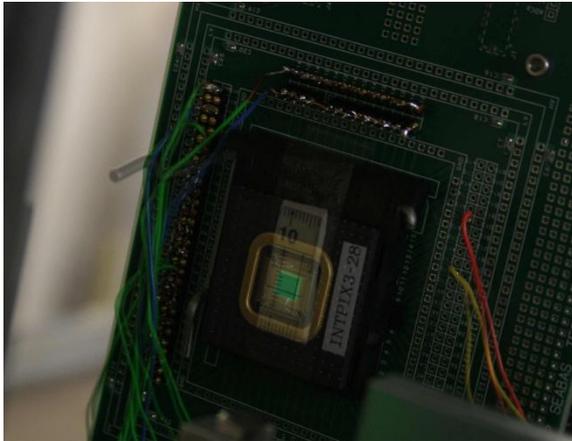
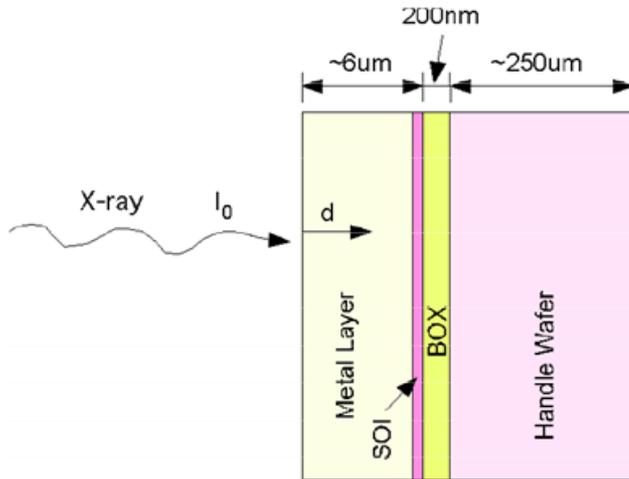
[ $I_d$ - $V_g$ 特性]



[ $I_d$ - $V_{back}$ 特性]



# X線強度について



FR-D  
CuK $\alpha$ 線 : 8(keV)

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 $\alpha$ 線8keVに対しては

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

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

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

BOX層の $1\text{cm}^2$ あたりの質量は

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

よって、単位質量あたりで吸収するエネルギー $\Delta R$ は

$$\Delta R = \frac{\Delta E (\text{J/mm}^2)}{\sigma (\text{g/mm}^2)} = 0.11 \times \frac{I_{PD}}{S} (\text{Gy/s}) = 1.1 \times \frac{I_{PD}}{S} (\text{krad/s})$$

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。

# 全結果

- 損傷試験
  - 回復試験
- の全trの結果

容量が大きくなってしまふので別のスライドで管理します。