

# 高耐圧・大容量 GTO と光トリガサイリスタ

High-Voltage, Large-Capacity GTO and LTT

岩崎 政美  
M. Iwasaki

原田 辰雄  
T. Harada

二村 知樹  
T. Nimura

特集  
II

大容量インバータでの応用装置のほか、車両用や電力変換用に GTO (Gate Turn-Off thyristor) が従来のサイリスタに代わって用いられるようになってから約 15 年近くになる。近年では、GTO をさらに大容量化するとともに、応用装置のより小型・高性能化が図れるよう、電気的特性を改善した高耐圧・大容量 GTO が開発されている。

また、安定した電力供給のための直流送電 (HVDC) や静止型無効電力補償装置 (SVC) などの高電圧分野には光トリガサイリスタ (LTT: Light Triggered Thyristor) の使用が定着しつつある。当社が開発した 8 kV-3,500 A 定格の LTT は世界最大級の大容量をもつ電力用半導体デバイスである。

The ratings of gate turn-off thyristors (GTOs) and light-triggered thyristors (LTTs) have been growing year by year over the past approximately 15 years. GTOs and LTTs are power semiconductors that are widely used for power converter applications in the several-hundred-kVA and MVA range for rolling stock, static var compensators, high-voltage DC transmission systems, and large industrial motor drives.

This paper describes our 6kV-6kA GTO (anode-short type), 4.5kV-4.5kA GTO (reverse-blocking type) and 8kV-3.5kA LTT using 6-inch silicon wafers. These power semiconductors have the highest voltage/current ratings in the world for devices of this type, and can contribute to lower power losses in converter equipment.

## 1 まえがき

自己消弧機能をもつ GTO は、インバータ装置などの電力機器に広く応用され、急速に高耐圧・大容量化が進んだ。現在、4.5 kV-4,000 A~6 kV-4,000 A のものが実用化されている。

近年、GTO の応用分野でさらなる大容量装置への適用が可能で装置のより小型・高性能化が図れるよう電気的特性を改善した、電極直径 130 mm の 6 kV-6,000 A (SG6000JX27) 定格のアノードショート型および同直径で 4.5 kV-4,500 A (SG4500GXH25) 定格の逆阻止型 GTO を開発した。

また、HVDC や SVC などの高電圧分野に使用する電極直径 145 mm の 8 kV-3,500 A (SL3500LX21) 定格の LTT は、当社では初めて 6 インチウェーハを採用して開発した電力用半導体デバイスである。

ここでは、開発した GTO と LTT の設計、構造および電気特性を紹介する。

## 2 高耐圧・大容量 GTO

開発した当社 GTO の特長は、定常ロスとスイッチングロスの相関を大幅に改善した低損失型、低スナバ型となっていることである。この GTO の開発には、シリコンウェー

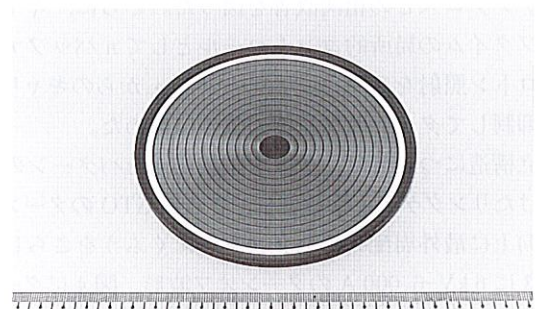


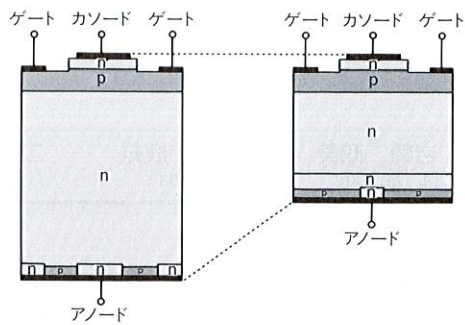
図 1. GTO SG6000JX27 のカソードパターン ベレット径 135 mm, 6 kV-6,000 A 定格のカソードパターンを示す。  
Cathode pattern of SG6000JX27 GTO

ハと熱緩衝板をろう付けしないアロイフリー構造を用いながら次の技術を採用している。

- (1) 高比抵抗の 6 インチウェーハ採用
- (2) n バッファ型のパンチスルー構造 (アノードショート型)
- (3) アノードショート率を含めた p エミッタ ( $p_E$ ) の最適化
- (4) カソードセグメント幅のより微細化
- (5) プロトン照射による選択的キャリアライフタイムコントロール技術

### 2.1 6kV-6,000A GTO SG6000JX27

図 1 に SG6000JX27 のカソードパターン、図 2 に断面構



(a)従来構造(ノンパンチ型) (b)新構造(パンチスルー型)

図2. GTO 単位セグメントの断面構造 n バッファのパンチスルー構造で n ベース層を大幅に薄くできる。

Cross-sectional views of GTO unit segment

造を従来型と比較して示す。

カソードセグメントは、幅約 200  $\mu\text{m}$ 、長さ約 4 mm で 6,000 本以上を放射状に配列してある。

ウェーハ設計については、宇宙線などによる直流オフ電圧印加中の破壊を避けるため、高比抵抗のウェーハを用いて直流 4 kV に耐える設計とした。また、n ベース層 ( $n_B$ ) はバッファ層を設けたパンチスルー構造とすることにより  $n_B$  厚を従来の GTO に比べ約 65 % まで薄くし、定常ロスとスイッチングロスとの相関改善を図った。さらに、キャリアライフタイムの局所的コントロールとして n バッファ層中にプロトン照射を適用し、アノード側  $p_E$  からのキャリア注入を抑制してターンオフ特性の改善に努めた。

組立構造については、ゲート圧接電極をパターンの外周に設けたリングゲート構造とし、さらに GTO のターンオフ能力向上に最外周配列のセグメントにくふうをこらした。

図3に 6 kV-6,000 A のターンオフ波形、図4にターンオフロス ( $E_{off}$ ) のオン電圧 ( $V_{TM}$ ) 依存性を従来型と比較して示す。改善レベルは、従来のノンパンチ型 GTO に比べ約 35 % となっている。なお、n バッファ構造を採用することで GTO のゲートトリガ電流 ( $I_{GT}$ ) が上昇するデメリットがあり、 $I_{GT}$  はターンオンとターンオフ時のスイッチング特性に

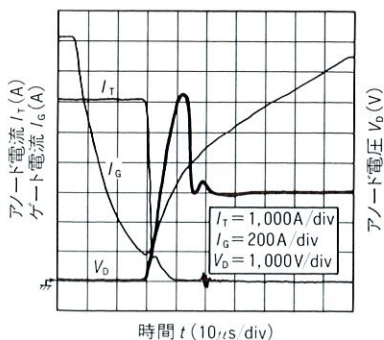


図3. GTO SG6000JX27 のターンオフ波形  $C_S=6 \mu\text{F}$  で 6,000 A のターンオフができています。

Turn-off waveforms of SG6000JX27 GTO

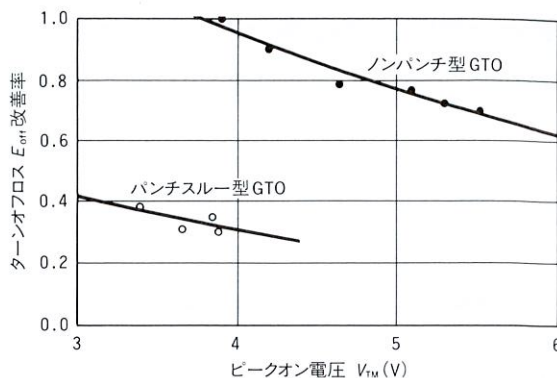


図4. GTO SG6000JX27 ターンオフロス ( $E_{off}$ ) のピークオン電圧 ( $V_{TM}$ ) 依存性 新構造は、 $E_{off}$  を 50 % 以上改善した。

Correlation between  $V_{TM}$  and  $E_{off}$  of SG6000JX27 GTO

大きく影響を与える重要なパラメータとなる。 $I_{GT}$  を低減させる方法は、n バッファ濃度をより低濃度に、アノードショートエミッタ ( $S_E$ ) の  $p_E$  とのショート率をより低減することであるが  $E_{off}$  特性を悪化させることになる。SG6000JX27 はこれらを実験と計算から実現した。

## 2.2 4.5 kV-4,500A GTO SG4500GXH25

逆阻止型の GTO は、従来サイリスタを使用した電流型インバータ装置に適しており、装置のより小型・軽量化を目的に開発されている。

今回開発した 6 インチサイズ GTO を含めて 4.5 kV の 800 A ~ 4,500 A 逆阻止型 GTO がラインアップしたことになる。SG4500GXH25 は電鉄用き電遮断機として採用され、特長は低いオン電圧 ( $V_{TM}$ ) で、高いピークターンオフ電流 ( $I_{TGM}$ ) 4,500 A を実現していることである。図5に 6 インチサイズ GTO (SG6000JX27 と SG4500GXH25) の素子外観、図6に 3.6 kV-4,500 A のターンオフ波形を示す。

## 2.3 最大定格と電気的特性

SG6000JX27 と SG4500GXH25 の最大定格を表1に、電気的特性を表2に示す。



図5. 6 インチサイズ GTO の素子外観 電極直径 130 mm、最大外形寸法 190 mm  $\phi$  の 6 インチ GTO 外観を示す。

External view of 6-inch size GTO

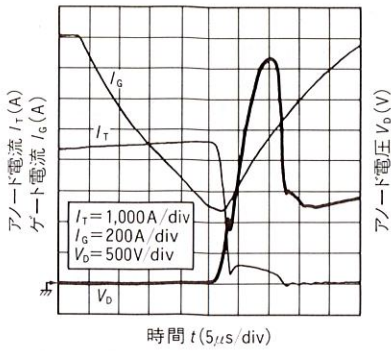


図 6. GTO SG4500-GXH25 のターンオフ波形  $C_S=6 \mu F$  で 4,500 A のターンオフができています。  
Turn-off waveforms of SG4500GXH25 GTO

表 1. GTO SG6000JX27 と GTO SG4500GXH25 の最大定格  
Maximum ratings of SG6000JX27 and SG4500GXH25 GTOs

項目	記号	SG6000JX27	SG4500GXH25
ピーク繰返しオフ電圧 (V)	$V_{DRM}$	6,000	4,500
ピーク繰返し逆電圧 (V)	$V_{RRM}$	17	4,500
ピークターンオフ電流 (A)	$I_{TGQM}$	6,000/6 $\mu F$	4,500/6 $\mu F$
実効オン電流 (A)	$I_{T(RMS)}$	2,700	3,000
臨界オン電流上昇率 (A/ $\mu s$ )	$di/dt$	500	300
接合温度 (°C)	$T_j$	-40~125	-40~115
圧接力 (kN)	—	80±8	109±11

表 2. GTO SG6000JX27 と GTO SG4500GXH25 の電気的特性  
Electrical characteristics of SG6000JX27 and SG4500GXH25 GTOs

項目	記号	SG6000JX27		SG4500GXH25	
		標準	最大	標準	最大
ピークオン電圧 (V)	$V_{TM}$	4.0 ( $I_{TM}=6 \text{ kA}, T_j=125^\circ\text{C}$ )	—	2.6 ( $I_{TM}=4.5 \text{ kA}, T_j=115^\circ\text{C}$ )	—
ゲートトリガ電流 (A)	$I_{GT}$	8.0 ( $V_0=24 \text{ V}, T_j=25^\circ\text{C}$ )	—	0.5 ( $V_0=24 \text{ V}, T_j=25^\circ\text{C}$ )	—
ターンオン遅れ時間 ( $\mu s$ )	$t_d$	1	—	1	—
ターンオン時間 ( $\mu s$ )	$t_{gt}$	5 ( $V_0=4 \text{ kV}, I_{TM}=6 \text{ kA}$ $di/dt=500 \text{ A}/\mu s$ $I_{GM}=80 \text{ A}, T_j=25^\circ\text{C}$ )	—	6 ( $V_0=2.25 \text{ kV}, I_{TM}=5 \text{ kA}$ $di/dt=300 \text{ A}/\mu s$ $I_{GM}=20 \text{ A}, T_j=25^\circ\text{C}$ )	—
臨界オフ電圧上昇率 (V/ $\mu s$ )	$dv/dt$	1,250 (最小) ( $V_{DRM}=4,000 \text{ V}$ $V_{GK}=-10 \text{ V}, T_j=125^\circ\text{C}$ )	—	1,000 (最小) ( $V_{DRM}=3,000 \text{ V}$ $V_{GK}=-4 \text{ V}, T_j=115^\circ\text{C}$ )	—
ターンオフスイッチングロス (J)	$E_{off}$	17 ( $I_{TQ}=6 \text{ kA}, V_{DM}=5 \text{ kV}$ $di_{GQ}/dt=60 \text{ A}/\mu s$ $C_S=6 \mu F, T_j=125^\circ\text{C}$ )	—	—	—
ターンオフ時間 ( $\mu s$ )	$t_{gq}$	—	—	48 ( $I_{TQ}=4.5 \text{ kA}, V_{DM}=4 \text{ kV}$ $di_{GQ}/dt=60 \text{ A}/\mu s$ $C_S=6 \mu F, T_j=115^\circ\text{C}$ )	—
熱抵抗(接合-フィン間) (°C/W)	$R_{th(j-f)}$	—	0.0044	—	0.0043

### 3 高耐圧・大容量 LTT

今回開発した 6 インチサイズ SL3500LX21 は、8 kV の高耐圧を維持し、かつ高い臨界オフ電圧上昇率 ( $dv/dt$ ) 特性、臨界オン電流上昇率 ( $di/dt$ ) 耐量と高光感度を同時に実現している。

GTO と同じくアロイフリー構造を用いて次の技術を採用

した。

- (1) 高比抵抗の 6 インチウエーハ
- (2) 多段増幅ゲート構造
- (3) プロトン照射による選択的ライフタイムコントロール
- (4) 組立圧接構造解析

#### 3.1 素子設計と構造

図 7 に SL3500LX21 のカソードパターン、図 8 にゲート構造の断面模式図を示す。

6 インチの大口径ウエーハであるが、 $p_B$  と  $p_E$  はイオン注入を用いた拡散で均一な拡散層が形成できている。

ウエーハ厚の増大はオン電圧 ( $V_{TM}$ ) と逆回復電荷 ( $Q_{rr}$ ) が増大するとともに  $V_{TM}$  と  $Q_{rr}$  はキャリアライフタイムに対しても大きく依存する。キャリアライフタイムコントロールには、これまで金や白金などの重金属拡散を用いていたため耐圧問題などがあった。今回の LTT で初めてプロトン照射による局所的 ( $p_E$  層に近い  $n_B$  層に) キャリアライフタイムコントロールを採用することで問題を解決し、 $V_{TM}$  と  $Q_{rr}$  の相関特性を約 70% まで飛躍的に改善した。また、LTT は小さな光トリガパワー ( $P_{LT}$ ) でも安全にターンオンできるように、ゲート受光部がきわめて高感度に設計されている。

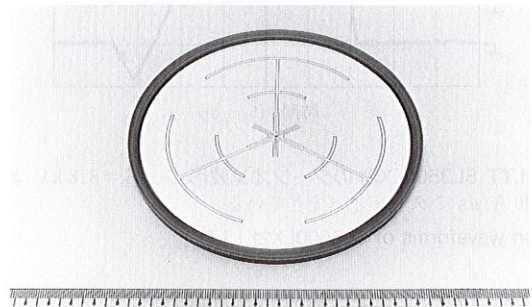


図 7. LTT SL3500LX21 のカソードパターン ペレット径 145 mm, 8 kV-3,500 A のカソードパターンを示す。

Cathode pattern of SL3500LX21 LTT

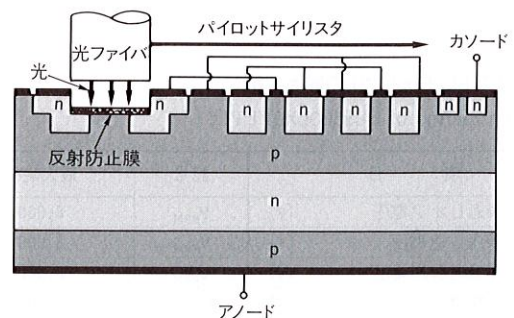


図 8. LTT SL3500LX21 ゲート構造の断面模式図 臨界オン電流上昇率 ( $di/dt$ ) 耐量改善に多段増幅ゲート構造を採用している。

Cross-sectional view of SL3500LX21 LTT gate structure

しかし、トリガ感度を著しく増加させた場合、 $dv/dt$  特性が低下する。これを避けるために受光部面積を小さくすると初期点弧領域が減少し  $di/dt$  耐量が低下する。

このように、 $P_{LT}$  と  $dv/dt$  特性と  $di/dt$  耐量との間には相関があり、反射防止膜を形成した受光部の深い n エミッタ ( $n_E$ ) 構造および多段増幅ゲート構造を導入することで高光感度を維持し、これら相関特性改善を同時に実現した。

図 9 にターンオン波形を示す。SL3500LX21 は、 $V_D=8.8$  kV より  $di/dt=500$  A/ $\mu$ s の条件下 (定格の 2 倍以上) でターンオンできることを確認している。

また、組立圧接構造については 6 インチサイズのシリコンウェーハを均一に圧接することが重要なため、圧接時の組立て構造解析を行い現在の構造を決定し均一な圧接を実現している。そのために実効電流が大きく、サージ電流耐量も高い LTT となっている。

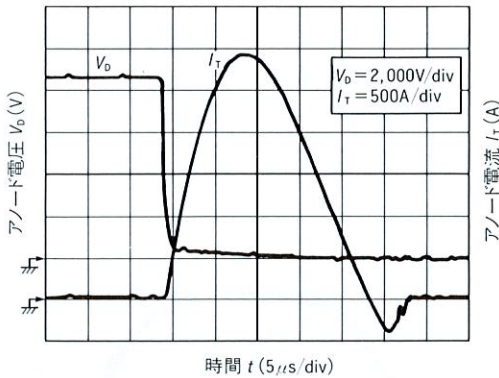


図 9. LTT SL3500LX21 のターンオン波形  $V_D=8.8$  kV より  $di/dt=500$  A/ $\mu$ s でターンオンできている。  
Turn-on waveforms of SL3500LX21 LTT

### 3.2 最大定格と電気的特性

SL3500LX21 の最大定格を表 3 に、電気的特性を表 4 に、示す。

表 3. LTT SL3500LX21 の最大定格  
Maximum ratings of SL3500LX21 LTT

項目	記号	最大定格
ピーク繰返しオフ電圧 (V)	$V_{DRM}$	8,000
ピーク繰返し逆電圧 (V)	$V_{RRM}$	8,000
ピーク非繰返し逆電圧 (V)	$V_{RSM}$	8,800
実効オン電流 (A)	$I_{T(RMS)}$	5,500
平均オン電流 (A)	$I_{T(AV)}$	3,500
臨界オン電流上昇率 (A/ $\mu$ s)	$di/dt$	200
接合温度 ( $^{\circ}$ C)	$T_j$	-40~120
圧接力 (kN)	—	98 $\pm$ 9.8

表 4. LTT SL3500LX21 の電気的特性  
Electrical characteristics of SL3500LX21 LTT

項目	記号	最小	最大	測定条件
ピークオン電圧 (V)	$V_{TM}$		2.7	$I_{TM}=2.8$ kA $T_j=25^{\circ}$ C
光トリガパワー (mW)	$P_{LT}$		8	$V_D=12$ V, $R_L=6$ $\Omega$ $T_j=25^{\circ}$ C
ターンオン遅れ時間 ( $\mu$ s)	$t_d$		5	$V_D=4$ kV, $P_{LT}=24$ mW $T_j=25^{\circ}$ C
ターンオン時間 ( $\mu$ s)	$t_{gt}$		10	
ターンオフ時間 ( $\mu$ s)	$t_q$		400	$I_T=2.5$ kA, $V_R \geq 500$ V $dv/dt=25$ V/ $\mu$ s $V_{DRM}=4$ kV, $T_j=90^{\circ}$ C
逆回復電荷量 ( $\mu$ C)	$Q_r$		3,200	$I_T=3.5$ kA, $T_j=120^{\circ}$ C $di/dt=5$ A/ $\mu$ s
保持電流 (mA)	$I_H$		300	$R_L=6$ $\Omega$ , $T_j=25^{\circ}$ C
臨界オフ電圧上昇率 (V/ $\mu$ s)	$dv/dt$	3,000		$V_{DRM}=4$ kV, $T_j=120^{\circ}$ C ゲートオープン
熱抵抗(接合-フィン間) ( $^{\circ}$ C/W)	$R_{th(j-f)}$		0.0035	—

## 4 あとがき

今回開発した GTO は、大容量のインバータ装置、電力変換装置各種の小型・軽量化と高信頼性化に、また LTT はサイリスタバルブのさらなるコンパクト化、低損失化、高信頼性化に貢献するものと考えている。

電力用半導体デバイスは、高耐圧、大容量化、高機能化、高性能化に向けてさらに発展していくと思われる。

## 文 献

- (1) 松田秀雄, 他: 最近の自己消弧デバイス, 東芝レビュー, 51, 4, pp.7-9 (1996)
- (2) TOSHIBA Electron Device News No.45 (1996)
- (3) 二村知樹, 他: 3500 A-8 kV 光トリガサイリスタ, 電子デバイス, 半導体電力変換合同研究会, EDD-95-86, SPC-95-69 (1995)
- (4) H. Matsuda, 他: HIGH POWER GTOs: PRESENT STATUS AND FUTURE TRENDS, CIGRE '95 Symposium Tokyo, CIGRE 600-05 (1995)
- (5) 松田秀雄, 他: 高直流耐圧 GTO サイリスタ, 東芝レビュー, 50, 12, pp.915-918 (1995)



岩崎 政美 Masami Iwasaki

多摩川工場大型電力素子技術部主務。  
大型電力素子の開発設計に従事。  
Tamagawa Works



原田 辰雄 Tatsuo Harada

多摩川工場大型電力素子技術部。  
GTO の開発設計に従事。  
Tamagawa Works



二村 知樹 Tomoki Nimura

多摩川工場大型電力素子技術部。  
LTT の開発設計に従事。  
Tamagawa Works