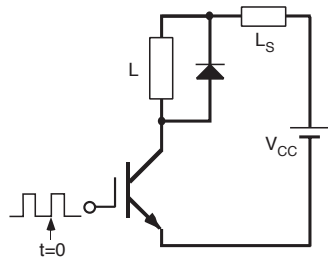
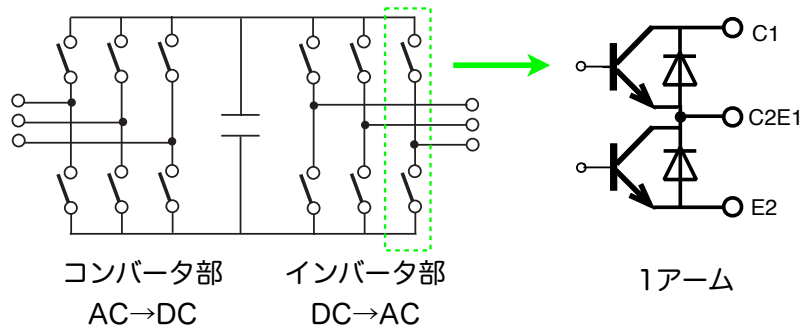


GTO, トランジスタのスイッチング回路



チョッパ回路

SW素子, Diodeにおいて、
インバータ動作はチョッパ動作と等価。

SW素子の問題

- 1) OFF時の破壊.
- 2) 短絡動作時の破壊.

Diodeの問題

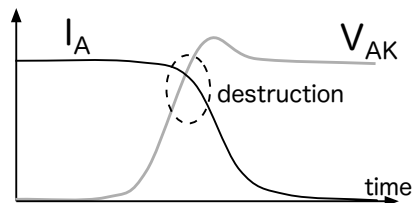
- a) ON時の(短絡)電流...(問題源)
- b) リカバリ動作....(問題源, 破壊)

16年6月22日水曜日

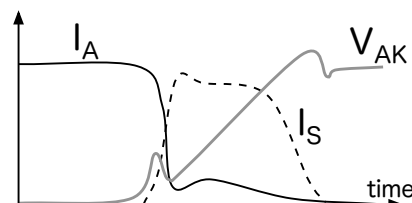
(配付資料 2016 #4-p.1): 高田

1

スナバの効果: GTOの場合



GTO turn-off波形 (スナバなし)

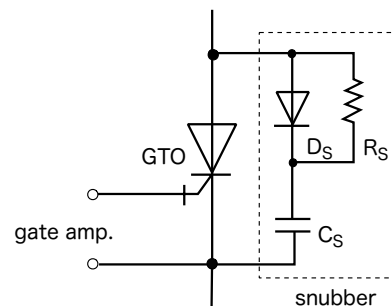


GTO turn-off波形 (スナバあり)

(snubber)

snub: 鼻であしらう, 急停止させる.

電圧と電流の位相をずらすことで
素子の負担を軽減する.



スナバ回路例

16年6月22日水曜日

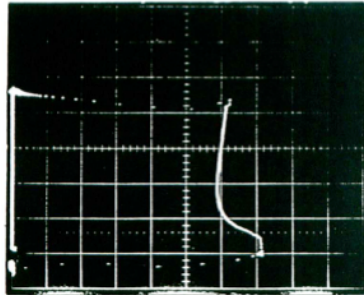
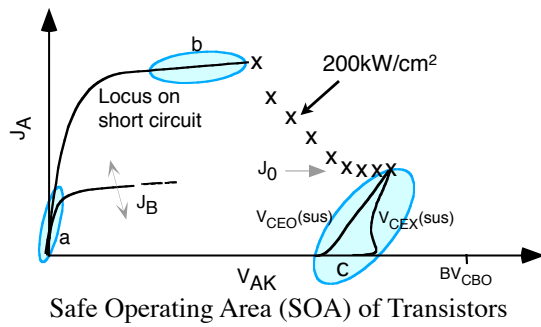
(配付資料 2016 #4-p.2): 高田

スナバは、SW素子の負担を軽減する一般的な方法である。

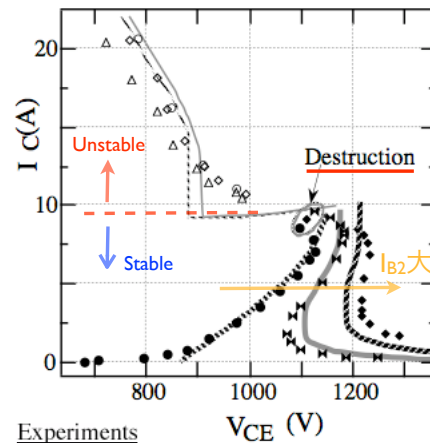
1970年中頃以前のBJTをインバータに用いるためには、大きなスナバが必要であった。

2

BJT 逆バイアス二次破壊の解析(R.B.SOA)



$V_{CEX(sus)}$ Locus of
1200V 100A 3-stage Darlington Tr.
(y:12.5A/div, x:200V/div)
($V_{clamp}=1400V$, $I_{B1}=-I_{B2}=2A$)



Experiments

$\Delta I_{B2} = -1A$
 $\diamond = -300mA$
 $\circ = 0mA$
 $\bullet I_{B2} = -300mA$
 $\times = -185mA$
 $\bullet = 0mA$

RBSOA Destruction
 $V_{CEO(sus)}, V_{CEX(sus)}$
Loci and Destruction

Calculations

$I_{B2} = -660mA$
 $I_{B2} = -300mA$
 $I_{B2} = 0mA$

$V_{CEO(sus)}, V_{CEX(sus)}$
Loci and Destruction

Operation Limits of 1kV 10A Single Tr.

16年6月22日水曜日

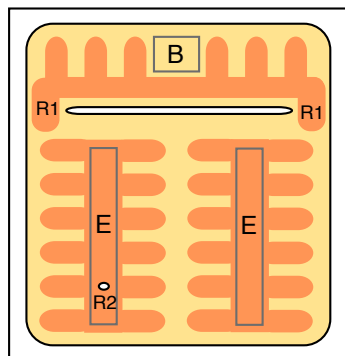
3

(配付資料 2016 #4-p.3) : 高田

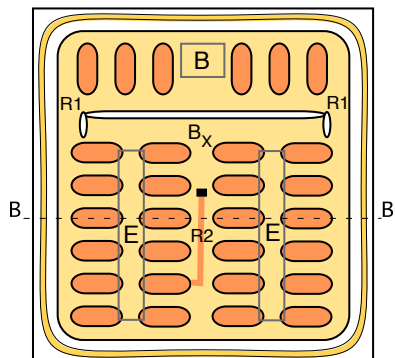
BJTのL負荷ターンオフ破壊限界とその破壊機構の説明は1985年になされた。

B: bread down, V_{CBX} : Open, Short, reverse biased

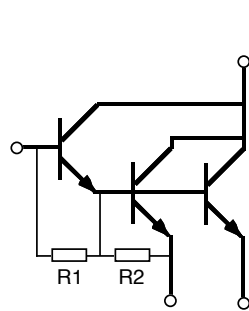
インバータ用トランジスタの対策 (L負荷破壊)



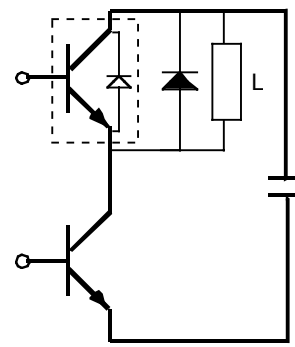
B/E領域 改良 前



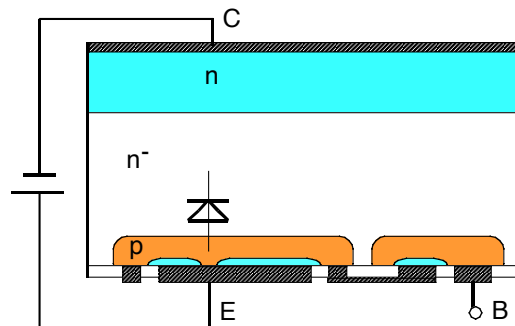
B/E領域 改良 後



Darlington TR Chip



Chopper Operation



寄生ダイオード

16年6月22日水曜日

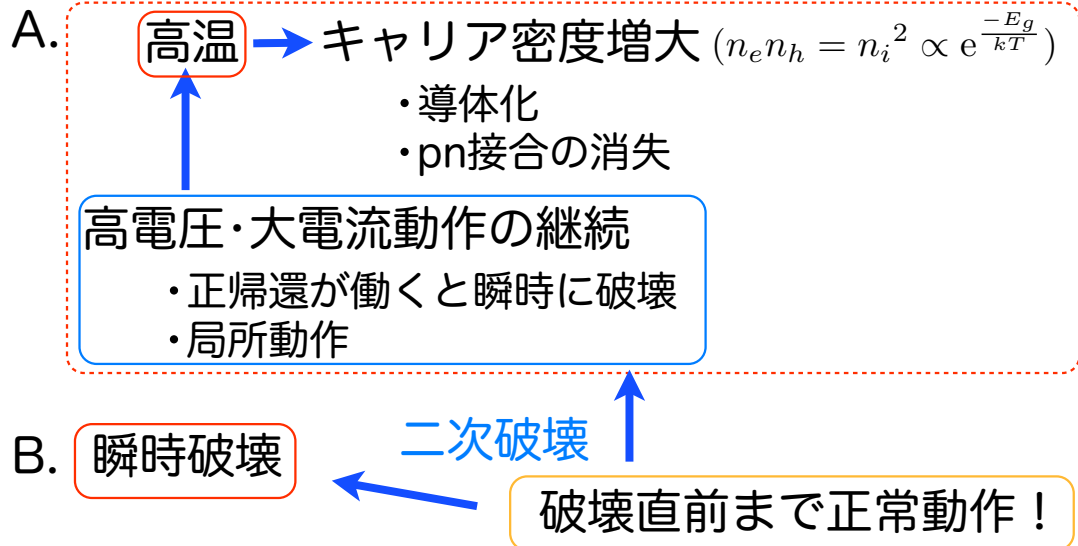
4

(配付資料 2016 #4-p.4) : 高田

アルミニウム電極を取り除いたチップ表面。

$\geq 1,000V$ BJTは、エミッタ領域の中抜きを徹底して行った(寄生トランジスタ動作を徹底して除去した)。

限界動作-Ab (安全動作領域)



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)

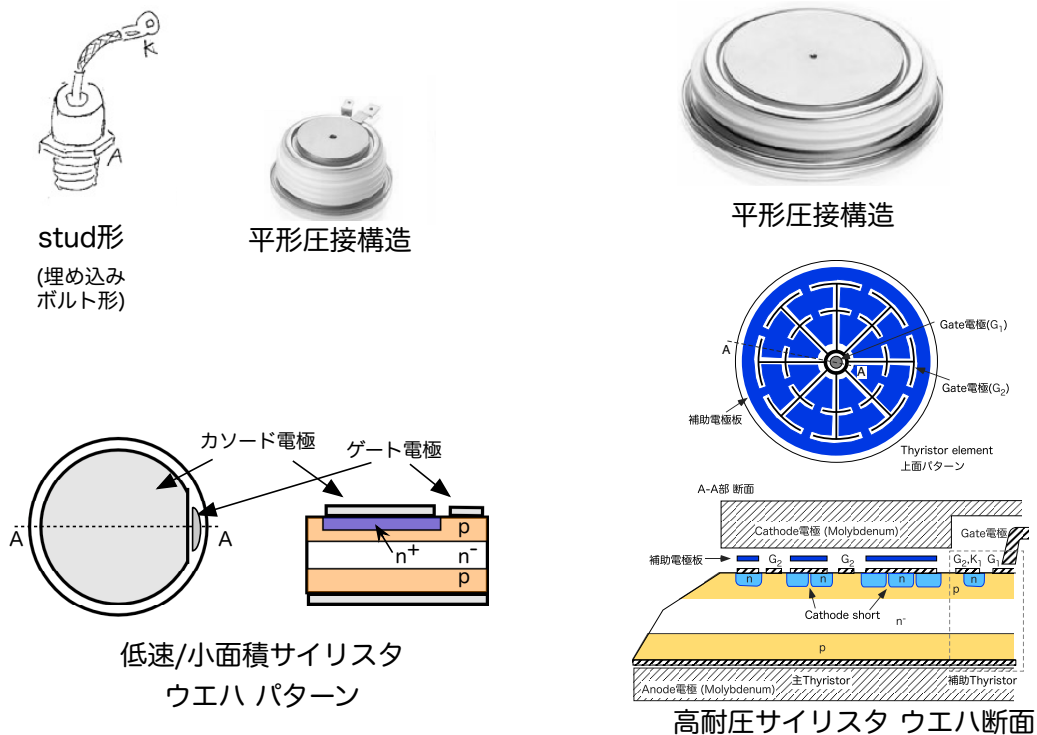
16年6月22日水曜日

5

(配付資料 2016 #4-p.5) : 高田

温度上昇は(Primary) Breakdown (一次破壊). それ以外が Secondary Breakdown (二次破壊). 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。

Diode, Thyristorパッケージ



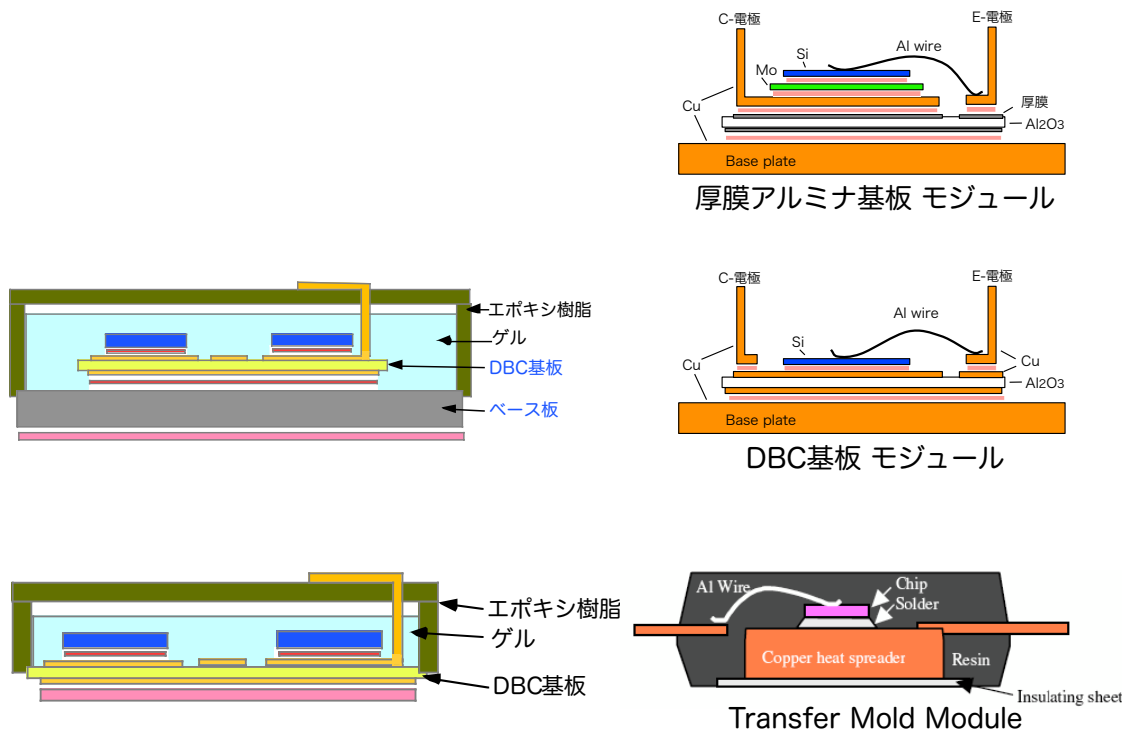
16年6月22日水曜日

6

(配付資料 2016 #4-p.6) : 高田

サイリスタ パッケージには、棒状のゲート端子が付く。

モジュール・パッケージ



16年6月22日水曜日

7

(配付資料 2016 #4-p.7) : 高田

モジュール構造は、パワーデバイスとして放熱、機械構造の面で極めて異端(不適切)。
それでも、使用し易さから広く使われるようになった。

<解説>

- 1.安全動作領域(Safe Operating Area)は、素子の使用が可能な電圧と電流の範囲である。素子の破壊は、まず動作温度で制限される。高温になって正孔と自由電子がp形、n形不純物濃度と同等になれば、素子は機能しない。ところが、素子の平均温度上昇がごく小さい微小時間の動作で(電子的な機構で)破壊するモードがあって、これを2次破壊と呼ぶ。
- 2.トランジスタ(Bipolar Junction Transistor)やGTOをスイッチとして用いる典型例はインバータ用途である。そのスイッチング動作はチョッパ動作で再現できる。(p.1)
- 3.トランジスタは、高電圧時に電流が小さいL負荷ソフトスイッチングには用いられたが(例えばテレビの水平偏向回路)、L負荷に継続して流れている電流を遮断するインバータ用途では高電圧が発生しているために極めて容易に2次破壊した。
4. GTO (Gate Turn Off thyristor)は、pinダイオードと実質的に同じオン動作をするサイリスタに蓄積している電荷端体を(細い短冊形のカソード領域を取り囲んだ)ゲート電極でから引き出すことで遮断特性を得ようとした。
5. 1970年頃までのインバータには、トランジスタやGTOに(電圧と電流の位相をずらすことで素子の負担を軽減する)スナバを併置することが必要であった。スナバ キャパシタは巨大で($\approx 1\mu\text{F}/1\text{kA}$)で、スナバ電流は全て損失になる。(p.2)
- 6.1980年頃からの (汎用インバータ、エアコン、エレベータ、etc.への)インバータの急速な普及は、スナバを必要としないトランジスタ(BJT)を組み立て易いパッケージに入れたトランジスタ モジュールの実用化が可能にした。
7. その実用化には、スナバレスで定格電圧で数十A/cm²の安全動作領域を有するBJTチップが不可欠であった。(p.3)
8. BJTのL負荷スナバレス動作は、ベース電極から離れたエミッタn形領域を除去することで可能となった。すなわち、余分な寄生構造を取り去った本来のトランジスタ(BJT)は、元来(当時として)極めて大きなSOAを有していた。(p.4)
- 9.数百Vで数百A/cm²もの電流が流れる短絡動作も、BJT本来の機能であることが判った。
10. BJTには高電圧、大電流密度動作を安定に行う機構が見わっているが、ある限界点を越えると衝突電離作用に依る電流増大作用が再帰的に働いて、急峻に大電流密度、低電圧動作モードに移行して、その状態が継続する(2次破壊)。素子の破壊は、温度上昇に依って起こる。急峻な電圧降下を検出して、直ちに主電源を遮断すれば原理的には破壊しない。(p.5)
- 11.パワーデバイスの伝統的なパッケージは、セラミックと金属で囲った気密パッケージである。熱抵抗の小ささと機械的な疲労が起きない構造を目指した。疲労が起きる半田は使用しないのが原則である。(p.6)
- 12.モジュール構造は、熱設計と機械的な疲労の両面で常識外れの構造であるが、DBC (Direct Bond Copper)基板や素材の改善(特に熱膨張率をシリコンに近づける)によって、自動車や電鉄に使える段階に達した。(p.7)

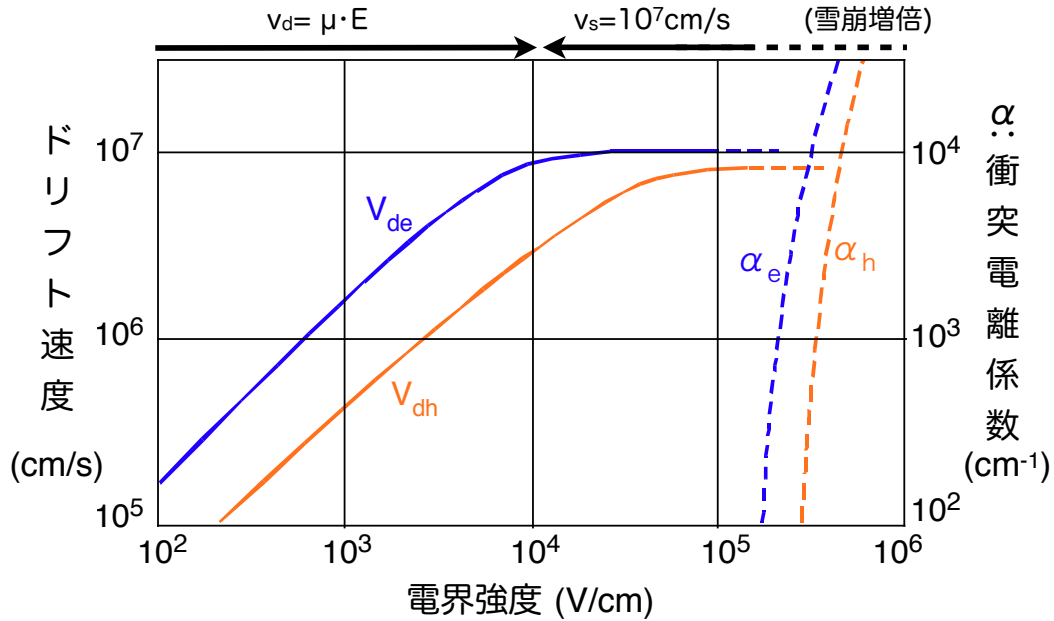
16年6月22日水曜日

8

(参考資料 2016 #4-p.8: 高田)

電界中の自由電子と正孔

シリコン @300K



運動量緩和(I) → 運動量緩和(II) → 運動エネルギー緩和:
 移動度 μ : 定数 → 電界に反比例(飽和) ⇒ <正孔-自由電子対発生>

16年6月22日水曜日

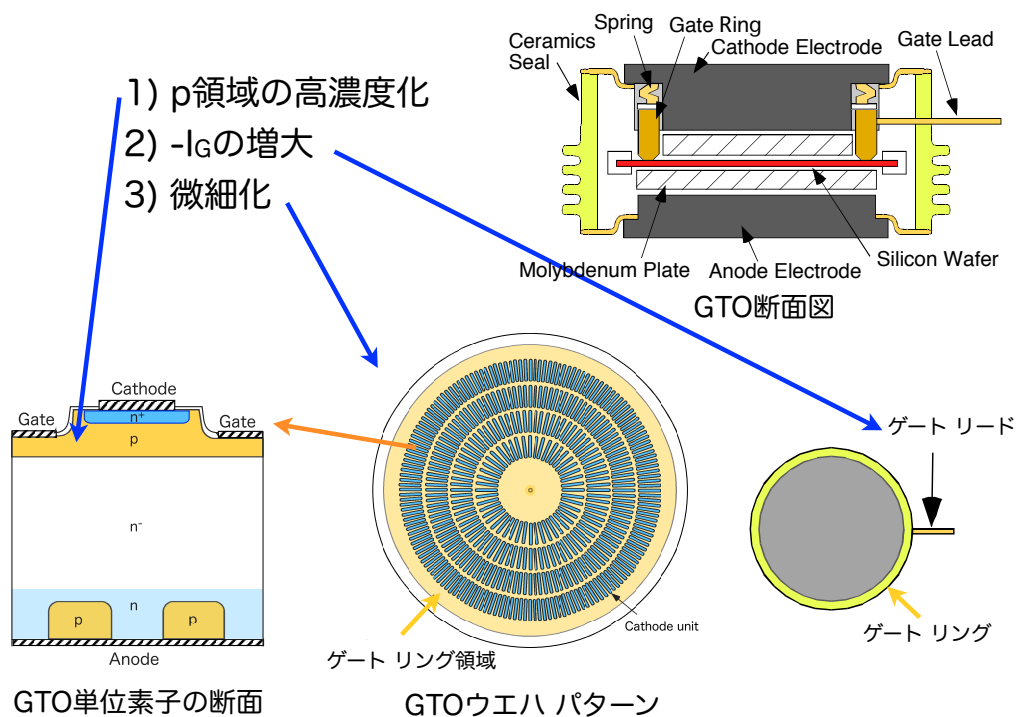
9

(参考資料 2016 #4-p.9) 増加する運動量, 運動エネルギーをどう処理するか:

運動量散乱(I) → 運動量散乱(II) ⇒ エネルギー散乱 (最外殻電子を剥がす)

2012-09-26以前は(運動量散乱 → エネルギー散乱 ⇒ 別のエネルギー散乱機構(最外殻電子を剥がす))

GTO実用化の方策



16年6月22日水曜日

10

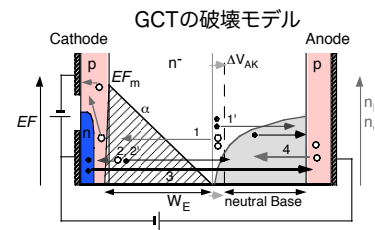
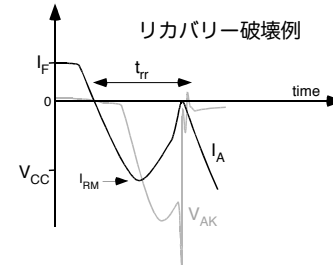
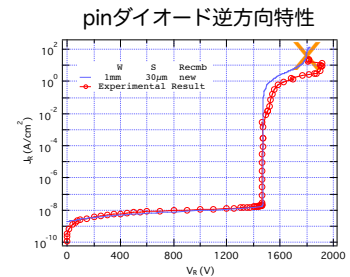
(参考資料 2016 #4-p.10)

方策(1), (2)は、新人時代の中川さんが気付いた。

GTO→GCTの改善は、ゲート回路全体の低インピーダンス化と $I_G = -I_A$ の駆動方式に因る。

安全動作領域 -II (瞬時破壊)

- ダイオード
 - 太電流 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



16年6月22日水曜日

(参考資料 2016 #4-p.11)

二次破壊は、各デバイスに存在するが、スイッチング素子(BJT, IGBT, GCT)で厳しい。

下線項目の詳細な解析(simulation)は未だ行われていない。