

TCHoU-Work Shop

陽子線照射によるPDD構造SOIピクセルセンサの暗電流増加

Increased dark current of PDD structure SOI pixel sensor
by proton beam irradiation

鈴木尚紀, 倉知郁夫^A, 原和彦

筑波大学, 高工研^A

背景

放射線の照射によるセンサへのダメージ

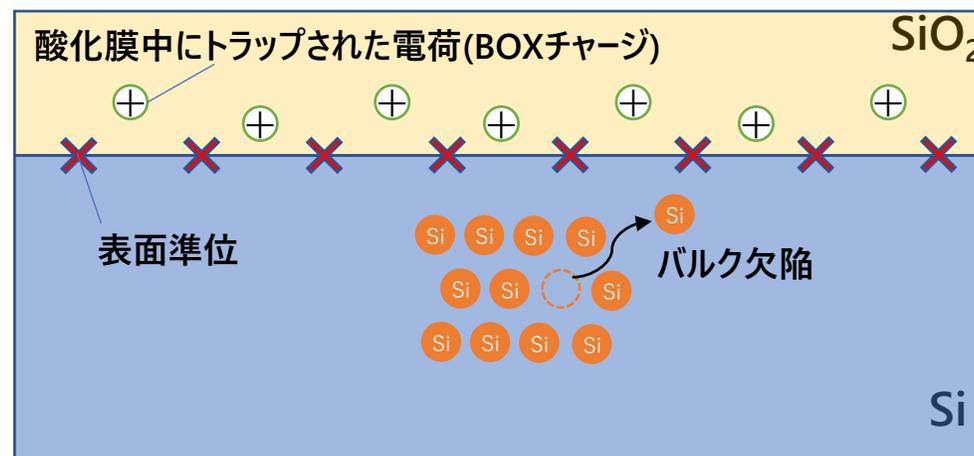
→ CMOS Image Sensor(CIS)では暗電流の増加が課題！

暗電流の原因として...

- 界面準位の増加
- 酸化膜中に発生した電荷による空乏層拡大
- バルク損傷 (NIEL)



対策のためにそれぞれの成分の定量的評価したい



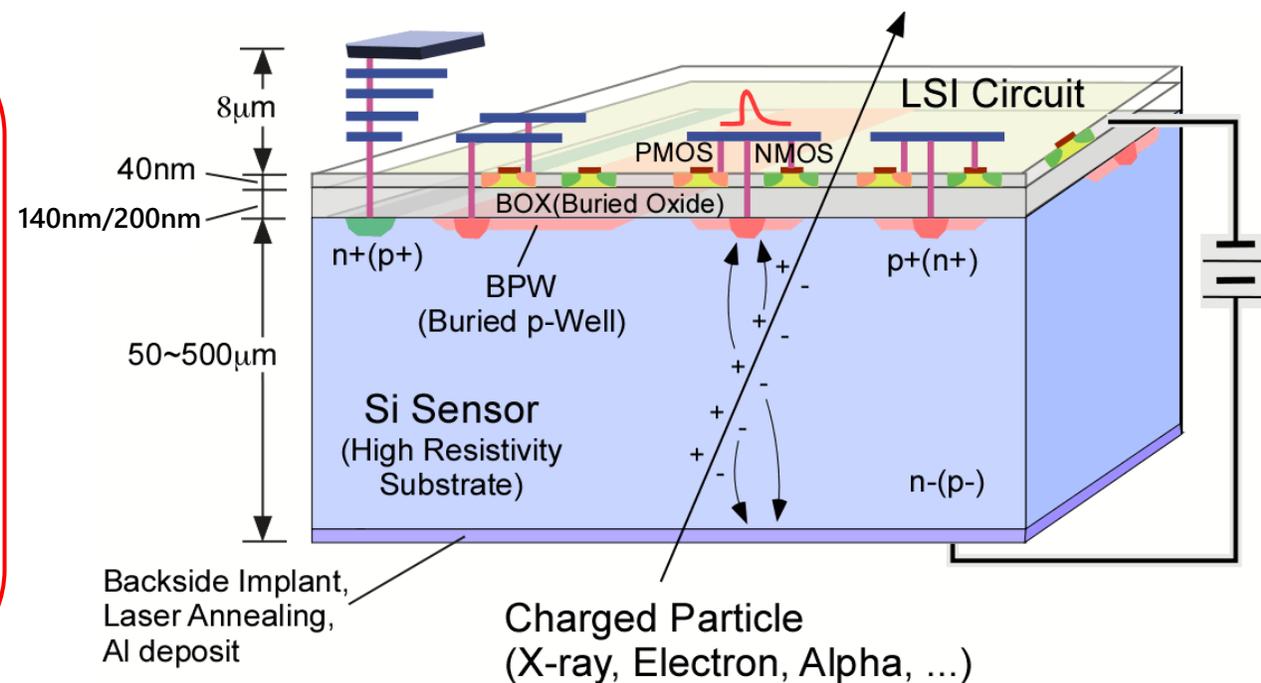
PDDTEG2チップを使えば、ピクセル部の暗電流とMOSFETの特性評価による表面準位および酸化膜内にトラップされた電荷 (BOXチャージ) の測定ができる！

SOIピクセル検出器

SOI (Silicon On Insulator) 技術によりSiO₂酸化膜上にトランジスタを形成
読み出し回路一体型の次世代半導体検出器

特徴

- SOI-CMOS
酸化膜で各トランジスタを電氣的に分離
- モノリシック型
回路・センサー部が一体構造
→ バンプボンディング不要で微細化・薄型化が可能
高比抵抗ウェハ
→ 空乏層が広がりやすくセンサー部に適する



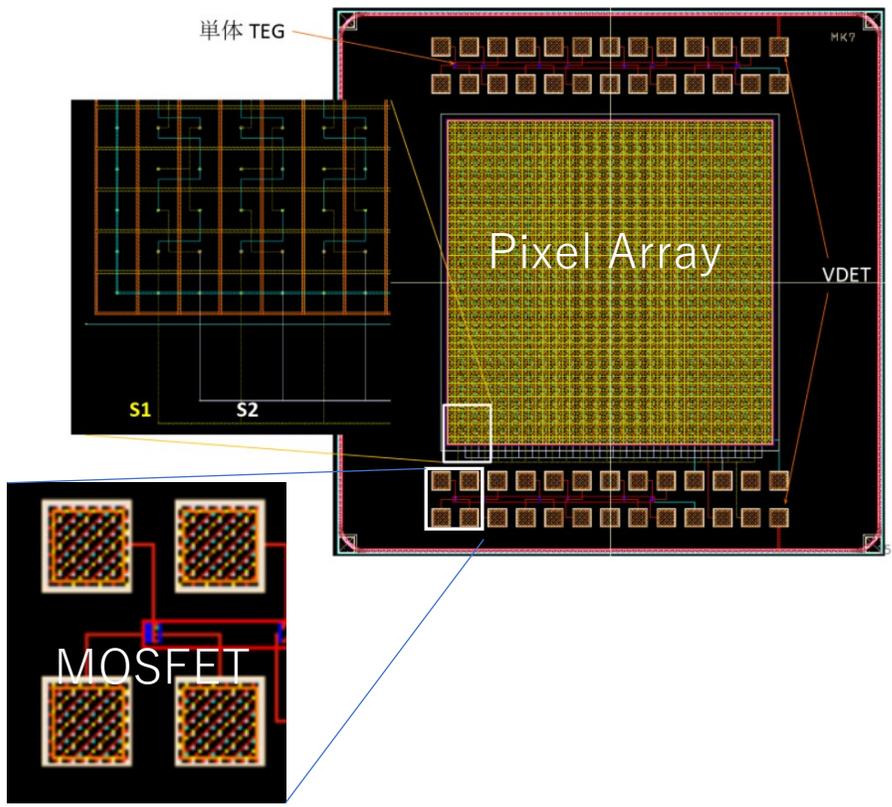
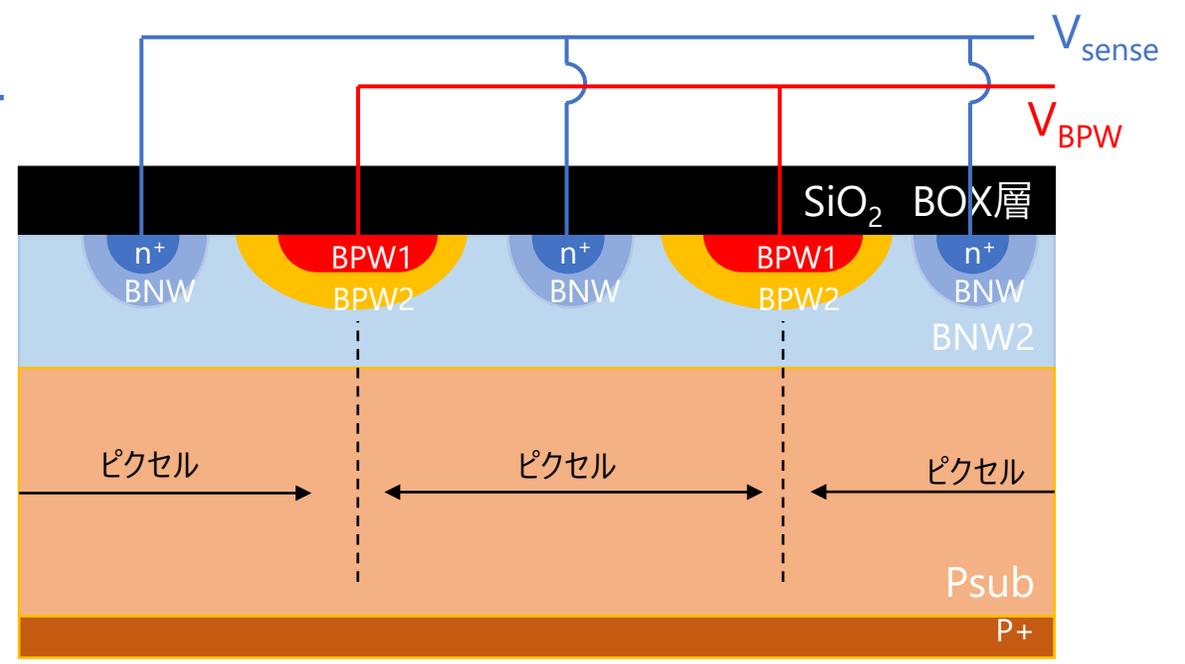
- ⇒
- ・ピクセルの細密化
 - ・低物質量化 → 多重散乱の低減
 - ・低寄生容量 → 高S/N, 高速動作

- ・低消費電力
- ・高い放射線耐性
- ・広い動作温度領域 (0.3K~570K)

PDD構造 / PDDTEG2 とは？

ピクセル境界の高濃度P型ドープ (BPW) を形成し、この層の電位(V_{BPW})を固定して用いる ※P型バルクの場合

→BOX回路層とセンサー層の干渉を抑えられる



TEGはPDD構造のPixel Array(センサ部)と、周辺のMOSFETから構成される

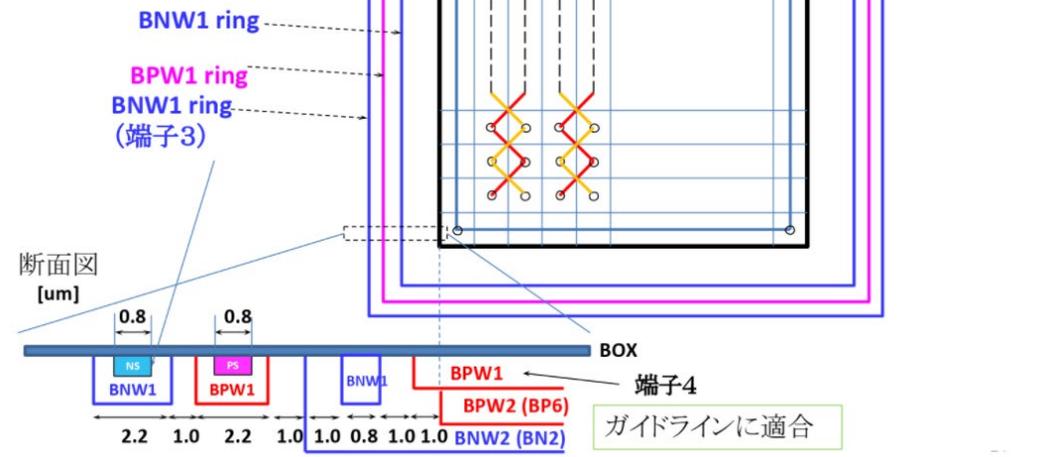
Pixel Arrayでセンサ部のリーク電流、MOSFETのIV特性を測定する

Pixel ArrayとSubMOSFET

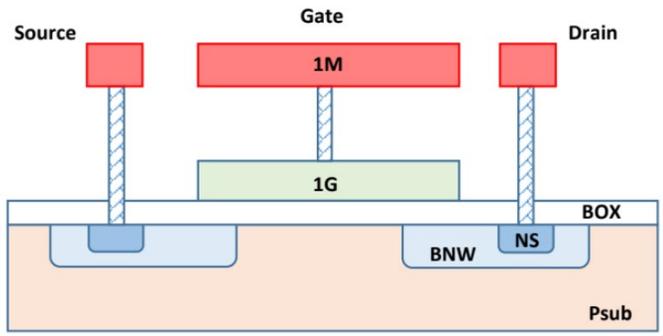
- ◆ Pixel Arrayはピクセルサイズ38.4umのピクセルが48*48個
- ◆ 内側46*46をセンスノード、外側1列をダミーとして区別
- ◆ センスノード (S₁, S₂) , ダミー, BPW, Psub(裏面)に電圧をかけてIV測定

V_{backbias} = 0 ~ -200V (1V step)

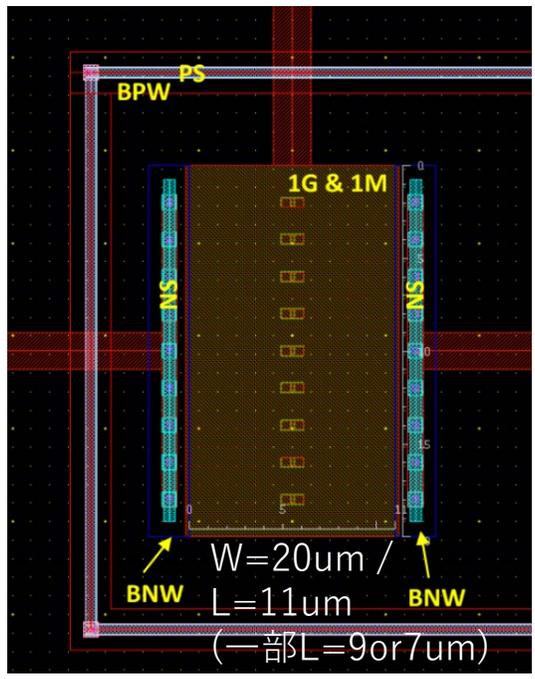
- 端子 1: S1 } 0.8V
- 端子 2: S2 } 0.8V
- 端子 3: BNW1 OPEN
- 端子 4: BPW1 -2.0V
- 端子 5: dummy 0V



PDDTEG2に搭載



V_{ds} = 0.8V
 V_{gs} = -10 ~ 10V (0.05V step)
 V_{backbias} = -30V
 @Room Temperature(27°C)



- ◆ BOX層をゲート酸化膜としてSubMOSFETを使用
- ◆ ソース, ドレイン, ゲート, Psub(裏面)のIVを測定

陽子線照射

東北大のCYRIC(cyclotron radio isotope center)にて70MeVの陽子を照射

照射条件は 9.63×10^{13} n/cm² , 5.14×10^{14} n/cm²の2条件

(1MeV equivalent neutrons/cm² : n/cm²)

各条件2チップずつ

照射後、冷凍保存

測定前60°C80分のアニールを実施

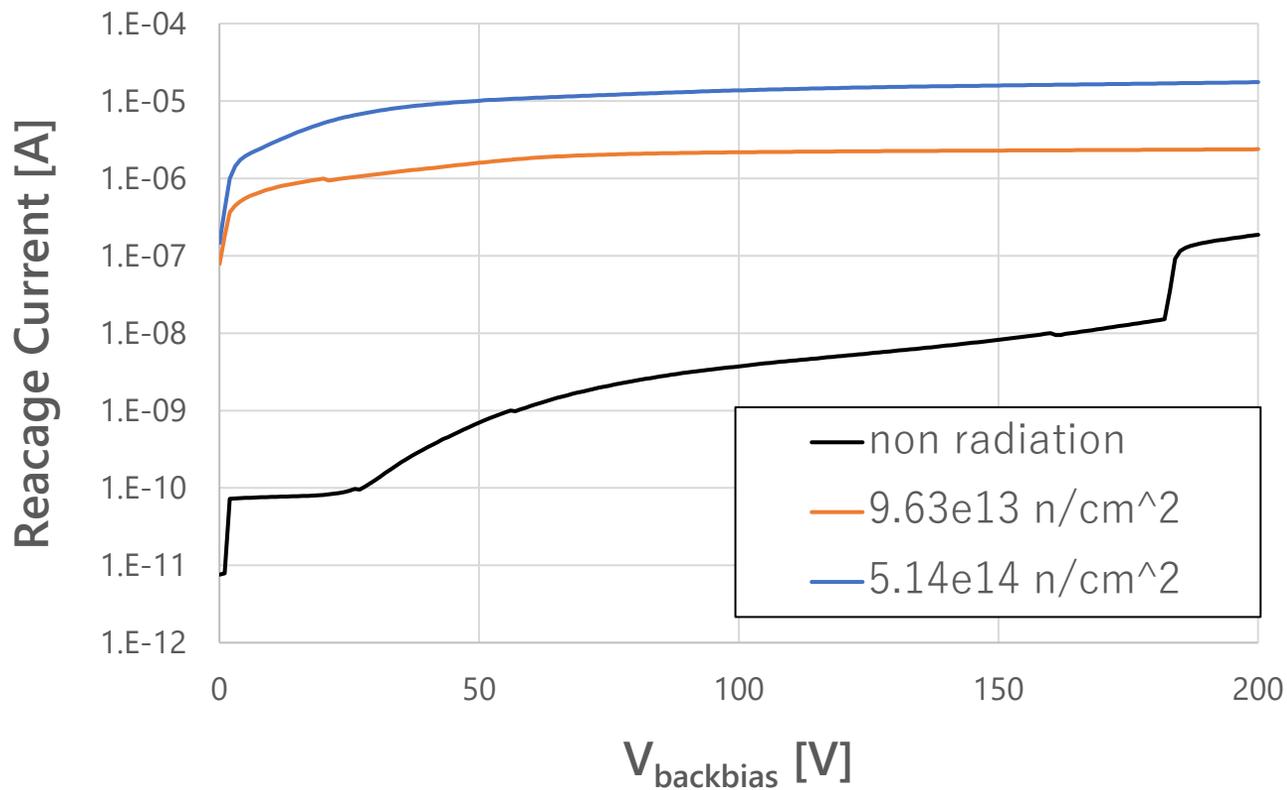
PDD構造における暗電流増加

照射量に依存して暗電流量も大きくなる

→この暗電流増加を

- 界面準位
- BOXチャージ
- バルク損傷 (NIEL)

の原因に分けて考えたとき, それぞれの寄与の大きさを評価したい



MOSFET 評価パラメータ(1)

(1) S : サブスレショルドスイング(slope)

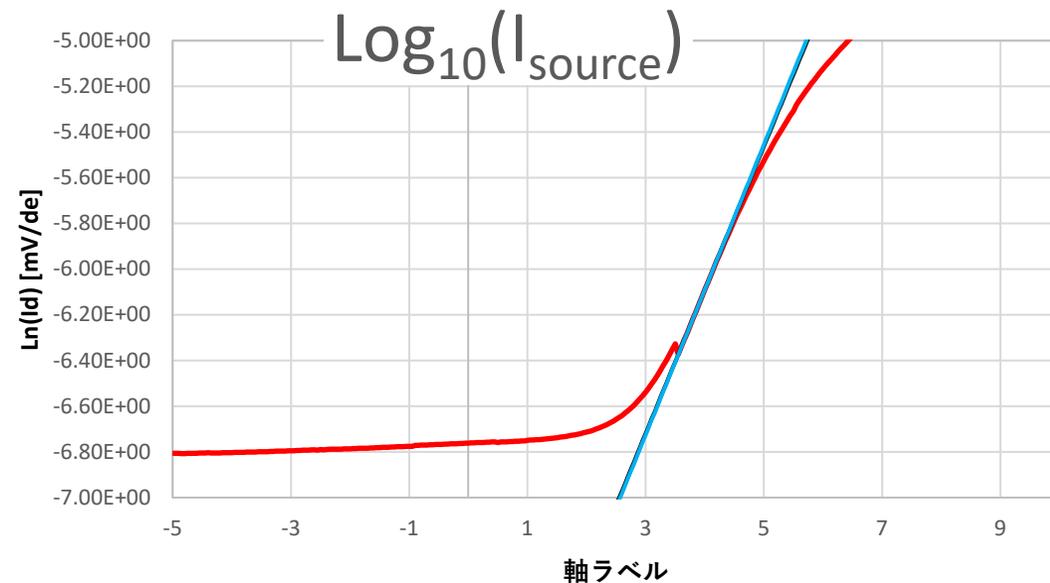
ゲート電圧がしきい値電圧より低く半導体表面がわずかしか反転していない場合のドレイン電流はサブスレショルド電流と呼ばれる

$\ln(I_d) - V_g$ について、線形領域の傾きをSとして定義する

$$S = \frac{kT}{q} \ln 10 \left(1 + \frac{C_D}{C_i} \right) \left(\frac{1 + (C_D + C_{it})/C_i}{1 + C_D/C_i} \right), C_{it} = qD_{it}$$

D_{it} は界面準位濃度

→Sによって界面準位をモニタ

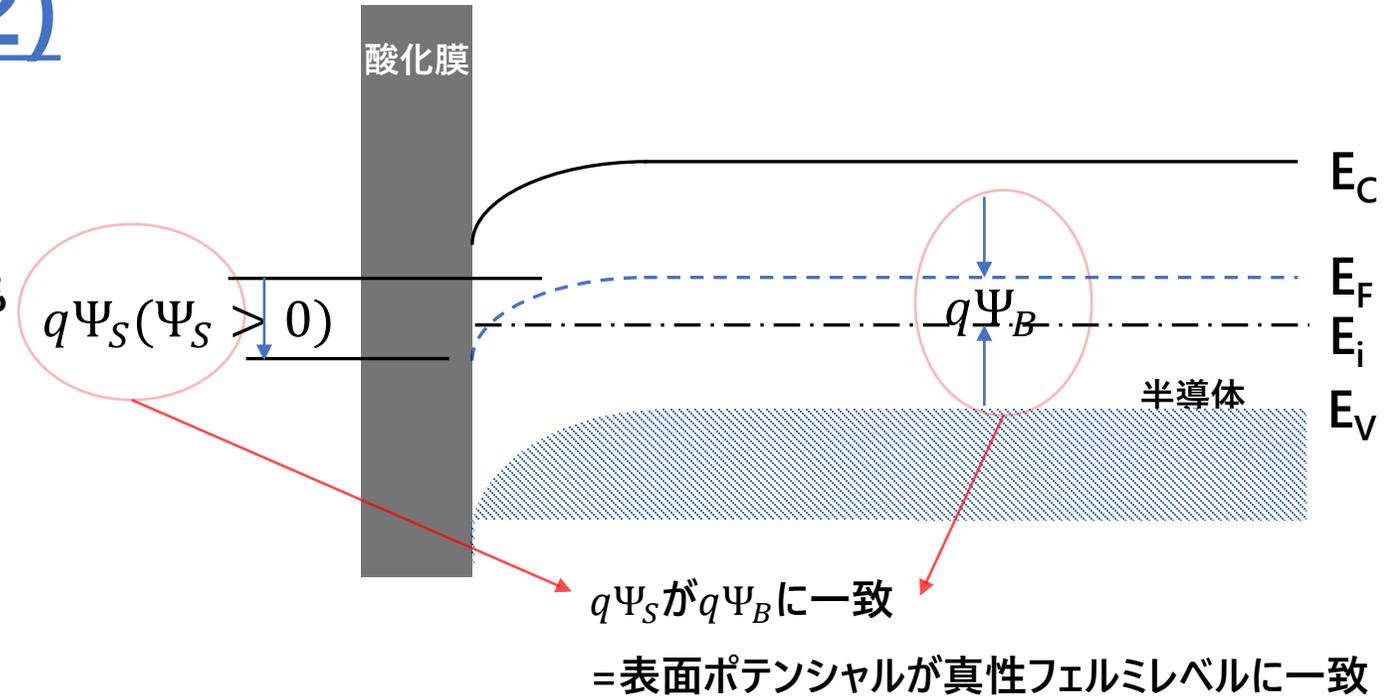


MOSFET 評価パラメータ(2)

(2) V_{mid} : ミッドギャップ電圧

$\psi_s = midgap$ の時は界面準位がイオン化せずに電荷をもたない

→ミッドギャップ電圧 V_{mid} を求めることで界面準位は引いた純粋な酸化膜に発生した電荷を見ることができる



$$I_d = \mu \frac{W}{L} \frac{a C_i}{2 \beta^2} \left(\frac{n_i}{N_A} \right)^2 (1 - e^{-\beta V_d}) e^{\beta \psi_s} (\beta \psi_s)^{-\frac{1}{2}} \quad \psi_s = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) @ midgap \quad a = \frac{\sqrt{2 \epsilon_{Si} q N_A \beta}}{C_i} \quad \beta = \frac{q}{kT}$$

$$\mu = 500 \frac{cm^2}{Vsec}, T = 300K, T_{ox} = 145 nm, V_d = 0.8 V, N_A = 2 \times 10^{12} cm^{-3}$$

$$I_d @ midgap = 5.07 \times 10^{-12} A$$

Sを求めた線形近似の外挿から $I_d @ midgap$ のときのゲート電圧をミッドギャップ電圧として定義

アニーリング

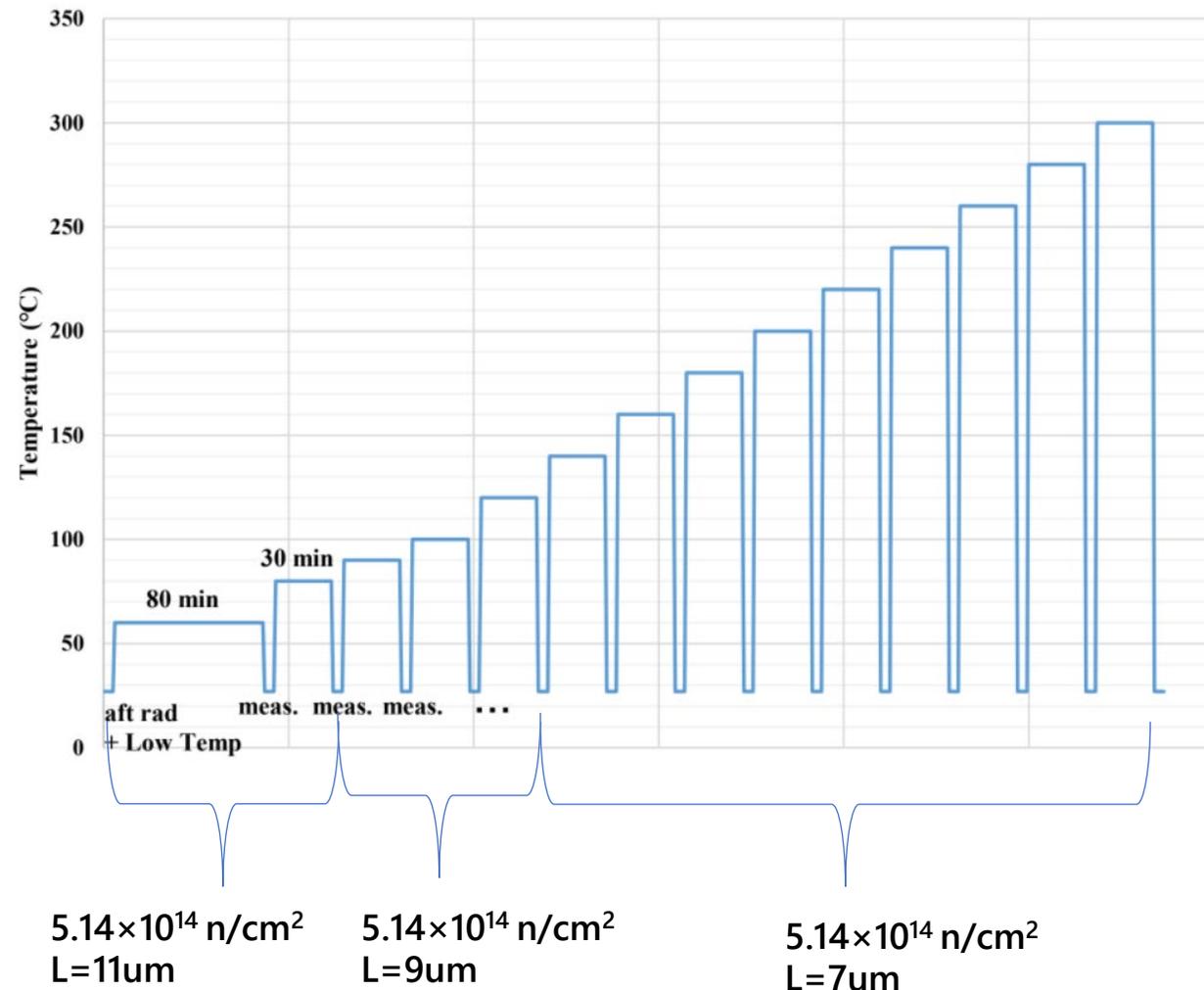
◆80°C~300°Cまで20°Cステップで30分間アニーリング

→放射線ダメージの回復を見ながら暗電流の原因となる成分をモニタ

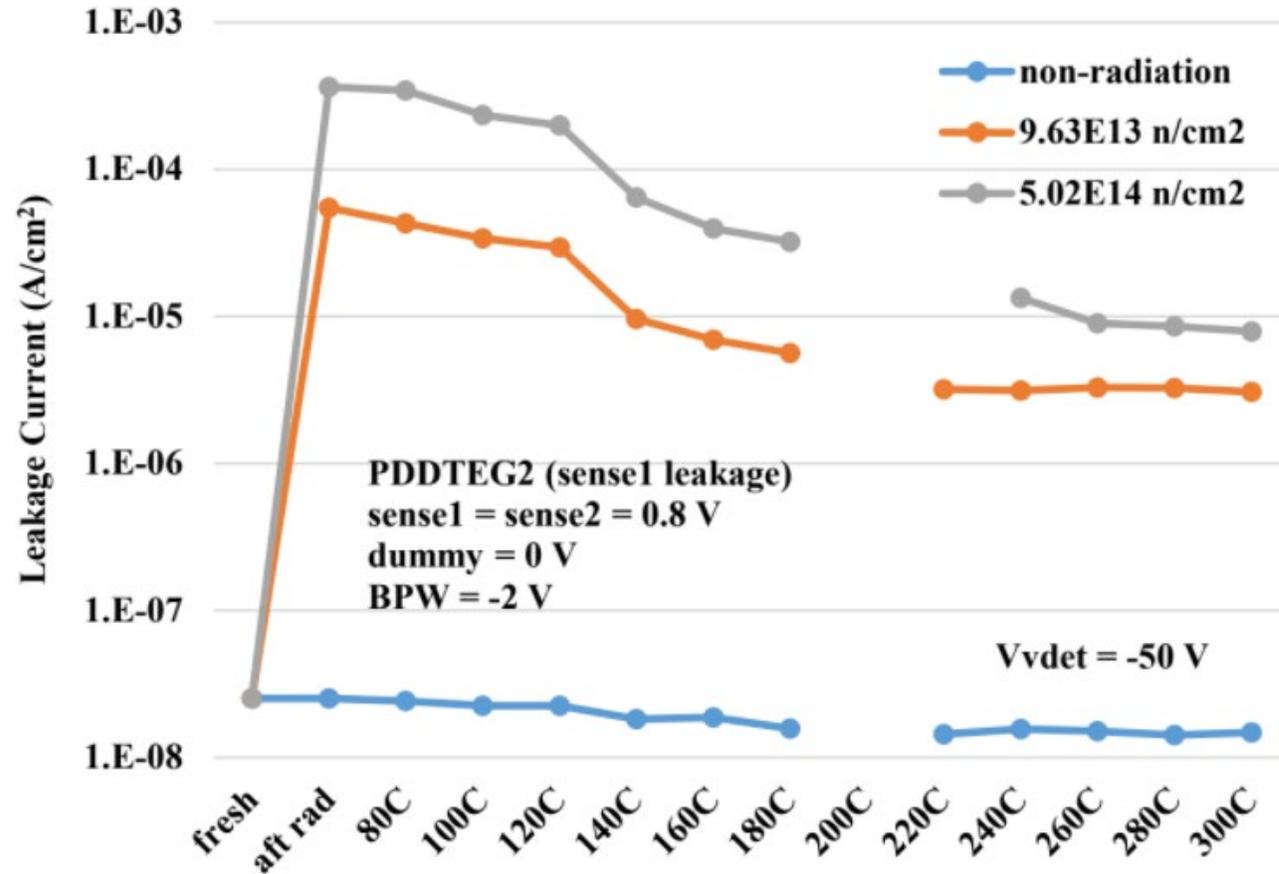
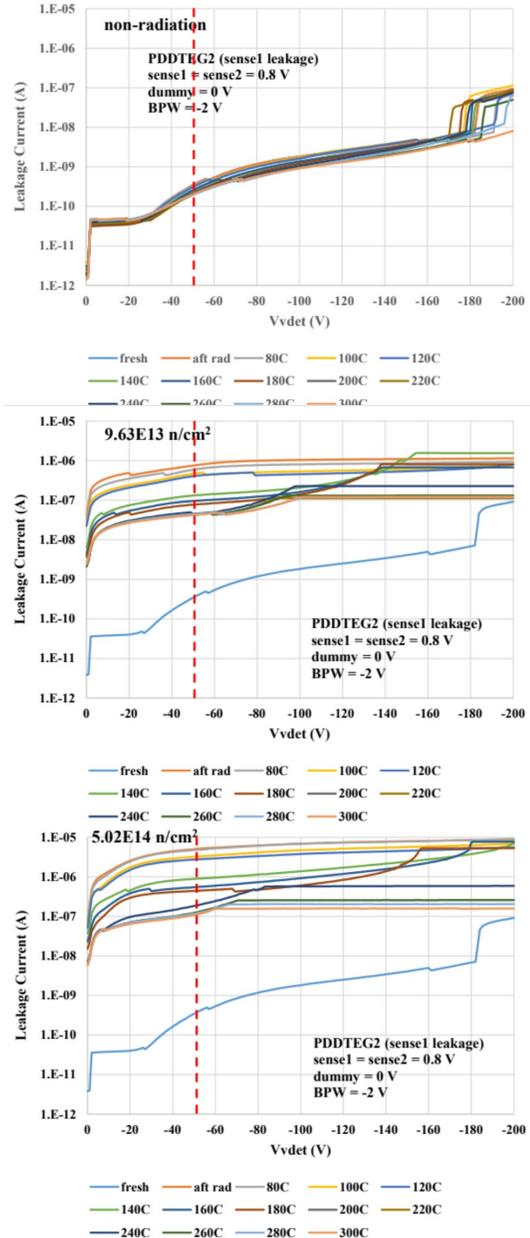
◆ 9.63×10^{13} n/cm² についてはW=20um,L=11umのsubMOSFETを測定

◆ 5.14×10^{14} n/cm²のサンプルについては@120°CでL=11um,@160°CでL=9umのSubMOSFETが測定途中で故障したため160°C~L=7umのSubMOSFETで測定

※比較実験として未照射サンプルについてもアニーリングを実施 → MOSFET特性に変動なし



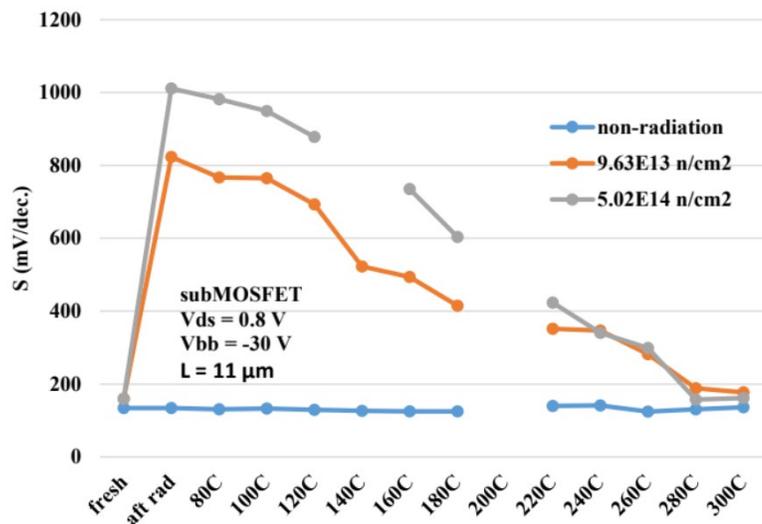
PDDTEG 測定結果 ピクセルIV



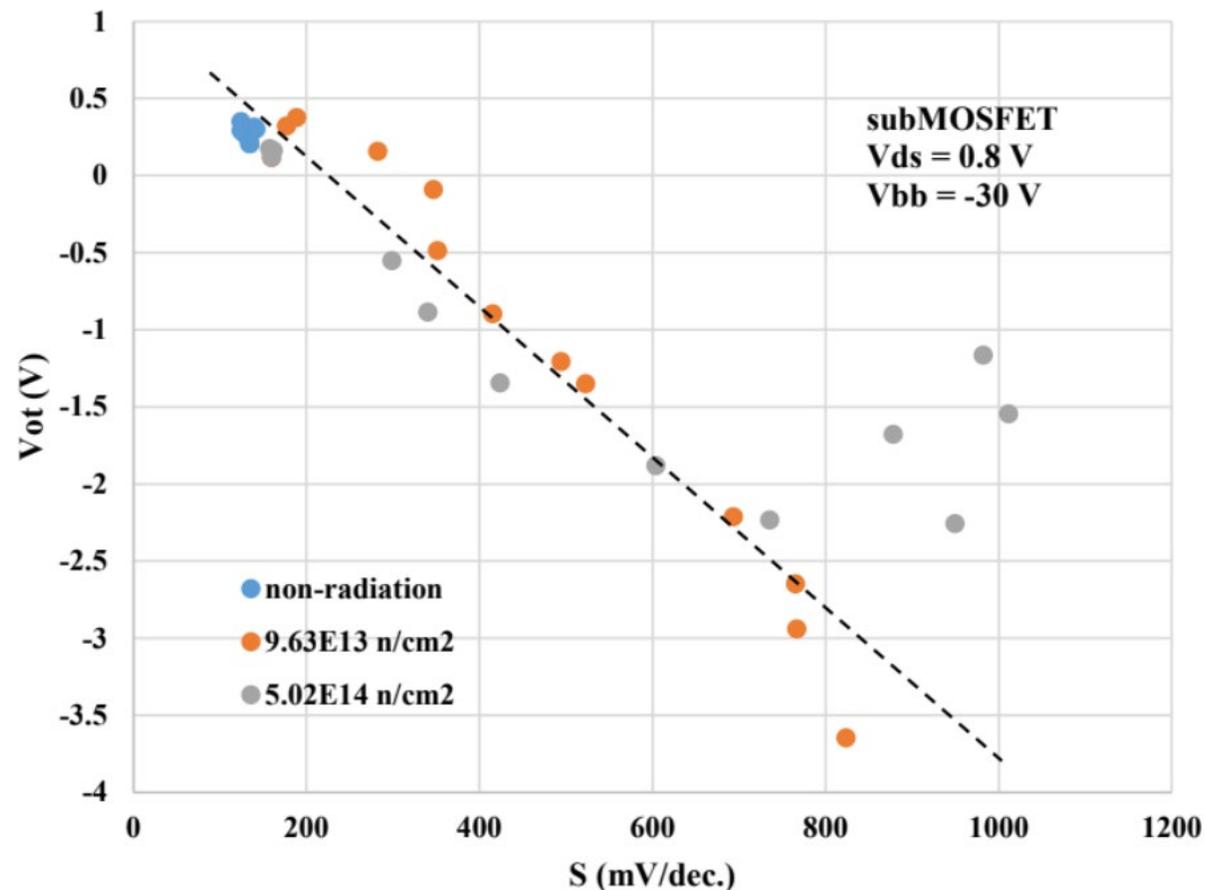
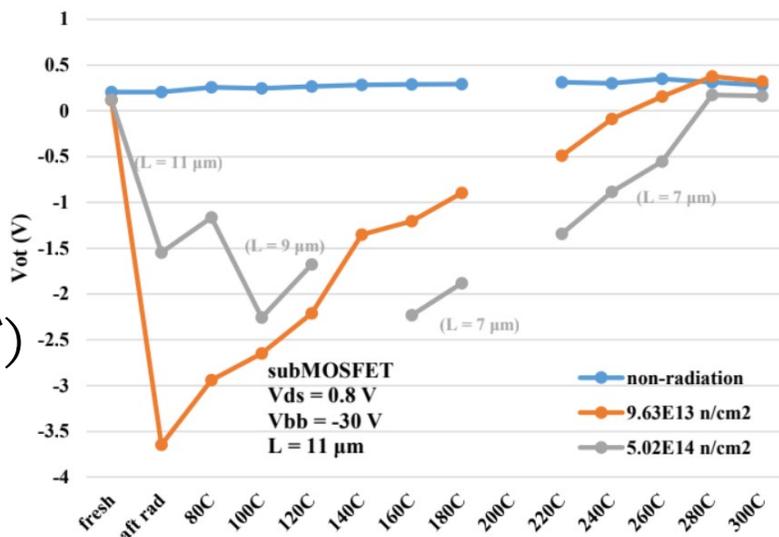
- ◆ Non-radiationサンプルはアニールによる暗電流変動ほとんどなし
- ◆ リーク電流はドーズ量に依存
- ◆ 260°Cで回復がほぼ飽和

PDDTEG 測定結果 SubMOSFET

S
(界面準位)



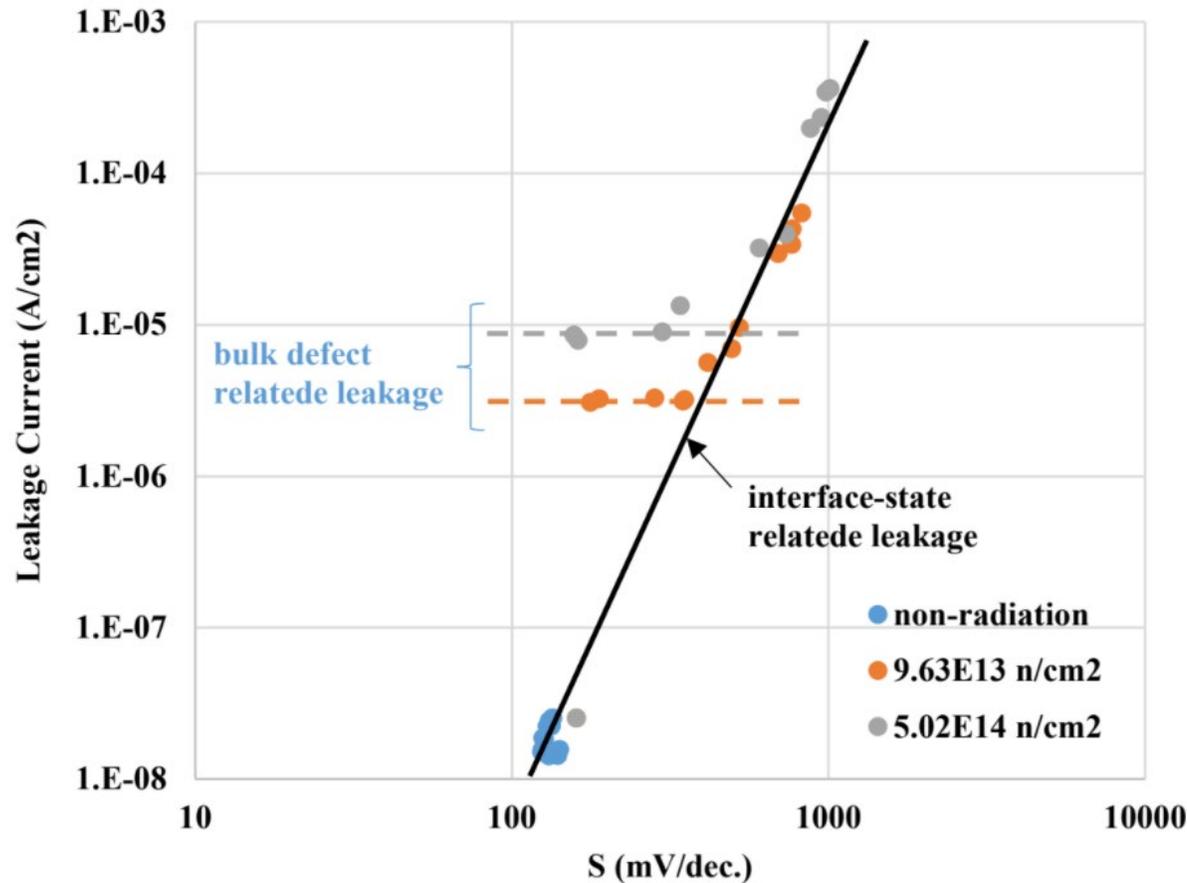
V_{mid}
(BOXチャージ)



◆ $5.14 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ の一部データをを除くとBOXチャージと界面準位に相関がありそう

※V_{mid}については移動度μ固定でI_d@midgapを計算しているが、実際は照射によって移動度が低下しているため適当なμを推定して解析する必要がある

PDDTEGリーク電流とBOX・基板間界面準位の関係



- ◆ S（界面準位）とリーク電流の関係を両対数スケールでプロット
- ◆ 照射済サンプルについてはSが回復してもリーク電流は回復せず飽和
 - 回復が飽和した固定リーク電流は放射量に依存
- ◆ Sとリーク電流は固定電流を除きlog-logの関係
 - 界面準位・BOXチャージがほとんど回復したと考えれば、固定リークはバルク損傷が原因と考えられる

量的にリーク電流の原因のほとんどは界面準位に起因するが、アニールによってバルク損傷によるリーク電流の影響も無視できない影響として区別して確認することができた

まとめ・今後の展望

- ◆ PDDTEG2を用いてPDD構造のSOIピクセルセンサーに陽子線を照射し、リーク電流・SubMOSFET特性を測定した
→サブスレショルドスイングSによって界面準位を、ミッドギャップ電圧 V_{mid} によってBOXチャージをモニタした
- ◆ アニール測定によって界面準位とバルク損傷による成分を切り分け、定量的に評価することができた
- ◆ BOXチャージの評価には移動度 μ の適切な推定が必要になるため今後解析を続ける
- ◆ 放射線の種類の違いによるリーク電流への影響を評価するために高崎でガンマ線照射を行う予定