



放射線損傷： バルク損傷と表面損傷

Koji Nakamura (KEK)

目標

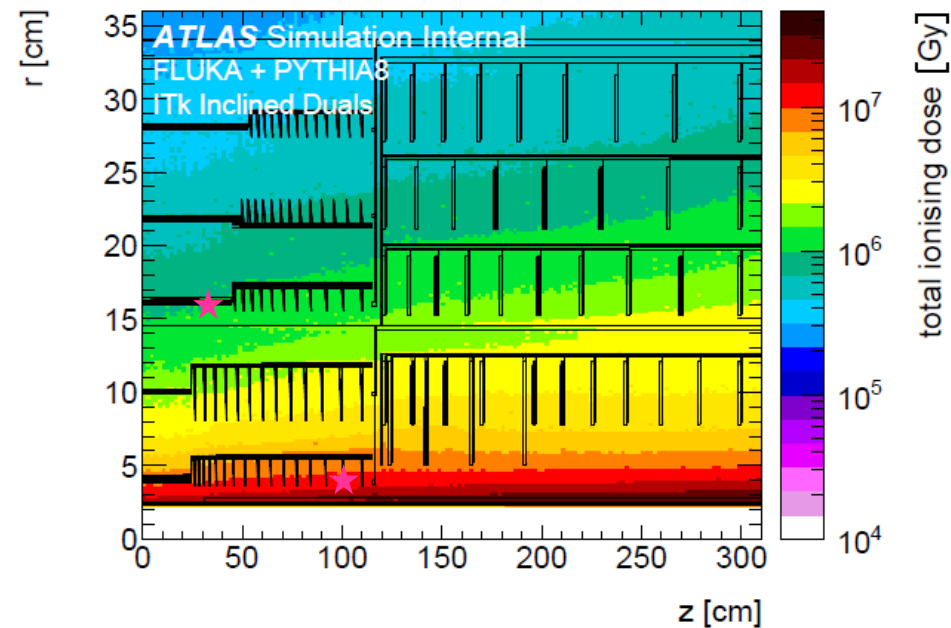
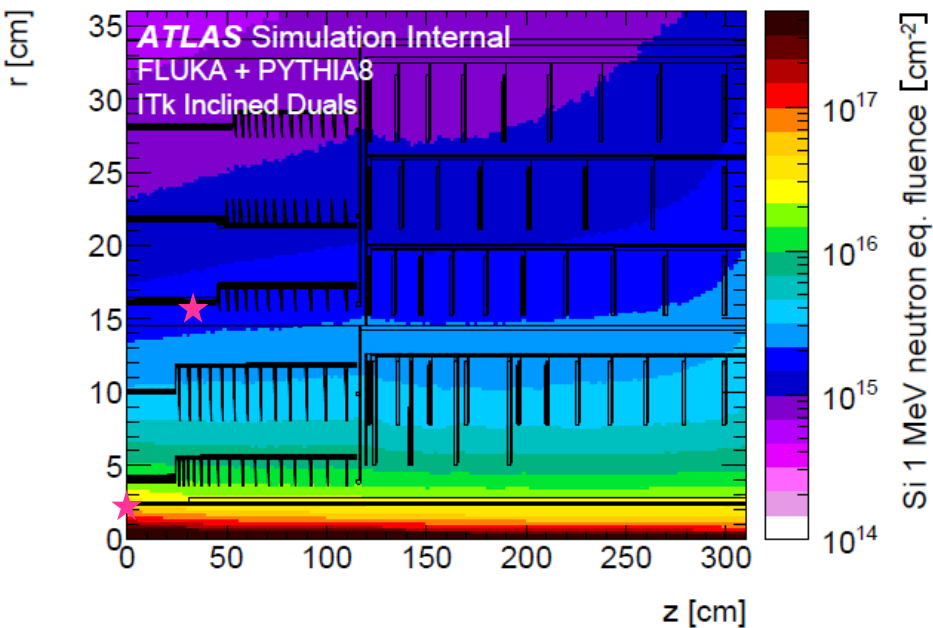
- バルク部の損傷のメカニズムを理解する。
- 表面損傷のメカニズムを理解する。
- TCADシミュレーションでできることを知る
 - なんのパラメータで損傷を記述しているか？
 - それっぽいパラメータでシミュレーションをするとIV/CV/空乏層厚などの照射量依存性が定性的に理解できる結果になるか。
- 今後の課題
 - シミュレーションと実データを比較したい。
 - 10^{17} neq/cm²などまでシミュレーションが適応できるか

放射線耐性

- 放射線損傷は高放射線環境下で放射線の落とすエネルギーによる物質の損傷で、大きく分けて二種類ある。
 - 非電離損傷: Non Ionizing Energy loss (NIEL)
 - 主に陽子線やパイ中間子など比較的重い粒子によって引き起こされるダメージ
 - ドーパント準位の損失: Acceptor removal
 - ドープされたホウ素が本来のアクセプター準位からドナー準位に代わる現象
 - 電離相互作用による損傷: Total Ionization Dose (TID)
 - 主に荷電粒子や光子通貨によるイオン化エネルギーで引き起こされるダメージ

放射線耐性

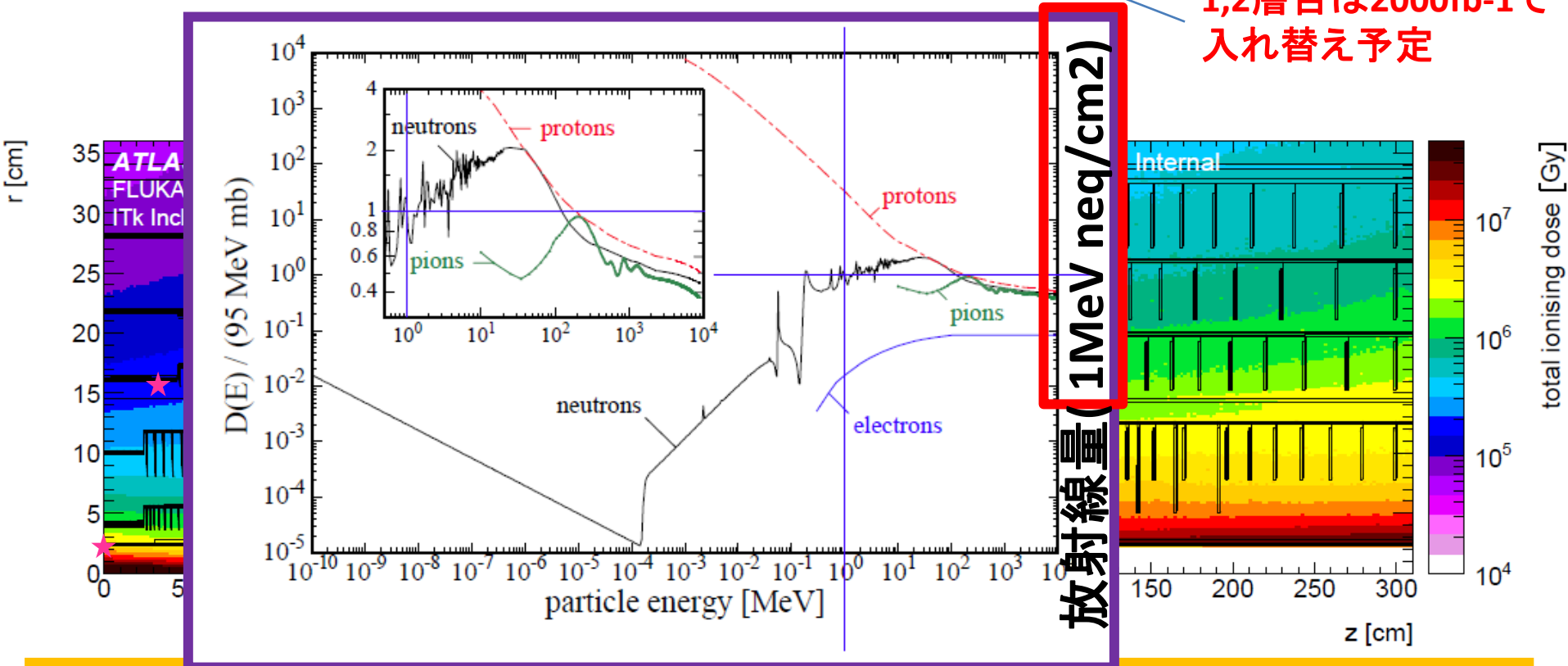
- 4000fb^{-1} で予想される放射線量(マージン1.5含む)
 - NIEL : 3層目 2.8×10^{15} neq / cm^2 最内層 2.6×10^{16} neq/ cm^2
 - TID : 3層目 1.6MGy 最内層 19.8MGy
- 1,2層目は 2000fb^{-1} で入れ替え予定



放射線耐性

- 4000fb^{-1} で予想される放射線量(マージン1.5含む)
 - NIEL : 3層目 2.8×10^{15} neq / cm^2 最内層 2.6×10^{16} neq/ cm^2
 - TID : 3層目 1.6MGy 最内層 19.8MGy

1,2層目は2000fb-1で
入れ替え予定



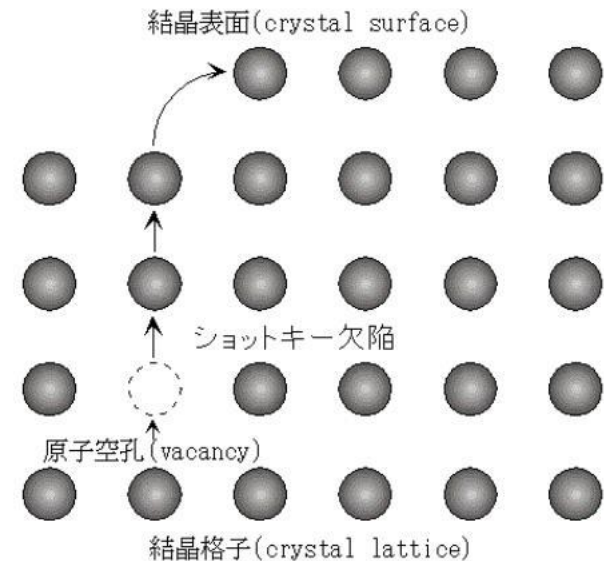
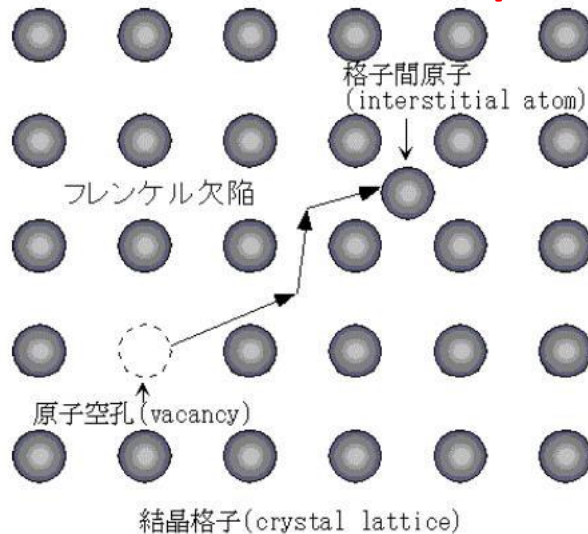
シリコン検出器のバルク損傷(NIEL)

バルク損傷

- シリコンセンサーに放射線が入射すると、電子を励起、反跳したり、シリコン原子と衝突を繰り返してエネルギーを失っていく。(NIEL: Non Ionizing Energy loss)

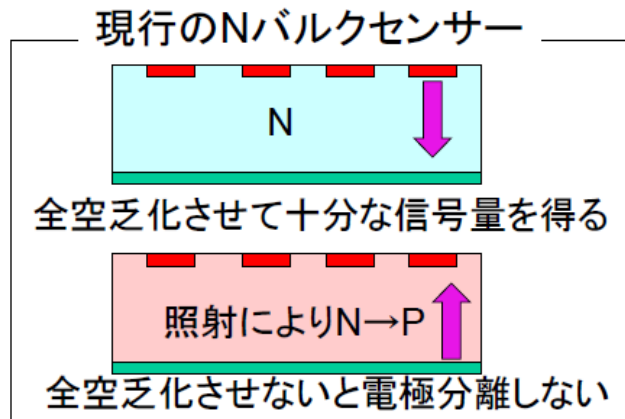
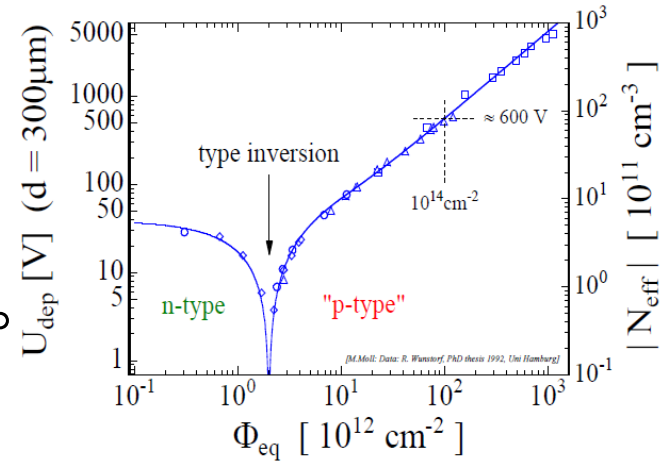
フレンケル欠陥とショットキー欠陥

- シリコン原子が弾き出されて生じた空孔と、弾き出された原子が他の結晶格子間に移動して出来た格子間原子の対をフレンケル欠陥と呼ぶ。
- 弾き出された原子が結晶表面に移動し空孔のみが残った欠陥をショットキー欠陥と呼ぶ。
- **いずれも原子核欠損なのでp型不純物として働く→暗電流も劇的に増加**



シリコンのバルク損傷とn-in-p検出器

- n型バルクとp型バルク
 - 放射線損傷でn型バルクはp型に型変換する。
 - 型変換すると空乏層の広がり逆になるので、読み出しには全空乏化が必要。
 - センサーの耐圧で制限される。
- もしくは両面プロセス(ただし高価)



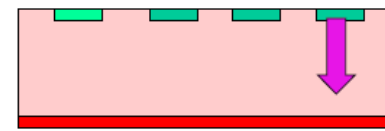
全空乏化させて十分な信号量を得る

照射によりN→P

全空乏化させないと電極分離しない

$10^{14} /\text{cm}^2$ (LHC当初計画)を越えると全空乏化電圧は500Vに達し、システムの耐圧を越える

放射線耐性をさらに上げるには、P型バルクセンサー



型反転しない

PN接合側の電極は部分空乏化でも分離

耐圧を越えたら、電圧を下げても運転 (信号量は減る)

最近、耐圧~1000Vくらいのn+in-p検出器の開発

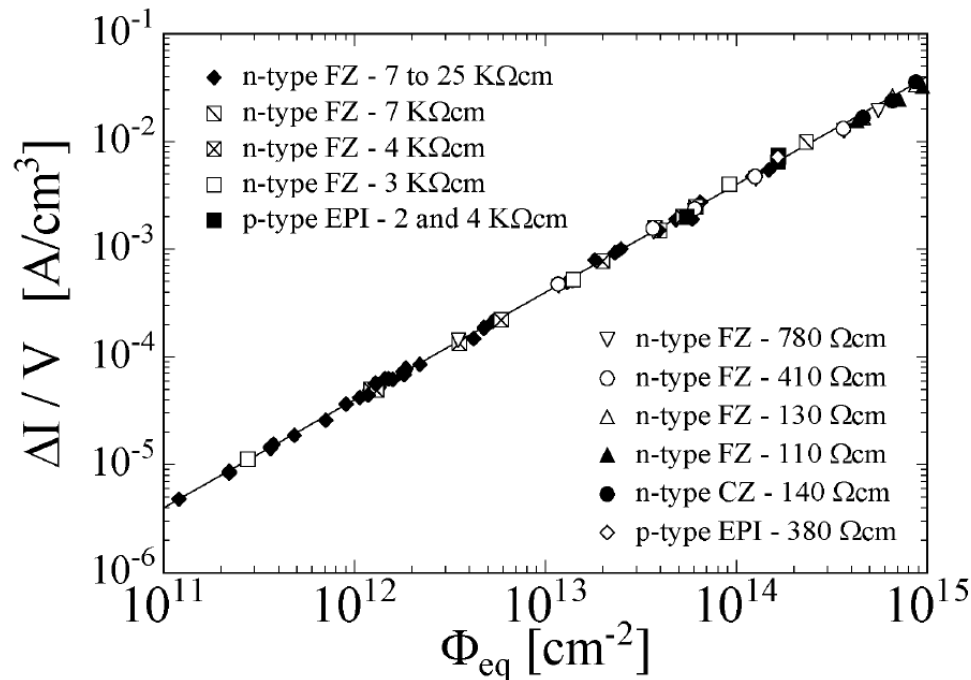
放射線損傷後の全空乏化電圧

- 暗電流の照射量依存性:

$$\Delta I / v = \alpha \Phi_{eq}$$

ΔI : 電流増加量 [A], v : Volume [cm^3],

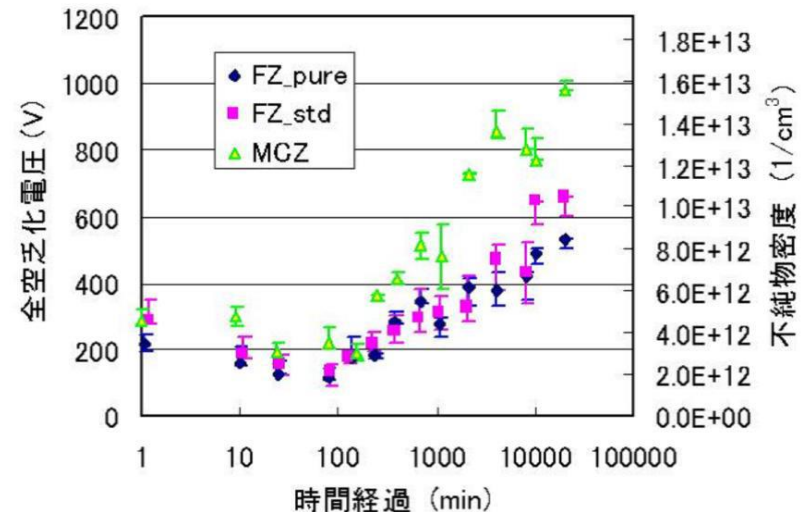
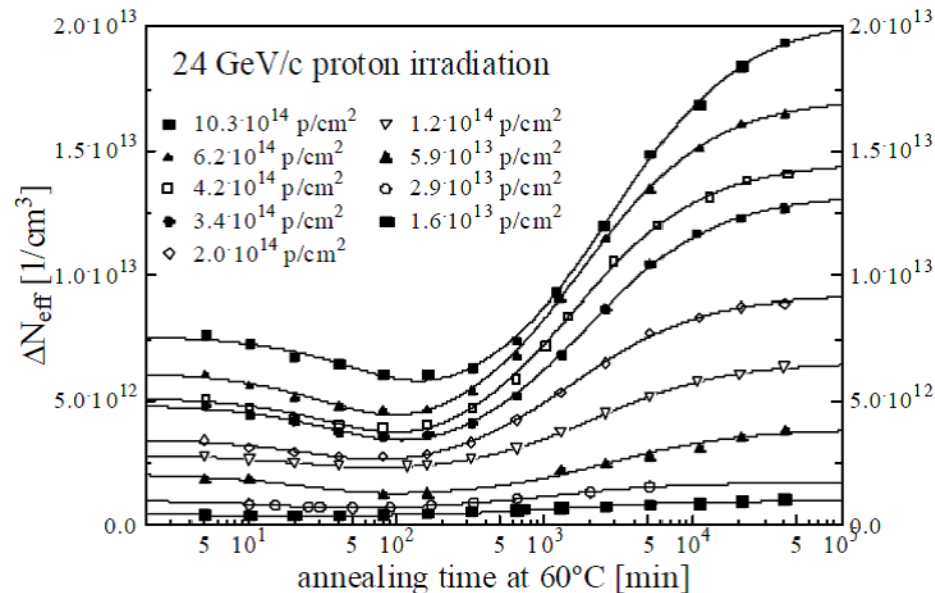
Φ_{eq} 照射量 [neq/cm^2] α : ダメージファクター [A/cm^3].



M.Moll's thesis

アニーリングと逆アニーリング

- 放射線損傷による格子欠陥は、原子の熱振動により時間と共に移動する。その際格子欠陥は消滅する場合もあるが、格子欠陥同士が結合しさらに大きな欠陥へ成長する場合もある。
 - 熱振動によりある時点まで有効不純物濃度が減少する現象をアニーリングと呼ぶ。
 - その後有効不純物濃度が増加する逆アニーリングに移行する。
 - 移行の目安は60°Cで80分(室温で2週間)



アニーリングと逆アニーリング

- 暗電流の照射量依存性:

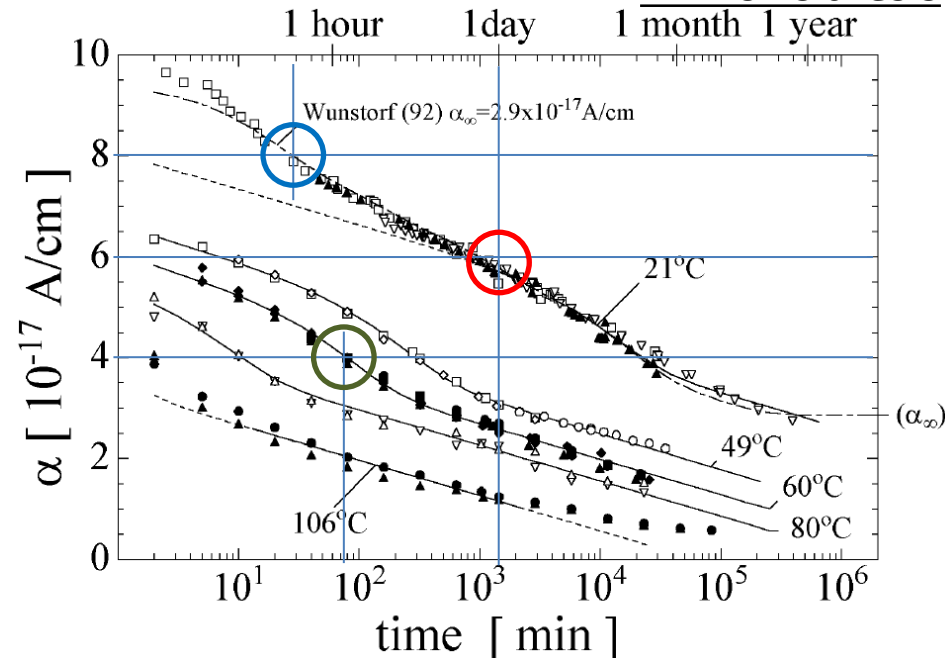
$$\Delta I / v = \alpha \Phi_{eq}$$

- アニーリングによってダメージファクター α が変化する
 - 30 min annealing by room temperature : $\alpha=8 \times 10^{-17} [\text{A/cm}]$
 - 1 day annealing by room temperature : $\alpha=6 \times 10^{-17} [\text{A/cm}]$
 - 80min annealing by 60°C : $\alpha=4 \times 10^{-17} [\text{A/cm}]$

M.Moll's thesis

長くアニーリングすると
暗電流はどんどん下がっていく

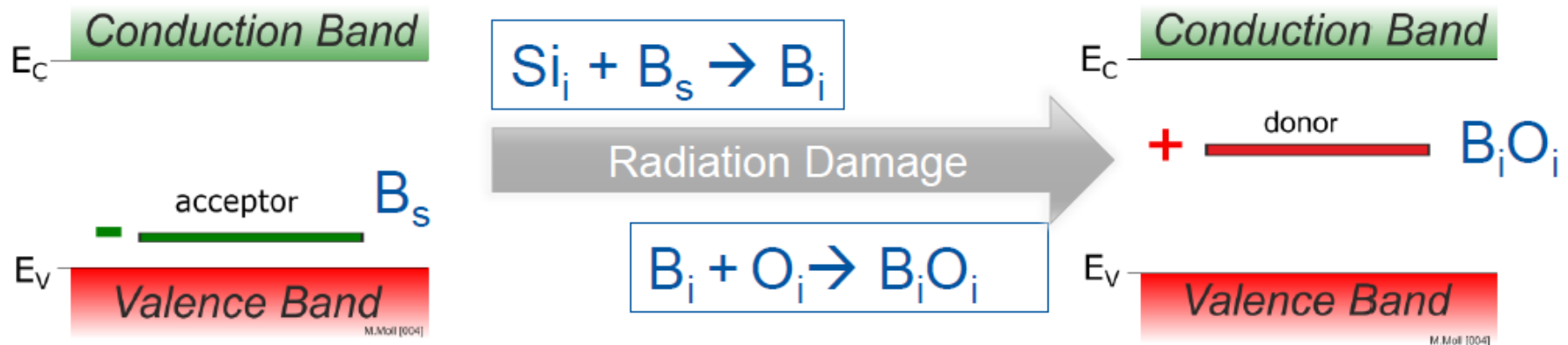
TCADでこの効果は、シミュレーション不可
ダメージファクターの調節しかないが、
現実には大分パフォーマンスが違うか？



ドーピング準位の損失- Acceptor Removal

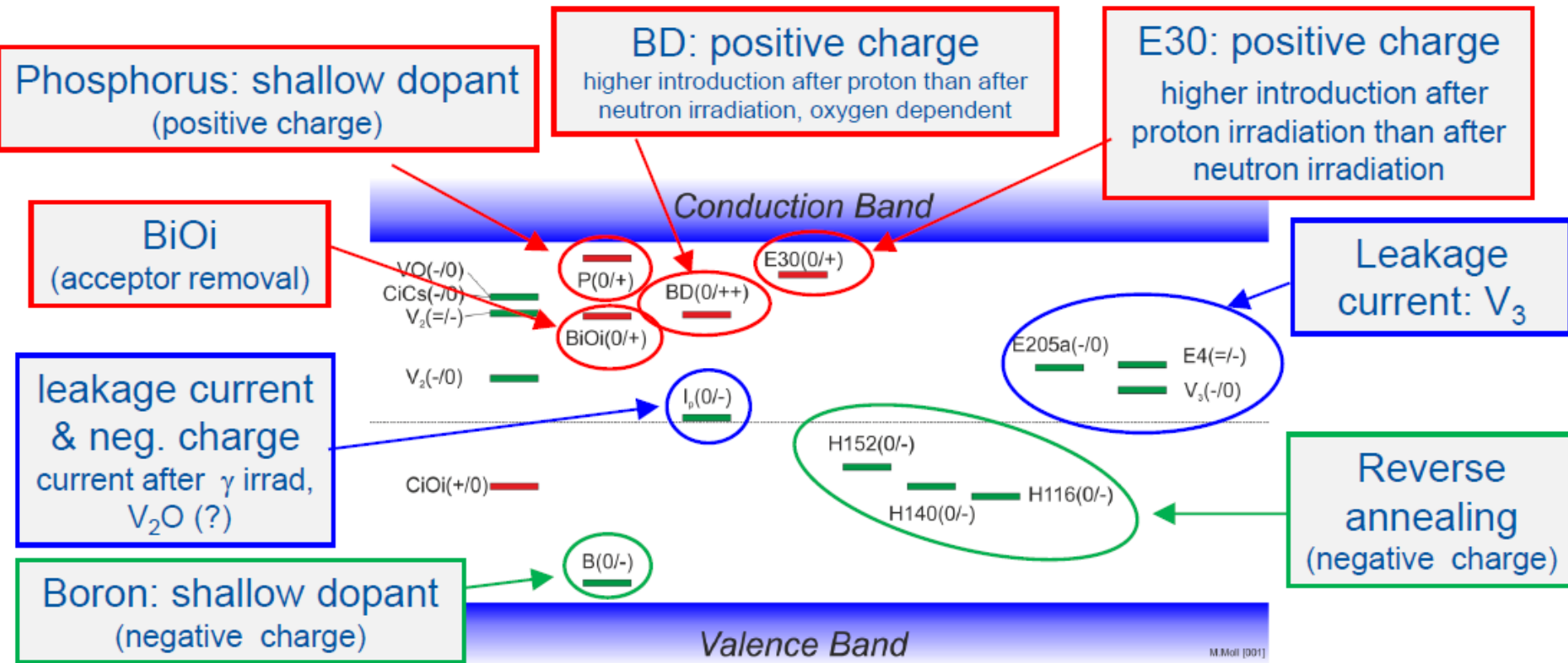
- ホウ素ドーピングで作ったp型層は、Valence Bandに近い準位を持つが、放射線損傷により酸素原子と結びついてConduction Band近くに準位を変える

- Most typical radiation induced reaction:



ドーパ準位の損失- Acceptor Removal

- 実際は遥かに複雑で、数10ものエネルギー準位ができる。→シミュレーションでこれを再現したいが、すべてのトラップ準位を入れるのは困難。



シミュレーションでは

- 原子核欠損はp型不純物として働くなら...
 - バルク部のドーピング量を増やすだけでよいか
 - 未照射で $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 程度のドーピング量
 - $3 \times 10^{15} \text{ neq}/\text{cm}^2$ の照射量で $4 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 程度のp型不純物で暗電流の量は大体再現する...
 - ただ、これだとエネルギー準位が合わないのでは正しくない(?)
- TCADではTraps {} というコマンドでトラップエネルギー準位を作ることができる
 - 複数異なる順位を作ることにも可能
 - Trappingの反応断面積も指定可能

Trapping Dynamics

- 原子核捕獲と再結合のレートで決まる反応断面積が重要なパラメータ

- Effective Trap time (τ_{trap})は、

– $\tau_{trap} = \frac{1}{N_t v_{th} \sigma}$ と書ける

放射線損傷が増えると
格子欠陥量(N_t)が大きくなる。

- N_t : trap level concentration [cm^{-3}]
- v_{th} : thermal velocity [cm/s]
- σ : trap cross section [cm^2]

– 例えば $N_t = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ $v_{th} = 2 \times 10^7 \text{cm/s}$ $\sigma = 10^{14} \text{cm}^2$ だと
life time は $5 \times 10^{-11} \text{s}$

欠陥への再結合

- 再結合のモデルはShockley Read Hole(SRH) approximationを用いて、

$$R_{\text{net}} = \frac{N_0 v_{\text{th}}^n v_{\text{th}}^p \sigma_n \sigma_p (np - n_{i,\text{eff}}^2)}{v_{\text{th}}^n \sigma_n (n + n_1/g_n) + v_{\text{th}}^p \sigma_p (p + p_1/g_p)}$$

In case of $\sigma_n = \sigma_p$, $v_{\text{th}}^n = v_{\text{th}}^p$, and $g_n = g_p = 1$

$$R_{E_t} = \frac{N_0 v_{\text{th}} \sigma (np - n_{i,\text{eff}}^2)}{n + n_1 + p + p_1}$$

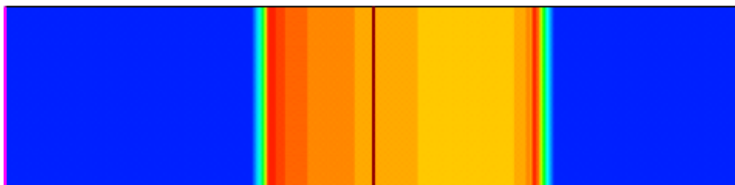
放射線損傷が増えると
 σ が大きくなる。

- つまり、再結合のレートはトラッピング反応断面積に比例。放射線ダメージを受けると再結合レートがあがる。

再結合と暗電流

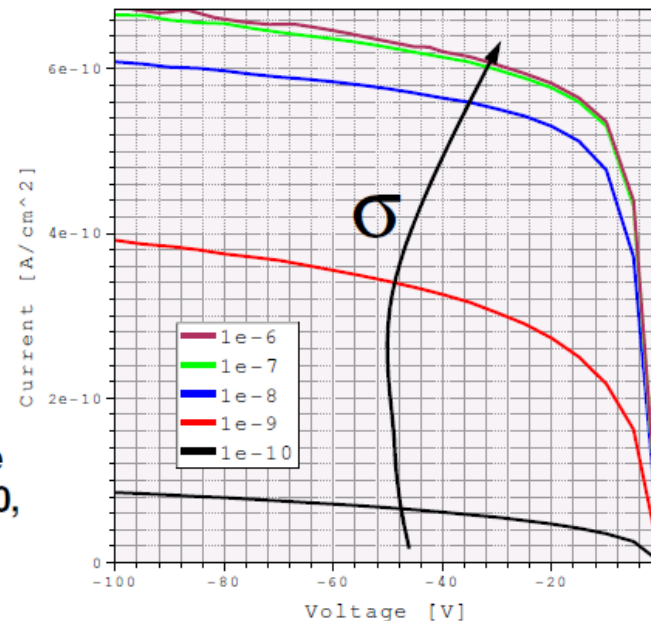
- 逆バイアスをかけたp-n 接合を考える。
 - 空乏層内では、再結合レート R_{ET} はキャリアの生成しやすさと同じような振る舞いを示す。
 - つまり暗電流は反応断面積に応じて大きくなる

Gap state recombination rate at -100Volts bias calculated for $\sigma=1e-9$ 1/cm²



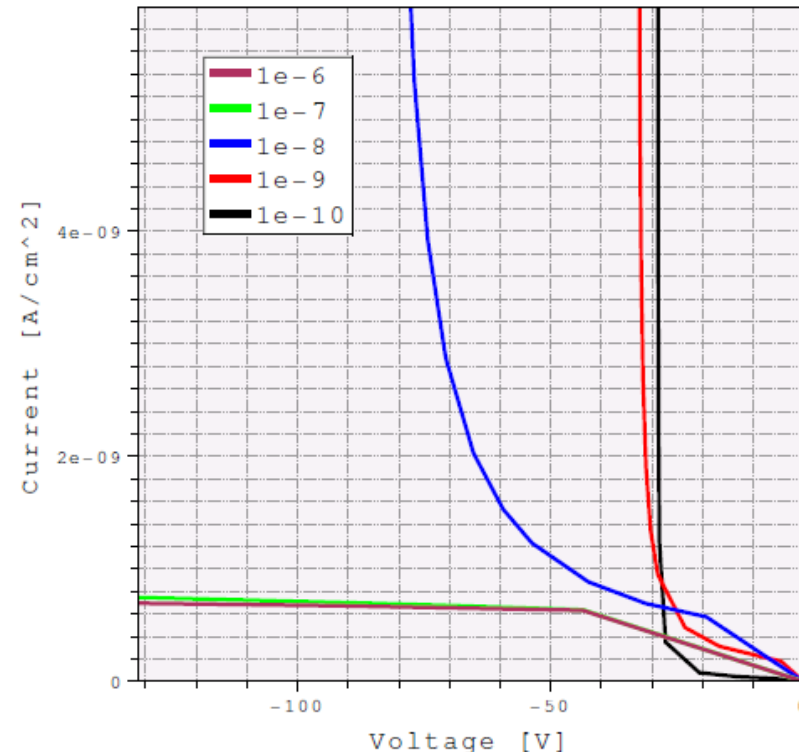
GapStatesRecombination: -3.9E+22 -5.9E+20 -8.1E+18 -1.4E+17 -2.1E+15 -3.3E+13 6.0E+04

Reverse biased diode I-V curves for the different e/h trap cross-section – 1e-10, 1e-9, 1e-8, 1e-7, and 1e-6 1/cm².
Avalanche is DISABLED



再結合と暗電流

- 実際はImpact Ionizationという効果でアバランシェ増幅が起きる(break down)
- このアバランシェの効果は反応断面積が小さい(再結合レート R_{ET} が小さい)ほど起こりやすい。→ break downは放射線損傷とともに起こりにくくなっていく。



Trap Type

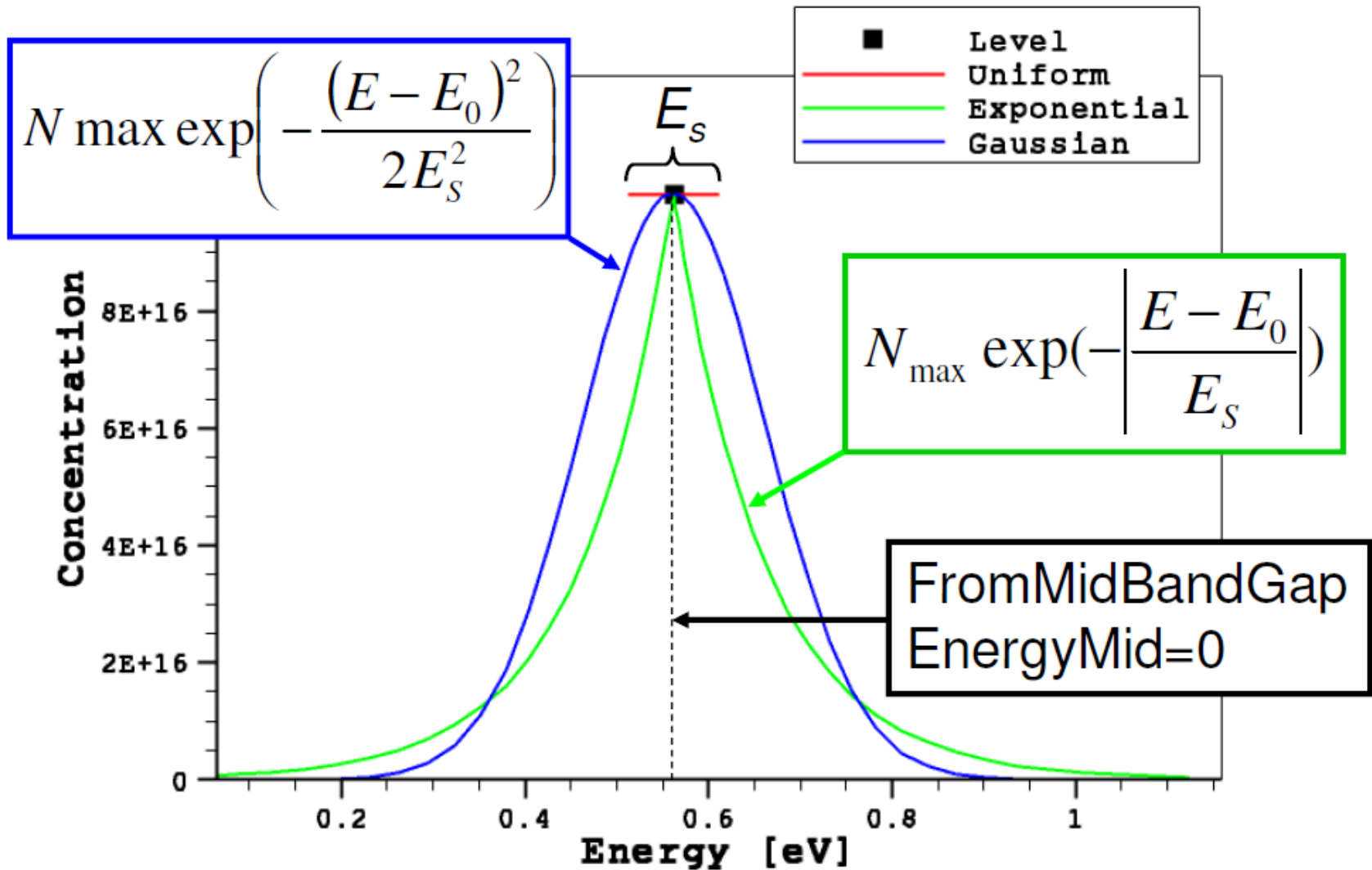
- Sentaurusでは3つのトラップタイプがある
 - FixedCharge
 - 固定電荷
 - Acceptor (or eNeutral)
 - 負電荷(electron)の捕獲
 - Donor (or hNeutral)
 - 正電荷(hole)の捕獲

Trap Energy Distribution

- Sentaurusでは、Trap energy distributionは5つの定義が存在
 - Level
 - ある一つのEnergy levelのみ。EnergyMid [eV]パラメータで定義。バルクの場合Trap concentrationは cm^{-3} で与えられる。
 - Uniform
 - Exponential
 - Gaussian
 - Table

トラップエネルギーを分布関数で与える。
この場合trap concentrationは $\text{eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ で定義
分布の幅はEnergySig [eV]で与える。

Trap Energy Distribution



Trap の定義

- トラップは物質、領域、インターフェースに対してグローバルに定義できる。

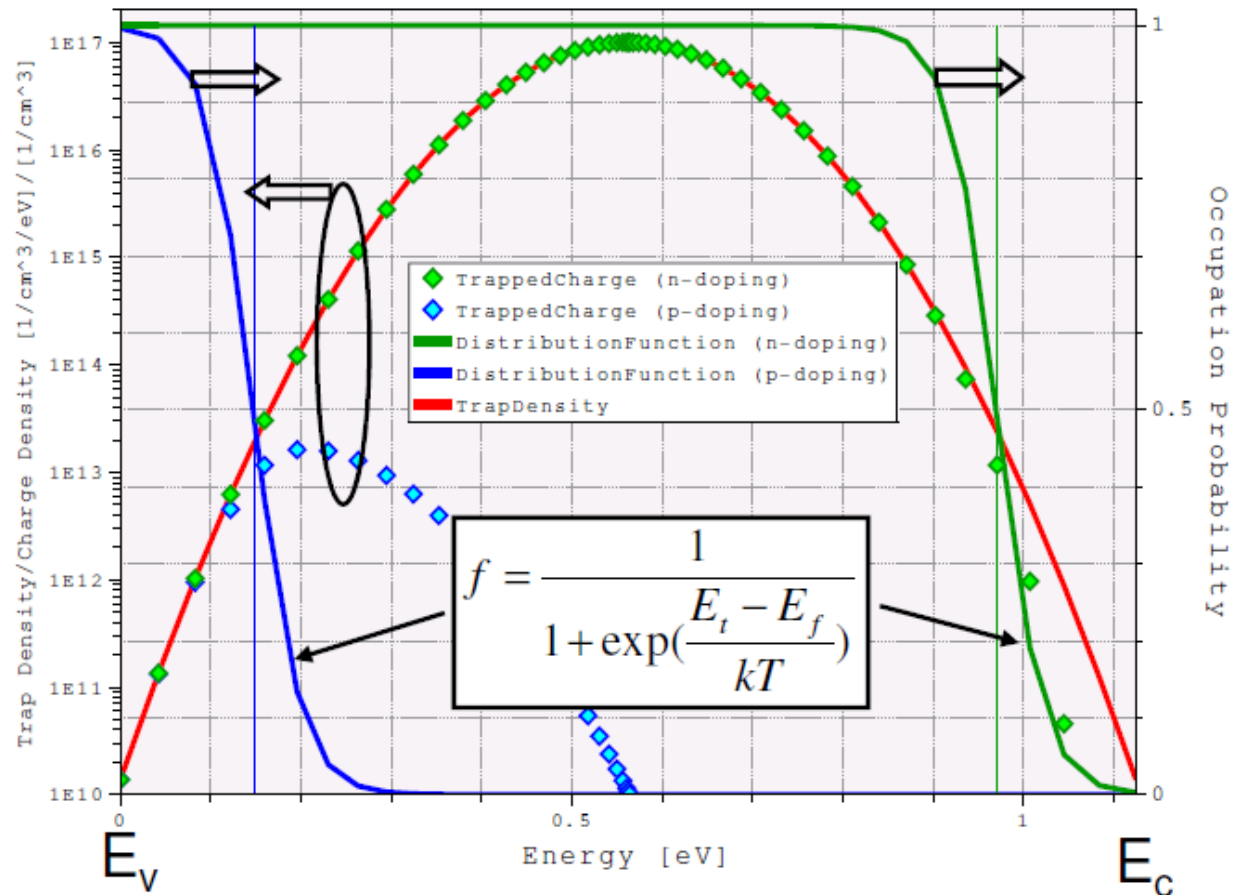
```
Physics {  
  Traps (  
    (<trap_type> Conc=<value>  
    [<trap_energetic_distribution>  
    <trap_cross_section_definitions>  
    <trap_tunneling_parameters>]  
    )  
    ( ... )  
  )  
}
```

Trap Occupation

- 通常は価電子帯、伝導体を基準に定義

Trap type:

eNeutral,
Conc=1e17 1/eV/cm³,
Gaussian, at MidGap,
ESigma=0.1,
eXsection=1e-8 cm²



Trap定義の例

- Bulk traps:

$1/(\text{cm}^3 \cdot \text{eV})$

```
Physics (Material="Silicon") {  
  Traps (Acceptor Gaussian Conc=1e18 EnergyMid=1. EnergySigma=0 FromMidBandGap  
        eXSection=1e-15 hXSection=1e-15  
  )  
}
```

- Interface traps:

$1/(\text{cm}^2 \cdot \text{eV})$

```
Physics (Material="SiC/Oxide") {  
  Traps (Donor Gaussian Conc=1e12 EnergyMid=0.1 EnergySigma=0 FromCondBand  
        eXSection=1e-12 hXSection=1e-12  
  )  
}
```

- Fixed charge bulk traps: $1/\text{cm}^3$

```
Physics (Material="GaN") {  
  Traps (FixedCharge Conc=+1e18 )  
}
```

NOTE: For fixed charge traps
sign of Conc value matters.

- Fixed charge interface traps: $1/\text{cm}^2$

```
Physics (Material="AlGaN/Nitride") {  
  Traps (FixedCharge Conc=-1e12 )  
}
```

今回の演習では

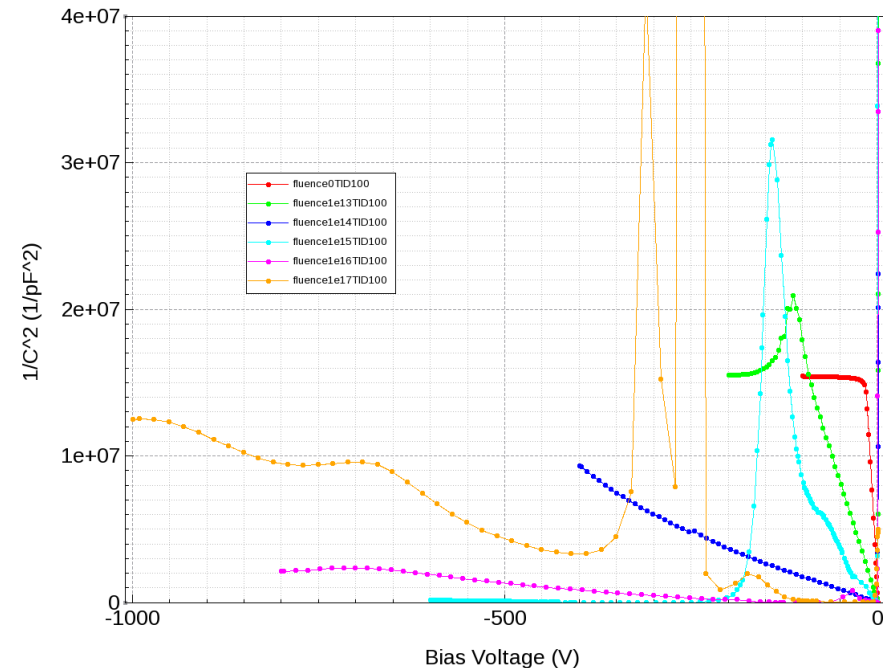
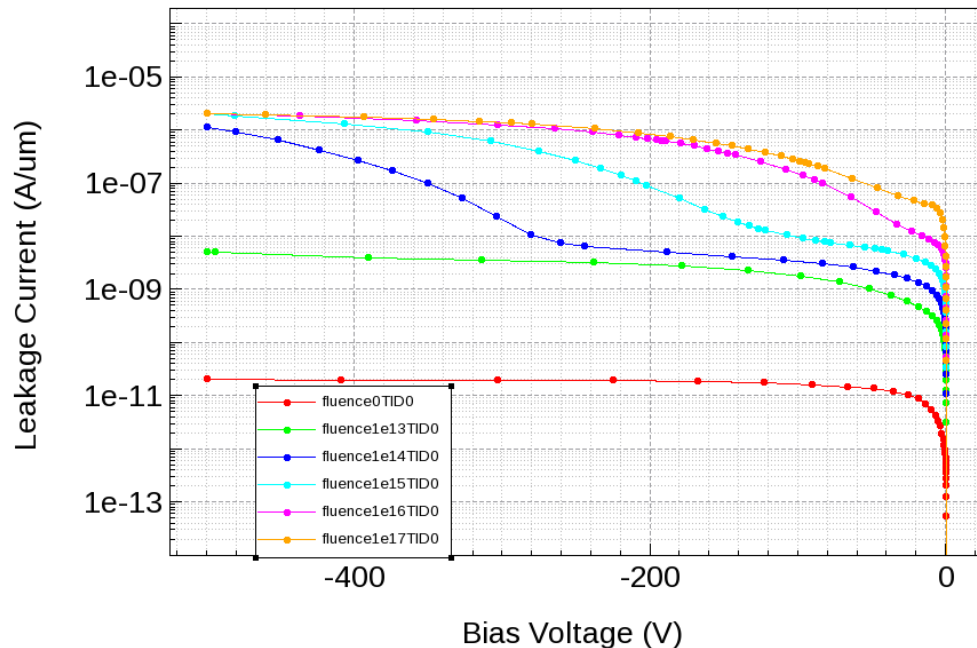
```
## defect density = fluence x eta
## state 1: acceptor, E = Ec-0.42 eV, sigma_e = 2e-15 cm2, sigma_h=2e-14 cm2, eta = 1.613 cm-1
## state 2: acceptor, E = Ec-0.46 eV, sigma_e = 5e-15 cm2, sigma_h=5e-14 cm2, eta = 100 cm-1
## state 3: donor, E = Ev+0.36 eV, sigma_e = 2.5e-14 cm2, sigma_h=2.5e-15 cm2, eta = 0.9 cm-1
Traps(
    (
        name="state1" acceptor conc=@<fluence*1.613>@
        Level FromConductionBand EnergyMid=0.42
        eXsection=2E-15 hXsection=2E-14
        ##eJfactor=1.0 hJfactor=1.0
    )
    (
        name="state2" acceptor conc=@<fluence*100.0>@
        Level FromConductionBand EnergyMid=0.46
        eXsection=5E-15 hXsection=5E-14
        ##eJfactor=1.0 hJfactor=1.0
    )
    (
        name="state3" donor conc=@<fluence*0.9>@
        Level FromValenceBand EnergyMid=0.36
        eXsection=2.5E-14 hXsection=2.5E-15
        ##eJfactor=1.0 hJfactor=1.0
    )
)
```

Sentaurusの人のExampleより

3つのstateを定義
内2つはenergyの違う
Acceptor Trapping
支配的なのはstate2

放射線損傷後のIV/CV特性

- NIELを $1e13, 1e14, 1e15, 1e16, 1e17 \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ と変化させて電流電圧特性、静電容量の電圧特性をシミュレーション
 - 基本的にNIELのダメージが増えると暗電流が増えている。
 - CV測定は最初の二点($1e13, 1e14$)くらいしかまともに測定できない。暗電流が大きいかからか？ → 低い温度環境では？(次週)

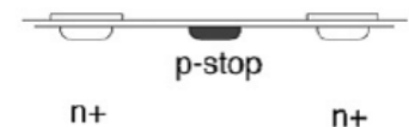
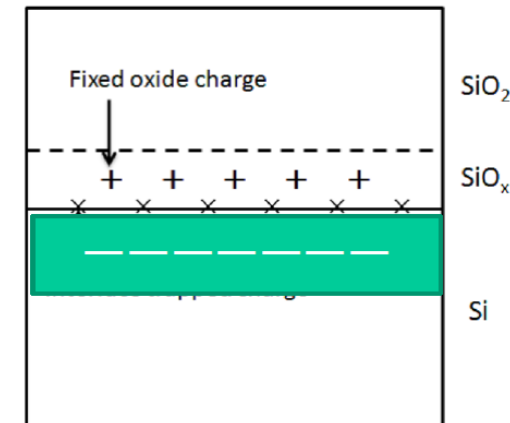
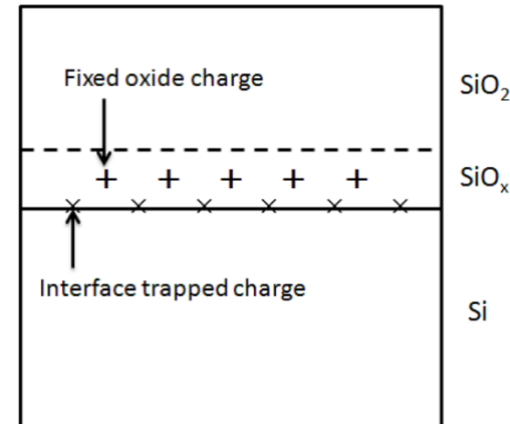


シリコン検出器の表面損傷(TID)

- 表面損傷はIonizing lossによって引き起こされる。
 - 主に300keV以下のエネルギーの光子や荷電粒子。
 - SiO₂層とシリコンバルク内で原子をイオン化励起し、エネルギーを落とす。
 - 表面電荷
 - Fixed oxide chargeはホールが捕獲されるもので、正の電荷をもつ。Si-SiO₂界面から数nmの不規則な範囲に存在。
 - Interface trapped chargeは、SiとOの結合のふらつきによるもので、禁制帯に新たなエネルギー準位を形成するため、正負どちらの状態も取り得る。空間電荷として働き移動しない。

影響

- 表面損傷による表面電荷は、暗電流の増加、表面電流の上昇によるブレークダウン電圧の変化、表面上に空乏化しないDead layerの形成などが起こる。
- P-bulkでは、電極分離構造(p-stopなど)が必要。



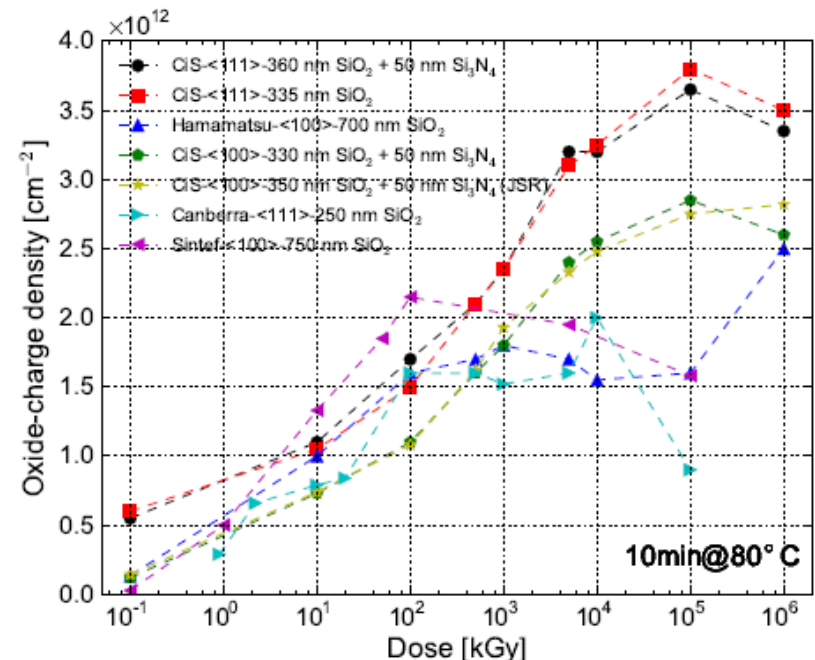
シリコン検出器の表面損傷(TID)

- どのくらいの電荷がたまるか？
 - 酸化膜電荷密度(Q_F)は、半導体の結晶面やドーピングプロセス、照射レート、アニーリングステップ、湿度などに依存するためかなり複雑。
 - データをもとに決めるのが良い？

$$Q_F = 0.8e12 + 0.3e12 * \log_{10} D$$

Q_F : cm^{-2}
 D : dose in [10kGy=MRad]

$$1Gy=100Rad$$



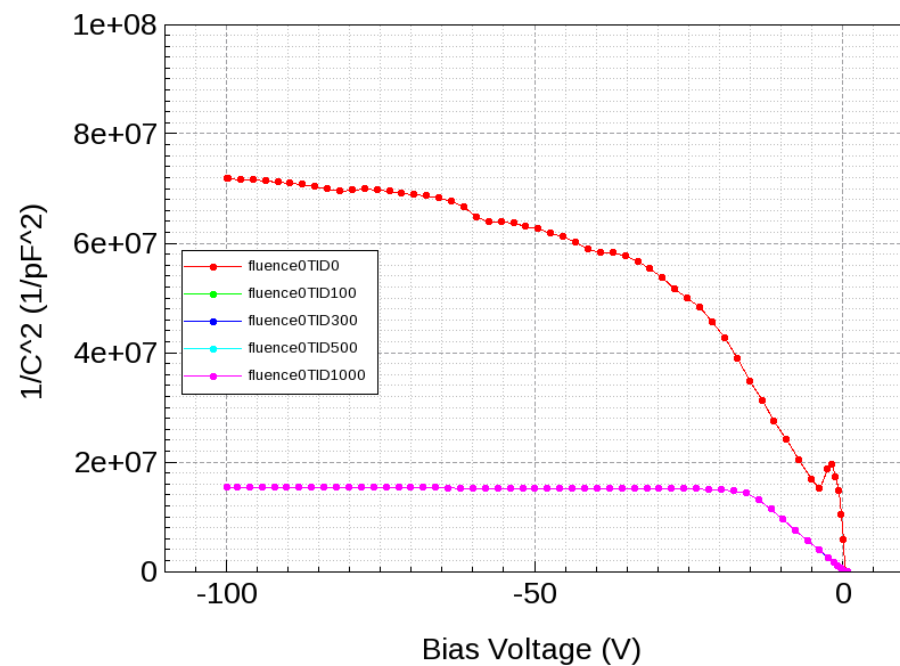
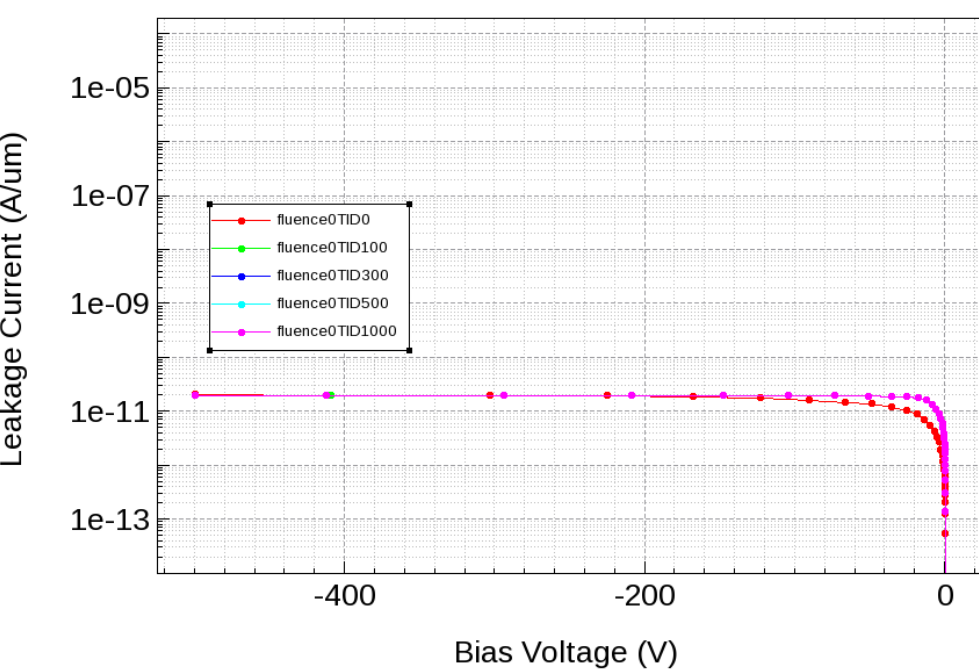
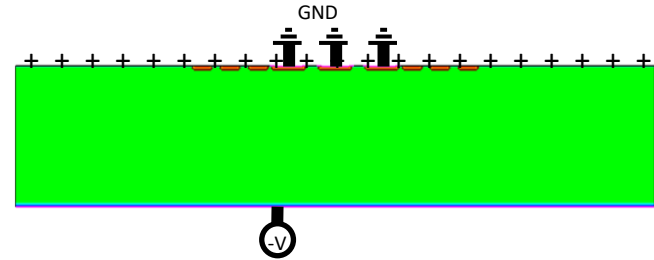
シミュレーションでは

- 酸化膜とシリコンの間の界面に固定電荷を置く。
 - Physicsセクションに次のコマンドを加えるだけ。

```
Physics (MaterialInterface= "Silicon/Oxide" ) {  
    Traps (FixedCharge Conc=1e12)  
}
```
 - Trapsは固定電荷やエネルギー順位を作る。
 - Concは電荷の単位面積当たりの電荷数(cm^{-2})

TID後のIV/CVカーブ

- TID 0 – 1000Mradまで変化させてIV/CVカーブをプロットしてもほとんど変わらない。(100-1000は重なっている)
 - TID=0でいびつだったCVカーブは電荷を置いたおかげできれいな分布になった(?)
 - 全空乏化電圧も変化せず



それでは演習を始めてください

- <http://atlaspc5.kek.jp/do/view/Main/Tutorial6thTCADDay4>