

電力用半導体素子

*1 橋本 理(はしもと おさむ) *1 大衛 建也(おおひら けんや) *1 遠藤 勝弘(えんどう かつひろ) *1 桐畑 文明(きりはた ふみあき)
 *1 水野 鉄哉(みずの てつや) *2 佐藤 安行(さとう やすゆき)

1 まえがき

電力用半導体素子は技術的に成熟段階に入り、適用装置からの要求に応じて、高耐圧化、大電流化、高機能化及び高速化が急速に図られている。

特に近年、進歩が著しい自己消弧機能を有する GTO サイリスタは、IC 技術を電力用サイリスタに導入した素子である。この GTO サイリスタは、ゲート信号によりオン・オフできるため、装置の小形化、高効率化及び低騒音化に効果を発揮でき、車両分野を中心に適用が拡大している。

無効電力補償装置などの高圧電力変換装置では、高圧側の主回路と低圧側の制御回路の間の電氣的絶縁が重要である。この絶縁性を強化する手段として、光信号による主回路の制御が最も効果的である。それを実現するために開発された素子が、光サイリスタである。国内においては、当初、電気点弧式の通常サイリスタを点弧させるために、高耐圧、小電流の光補助サイリスタを富士電機で開発した。その後、更に回路の単純化を図るために、大電流を通電できる光主サイリスタの開発が主流となっている。近年、この光サイリスタの高耐圧化、大電流化は著しく進んでいる。

大容量電動機駆動用インバータの小形化及び高効率化を図るために、電力用サイリスタのターンオフ時間を短縮することが重要である。富士電機では、この要求に応じるために、通常サイリスタと比べターンオフ時間の短い、中速サイリスタを開発している。

本稿では、これらの電力用半導体素子について、定格特性を中心に紹介する。

2 GTO サイリスタ

GTO サイリスタは、 $1 \sim 2 \text{ mm}^2$ の微小カソード面積を持つ小サイリスタが 1 枚のシリコン板上に数百本以上集積した素子である。この小サイリスタ群をシリコン板上で均一に製作することが、技術上の最大のポイントである。富士電機では、IC における微細加工技術の適用、均一で高精度な拡散法の開発、シミュレーションによる接合設計及びパターン設計の最適化、均一接触と大きなゲート電流を安定に引き出すことのできる組立技術の開発により、耐圧 2.5kV、可制御電流 1,000A の GTO サイリスタを既に製品化している。本 GTO サイリスタは車両用補助電源インバータなどに使用され、良好な運転実績を有している。その主要な特性について以下に述べる。

図 1 に本 GTO サイリスタの外観を示す。表 1 に定格特

図 1 GTO サイリスタ EFR 22-25 の外観

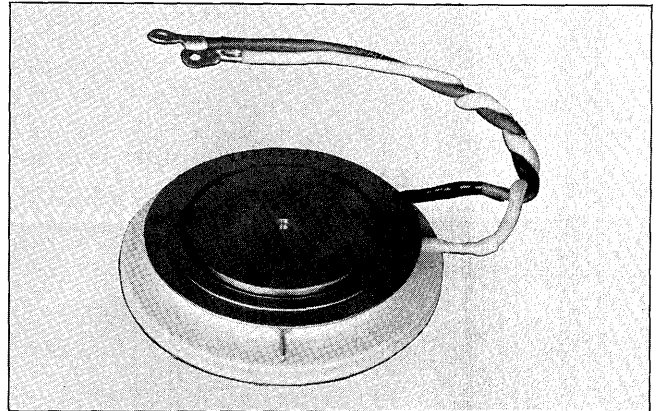


表 1 GTO サイリスタ EFR 22-25 の定格特性

項 目	EFR 22-25
ピーク繰返しオフ電圧	2,500 V ($V_{GK} = -5 \text{ V}$)
ピーク繰返し逆電圧	100 V
臨界オフ電圧上昇率 (dv/dt)	500 V/ μs ($V_{GK} = -5 \text{ V}$)
オン電圧	2.7 V (1,000 A, $T_j = 25^\circ\text{C}$)
可制御電流	1,000 A (2,000 V, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
実効オン電流	600 A ($T_C = 88^\circ\text{C}$)
臨界オン電流上昇率 (di/dt)	200 A/ μs ($\frac{1}{2} V_{DRM}$ からターンオン, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
せん頭ターンオン電流	200 A ($\frac{1}{2} V_{DRM}$ からターンオン, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
サージオン電流	7,000 A (50 Hz ベース, 1 サイクル定格負荷)
オフ電流	100 mA ($V_D = V_{DRM}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
接合温度	-40 ~ 125 $^\circ\text{C}$
保存温度	-40 ~ 125 $^\circ\text{C}$
熱抵抗	0.033 $^\circ\text{C}/\text{W}$ (平滑, 接合部-基準点間)
ゲートトリガ電圧	1.1 V ($T_j = 25^\circ\text{C}$)
ゲートトリガ電流	500 mA ($T_j = 25^\circ\text{C}$)
ゲート逆電圧	15 V
ターンオン時間	10 μs ($\frac{1}{2} V_{DRM}$, $i_G = 10 \text{ A}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$)
ターンオフ時間	25 μs ($V_D = 2,000 \text{ V}$, $I_T = 1,000 \text{ A}$, $di/dt = 20 \text{ A}/\mu\text{s}$, $dv/dt = 500 \text{ V}/\mu\text{s}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
圧接カ	1,500 \pm 150 kg (推奨値)

性を示す。

図 2 にオン電圧-オン電流特性を示す。拡散プロファイル、シリコン厚みの最適化とライフタイム分布の均一化により、1,000A のオン電流で 2.7V 以下のオン電圧を確保している。

*1 (株)富士電機総合研究所 電子デバイス研究所 *2 松本工場 第二製造部

図2 オン電圧 - オン電流特性

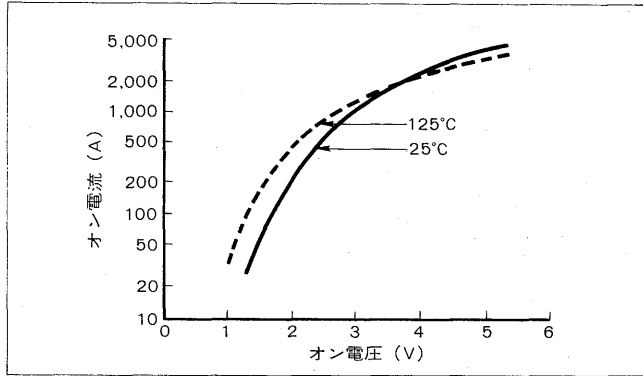


図3 GTOサイリスタ EFR 22-25 のターンオフ時の電圧 - 電流波形

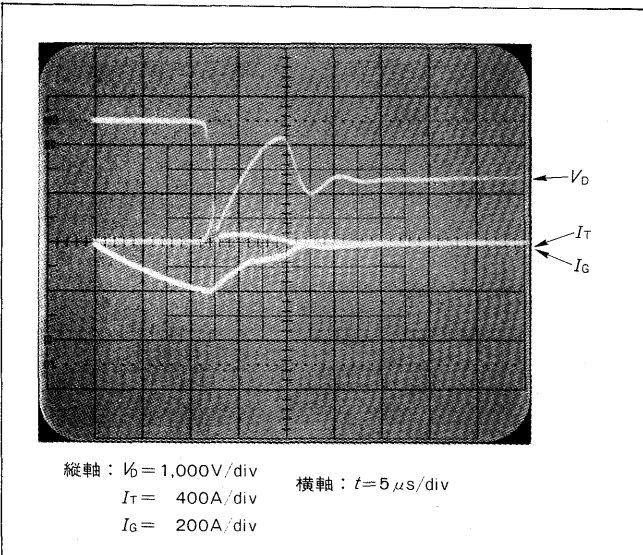


図4 ターンオン損失の di/dt 依存性 (代表例)

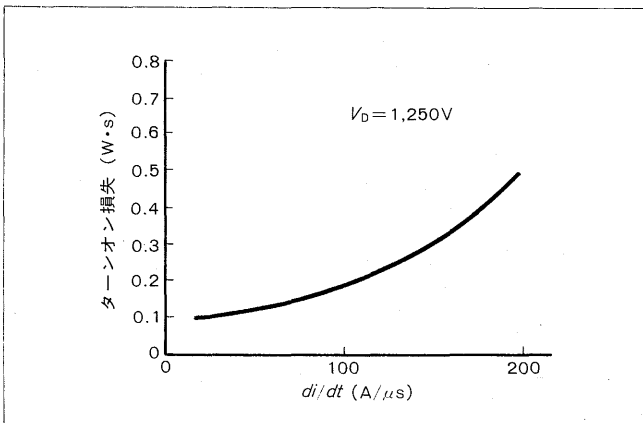


図3に1,000Aのアノード電流を遮断したときの電圧・電流波形を示す。小サイリスタ間の特性ばらつきを低減したことにより、到達電圧2,000V、 dv/dt : 500V/ μ s、 di_G/dt : 20A/ μ sで1,000Aのアノード電流を遮断している。図4にターンオン損失の di/dt 依存性を示す。200A/ μ sの di/dt で0.5W·sのターンオン損失である。図5にターンオフ損失のアノード電流依存性を示す。1,000Aのアノード電流を遮断したときのターンオフ損失は、0.6W·sである。本GTOサイリスタは使用条件を選定することによって、1kHz

図5 ターンオフ損失のアノード電流依存性 (代表例)

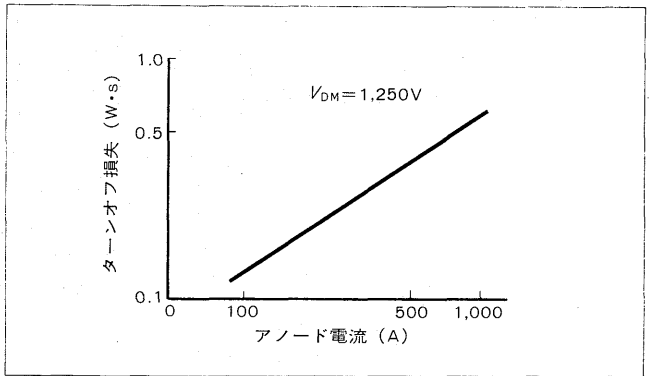


図6 受光部構造 (電極下のシリコン面)

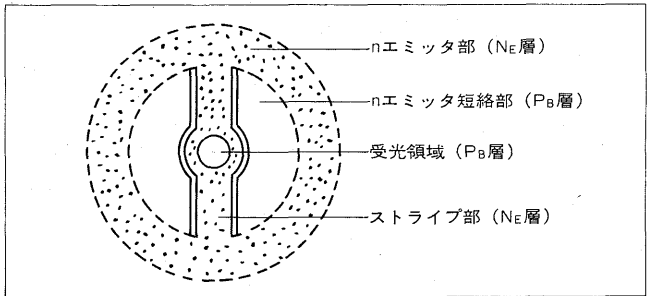


図7 光サイリスタ EKT 01-40 の外観

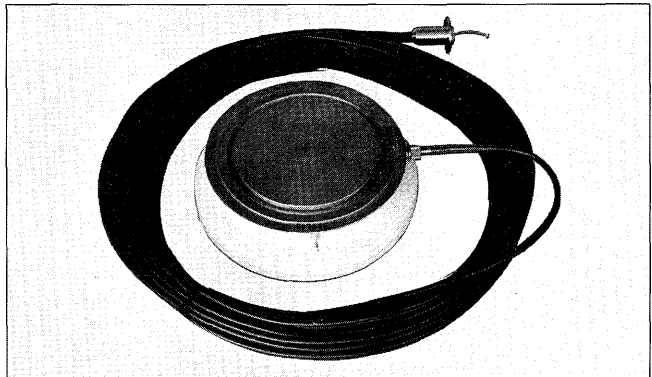


表2 高速ダイオード ERP 21-25 の定格特性

項目	ERP 21-25
ピーク繰返し逆電圧	2,500 V
順電圧降下	2.8 V (1,250 A, $T_j = 25^\circ\text{C}$)
平均順電流	400 A ($T_c = 80^\circ\text{C}$)
サージ電流	7,500 A (50 Hz ベース, 1 サイクル定格負荷)
逆電流	80 mA ($V_R = V_{RRM}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
逆回復電荷	400 μ C ($T_j = 125^\circ\text{C}$, $I_F = 1,000$ A, $-di/dt = 100$ A/ μ s)
接合温度	-40 ~ 125 $^\circ\text{C}$
保存温度	-40 ~ 125 $^\circ\text{C}$
熱抵抗	0.04 $^\circ\text{C}/\text{W}$ (平滑, 接合部 - 基準点間)
圧接カ	1,500 \pm 150 kg (推奨値)

程度の動作周波数まで使用できる。

本GTOサイリスタは、逆並列に高速ダイオードを接続して使用される場合が多い。この高速ダイオードの定格特

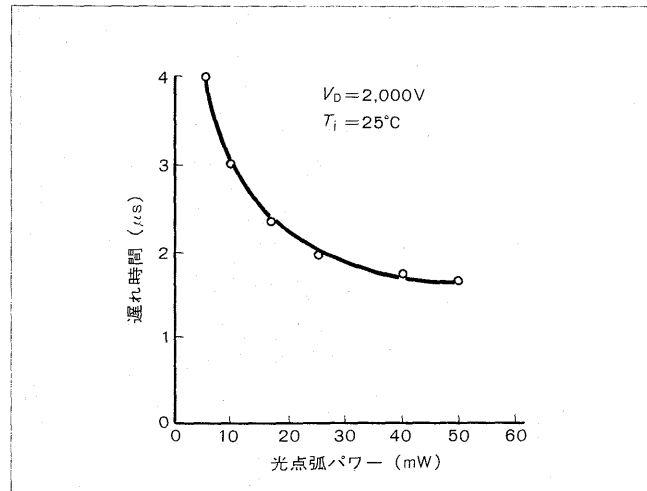
性を表2に示す。シリコン板の厚みとライフタイム制御の最適化により、耐圧2.5kV、平均電流400A、逆回復電荷400 μ sの高速ダイオードが開発された。

③ 光サイリスタ

光サイリスタは光信号によって制御される素子である。この光信号のエネルギーは、通常、電気信号のエネルギーに比べ小さいため、光サイリスタの点弧感度を高くする必要がある。一方、点弧感度が増大すると誤点弧しやすくなり、 dv/dt 耐量が低下する。更に、 dv/dt 耐量を改善するために受光面積を小さくすると、 di/dt 耐量が低下する。優れた光サイリスタを製作するためには、点弧感度、 dv/dt 耐量及び di/dt 耐量の三つのパラメータ間の協調をとることが重要である。富士電機では、この3特性間の協調のとれた受光部構造を開発し、光補助サイリスタに適用した。今回開発した4kV 1,500A光サイリスタの受光部構造は、この光補助サイリスタで実績のある富士電機独自の構造を適用している。図6にその受光部構造を示す。また、この光サイリスタは、 di/dt 耐量を一層向上させるために、特殊なゲート構造を採用している。図7に本光サイリスタの外観を示す。表3に定格特性を示す。その主な定格特性は、耐圧4kV、平均電流1,500A、最小光点弧パワー3mW、 dv/dt 耐量1,500V/ μ s、 di/dt 耐量250A/ μ sである。

図8に遅れ時間の光点弧パワー依存性を示す。光点弧パワーを40mW供給することによって、遅れ時間は2 μ s以下となる。

図8 遅れ時間の光点弧パワー依存性



④ 中速サイリスタ

通常の電力用サイリスタのターンオフ時間は、400 μ sが一般的である。近年、電動機駆動装置の小形化及び高効率化を推進するために、サイリスタのターンオフ時間の短縮化への要望が強い。この要望にこたえるために、2.5kV、1,000A、ターンオフ時間150 μ sの中速サイリスタを開発した。図9に中速サイリスタの外観を示す。表4にその定格特性を示す。ターンオフ時間を短縮するためには、ライフタイムの低減、シリコン厚みの低減、エミッタシヨート孔の高密度化などが必要である。ターンオフ時間以外の特性との協調を図るためには、これらの製造パラメータの最

表3 光サイリスタ EKT 01 - 04 の定格特性

項目	EKT01 - 40
ピーク線返しオフ電圧	4,000 V
ピーク線返し逆電圧	4,000 V
オン電圧	2.5 V (4,800 A, $T_j = 25^\circ\text{C}$)
平均オン電流	1,500 A ($T_c = 70^\circ\text{C}$)
サージオン電流	26,000 A (50 Hz ベース, 1 サイクル定格負荷)
臨界オン電流上昇率 (di/dt)	250 A/ μ s ($\frac{1}{2} V_{DRM}$ からターンオン, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
オフ電流	200 mA ($V_D = V_{DRM}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
逆電流	200 mA ($V_R = V_{RRM}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
接合温度	-40 ~ 125 $^\circ\text{C}$
保存温度	-40 ~ 125 $^\circ\text{C}$
熱抵抗	0.012 $^\circ\text{C}/\text{W}$ (平滑, 接合部 - 基準点間)
最小光点弧パワー	3 mW
遅れ時間	3.0 μ s
臨界オフ電圧上昇率 (dv/dt)	1,500 V/ μ s
ターンオフ時間	400 μ s ($V_D = \frac{2}{3} V_{DRM}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
圧接力	5,000 kg (推奨値)

表4 中速サイリスタ EGR 11 - 25 の定格特性

項目	EGR 11 - 25
ピーク線返しオフ電圧	2,500 V
ピーク線返し逆電圧	2,500 V
臨界オフ電圧上昇率 (dv/dt)	1,000 V/ μ s
オン電圧	2.5 V (3,200 A, $T_j = 25^\circ\text{C}$)
平均オン電流	1,000 A ($T_c = 60^\circ\text{C}$)
臨界オン電流上昇率 (di/dt)	200 A/ μ s ($\frac{1}{2} V_{DRM}$ からターンオン, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
オフ電流	150 mA ($V_D = V_{DRM}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
逆電流	150 mA ($V_R = V_{RRM}$, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
接合温度	-40 ~ +125 $^\circ\text{C}$
保存温度	-40 ~ +125 $^\circ\text{C}$
熱抵抗	0.025 $^\circ\text{C}/\text{W}$ (平滑直流, 接合部 - 基準点間)
ゲートトリガ電流	300 mA ($T_j = 25^\circ\text{C}$)
ゲートトリガ電圧	3.0 V ($T_j = 25^\circ\text{C}$)
ターンオン時間	5 μ s ($V_D = \frac{1}{2} V_{DRM}$, $I_{TM} = 2,000$ A, $I_G = 1$ A, $di_G/dt = 0.5$ A/ μ s, $T_j = 25^\circ\text{C}$)
ターンオフ時間	150 μ s ($V_D = \frac{2}{3} V_{DRM}$, $I_{TM} = 1,500$ A, $V_R = 100$ V, $T_j = 125^\circ\text{C}$)
圧接力	3,000 kg

図9 中速サイリスタ EGR 11-25 の外観

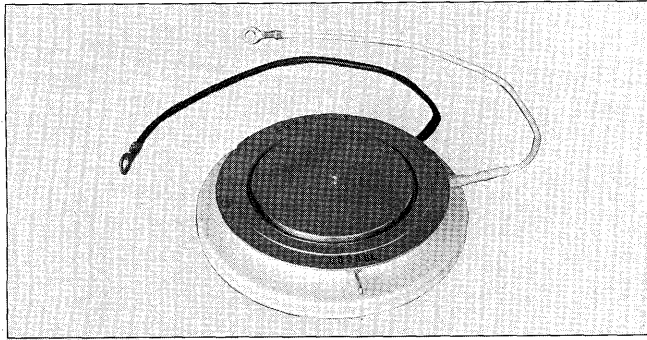
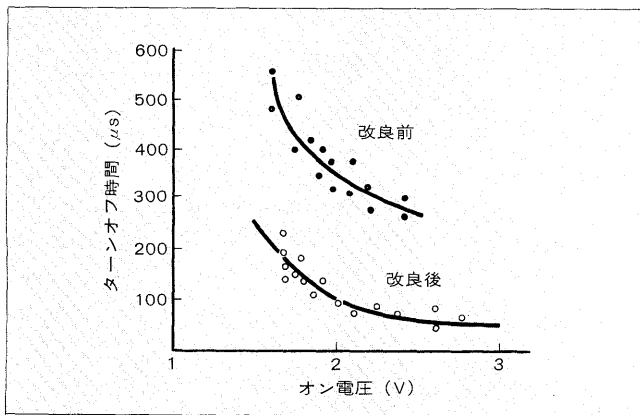


図10 ターンオフ時間とオン電圧の相関



適化がポイントとなる。図10にターンオフ時間とオン電圧の相関を改良前と改良後について示す。三つの製造パラメータの最適化により、オン電圧2.5Vでターンオフ時間150 μ sを達成している。

5 あとがき

最近、進歩の著しい電力用半導体素子について、富士電機の現状を簡単に述べた。

電力用半導体素子は各種電力変換装置からの種々の要求を満たすべく、今後一層、高耐压化、大電流化、高機能化及び高速化が進むことが期待される。

参考文献

- (1) 佐藤安行ほか：大電力用半導体素子，富士時報，53，10，pp. 735～738 (1980)
- (2) O.Hashimoto et al. : A High Voltage, High Current Light-Activated Thyristor with a New Light Sensitive Structure, 1981 Power Electronics Specialist-Conference pp. 226～231
- (3) 橋本理ほか：車両用大容量半導体素子，富士時報，56，3，pp. 213～216 (1983)

技術論文社外公表一覧

題 目	所 属	氏 名	発 表 機 関
混晶半導体の物性・評価 2.3.2 ラマン分光/2.3.3 光学的測定	富士電機総合研究所	豊田 太郎	混晶デバイス委員会調査報告書 (1984)
センサの信頼性技術 概論 (5章1節)	富士電機総合研究所	矢部 正也	センシングデバイス調査専門委員会報告書 (1984)
下水道とオートメーション	計測事業部	伊東 祐輝	水 26, 5 (1984)
DC Glow Discharge (Chapter 3)	富士電機総合研究所	内田 喜之	Semiconductors and Semi-metals, 21A (1984)
個人住宅用太陽光発電システムの開発	富士電機総合研究所	小野寺慶一	エネルギー資源研究会第3回研究発表会 (1984-4)
デジタルコントローラによる配水圧力制御	富士ファコム制御	黒谷 憲一	システムと制御研究発表講演会 (1984-5)
DP法によるポンプ最適運転の実施	富士ファコム制御	柄沢 隆	水道研究発表会 (1984-5)
ZnO-Pr ₆ O ₁₁ 系バリスタにおける添加物の効果	富士電機総合研究所 " "	丸山 哲 向江 和郎 永沢 郁郎	窯業協会 (1984-5)
燃料電池によるエネルギー変換	富士電機総合研究所	小林 喬	第36回化学機械技術講習会 (1984-5)
小径ロールによる孔型圧延特性の実験的検討	富士電機総合研究所	篠倉 恒樹	日本塑性加工学会 (1984-5)
不飽和ポリエステル樹脂組成物の摩耗特性	富士電機総合研究所	古庄 昇	高分子学会第33回年次大会 (1984-5)
繊維強化ポリアシドの繰返し曲げ疲労	富士電機総合研究所	丸山 茂	
計算機による配水コントロールの実施例	公共事業部	守本 正範	日本水質汚濁研究会水システム自動計測制御ワークショップ (1984-5)
浄水場薬品注入制御へのファジィ推論の適用	公共事業部	柳下 修	
立形多段焼却炉での計算機制御の応用	公共事業部	上野 健郎	
Preparation of a-Si:H Films and Devices in the Interdigital-vertical-electrode Deposition Apparatus	富士電機総合研究所 " " " "	酒井 博 丸山 和美 吉田 隆 市村 剛重 内田 喜之	17th IEEE Specialists Conference (1984-5)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。