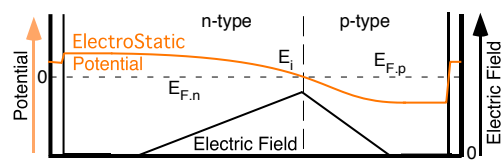
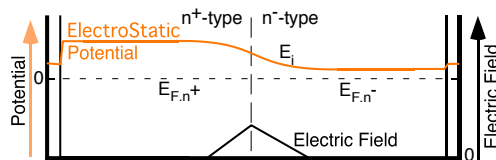
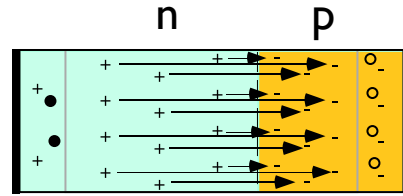
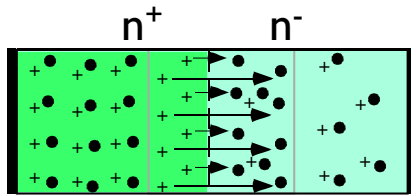


半導体内部の電位と電界強度

$$\exp\left(\frac{-\Delta E_{ab}}{kT}\right) = \frac{N_a}{N_b} : \text{ボルツマン分布}$$



キャリアの移動がバランス: 平衡状態
両端電極の電位は同じ: 電極材質で決まる

18年9月11日火曜日

(参考資料 2016 #3-p.1: 高田)

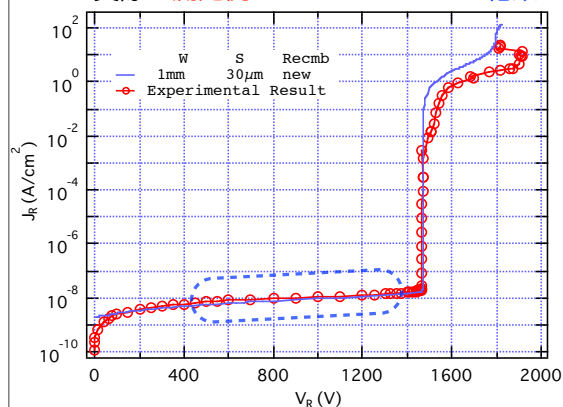
正孔も自由電子も(種類が異なる)理想気体として考える。

どちらの密度も、それぞれがボルツマン分布。密度が異なる領域は、電位も異なる。p-nはn-n+よりも電位差が大きいのみ。n+-n-境界も接合である。(内部電位図を修正した 2015-01-12, 2015-11-03再修正, 2018-09-11 再々修正: $E_{FM} = E_{FS}$ とする)

1

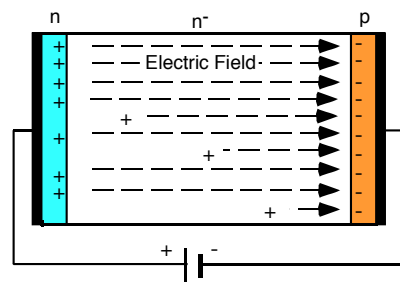
§4.1 電圧保持機能-I (オフ状態)

実際の測定例とシミュレーション結果

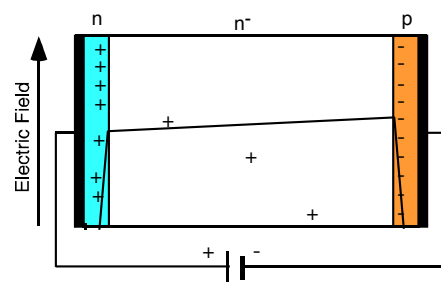


pinダイオードの高耐圧保持状態は
ほぼコンデンサー

高電界 存在領域=
電荷担体の空乏領域



pinダイオードの電気力線



pinダイオードの電界強度分布

16年6月22日水曜日

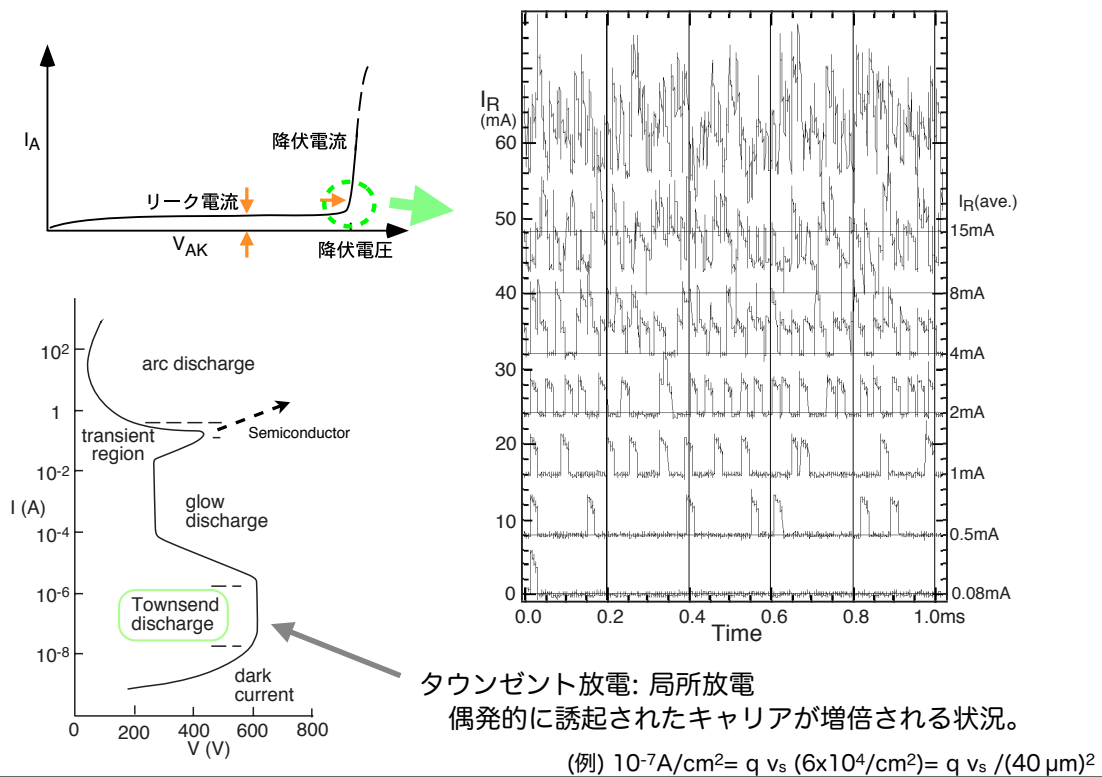
(参考資料 2016 #3-p.2: 高田)

pin構造は、低オン電圧を前提にした高耐圧構造

点線で囲った箇所が、一番単純 (n-全体に電界が存在=電荷単体の空乏)

2

Si pinダイオード降伏開始時のパルス電流



16年6月22日水曜日

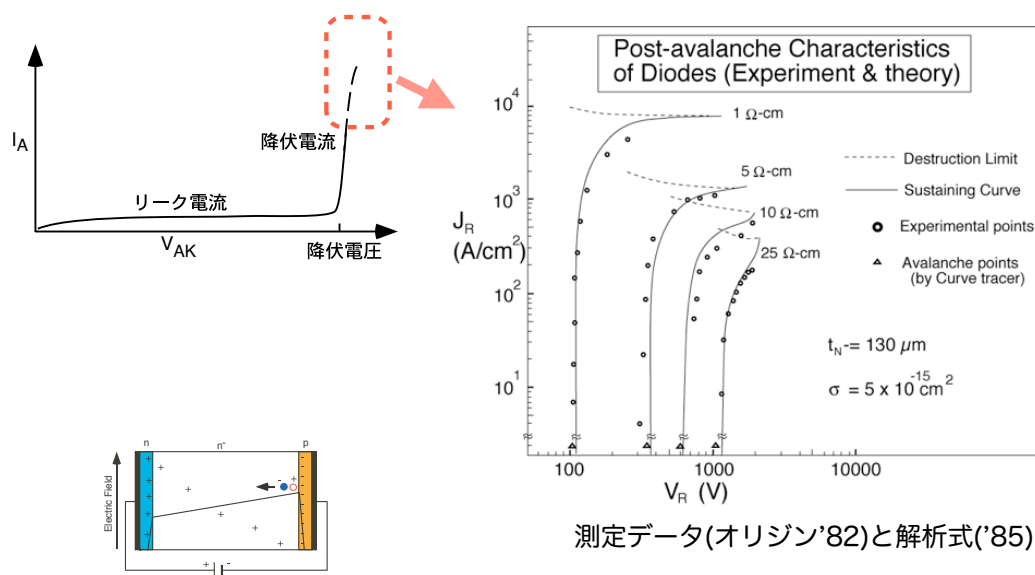
(参考資料 2016 #3-p.3: 高田)

$J_R \approx 10 \text{nA/cm}^2$ という低電流密度では、電荷担体は離散的に存在する。

パルスは、自然放射線の入射毎に発生する？

3

降伏後の電流-電圧特性



測定データ(オリジン'82)と解析式('85)

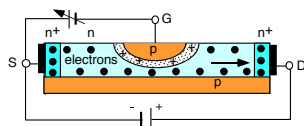
16年6月22日水曜日

(参考資料 2016 #3-p.4: 高田)

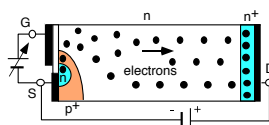
パルス電圧を順に高くして行き、破壊に到るまで測定した。

4

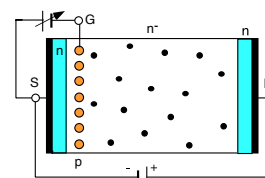
§4.4 電流制御機能 (I-ユニポーラ デバイス)



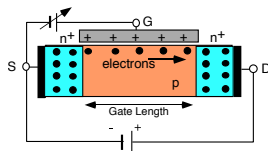
接合形FET



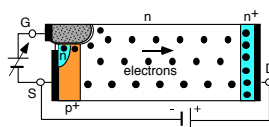
縦形プレーナMOSFET



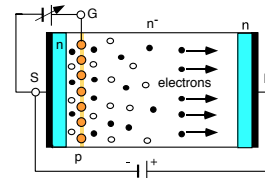
SITの基本動作



横形MOSFET



トレンチMOSFET



BSITの大電流動作

16年6月22日水曜日

5

(参考資料 2016 #3-p.5: 高田)

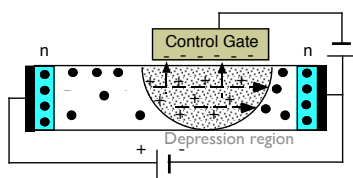
ユニポーラ(単極)デバイスでは、自由電子か正孔のみが移動する。

接合形FETとSITは、通電領域幅を制御する。

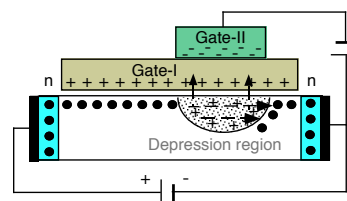
MOSFETは、ゲート電位で通電領域の電荷担体密度を制御する。

§4.4 電流制御機能 (I-ユニポーラ デバイス)

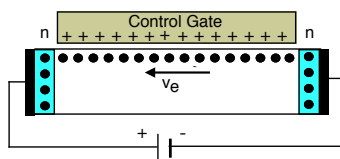
n^+-n-n^+ デバイスのOFF/ ON動作



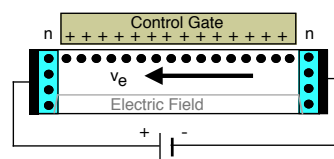
OFF



OFF (HFET)



ON (小電流)



ON (大電流)

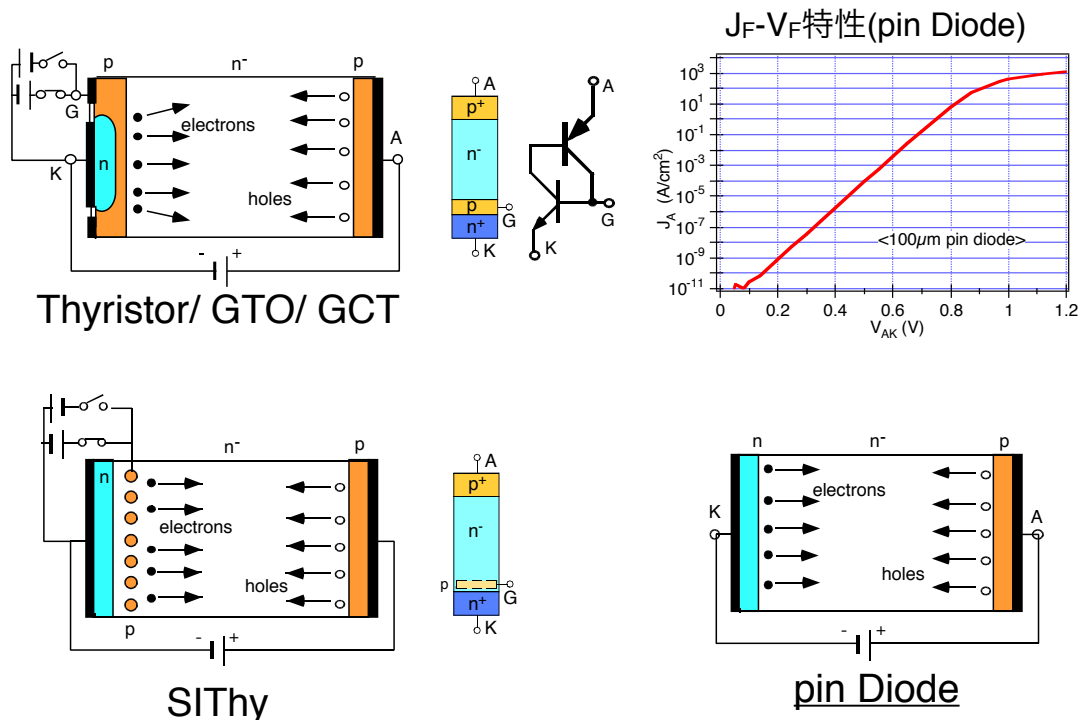
16年6月22日水曜日

6

(参考資料 2016 #3-p.6: 高田)

ユニポーラ デバイスでは、電荷担体が単一であるので、電界が分担されて高電界領域が現れない。

§4.4 電流制御機能 (II- pinダイオード ファミリー)



16年6月22日水曜日

(参考資料 2016 #3-p.7: 高田)

バイポーラ(双極)デバイスでは、自由電子と正孔が同量増える。

pinダイオードとして動作する。

7

<解説>

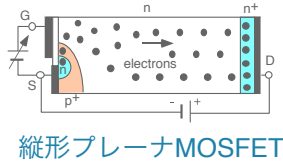
1. p形やn形の不純物の濃度が隣接する領域では、電荷担体の密度差に依る移動と拮抗するように電位差が生じる。熱平衡状態においては、電荷担体の密度比 N_A/N_B とその電荷担体が感じる領域間のエネルギー差 ΔE_{AB} の間には、 $N_A/N_B = \exp(-\Delta E_{AB}/kT)$ のボルツマン分布則が成り立つ。正孔と自由電子は、別種の理想気体の如く振る舞うと見なし得る。
2. 基準とする領域Bに対して領域Aに $-V_{AB}$ の電位差を加えれば、領域Aの正孔密度 n_A は領域Bの正孔密度 n_B の $\exp(qV_{AB}/kT)$ 倍になる。このように、半導体中の電荷担体密度は、電位差を設けることで大きく変え得る。(以上 p.1)
3. パワーデバイスの最も重要な特性は、高電圧を安定して保持する能力である。pinダイオードでは、それは基本的に通常のキャパシタの電圧保持機構と同じである。(p.2)
4. pinダイオードの逆方向I-V特性は、ガス放電管の特性に類似している。それは、両者の基本現象が同じ為である。
5. pinダイオードの逆方向電流の立ち上がりは、一定の高さで一定の短いパルスが増えることで起きる。これは、ガス放電管に離散的に入射する荷電粒子が引き起こす散発的なタウンゼント放電に類似している。(p.3)
6. どちらのデバイスの場合も、より高電圧、大電流ではデバイス全面に電流が流れる状況になる。ガス放電管ではグロー放電と呼ばれる状況で、ほぼ一定電圧動作となる(かつては低電圧源として使われた)。pinダイオードの降伏電圧がほぼ一定となる状況に当たる。(p.3)
7. 一層電流が増えると、ガス放電管では電極金属が溶けて+イオンとなるアーク放電が起こる。pinダイオードは、正孔と自由電子のプラズマ状態が容易に出現するので、少なくともi領域の不純物濃度 N_D で定まる電流密度($J_0 = q N_D v_s$)までは安定な動作をする。 $(v_s = 100\text{km/s: 飽和速度})$ (p.4)
8. 単一電荷担体(ユニポーラ)デバイスは、基本的に抵抗として動作する。接合形FET (Field Effect Transistor)は通電領域幅を制御して、MOSFETはゲート電位で通電領域の電荷担体密度を制御する。(p.5)
9. ユニポーラデバイスで、(ゲート電圧一定で)ドレイン電圧が増えると、通電領域の電界強度が大きくなって移動速度が増すことで大電流を流す(電荷担体密度は変わらない)。(p.6)
10. 双電荷担体(バイポーラ)デバイスの電流は、正孔と自由電子からなるプラズマ中を流れる。基本素子であるpinダイオードは、上述(2.)項の動きの為に、低電流では $I \propto \exp(qV/kT)$ の特性を示す。ただし、大電流ではi領域中の電圧降下が大きくなる為に抵抗特性($I \propto V$)となる(どのデバイスにも現れる一般的な傾向である)。(p.7)
11. IGBTのオン動作は、不完全なpinダイオードと見なし得る(次回説明する)。

16年6月22日水曜日

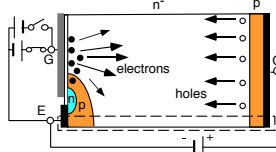
(参考資料 2016 #3-p.8: 高田)

8

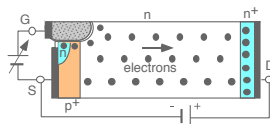
§4.4 電流制御機能 (III- IGBT)



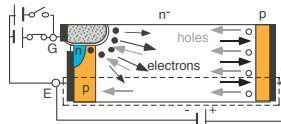
縦形プレーナMOSFET



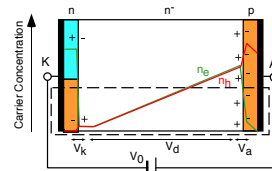
プレーナIGBTの動作



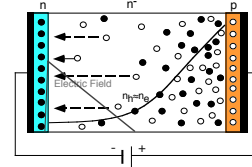
トレンチMOSFET



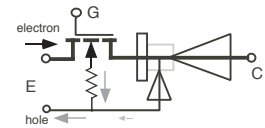
トレンチIGBTの動作



IGBT低電圧オン時の電荷分布



IGBT高電圧オン時の電荷分布



IGBTオン時の等価回路

16年6月22日水曜日

(参考資料 2016 #3-p.9: 高田)

IGBTは、不完全pinダイオードをMOSFETで制御する。

IGBTの大電流高電圧動作では、電荷担体の高密度部と低密度、高電界領域が分離する。

9

半導体中の基本現象

● 電荷担体(正孔, 自由電子)の対発生/再結合

- ▶ なだれ増倍 (降伏動作時)
- ▶ リーク電流の発生 (OFF時)
- ▶ 電荷担体分布の変化 (ON時)

ライフタイム(τ):
反応の時定数

● 電荷担体の移動

- ▶ 拡散運動
- ▶ ドリフト運動 (v_d : 電界方向への移動)
 - ・ オームの法則 (低電界領域) 移動度(μ): $v_d = \mu \cdot EF$
 - ・ 飽和速度 (v_s) (電界強度 $\geq 10^4 \text{V/cm}$)

16年6月22日水曜日

(参考資料 2016 #3-p.10: 高田)

前回の”電荷担体の移動”と共に、”電荷担体の発生/消滅と移動”が、最も基本的な現象である。

10