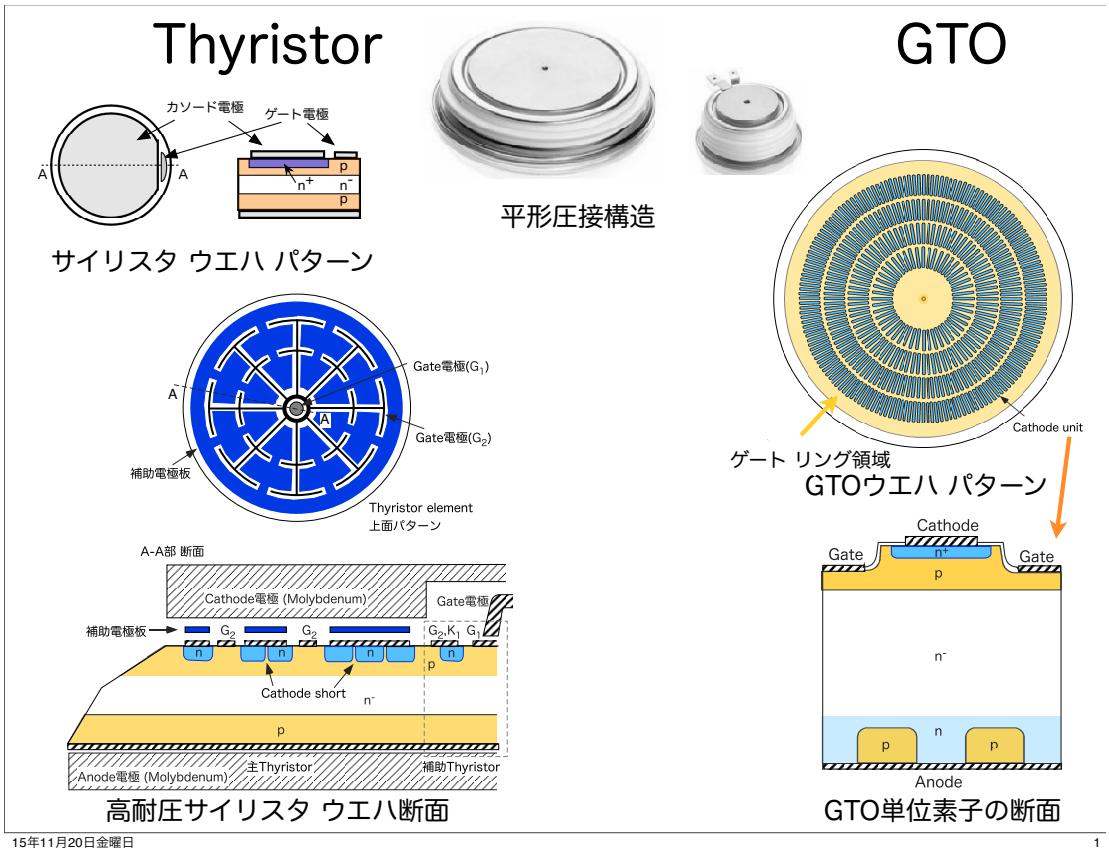
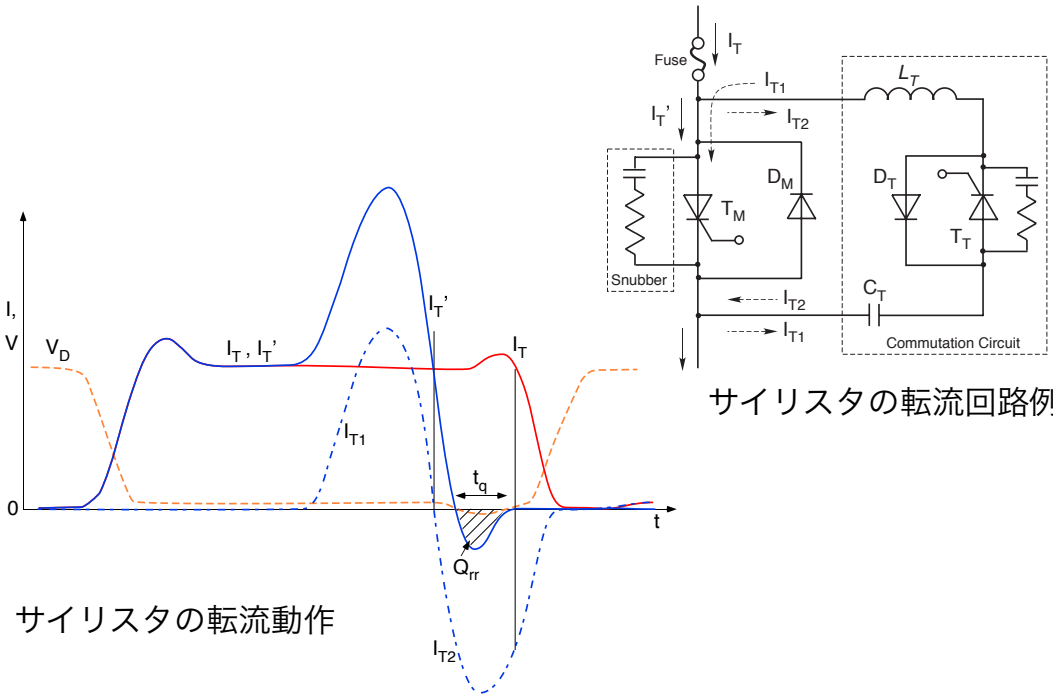


15年11月20日金曜日 1

(補足資料 2015 #6-p.1) :高田 サイリスタは、その時点で入手できる最大径のウエハを用いて作られた。
径が大きくなるにつれ、オン時の破壊を防ぐために中央ゲートとなり、補助サイリスタで主サイリスタを駆動する形になった。
Cathode short構造は、高dV/dt時の変位電流によるオン動作を防ぐために設けられた。補助サイリスタは、BJTのダーリントン接続に相応する。
GTO (Gate Turn Off thyristor)は、カソード領域幅を極力狭くして、I_Aの1/3〜1/5の-I_Cを流すことでオフ能力を得た。

サイリスタの転流回路/動作

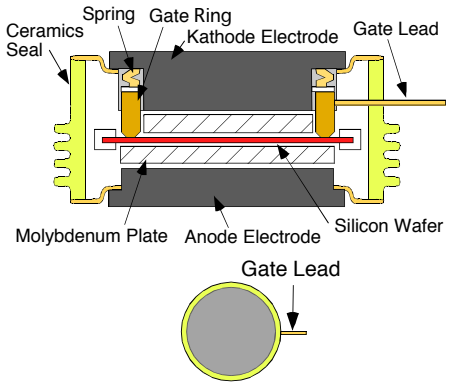


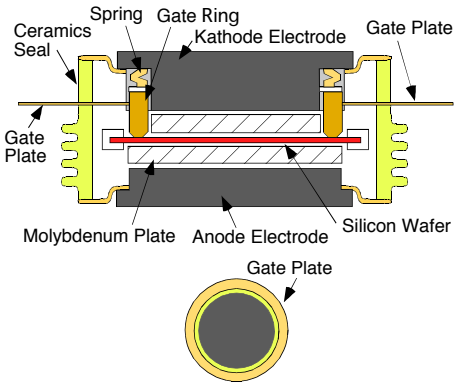
パワーデバイス・パワーIC ハンドブック, 電気学会, 1996

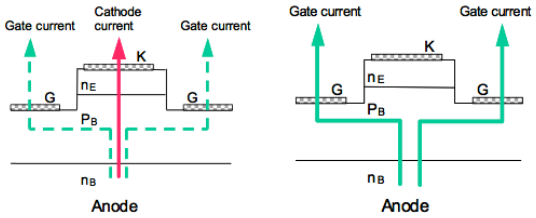
15年11月20日金曜日 2

(配付資料 2015 #6-p.2) :高田
オフ時にCrは充電される。オンしたい時、転流回路のサイリスタT_TをオンさせてL_TとC_Tによる共振電流を、主サイリスタに重畳させる。I_{T2}>I_Tならオフする。
オン時の蓄積電荷が無くなるまでの逆回復期間t_qよりも電圧V_Dの立ち上がりを遅らすためにスナバが付いている。

GTO → GCTの改善点







(a) GTO サイリスタ
(ターンオフゲイン=3〜5)

(b) GCT サイリスタ
(ターンオフゲイン=1)

図 2　ターンオフ動作原理

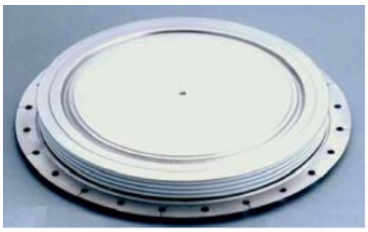
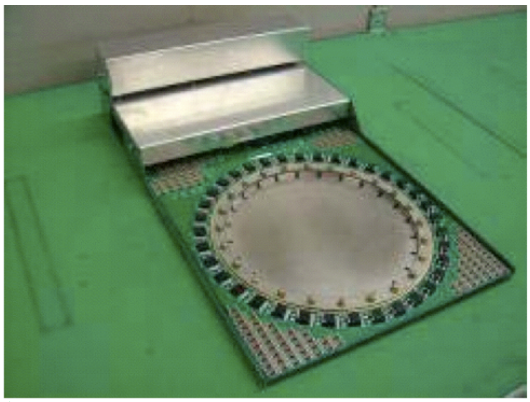


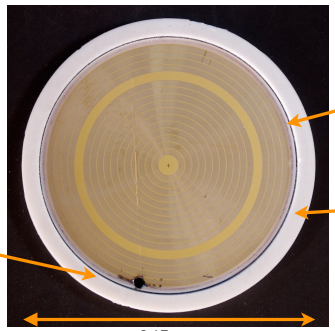
図 1　6kV/6kA-GCT サイリスタ

(配付資料 2015 #6-p.3) :高田
GCTは、ゲート全回路のインダクタンスを極力減らし、巨大なゲート電源を用いてオフ時には全電流I_Kをゲート端子に転流する。オフ過程ではpip構造デバイスとして動作する。
実は、GCTもClamped snubberを使用するが、それによる電力損失がないこともありスナバレスと称している。

Gate Drive Unitの進歩

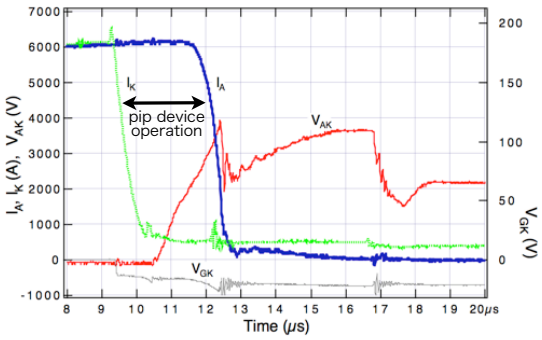


遮断電流 6kA → 8kA(予想値) @125°C

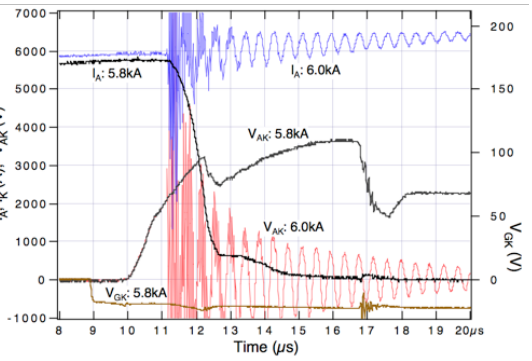


(GCT: 6”ウエハ. カソード面)

(配付資料 2015 #6-p.4) :高田
円形部にGCTパッケージのカソードが接触し、周りの多数の穴でゲート円盤を固定する。両面プリント基板端にはゲート電源コンデンサと駆動用MOSFETが多数設置されている。



Turn-off Wave Forms of #2 generation GCT Thyristor (Sample:F @125°C)



Succeeded and Destructed Turn-off Wave Forms of #2 generation GCT Thyristor (Sample:E @125°C)

1996年 GCT遮断限界試験波形(@125℃)

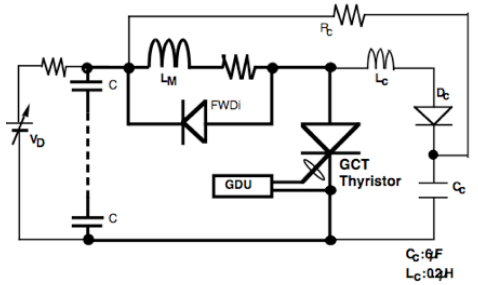
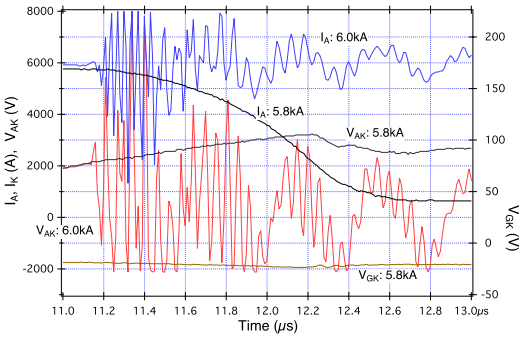


Fig.1 Turn-off Measuring Circuit Using Clamped Snubber



上記破壊点の拡大図

(補足資料 2012 #6-p.5)
(I_A-I_K) はゲートに流れる。 IGBTのL負荷オフ試験も同じで行い、同様のI_A, V_{AK}波形を示す。
Clamped snubberを使用しているが、それによる電力損失がないこともあって"スナバレス"と称す。

大容量変換器でのGCT/IGBTの使用動向

300Hz～400Hz以下: GCT (低オン電圧)
以上: IGBT (低SW損失)

GCTは、並列動作の例なし。直列動作例あり。
IGBTは、並列動作も、直列動作も行われている。
ゲート回路小型化は大きな利点。

システムの発熱量を抑えることが最大要件

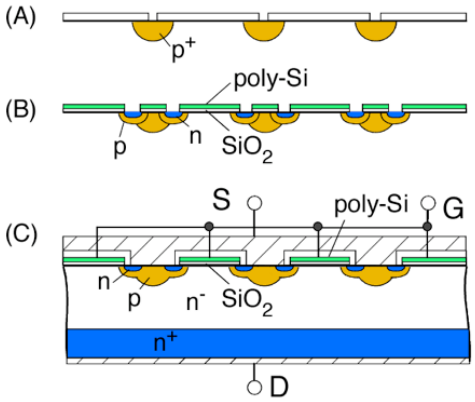
大容量変換には 1～3パルス動作が適する。
自励送電は送/受装置間の連携不要。無効電力制御可。
(SiCデバイスに期待する)

ThyristorとIGBTの定格項目

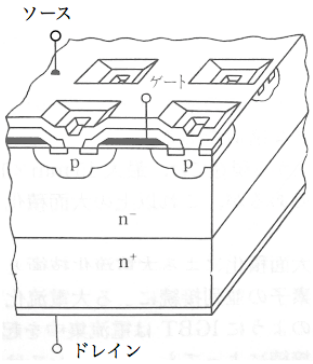
	6kV 4kA GCTサイリスタ @125°C		3.3kV 1.2kA IGBT @25°C	
最大定格	ピーク繰返しオフ電圧	6 kV	コレクタ-エミッタ電圧	3.3 kV
	直流オフ電圧 (100FIT保証)	3.6 V		
	平均オン電流(60Hz半波, 70℃)	1.2 kV		
	実効オン電流	1.8 kV		
	繰返し可制御電流	4 kA		
	サージ オン電流 (60Hz 半波 1cycle)	25 kA	コレクタ電流	1.2 kA (pulse)2.4 kA
			コレクタ損失	15,630 W
電気特性	オフ電流	150 mA	コレクタ遮断電流	1 mA
	オン電圧 (@ 4kA)	3.8 V	コレクタ-エミッタ 飽和電圧 (@ 1.2kA) 25℃ / 125℃	3.8 V (標準) / 4.0 V (")
	遮断エネルギー/パルス (@ 4kA, V_D=3kV)	15 Ws		
	蓄積時間 (t_s)	2.5 μs	ターンオフ・タイム (t_{off})	2.5 μs
	熱抵抗 (接合-フィン)	0.011°C/W	熱抵抗 (接合-ケース) (ケース-フィン)	0.008 °C/W / 0.006 °C/W

(配付資料 2015 #6-p.6) :高田
サイリスタ, GTO, GCTは、IGBTよりも丁寧な規格である。特に、熱特性。

DSA MOSFETの構造
(Diffusion Self-Alignment)



縦形DSA-MOSFETとその製造順序



多角形ソース

(配付資料 2015 #6-p.7) :高田

酸化膜とその上の(後にゲート電極になる)多結晶シリコンに開けた同じ穴から行うp形とn形の二重拡散の深さの違いを利用してチャネル領域を形成する。
チャネル長を稼ぐために、セルの形状は表面から見て多角形を基本とする。(IGBTは、長方形のセルを基本としている)

<解説>

1.サイリスタ(Thyristor)は、pinダイオードのカソードn領域のi領域側にp領域(ゲート)を設けた構造である。このゲート領域の一部にカソードを基準にして正電位を与えると、その箇所でアノードからカソードにかけて(カソード側npn部のトランジスタ動作を端緒にして) pinダイオード動作が(縦方向に)始まって、それがデバイス全面(横方向)に拡がって均一動作する。このオン状態は、内部の電荷担体分布も電気特性もゲートp領域のないpinダイオードと同じとなる。(p.1)

2.ウエハ径が大きくなるにつれ、オン時の破壊を防ぐために中央ゲートとなり、補助サイリスタで主サイリスタを駆動する形になった。Cathode short構造は、高dV/dt時の変位電流によるオン動作を防ぐために設けられた。(p.1)

3.サイリスタを無理やりインバータに使う場合には、転流回路を設けた。オフ時にC_Tは充電される。オンしたい時、転流回路のサイリスタT_TをオンさせてL_TとC_Tによる共振電流を、主サイリスタに重畳させる。$I_{T2}>I_T$ならオフする。(p.2)

4. GTO (Gate Turn Off thyristor)は、カソード領域幅を極力狭くして、I_Aの1/3〜1/5の$-I_G$を流すことでオフ能力を得た。

5. GCT (Gate Commutated turn-off Thyristor)は、ゲート全回路のインダクタンスを極力減らし、巨大なゲート電源を用いてオフ時に全電流I_Kをゲート端子に転流する。(p.3, p.4)

6.アノード電流I_Aが流れカソード電流I_Kが途絶えている期間、I_Kはゲート電流として流れる($I_G=I_A-I_K$)。この期間、GCTはpip構造デバイスとして動作している(トランジスタのような増幅作用は無い)。(p.5)

7. GCTの遮断試験で用いるClamped snubberは、スナバ キャパシタが電源電位となっている。GTOスナバと異なって、≈1V〜電源電位と変動しない。巨大電流は流れず、エネルギー損失も全く無い。 (p.5)

8. GCTは、IGBTよりも通電能力が高いので、大容量の変換器や電源で優位である。ただし、300Hz〜400Hz程度以下の動作に限られる。その際、1〜3パルス動作が適している。Thyristor系の規格はIGBTより丁寧。(p.6)

9. MOSFETのチャネル部の機構と動作はICのそれと同じである。高耐圧を持たす為に長大なn^-領域があることと破壊の問題が異なっている。MOSFETデバイスは、抵抗とキャパシタの集まりと解釈できる。(p.7)

10.パワーデバイス用の縦型MOSFETでは、内蔵寄生pnダイオードの振る舞いに注意せねばならない。インバータ動作では、還流電流がこのダイオードにも流れて、貧弱なリカバリー特性が損失をもたらす。また、SiC MOSFETでは、リカバリー特性はかなり優秀であるが、V_F劣化現象をMOSFETも被る可能性がある。

11.又、定電流源によるMOSFET動作では、温度上昇とオン抵抗増大の正帰還による破壊も考慮すべきである。

(参考資料 2015 #6-p.8: 高田)

数百V用のMOSFETとして超接合(Super Junction) MOSFETが近年多く使われている。これは、逆方向電圧が加わった時、 極幅の狭いp領域とn領域が隣接箇所は実効的にi領域になることを利用している。多数の狭い(不純物濃度が実質等量の)p^+/n^+領域をSource-Drain方向に設ければ、逆電圧はp/n領域の長さ分のi領域で保持されて、オン電流は定抵抗のをn^+領域を流れることで低オン電圧を得る。