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 小

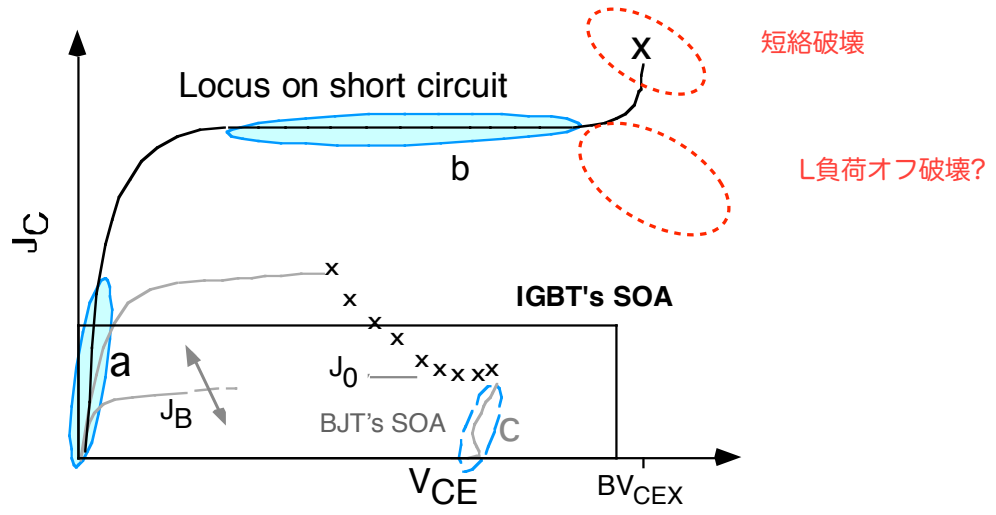
II. 高温：リーク増大, キャリア密度増大 → 熱暴走

III. ON/OFF：ドリフト速度, ≈光速(対発生速度)

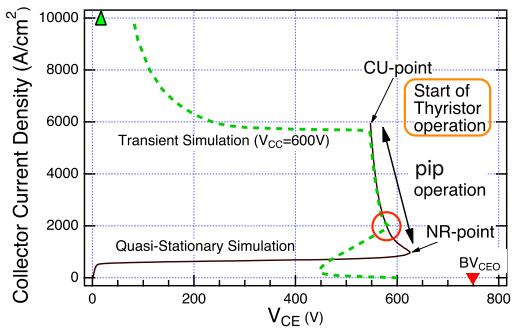
IV. 破壊：pin Diode構造だけなら瞬時破壊は無い
+真の瞬時破壊(三次破壊?) ..宇宙線, GCT, Di Rec.

(参考資料 2014 #12-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の動作限界 (SOA)

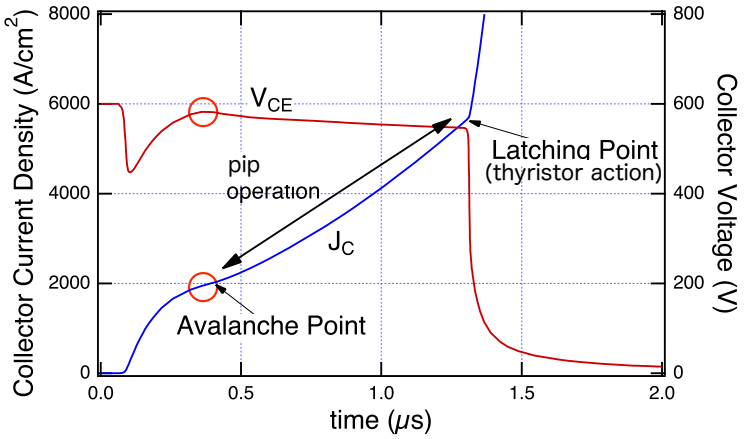


(参考資料 2014 #12-p.2：高田)
短絡破壊には温度上昇に因るもの以外に、瞬時破壊がある。
BJTと異なり、短絡破壊やL負荷オフ破壊の限界は明確に定まらない。



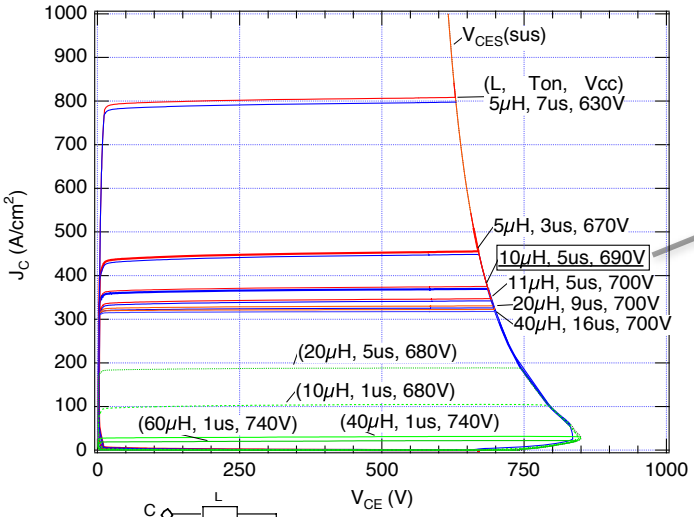
IGBT動作モードの変遷

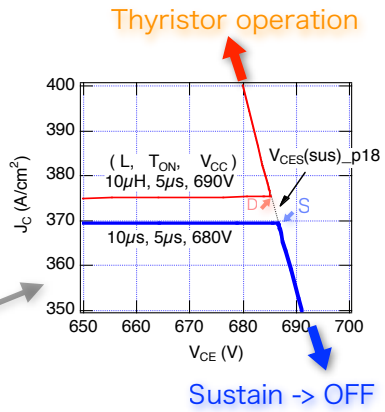
Transient Simulation

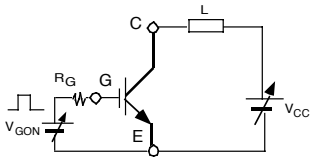


(参考資料 2014 #12-p.3'：高田)
準定常simulation(V_{CE}=0→大)と過渡simulation(V_{GE}=0→10V)は、CU-pointまで ほぼ同じJ_C-V_{CE}特性を示す。
Avalanche Pointで(VCE<VCC)の再帰的な負性抵抗特性条件となっている。ここが、実質的な破壊点である。
CU-point (サスティン動作限界点)でサイリスタ動作の開始は、その必然的な結果である。

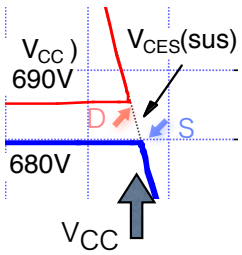
Turn OFF/ (Destruction) Branch Points





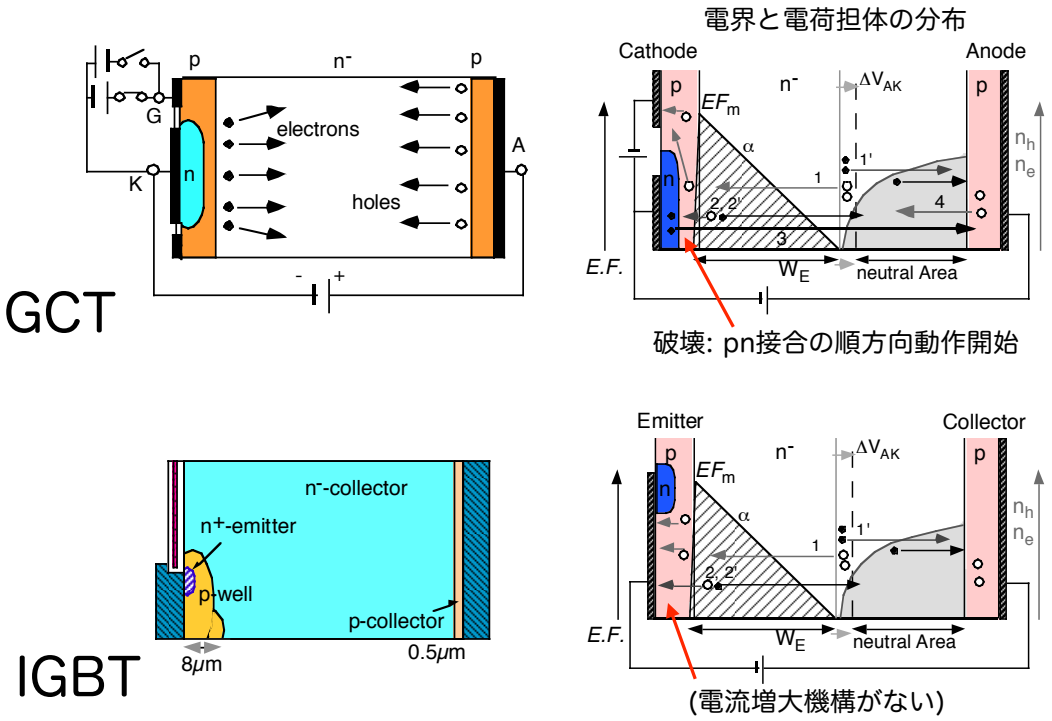


Thyristor operation : $V_D < V_{CC}$
Sustaining -> OFF : $V_S > V_{CC}$



(参考資料 2014 #12-p.4'：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。
サスティン特性は負性抵抗なので、(交点電圧<V_{CC})ならば電流増大/電圧減少傾向に正帰還が掛かる。
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。

L負荷OFF動作 内部状態と破壊



(参考資料 2014 #12-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)<電源電圧で負性抵抗特性
  →電圧保持能力壊失.
    通常 サイリスタ動作以前の動作電流でこの条件に至る.
  - 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.

(参考資料 2014 #12-p.7：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。
pip構造 <-- pnpトランジスタ (2014-01-25)

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)	○	×	–

(参考資料 2014 #12-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。

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

(参考資料 2014 #12-p.8 : 高田)