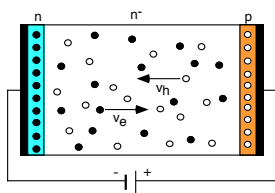
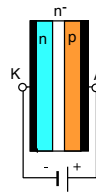


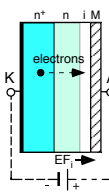
ダイオードの基本構造



pinダイオード



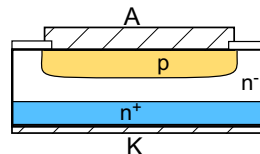
pnダイオード



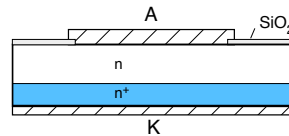
SBD



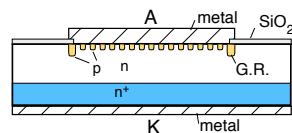
Diffused Junction diode



pin diode



Schottky Barrier Diode (SBD)



Merged Pin Schottky diode (MPS diode)

ダイオードの基本特性

$$J_F \propto \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right)$$

16年11月25日 金曜日

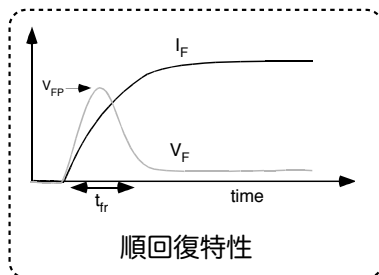
1

(配付資料 2016 #5-p.1: 高田)

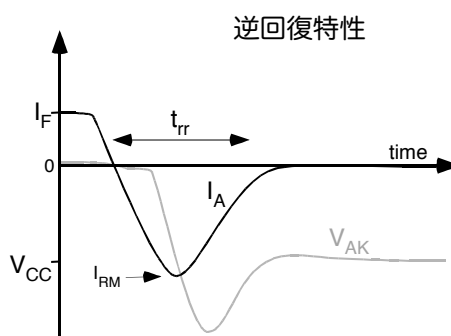
中間レポート課題: “パワーデバイスにおけるpinダイオードの意義とオン動作の原理”

締め切り: 7/10 ? 23:50, 提出先: takatako@skyblue.ocn.ne.jp, 書式: pdf-file.

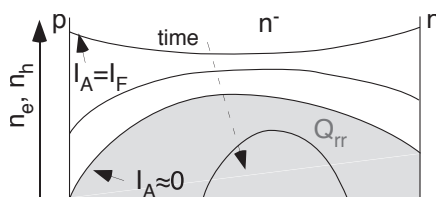
pin Diodeの順/逆リカバリ動作



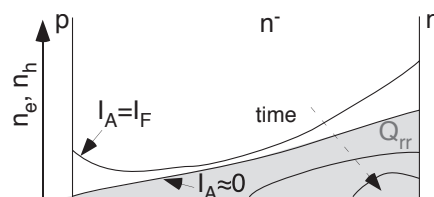
順回復特性



逆回復特性



pinダイオードの電荷担体分布の変化



高速pinダイオードの電荷担体分布の変化

16年11月25日 金曜日

2

(配付資料 2016 #5-p.2: 高田)

高速pinダイオードは、オン時にn-領域に蓄積される電荷担体量を減らしている。

p, n領域を浅く、低不純物濃度にしたたり、ライフタイムを短くする方法がある。

高速pin Diode -II

● 還流動作後の短絡損失を減らす

● オン時の電荷担体総量を減らす

● p, n領域を浅く、薄くする

● ライフタイムを小さくする

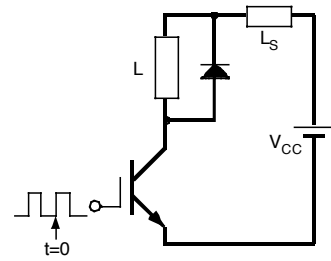
● 金, 白金等の導入

● 電子線照射

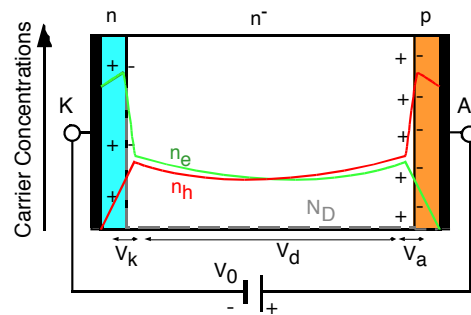
● オン電圧は必ず高くなる

● 短絡損失とのtrade-off

● SBDは有望 (高耐压化が必要) (Schottky Barrier Diode)



スイッチング動作の測定回路
(チョッパ回路)



鍋底形のキャリア分布

16年11月25日 金曜日

3

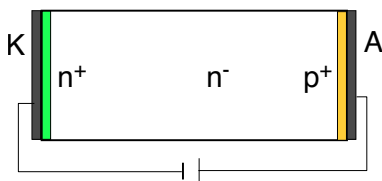
(配付資料 2016 #5-p.3: 高田)

ライフタイムを短くすると何故n-内の電荷担体密度が減るのか?

同じJAならばp,n領域端の電荷担体密度は同じ.

Vdが増える→VaとVkが低下, 接合の密度比も低下→Vdが一層増える。(電荷担体密度減少への正帰還)

pinダイオードの(小電流)動作原理



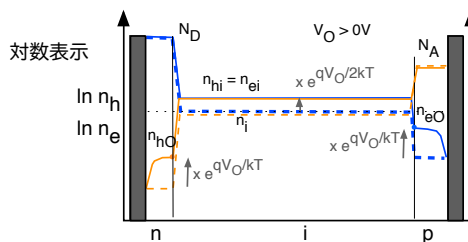
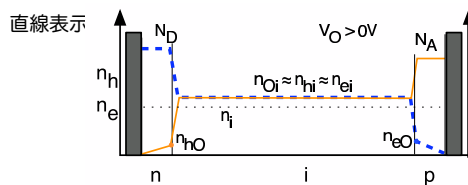
n-中の電荷担体は均一に分布

∴ 正孔, 自由電子は自由に移動する

$$J_h \approx qD_h \frac{n_{hn}}{t_n} \quad J_e \approx qD_e \frac{n_{ep}}{t_p}$$

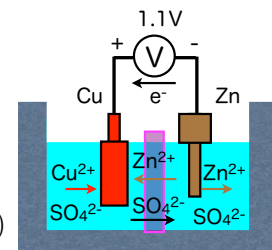
$$(n_h n_e)_A = (n_h n_e)_B$$

$$\exp\left(\frac{-\Delta E_{ab}}{kT}\right) = \frac{N_a}{N_b}$$

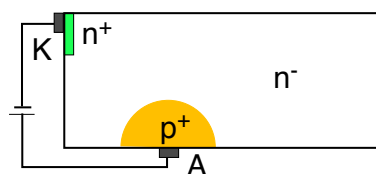


ON時 キャリア分布

$$n_h \approx n_e \approx n_i \exp\left(\frac{qV_0}{2kT}\right)$$



媒体: H2O
ダニエルの電池



16年11月25日 金曜日

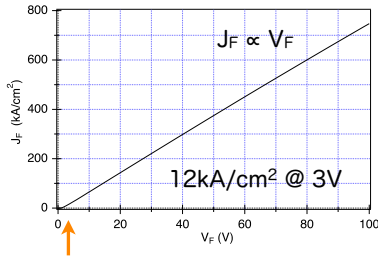
4

(配付資料 2016 #4-p.2: 高田)

pinダイオード"i"領域の電荷担体密度は、電池(メッキ)液中と同じ?

電池槽を二分割して、タオルで結んでも機能する。しつこいが、また修正。Zn²⁺イオンとSO₄²⁻イオンが動く。(2016-11-25)

pinダイオードの巨大電流動作 -B₂

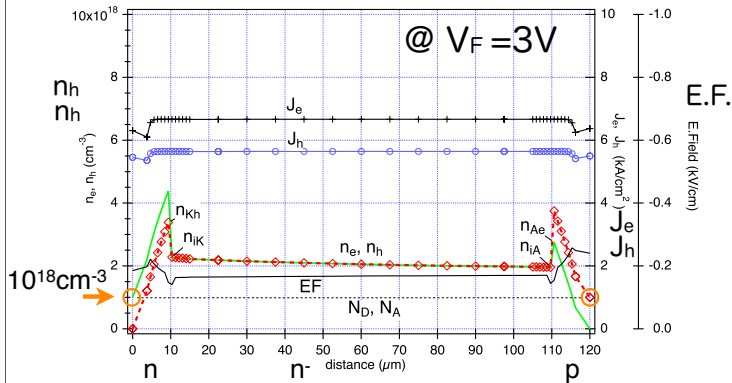


$$J_F \approx q (N_D + N_A) \mu_0 E F_0$$

$$E F_0 \approx V_F / L$$

J_e, J_h 各々○点のドリフト電流

($\mu_0 \approx 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ @ $V_F = 3 \sim 100 \text{ V}$)



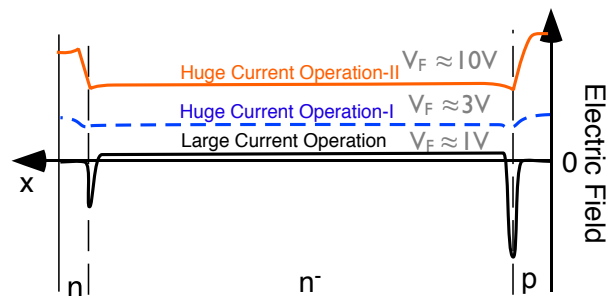
16年11月25日 金曜日

5

(配付資料 2016 #5-p.5: 高田)

巨大電流動作では、電極接触部の不純物濃度(N_D, N_A)とその点でのドリフト移動度(μ_e, μ_h)と電界強度($\approx V_0/L$)で決まる。

pinダイオードの巨大電流動作 -A

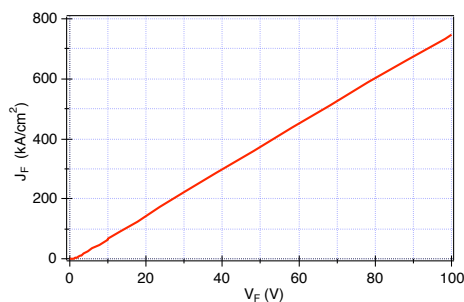


大電流動作時の電界強度分布の模式図

巨大電流動作 -B

$$J_F \approx q (N_D + N_A) \mu_0 E F_0$$

J_h, J_e 各々n,p電極近傍のドリフト電流



V_F	μ_b	$E F_a$	$J_{calc.}$	J_F
3V	200	0.3	19	12.3
10V	200	1.0	64	65.3
100V	200	10	640	748
(unit)	cm^2/Vs	kV/cm	kA/cm^2	kA/cm^2

16年11月25日 金曜日

6

(配付資料 2016 #5-p.6: 高田)

オン電圧の増大に連れて、n-n⁻接合とn⁻-p接合の電界は小さくなり、大電流動作ではダイオード全域の電界強度にほぼ等しくなる。

pinダイオード動作(まとめ)

●ボルツマン分布則

$$\exp\left(\frac{-\Delta E_{ab}}{kT}\right) = \frac{N_a}{N_b}$$

(ドリフト電流≈拡散電流) + Einsteinの関係式

$$0 \approx -qD_h \frac{dn_h}{dx} - q\mu n_h \frac{d\psi}{dx} \quad qD = kT\mu$$

●拡散電流 at アノードp, カソードn領域: 小電流動作

●ドリフト電流 at ダイオード全領域 : 大電流動作

● Band Gap Narrowing

● pin構造がDiodeの基本!

小電流動作時

● n領域中の電位は均一($V_0/2$),

● 電荷担体密度も均一

● (課題: Life Timeの取り扱い: 通常ダイオードには不要)

16年11月25日 金曜日

7

(配付資料 2016 #5-p.7: 高田)

高速pinダイオードの実現に、p, n領域の不純物濃度を下げ、領域長を短くすることが効果的である理由は、各自で考えて欲しい。

<解説>

- pnダイオードの境界部は実質的に真性(intrinsic)領域と見なせる。高耐圧を得る為に、この領域を意識的に長くしたのがpinダイオードである。(i領域長は、シリコンでは100 μ m/1,000V、SiCでは10 μ m/1,000V 必要)。
- pnダイオードのオン動作電流が $J_F \propto \exp(q V_F/kT)$ となることは良く知られているが、pinダイオードもSchottky Barrier Diode (SBD)も同じ特性を示す。(p.1)
- オフ→オン過程では、高耐圧ダイオードでは順回復特性(過渡電圧)が問題になることがある。元々i領域(実はn領域)にはわずかな自由電子しか存在しない。p領域から正孔、n領域から自由電子が流入して漸くオン状態になる為である。
- オン→オフ過程は、(p.3)に示すチョッパ回路の2パルス動作目で問題となる。SW素子が一度オンしてオフすると、ダイオードには還流電流が流れる。この時、ダイオードのi領域には正孔と自由電子が蓄積しており、それはキャパシタが充電している状況に例えられる。SW素子が再びオンすると、ダイオードは実質的にダイオードの放電状態になって、その内部電荷が無くなるまでSW素子は(負荷)短絡動作に曝される。その電流は、負荷Lを通らないので、全て損失となる。
- IGBTで高速スイッチングを行う為には、ダイオードのオン時に蓄積される電荷量を小さくする必要がある(p.2)。それは、p領域、n領域の構造やライフタイムを短くすることで為されて来た。そうすると、オン電圧 V_F は必ず増大する。
- pinダイオードのオン動作を考える鍵は、第1に、i領域中の電荷担体密度 n_h , n_e の決定機構である。第2に正孔電流と自由電子電流が定まる機構にある。前者は $n_h \approx n_e \exp(q V_F/2kT)$ となる(変則的なn領域やp領域であっても変わらない) (p.4)。後者はn領域とp領域の長さに反比例する(各々の領域長が特段長くない場合)。これらの機構の説明は長くなるので、全体資料"pinダイオードとバイポーラ トランジスタの動作原理"または付録A.10節を参照されたい。
- pinダイオードの $J_F \propto \exp(q V_F/kT)$ 特性は小電流動作(~100A/cm²程度)のもので、大電流動作は $J_F \propto V_F$ となる。その場合、 $J_F \approx q (N_D + N_A) \mu_0 E F_0$ で表される。 N_D と N_A はn領域とp領域の不純物濃度、 μ_0 と $E F_0$ はp.5左下図の○印で囲った箇所のドリフト移動度 μ と電界強度 $E F$ である。 μ は不純物濃度や電荷担体密度 n_h , n_e に依存するが、図に示すようにこれらの箇所の n_h , n_e は N_D と N_A に等しいので(オーミック電極では半導体側の n_h , n_e は熱平衡状態値になる)、その値は簡単に評価できる。(p.5)
- また、大電流動作時の電界強度 $E F$ は、ダイオードの全域でほぼ一定と近似できるので、 $E F_0 \approx V_F/L$ と見込める(Lはダイオードの全長)。この簡単な式の計算値 J_{calc} とデバイス シミュレーションの結果はp.6右下の表の様に良く一致する。(p.6)
- pinダイオードの基本動作に正孔-自由電子の再結合を考える必要は無い。しかし、高速ダイオードではライフタイムを短くする必要がある。その(逆回復)リカバリー特性は難しい問題である。それに悩まされないSBDが期待されている。

16年11月25日 金曜日

8

(参考資料 2016 #5-p.8: 高田)

2016-11-25: p.4 ダニエルの電池を修正。素焼き板を通るイオンを H^+ から Zn^{2+} と SO_4^{2-} に変える。素焼き板はイオンを通す。強酸溶液中で H^+ イオンはほとんど存在しない。外部から逆電圧を加えると、素焼き板を Cu^{2+} イオンと SO_4^{2-} イオンが通る。