限界動作 (デバイス構造依存)

A. 短絡破壊, OFF時破壊 (ON動作継続モード)
npn構造(BJT), pnpn構造(GCT), pip構造(IGBT)

B. 耐圧：12kV? サージ電圧による破壊(?)

極限動作 (半導体材料制限)

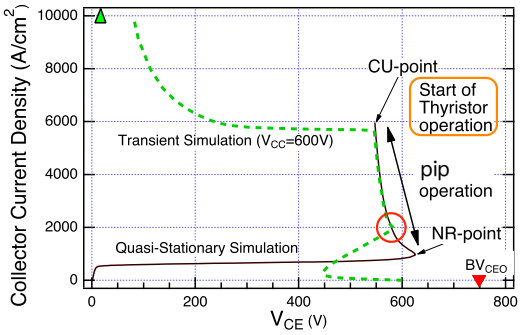
I. 低温：キャリア密度 少, 移動度 大, LifeTime(大)

II. 高温：リーク増大, キャリア密度増大 → 熱暴走

III. ON/OFF：ドリフト速度 / ≈光速(対発生速度)

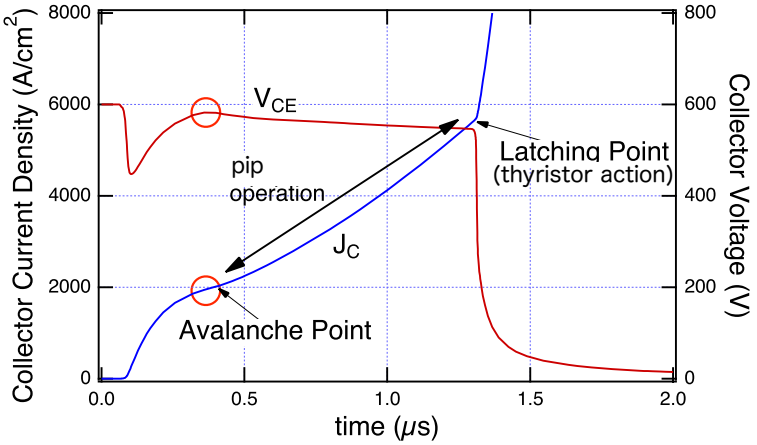
IV. 破壊：pin Diode構造だけなら瞬時破壊は無い
+真の瞬時破壊(三次破壊?) ..宇宙線, GCT, Di Rec.

(講義資料 2016 #14-p.1):高田 pinダイオードは、寄生構造がなければ、熱暴走以外では破壊しないであろう。
npn構造(BJT), pnpn構造(サイリスタ), pip構造(IGBT)に依って、破壊限界が定まる。
実際には、不均一動作が破壊耐量を制限する(オフ過程は、本質的に不均一動作となり易い)。
局所で、瞬時に半導体結晶が壊れる現象が存在すると思われる(GCTオフ時, 宇宙線破壊, Diodeリカバリー, ...)

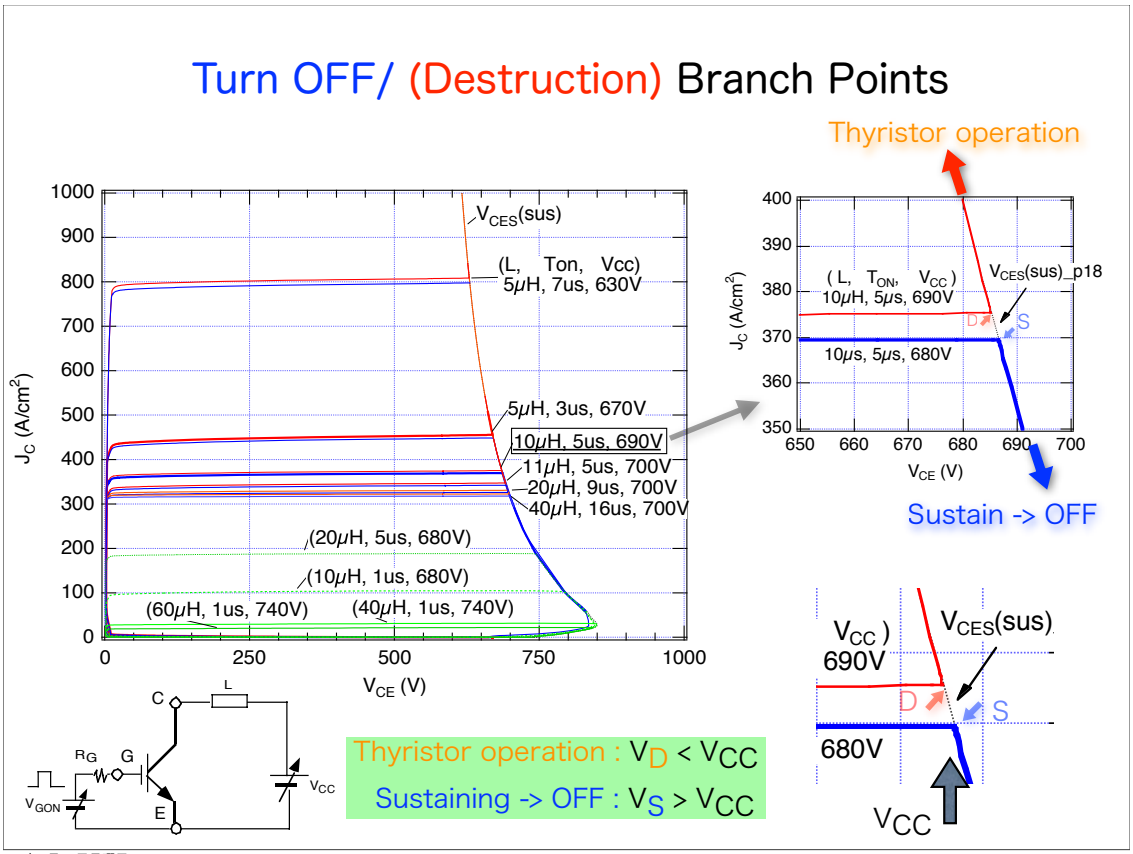


IGBT動作モードの変遷

Transient Simulation

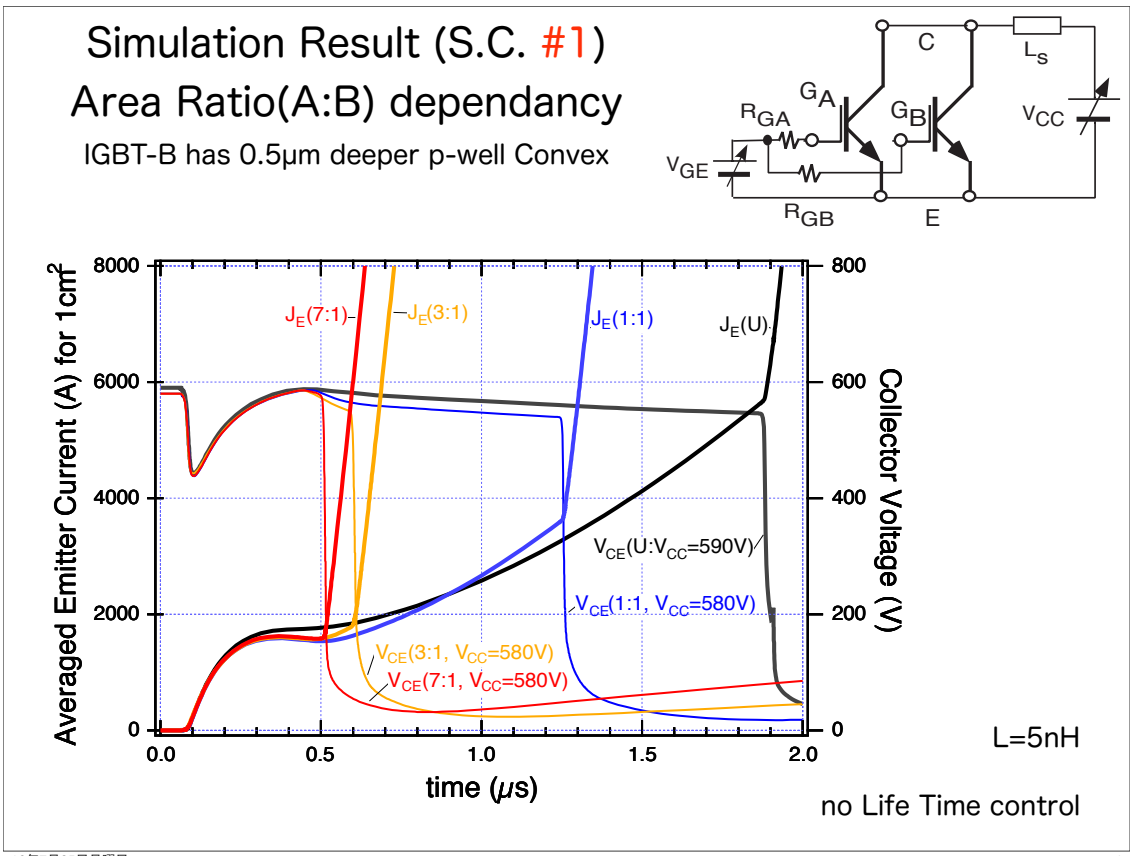


(講義資料 2016 #14-p.2) :高田
準定常simulation(V_{CE}=0→大)と過渡simulation(V_{GE}=0→10V)は、CU-pointまで ほぼ同じJ_C-V_{CE}特性を示す。
Avalanche Pointで(VCE<VCC)の再帰的な負性抵抗特性条件となっている。ここが、実質的な破壊点である。
CU-point (サスティン動作限界点)でサイリスタ動作の開始は、その必然的な結果である。



16年7月25日月曜日 3

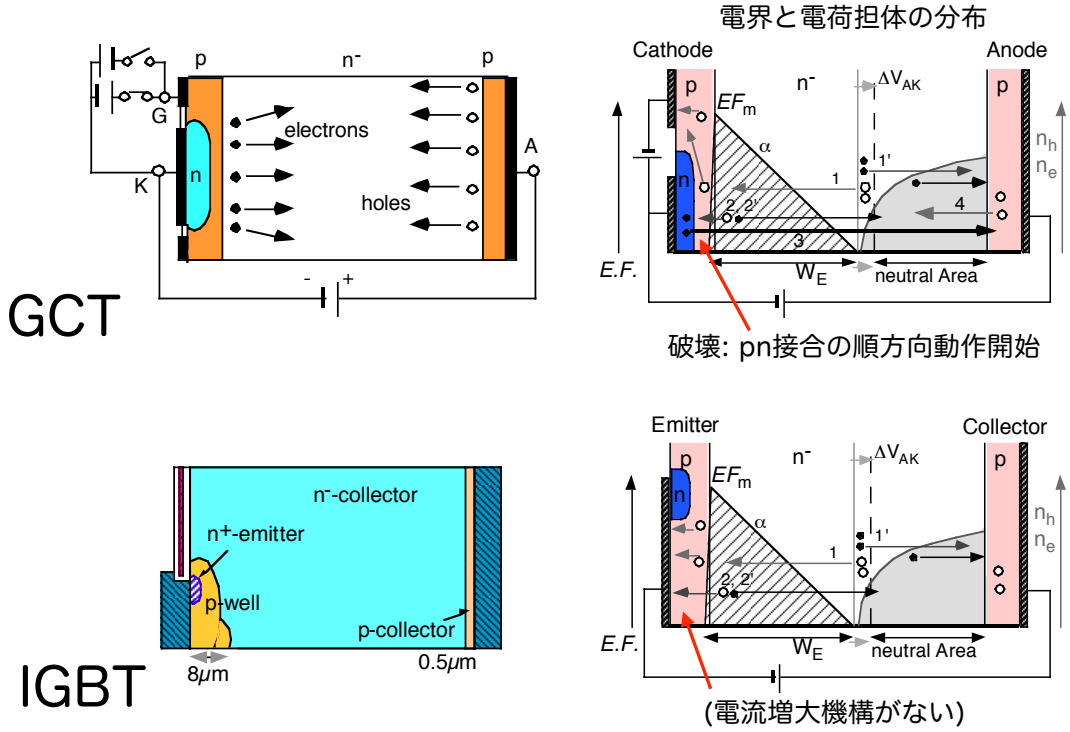
(講義資料 2016 #14-p.3) :高田
動作点は、J_C-V_{CE}動作線からV_{CES}(sus)サスティン動作線に移る。
(交点電圧<V_{CC})ならば電流増大/電圧減少が起こり始める。この傾向はサイリスタ動作が起こるまで続く。
電流が増大してサイリスタ動作が起こると、V_{CE}は急激に低下する。



16年7月25日月曜日 4

(講義資料 2016 #14-p.4) :高田
IGBTの一部をオン電流が大きい構造にした時の短絡動作において、
オン電流が大きい箇所の面積比率を大きくすると、急速に破壊(サイリスタ動作)開始点が早くなる。

L負荷OFF動作 内部状態と破壊



(講義資料 2016 #14-p.5) :高田
GCTの遮断破壊(オフ動作) $V_{AK}J_A \approx 300$ kW/cm^2,
バイポーラトランジスタの短絡破壊(オン動作) $V_{CE}J_C \approx 100$ kW/cm^2

IGBTとGCTのOFF動作破壊

- GCTは pip構造動作中に衝突電離作用が起きると破壊.
  - pip構造動作→局所サイリスタ(再)ON動作→発熱で破壊.
    (高電界は、n^-領域にON時に蓄積されていた正孔が押し出されて作る. 高電界領域には正孔のみ存在する)
- IGBTは [pip構造のV_{CEO}(sus) < 電源電圧]で破壊.
  →電源からIGBTに供給する電流が増大し続けて、
  サイリスタ動作に至る。
  - 一部セルON動作→発熱による温度上昇で破壊。
    実際は不均一動作部(by Life Time, V_{th}, ..)への電流集中.
    (高電界の形成機構はGCTと同じ. ただし自由電子,正孔が共存)

(ON時のBJTはアバランシェ電流でON動作が継続して破壊)
- コレクタ電流を構成する自由電子が高電界を作る.

(講義資料 2016 #14-p.6) :高田
IGBTが、GCTのように直ちに破壊しないのは、GCTよりも通電能力が大幅に劣るからである。
Punch-Through IGBTとNon-Punch-Through IGBTの本質的な違いはない。

極限動作-II (低温)

パワーデバイス低温動作の報告例 (@1998年)

	Liq.N2 Temp.	Liq.He Temp.
ダイオード	○: 高速Switching	□: 高濃度ドープは可
バイポーラTR	X : 低ゲイン	
サイリスタ	○: 高速Switching	△: 光トリガーが必要
GTOサイリスタ		
IGBT	○: 高速Switching	△: Bypass SWが可

パワーデバイス低温動作の測定結果

デバイス	型名	定格電圧	定格電流	チップ構造	パッケージ	室温	Liq.N2	Liq.He
高耐圧プレーナダイオード	SR-HVP	4.5kV	100A	プレーナ	Siワニス, 半田,DBC	○	○	□
整流用ダイオード	SR400FV-80	4kV	400A	メサ	樹脂, 合金形, 機密	○	○	△
環流用ダイオード	FWD-IGBT	1.2kV	100A	プレーナ	モジュール (Siワニス,半田)	○	○	△
バイポーラTR	QM50DY-H	600V	50A	プレーナ	モジュール (Siワニス,半田)	○	×	–
サイリスタ	CR3PM-12	600V	3A	メサ +ガラス	エポキシモールド(半田)	○	○	×
GTOサイリスタ	GT300AL-24	1.2kV	300A	メサ	樹脂, 合金形, 機密	○	×	×
IGBT	CM100DY-24H	1.2kV	100A	プレーナ	モジュール (Siワニス,半田)	○	×	–

(講義資料 2016 #14-p.7) :高田
ライフタイム制御をしないpinダイオードは、Liq.He温度近くまで使えそうである(耐圧が心配)。
pinダイオード特性を抑制しているNPT-IGBTとGCTは苦しい。PT-IGBTは、低温では使えない。
GCTはライフタイム制御してるので余計に難しい。 BJTは、Liq.N2温度で使えない。MOSFETは優秀。

<解説: PwDev#14: パワーデバイスの極限動作 >

1.半導体素子の動作制限は、(I.)デバイス構造に因る限界と、(II.)半導体材料特性上の極限動作に区分し得る。前者は短絡破壊, オフ時の破壊といった二次破壊であり、後者は低温, 高温, ON/OFF速度の特性である. (p.1)

2.二次破壊と言えども特段に変わったことは起こらず、オン動作が継続し続ける (大電流, 低電圧の)動作モードに移行するだけである。ただ、同時に電流増大に対して正帰還が働くことで、急激に動作が変化する。そして、移行した動作電圧が電源電圧よりも高い場合には、負荷エネルギーを消費した後にオフ状態に復帰することも有り得る。

3.pinダイオードやBJTの降伏電流は、$J_0 = q\, N_{Dn^-}\, v_s$の値(1,000Vデバイスで50A/cm程度)までは安定な特性を示す(#12講義資料p.4)。IGBTでは高電圧下で数1,000A/cm^{2}以上の大電流動作が可能で、原理的にはpnpn動作(latch-up)の発生で制限される。 latch-up開始点はデバイス構造(特にエミッタ構造)で大きく改善された(1993年頃では数千A/cm^{2}であった).(p.2)

4. L負荷に十分な電流を流した後の(スナバがない状況での)オフ動作では、Lに発生する逆電圧に因って、IGBTはsustain曲線に到達する。その到達点の電圧が電源電圧よりも大きい場合には、電流増大, 電圧減少の負性特性を辿ってlatch-up開始点に到達して破壊する。(到達点電圧>電源電圧)の場合には、緩やかに電流が下がり続けるsustain動作を経てオフする. (p.3)

5. IGBTの瞬時短絡破壊は、大IGBTとオン電流密度が少し高い小IGBTを並列接続して、小IGBTの面積比率を小さくすることで再現できた。通常動作ではほぼ面積比率で流れる電流が衝突電離現象が起こると、全て小IGBTに集中する。その電流密度がlatch-up開始電流を超えると、回復不能となるサイリスタ(pnpn)動作に移行する. (p.4)

6. L負荷オフ動作過程のGCTやGTOとIGBTの内部状態は良く似ている。オン時に正孔と自由電子が大量に蓄積した電荷中性領域と電界存在領域が存在して。中性領域中の正孔と自由電子は各々陰極側と陽極側に動く。電界存在領域の電界の傾きは、その中を走行する(正孔密度 - n$^-$領域不純物濃度≈正孔密度)にほぼ比例するので、高電圧, 大電流動作では最大電界強度EF_mが増す。EF_m部での衝突電離に因って生じて陽極側に向かう自由電子は電界強度の傾きを軽減するので安定化機構として働く。ところが同時に生じた正孔は、GCTでは 陰極側p領域に入った後(比較的)長いp領域を通過した後にゲート電極から引き出される。IGBTでは、発生箇所の直ぐ後にあるエミッタ電極から流れ出る。このため、IGBTではGCT (GTO)よりも桁違いに大きい動作電流になるまでサイリスタ動作(latch-up)が起きない。GCTの遮断動作はBJTの短絡動作に当たる。前者の限界値が約300kW/cm^{2}で後者の限界値が約100kW/cm^{2}なのは、正孔と自由電子の衝突電離係数の違いに因る. (p.5)

7.上記の限界値は不均一部を極力減らした場合で、実際には電界強度や電流密度の不均一部で破壊は起こる. (p.6)

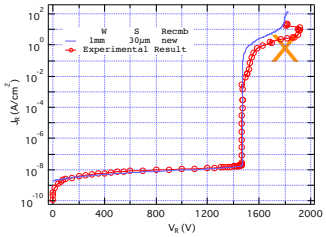
8.低温動作: ライフタイム制御をしないpinダイオードは、液体ヘリウム温度近くまで使えそうである(ただし耐圧の低下が心配)。pinダイオード特性を抑制しているNPT-IGBTとGCTは苦しい。PT-IGBTは低温では使えない。GCTはライフタイム制御してるので余計に難しい。 BJTは、液体窒素温度で使えない。MOSFETは優秀. (p.7)

9.高温動作は主にリーク電流で決まる。逆方向の大電流密度動作は、均一(メサ終端)小面積ダイオードならば数kA/cmが可能.

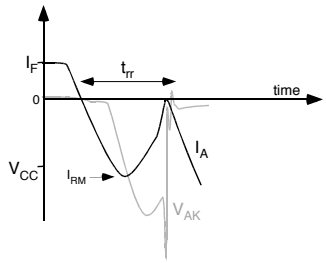
(講義資料 2016 #14-p.8) :高田
高耐圧素子としてメサ構造だけが存在した時代には、降伏電流を流すと破壊すると言われて来た。
著者は、表面が不安定で局所で降伏する為であろうと思っていたが、Townsend放電のようにスナップ バック特性が現れて破壊していた可能性が高い。プレーナ形素子では、必ず本来の降伏電圧よりも低い値で降伏電流が流れ始めるのでこの心配はない。

限界動作-Ab (安全動作領域)
瞬時破壊

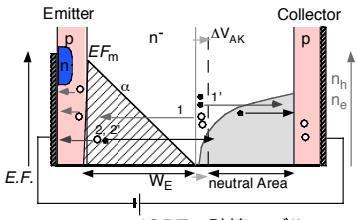
- ダイオード
  - •大電流 アバランシェ動作
  - •リカバリー
- サイリスタ
  - •オン時 ゲート周辺動作
- GTO, GCT
  - •オフ過程での再オン動作
- BJT
  - •オン時 活性部 (温度係数が正) 短絡動作 (SCSOA)
  - •オフ動作 (RBSOA)
- IGBT
  - •オン時 短絡動作 (SCSOA)
  - •オフ動作
- MOSFET
  - •アバランシェ耐量
  - •定電流動作



pinダイオード逆方向特性



リカバリー破壊例



IGBTの破壊モデル

(講義資料 2016 #14–p.9) :高田

限界動作-Aa (安全動作領域)

A. 高温 → キャリア密度増大 $(n_e n_h = {n_i}^2 \propto \mathrm{e}^{\frac{-E_g}{kT}})$
- ・導体化
- ・pn接合の消失

高電圧・大電流動作の継続
- ・正帰還が働くと瞬時に破壊
- ・局所動作

二次破壊

B. 瞬時破壊

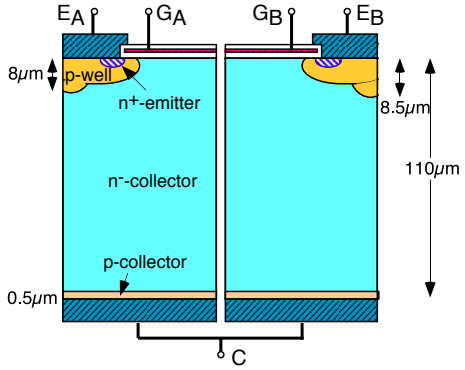
破壊直前まで正常動作！

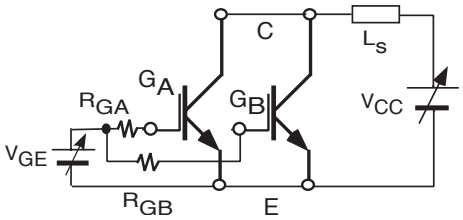
使用上限温度
- ・リーク電流による発熱 (ライフタイム小で大傾向)
  (低濃度領域接合の消失温度は低い)

(講義資料 2016 #14–p.10) :高田

熱以外にも、瞬時に破壊するモードがある(例えば、シリコン結晶が局所で破壊する)。そうでないと、~~GCTの破壊波形や~~ 宇宙線が誘起する破壊事例を説明できない。

Simulation Conditions





A : B

(ΔV_{th} ΔLifeTime, ...)

Large Small

p-collectoer: $1x10^{18}cm^3$

R_G=10Ω/cm^2, Total Area=$2cm^2$

Short Circuit	L-Load Turn-OFF
Life Time control(x0.1)	no Life Time control
L_S= 5nH	L = 5μH (~40μH)
Area Ratio= 1:1 ~ 7:1	Area Ratio= 1:1 ~ 31:1

(講義資料 2016 #14-p.11) :高田

大/小面積IGBTの並列動作 (短絡動作, L負荷オフ動作の両方)

小面積IGBTは、オン電流大(V_{th}, ライフタイム) or アバランシェ容易(深いp-well)

極限動作-III (ON/OFF)

- 高速化:
  - 低耐圧デバイスを直列にし同時駆動
    1kV MOSFETを30直列に100並列接続した
    24kV, 2kAのレーザー電源がある。26kA/μs
  - アバランシェ動作の伝搬 (Russian Devices)
    SOS(0.25cm^2 DSRDチップ 128直)を10直2パラで、
    4kA,120kVを20~30nsで遮断。>10^{11}回
- 大電流密度:
  - 均一小面積ダイオードは数kA/cm^2可能

(講義資料 2016 #14-p.12) :高田