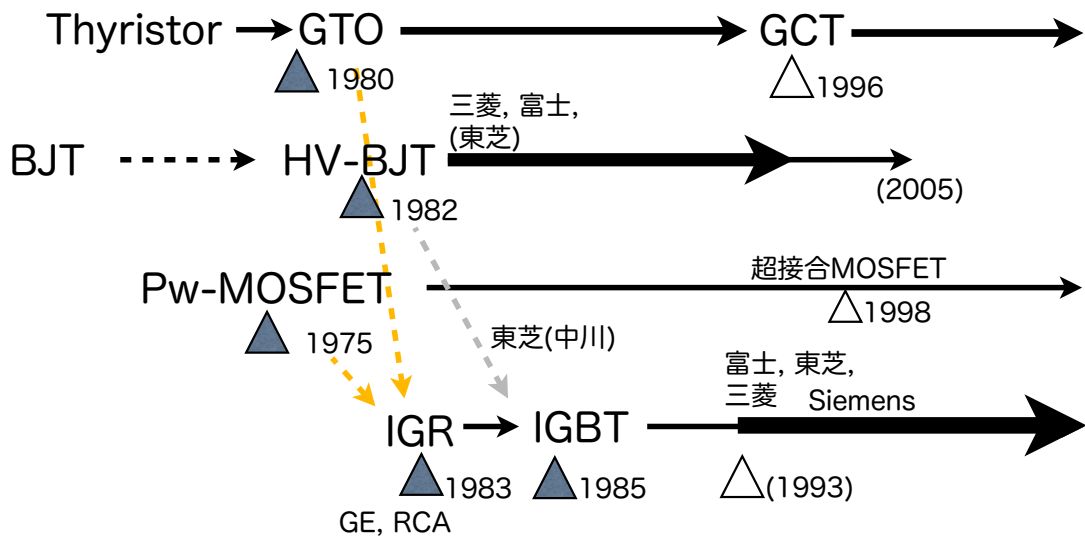


IGBT開発経緯



- 動機: GTO駆動をMOSFETでやりたい(MOS-gated GTO)
- 結果: MOSFET + diode
- 動作原理: 長い間不明 (pnp Tr. + MOSFETは明らかに間違い)

16年7月19日火曜日

1

(配付資料 2016 #12-p.1)

GTOの改善策としてMCT(MOS Controlled Thyristor)があった(米国)。

GEのBaligaだけは、Insulated Gate Rectifierの概念を有していた。

中川は、偶然IGRの発表を聞き、BJTの対抗策として会社案よりましとしてIGBT構造を選んだ。

IGBT構造の発展

●:新規技術, ..:いずれかの選択

		1980	1985	1990	1995	2000	2005	NPT-I	PT-I	PT-II	PT-III	NPT-II	H.V.	F.S.	IEGT	(IEGT-p)	OSTBT	HIGT	逆耐圧
基板	エビ	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	単結晶	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	単結晶(薄)	D	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ライフタイム制御	電子線照射局所	B	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
コレクタ構造	n ⁺ バッファ	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	n ⁺ バッファ(軽)	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	高濃度p+基板	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	p拡散	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	p拡散(浅)	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
エミッタ形状	多角形	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ストライプ	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
エミッタ構造	浅いp-well	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	トレンチ・ゲート	C	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	トレンチ比率大	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	トレンチ+n領域	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	p-well +n領域	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
逆耐圧構造		6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

各年代での目標は必ずしも正しくなかった。

- n⁺バッファとライフタイムは必ずしも必要でないことはNPT-IGBTで示された。
- パターンの微細化は、それ自体ではなく、**エミッタ表面p領域が浅くなった**ことに意味。
- 究極のIGBTと言われたトレンチIGBTは、チャンネル密度が増える利点が力説されたが、トレンチ密度を制限した方がオン電圧が下がった(IEGT)。

16年7月19日火曜日

2

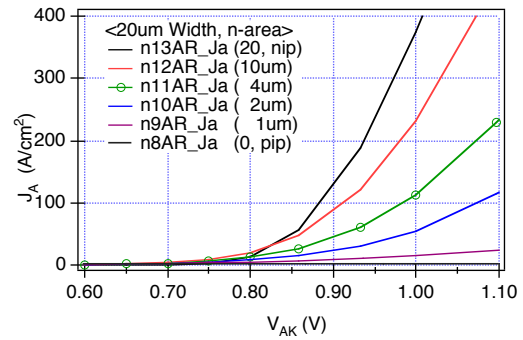
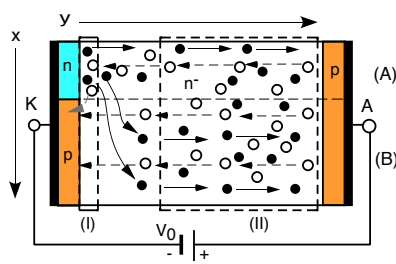
(配付資料 2016 #12-p.2)

多様な選択肢がある状況での開発の困難さ。

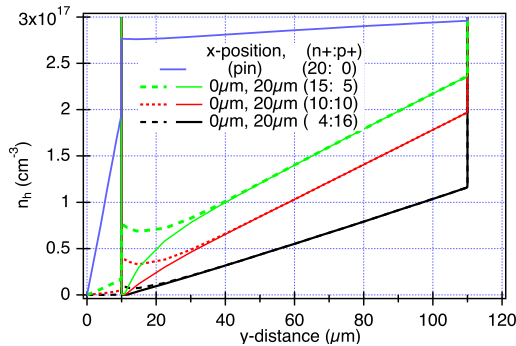
(各IGBT構造の模式図やまとめは、昨年講義#10の資料p.1～p.4, p.8を参考にされたい)

単純な不完全 pin ダイオード n⁺領域幅依存性

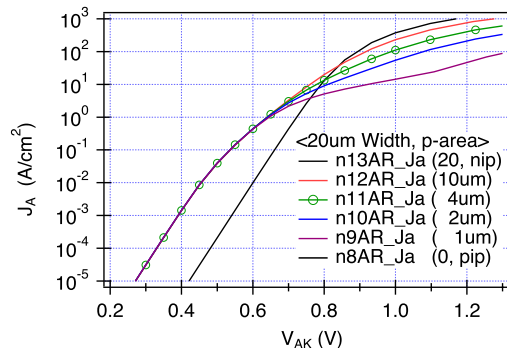
正孔と自由電子の流れ



J_A-V_{AK}特性 (直線表示)



正孔密度(n_h) @V_{AK}=1V



J_A-V_{AK}特性 (指数表示)

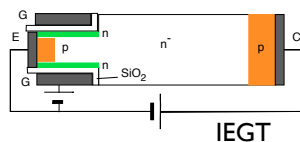
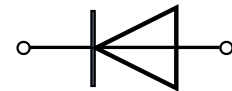
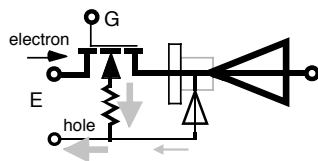
16年7月19日火曜日

3

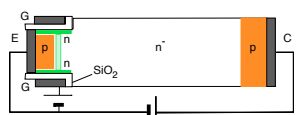
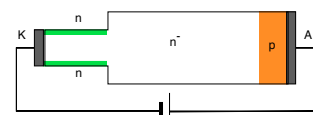
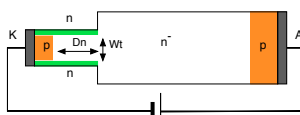
(配付資料 2016 #12-p.4)

<カソード側> 正孔は p⁺(p/n境界) > p⁺領域 >> n⁺領域と分布。自由電子はn⁺領域のみに存在する。
<n⁺領域 (ドリフト電流)> 正孔も自由電子も均一に分布する。

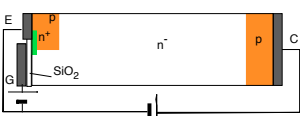
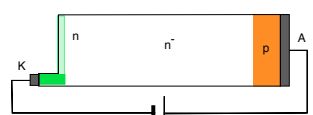
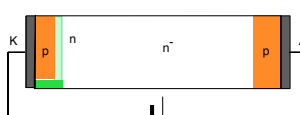
各種IGBTを単純化した構造



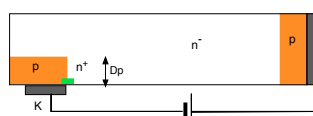
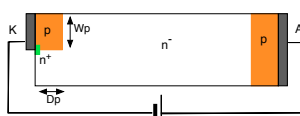
IEGT



CSTBT



planar IGBT



IGBTs → partial pin Diode → (substantial pin Diode)

16年7月19日火曜日

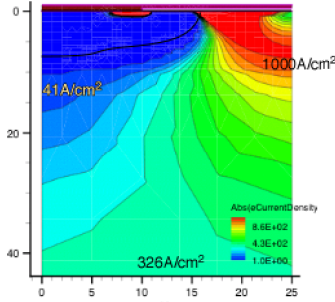
4

(配付資料 2016 #12-p.5)

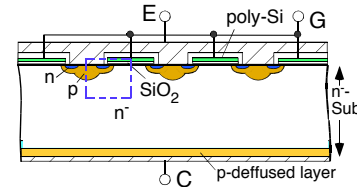
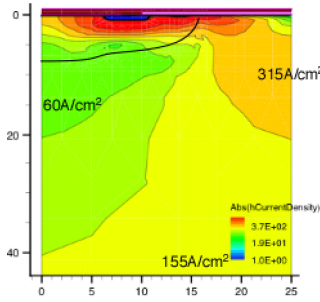
IGBTの進歩は、内蔵ダイオード構造がpinダイオードに近づく歴史であった。

プレーナ形IGBT v.s. 不完全pin Diode

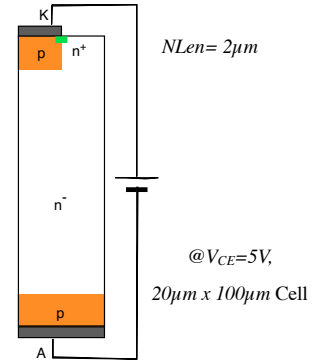
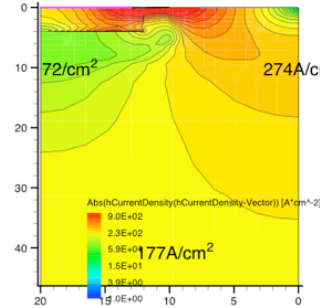
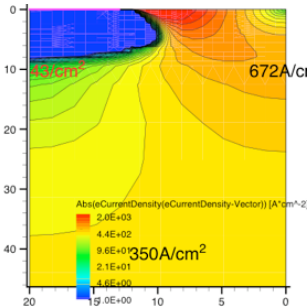
Electron Current distribution



Hole Current distribution



@ $V_{CE}=5V$, $25\mu m \times 110\mu m$ Cell



16年7月19日火曜日

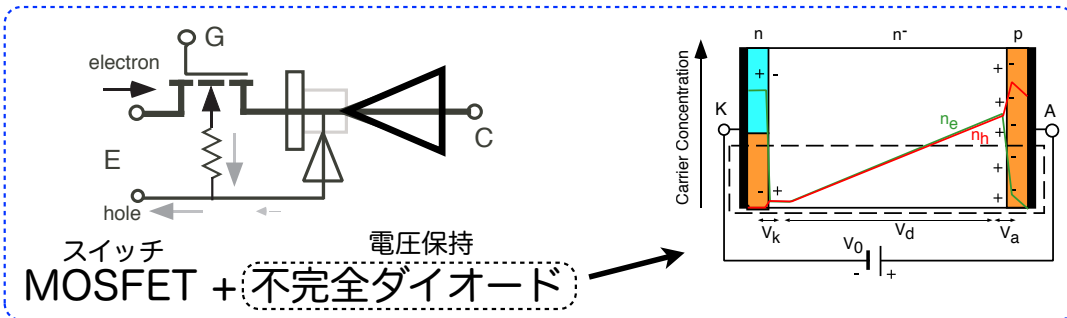
5

(配付資料 2016 #12-p.6)

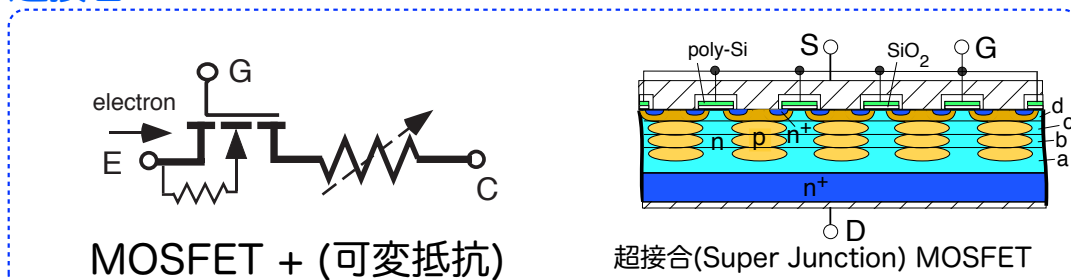
平面型IGBTと不完全ダイオードのオン状態は、良く似たシミュレーション結果となる。

MOSFET機能の高耐圧化

IGBT



超接合MOSFET



16年7月19日火曜日

6

(配付資料 2016 #12-p.3)

MOSFET機能を高耐圧化するために、IGBTと超接合MOSFETの2方法があると見なすことも可能である。

IGBTは、スイッチング機能はMOSFETに依る。ダイオードは電圧保持(耐圧)機能を分担。

基本製造工程はMOSFET、基本構造は不完全pinダイオード。原理把握に長大な期間を要した。

ディスカッション

- pnp形BJTは正孔電流のみ。IGBTは正孔+自由電子電流。
- 不完全pinダイオードはプレーナ形IGBT電荷分布を再現する
(n+チャネル様領域をp-wellより2~3μm程度出す条件)
- 不完全pinダイオードの電荷分布は
静電電位(EP)に応じたボルツマン分布で説明すべき
(空乏状態を除いて適用できる)
極めて一般性が高い

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

16年7月19日火曜日

7

(配付資料 2016 #12-p.7)

IGBTは、BJT動作を行ってない。

BJTの基本動作(単一電荷担体のドリフト電流)の把握に時間を要したことが、混迷の大きな要因。

<解説: PwDev#12: IGBTのON/OFF動作 >

1. IGBTの出現に先立って、GTOを電圧駆動(MOSFETで駆動)しようとする活動が米国であった。初期のIGBT開発は、RCA (H. W. Becke, C. F. Whealtley)やGE (B. J. Baliga)が主導し、1983/12に試作結果が発表された(IGR by GE)。東芝の中川氏は偶々その発表を聞き、特にそのオフ速度が約20μsと遅いことから特に魅力は感じなかったと言う事である(実際RCAが製品化したものはリレー駆動程度にしか使えなかった)。BJTモジュールで他社に遅れた東芝はMOS駆動BJTの開発を期待したが、彼はそれよりも(特に高耐圧で)期待できるとIGBT構造を選択した。RCAとの開発競争に1歩先んじて1985年に1,000V 25A品を製品化した。しかしながら、GEとRCAはIGBT開発活動を停止して、東芝も1987年に研究所から事業所に移管した。1990年頃に富士電機、さらに遅れて三菱電機が製品化して開発競争が進み、1993年頃ようやくBJTを凌ぎえる製品となった(600V品)。1,200V品の実用化はさらに遅れた。1995年頃、日本勢独占に対向してSiemens(現Infenion)が独自構造(NPT-IGBT)でメーカーに加わった。現在、三菱、富士、Infenionの三強状態。東芝、日立は電鉄用に特化。(p.1)
2. pnpトランジスタをMOSFETで駆動するというIGBTの基本構造は1968年に三菱電機の山上、赤桐氏が特許申請して1972年に認められていた。ただし、MOSFET+diodeと見なす立場もあった。GEは一時期IGR (Insulated Gate Rectifier)と呼ばれる、三菱電機は1993年のトレンチIGBTの発表以来この立場を取った。近年、この考えが定説となりつつある。
3. IGBTチップはnpnp4層構造を内蔵するので、主電流が増大すればサイリスタ動作(latch-upと呼ぶ)は必ず起き得る。この開始電流を実用的なレベルまで上げることと、それに伴うオン電圧の増大を出来るだけ抑えることが一貫したテーマであった。年代順に、(I.) n-bufferとlife-time、(II.)コレクタ構造、(III.)トレンチ ゲート構造、(IV.)エミッタ基本構造に注力した開発が行われた。紆余曲折の歴史であった。(p.2) (各IGBT構造の模式図やまとめは2014年講義#10の資料を参考にされたい)
4. IGBTは、不完全pinダイオードとMOSFETの直列接続と見なすのが妥当である。pinダイオードのカソードn領域側に少しでもp領域が存在すると、i領域の電荷担体密度が低下してオン電圧は増大する(p.4)。IEGTやCSTBTはエミッタ側p領域の影響を極力小さくしようとした構造で、それらの構造を徹底するとオン状態はpinダイオードと見なし得る。(p.5)
5. この妥当性は、MOSFETチャネル開口部をn+領域と見なした構造でIGBT動作電流がほぼ再現できることから言える。(p.6) pnpトランジスタ動作ではコレクタ電流は正孔に限られることから、pinダイオード基本モデルが妥当である。IGBTの等価回路は(p.7上図)とするのが適切である。オフ過程はpip構造に蓄積した電荷の排出過程に当たる(GCTと同じ)。
6. IGBTの問題点: ゲート酸化膜の長期信頼性はMOSデバイス共通の潜在問題である。また、IGBTの破壊限界は極めて高く、実際には不均一動作で制限されている可能性が高い。ただし、高電圧、大電流動作の繰り返し限界は未だ十分には確認されていない。近年は、150℃~175℃の高温動作化の比重が大きい(リーク電流が最大制限要因と予想される)。

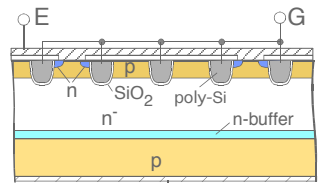
16年7月19日火曜日

8

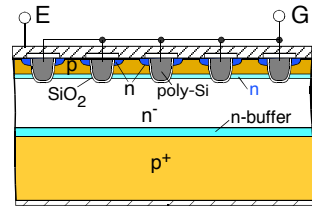
(参考資料 2016 #12-p.8) :高田

IGBTの破壊限界については、#14講義で説明する。

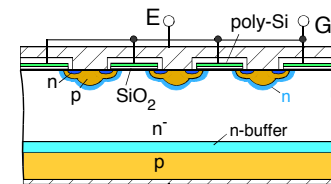
IGBTの発展 (IV-エミッタ構造)



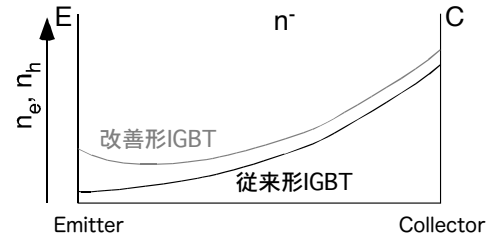
トレンチゲートを間引きしたIEGT



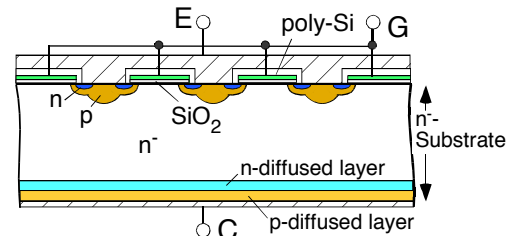
CSTBTの模式図



HiGTの模式図



オン状態のキャリア分布



IGBTの基本構造(HV-IGBT, FS-IGBT)

Short Collector構造, Long Life Time

16年7月19日火曜日

(参考資料 2016 #12-p.9) :高田

9

IGBTの開発史

～1990年: **n+バッファ**と**ライフタイム**の最適化

～1995年: エミッタ・パターンの**微細化**

(実は、**表面p領域比率の低減?**)

～2000年: トレンチ・ゲートによる**チャネル幅の拡大**

(最適チャネル密度があった: **IEGT**)

3~4.5kV IGBTの実用化

(Light Punch Through構造, 最適p-well密度)

2005年～: **薄いうエハ加工技術**を活用した最適設計

(低耐圧IGBT)

望ましい電荷密度分布の実現 (高速動作にも効果)

各世代の開発目標は必ずしも正しくなかった

IGBTの開発 -**オン電圧**の低減をめぐる失敗の歴史-

16年7月19日火曜日

(参考資料 2016 #12-p.10) :高田

10

汎用インバータ小型化に寄与した要因

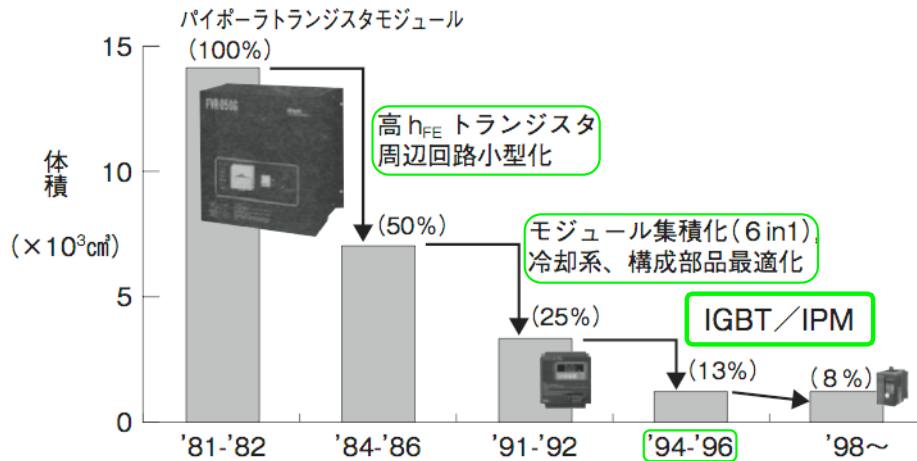


図 7-2 汎用インバータ (750W) のサイズ推移

“世界を動かすパワー半導体” column7, p.78

16年7月19日火曜日

11

(参考資料 2016 #12-p.11) :高田

IGBTが広く使われ始めるのは、'94-'96以降。

インバータ屋は、BJT → IGBTを記憶してない。BJT時代の改良の印象が強い(名古屋. 大上, 梶山)。

(Fujiの図. 三菱は少し早い?)

600V IGBTの改善経緯 @50A, 125°C

'93-3	世代	V _{on} (V)	t _f (μs)	SW 損失* (mJ/pulse)	電流密度 (A/cm ²)	SOA	コメント
	1	3.5	0.6	18	100	◎	RBSOA: 定格電圧 x (定格電流x2)
	2	2.5	0.3	12	100	◎	"
	3	1.8	0.2	5	140	◎	"
	(4)	1.4	0.2	3.5	200	○	トレンチIGBT, 短絡電流大き過ぎる
'02-10	4	1.75	0.4	3.5	150	◎	planar, サブミクロン
	5	1.6	0.35	2.8	210	◎	CSTBT (Trench)

IGBTの到達点

'93-3	定格電圧	定格電流	V _{on} (V)	t _f (μs)	SW損失 (mJ/pulse)	電流密度 (A/cm ²)	保護内蔵	Square SOA	TTL 駆動	コメント
	250V	650A	1.2	0.2	--	230	○	◎		125°C
	600V	800A	1.8	0.2	80*	140	○	◎	○	第三世代IPM, 125°C
	1200V	800A	2.4	0.25	240*	75	○	◎	○	第三世代IPM, 125°C
	2000V	600A	3.4	0.8	950*	75	○	○	○	開発中IPM, 5kHz ³ , 125°C
	2500V	1000A	4.2	(1.5)	(900)+α	(60)		○		powerpack ⁴ , (125°C 予想)
	4500V	(1200)	3**	6	(5300)+α	50		(○)		開発中IGBT ³⁴ , roomTemp
'02-10	4500V	1200A	3.9*	(1.5)	4800**	60		X		module, hockey-pack
	6500V	600A	5.2*	(2.5)	2700***	40		X		開発中

*: IGBT+FWDのSW損失(1ペアあたり), +a: FWD分, (:): 予想値, **: 100A/cm²でのON電圧

*typical value, **Eoff(@1340A), ***Eoff(@500A), (@125°C)

16年7月19日火曜日

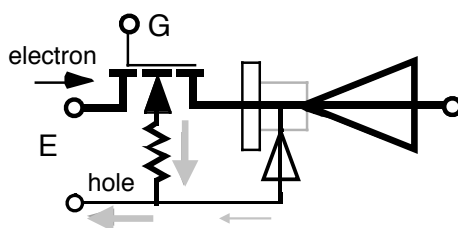
12

(参考資料 2016 #12-p.12) :高田

2012/12: 耐圧1200VクラスのIGBTでオン電圧 0.92V@150A/cm², 150°Cを実現できる可能性がある。

まとめ-I (IGBTのON/OFF動作)

- IGBT(MOSFET+pin diode)はMOSFETの高耐圧の一方策
- 不完全pinダイオードのオン電圧の低減方策
 - カソードp領域を小さくするか,(n領域より)奥に配置(A).
 - n領域長の短縮(B).
- オフ過程はGCTと同じ: pip構造に蓄積した電荷の排出.
- IGBTの等価モデル. (pnp TR動作は行っていない)



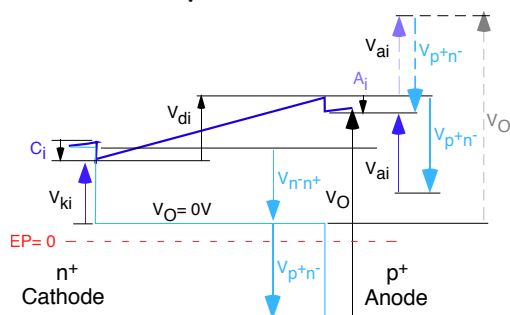
16年7月19日火曜日

13

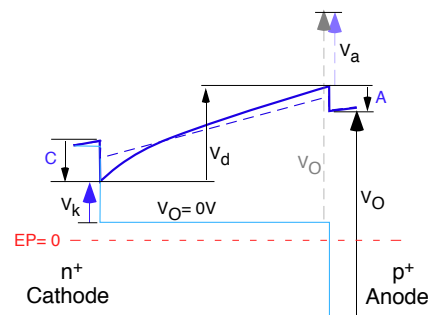
(配付資料 2016 #12-p.13): 高田

IGBTの動作限界は、#12回の講義”パワーデバイスの極限動作”で説明する。

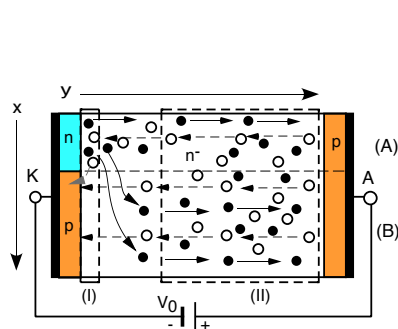
不完全pin diodeの動作時と非動作時の内部電位分布



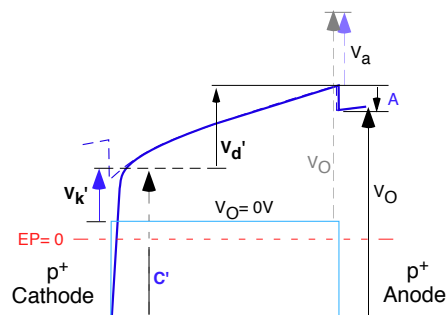
pinダイオード



不完全pinダイオード -I 領域A



不完全pinダイオードの電荷担体の流れ



不完全pinダイオード -II 領域B

16年7月19日火曜日

14

(参考資料 2016 #12-p.14): 高田

電荷担体密度の分布は内部電位で考えると、まだしも分かり易い。

ボルツマン分布！