

大電流半導体素子

High Current Semiconductor Devices

佐藤 安行* 白井 祺一郎*
Yasuyuki Sato Kiichiro Shirai

I. ま え が き

最近の電力用半導体素子の定格、特性の向上はめざましく、高耐圧、大容量素子がつぎつぎと実用化されている。

すなわち、電力用サイリスタでは、2,500V、400A級サイリスタが圧延機の直流電動機駆動用整流装置などにおいて良好な運転実績をあげている。

一方、整流ダイオードでは、2,500~3,000V、800A級ダイオードが電鉄変電所用整流電源、アルミニウム製錬用直流電源などで、多数個使用され、すでにかんりの運転実績をあげている。

しかし、変換装置の大容量化に伴い、装置全体の経済性と信頼性の面から並列素子数を低減する必要があり、大電流素子に対する要望がますます強くなってきた。

一方、最近のシリコン単結晶精製技術の進歩により、シリコン単結晶の大直径化が進み、従来の約2倍の電流定格を有する素子の製造が可能となった。

さらに、半導体素子冷却技術の進歩は、大容量半導体素子の開発を促進する大きな要因である。

以上のような背景から、今回2,500V、1,000A級サイリスタEGR01-25と2,500V、1,600A級ダイオードERR01-25を開発し、製品化に成功した。

これら大電流半導体素子の出現により、圧延機用電源や電解用直流電源において、現在の2分の1以下に素子数を低減でき、装置の小形化とコストダウンが期待される。

また、従来ダイオードを使用していた、アルミニウム製錬用直流電源装置にEGR01形サイリスタを使うことにより、速応制御、無接触化による保守の簡便、小形化が可能となろう。

特に力率の低下、交流側の高調波発生を避ける目的で、ダイオード整流装置を使用する場合には、これと組み合わせる電圧調整用のサイリスタ式負荷時タップ切替装置への用途も考えられる。

電気車両の速度制御用変換装置では特に小形軽量に対する要求が強い。EGR01形サイリスタとERR01形ダイオードはこれらの要求を十分に満足する性能を有し、交

流電気車制御への応用が期待される。

また、電力事業関係への応用面に着目すると、将来、直流大電力輸送が実現する段階でこの種の大形素子の電流サイリスタバルブへの適用が期待される。

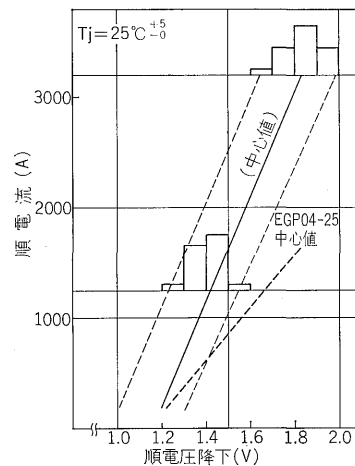
以下、EGR01形サイリスタ、ERR01形ダイオードの製造技術、定格と特性などを紹介する。

II. 製 造 技 術

シリコン直径が大きくなるに伴って、製造技術的にはシリコン単結晶の無欠陥処理、キャリアライフタイムのコントロール、シリコンと接触支持板の間の熱膨張差にもとづくエレメントの曲がりの低減など、小直径シリコンではあまり問題にならなかったことが新たに表面化した。これらを解決することによって、当社の半導体素子系列に新たに本素子をつけ加えることができた。

1. 順電圧降下

シリコン直径が大きくなると、単結晶自体の性質に加えて製造工程中にライフタイムの低下をまねく要因が多くなり、小直径の場合に比べて順電圧降下が大きくなりがちになる。この弱点を避けるために特に拡散工程の改良、熱処理方式の開発を行ない、同一電流密度に対して従来の全拡散形素子ERP01(3,000V、800Aダイオード)、EGP04(2,500V、500Aサイリスタ)に劣らぬ順電圧降下の素子を得ることができた。第1図にサイリスタEGR01の順電圧降下の分布を示す。この素子では無転位結晶を使用して均一な接合平面を確保し、拡散熱



第1図
EGR01-25の順電
圧降下分布
Fig. 1.
Distribution of
forward voltage
drop (EGR01-25)

* 中央研究所

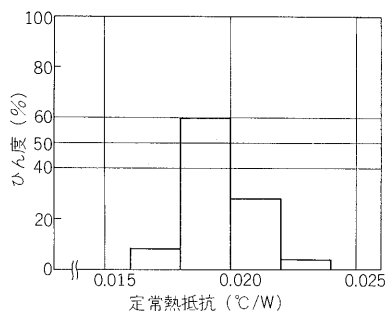
処理工程中にリンエイジなどの結晶欠陥が導入されないような製造法を確立して、均一な素材を最後まで維持できるようにしている。

2. 熱抵抗

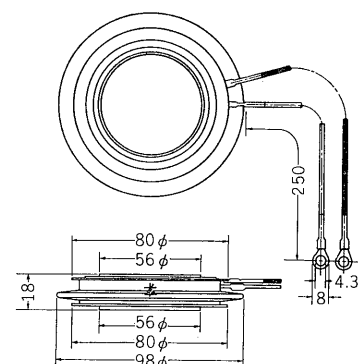
素子の直径に伴うもう一つの問題は、シリコン板とその接触支持板を合金化、融着した際にそれぞれの熱膨張差にもとづくエレメントの曲がり小直径のものと比較して大きくなることである。これに対しては支持板素材と合金化条件を検討して曲がりを極力少なくすると同時に、微少な曲がり特性や信頼性にまったく影響をおよぼさない組立方法を開発し、どの面からも問題がないことを確認した。素子の定常熱抵抗の分布を第2図に示す。素子の電流量は冷却方式全般の影響を受けるが、妥当と思われるケース温度と発生損失から算出された目標熱抵抗は0.025°C/Wである。これに対してかなり余裕のあることがわかる。

素子の外形図を第3図に示す。ケースの上下の電極、内部接触板、エレメントはケース内部ですべてお互いに滑動できるように重ねられ、運転時の熱サイクルに対して余分なストレスがかからないようになっている。

素子容量が大きくなると過電流耐量も大きくならな



第2図 EGR01-25の熱抵抗分布(接合部-冷却体内基準点間)
Fig.2. Distribution of thermal resistance between junction and reference point of cooling fin (EGR 01-25)



第3図
EGR01-25の外形図
Fig.3.
Size of the thyristor
(EGR 01-25)

なければならないが、これは大直径シリコンへの均一な接合面の形成と平形素子構造の特長である過渡熱抵抗の小さいことで達成されている。

3. 耐電圧特性

本素子の場合でも電圧阻止接合部はいわゆる二重拡散

によって形成されているから、内部降伏電圧と表面耐電圧の二点をともに高くとり、しかもこれを安定に得ることができる。また、大直径化の耐電圧特性におよぼす影響としては、断面内抵抗率のばらつき、接合部表面長の増大、大接合面積のための漏れ電流の増加があるが、これらはシリコンウエハの選別管理、加工精度と表面成形技術の向上、キャリアライフタイムの高水準保持によって充分カバーすることができる。また前述のように無転位結晶を素材とし、かつ無欠陥処理方式を確立したことも、耐電圧特性に良い効果をおよぼしている。

4. スイッチング特性

dv/dt 耐圧は、エミッタ接合面の平坦度と密接な関係があるから、素子の直径化による影響を受けやすい。本素子では、これまで述べたように全拡散技術の適用によって平坦な接合面が得られること、無転位結晶を使用ししかも無欠陥処理によって微少な接合面の凹凸も皆無としたこと、さらにエミッタ注入効率を小さくするような電極構造を採用することによって、従来品と同等の dv/dt 耐圧を得ている。しかしながら、 dv/dt を向上させるような構造は導通領域の広がりを悪化させる場合があるので、この点にも考慮を払って協調のとれた特性が得られるようにしている。

di/dt 耐量についても、ゲートから注入された電流が効果的に広い初期導通領域を形成するようゲート、カソード間の構造を決定し、その構造が精度よく形成されるように加工技術の精密化をはかることによって高い di/dt 耐量を得ている。

III. 定格および特性

1. 電流定格

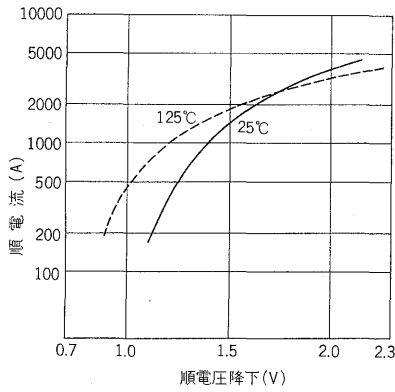
大電流定格を得るためには、素子の順電圧降下および熱抵抗が従来の素子よりもかなり低くなければならない。第4図、第5図にEGR01形サイリスタとERR01形ダイオードの順電圧降下特性を示す。一方、接合部基準点間熱抵抗はサイリスタ、ダイオードとも0.025°C/W以下である。

加圧接触構造を有する平形素子では、締付圧力によって接触電気抵抗、接触熱抵抗が変化する。第6図は順電圧降下の第7図は熱抵抗の、締付け圧力に対する変化を測定した結果を示す。これらから、2,000kgを標準締付け圧力としている。

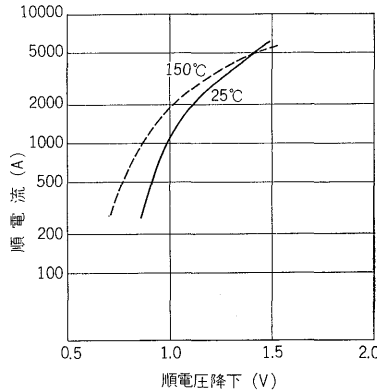
これら順電圧降下と熱抵抗の評価にもとづいて、サイリスタとダイオードの電流定格を求めた結果を、第8図、第9図に示す。

2. dv/dt 定格

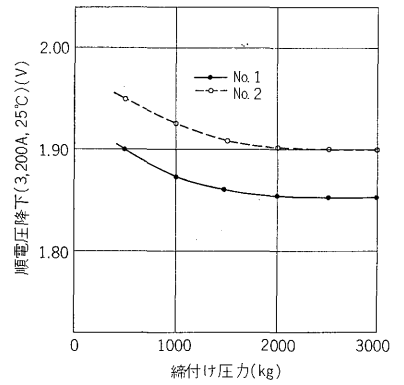
第10図に dv/dt と ブレークオーバー電圧との関係の代表例を示す。EGR01 形サイリスタの dv/dt 定格は、



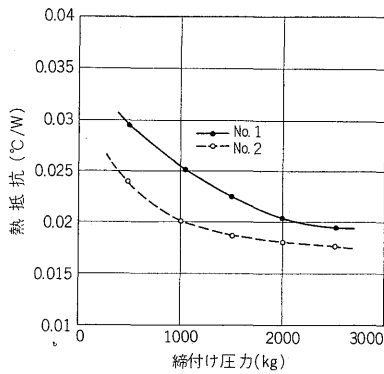
第 4 図 EGR01形サイリスタの順方向特性
Fig. 4. On-state characteristics (EGR 01 thyristor)



第 5 図 ERR01形ダイオードの順方向特性
Fig. 5. Forward characteristics (ERR 01 diode)

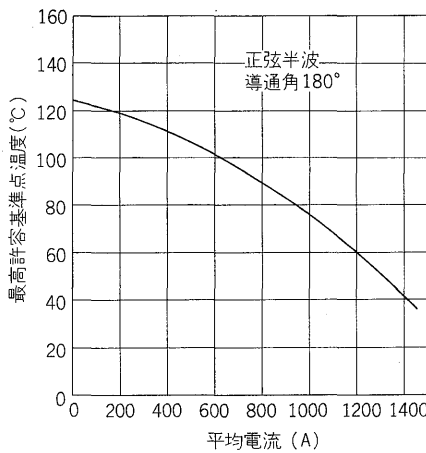


第 6 図 締付け圧力と順電圧降下 (EGR01形サイリスタ)
Fig. 6. Mounting force vs. on-state voltage (EGR 01 thyristor)

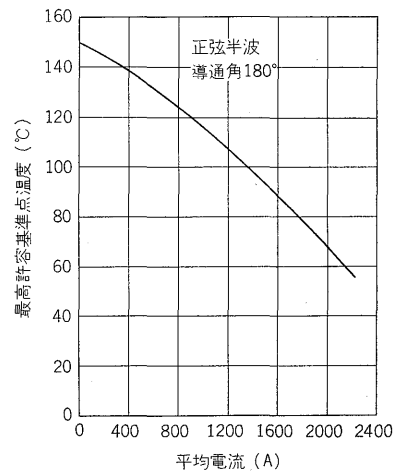


第 7 図 締付け圧力と熱抵抗 (EGR01形サイリスタ)

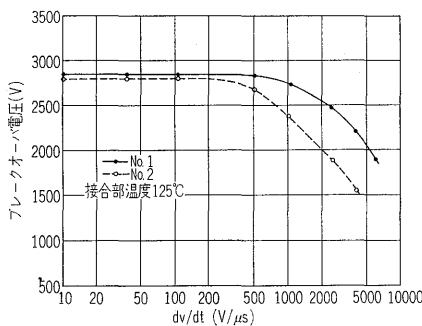
Fig. 7. Mounting force vs. thermal resistance (EGR 01 thyristor)



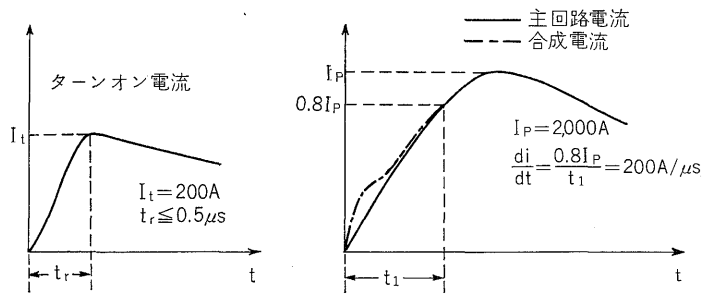
第 8 図 平均順電流対最高許容基準点温度 (EGR01形サイリスタ)
Fig. 8. Average forward current vs. maximum allowable reference temperature (EGR 01 thyristor)



第 9 図 平均順電流対最高許容基準点温度 (ERR 01ダイオード)
Fig. 9. Average forward current vs. maximum allowable reference temperature (ERR 01 diode)



第10図 EGR01-25 の dv/dt 特性
Fig. 10. Forward break over voltage vs. dv/dt (EGR 01-25)



ターンオン直前のアノード電圧: 1,300V
ゲートドライブ条件: $i_g=1.0A$ $di_g/dt=1.0A/\mu s$
接合部温度: 125°C

第11図 EGR01-25形サイリスタ di/dt 試験条件
Fig. 11. Test condition of di/dt test (EGR 01-25 thyristor)

接合部温度 125°C, 到達電圧 $\frac{1}{2} P F V$ において 2,000V/ μs 以上である。

3. di/dt 耐量

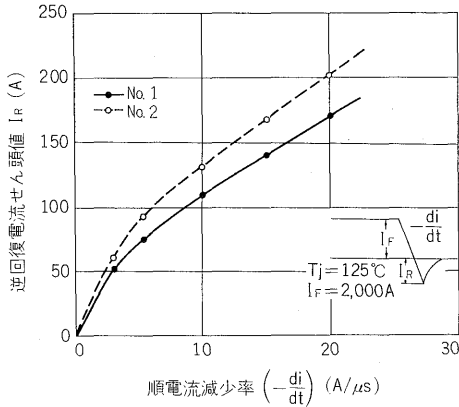
第11図はEGR01形サイリスタの di/dt 耐量試験条件である。ターンオン電流はサイリスタの並列RCフィル

タから流入する電流であり、回路がほぼ無誘導で形成されているので、サイリスタのターンオン特性のみで定まる急峻な立ち上りを有する。本サイリスタは 200 A/ μs の上昇率を有する主回路電流と、200Aのせん頭ターンオン電流との合成電流の責務に耐えることが確認され

た。

4. 逆回復特性

第12図にEGR01形サイリスタの順電流減少率と逆回復電流との関係を示す。これは逆回復時に印加される飛躍逆電圧せん頭値を抑制するための並列RCフィルタ定数決定に重要な特性である。⁽³⁾



第12図 順電流減少率と逆回復電流との関係 (EGR01形サイリスタ)

Fig. 12. di/dt vs. reverse recovery current (I_R) (EGR 01 thyristor)

5. 一般定格および特性

EGR01形サイリスタおよびERR01形ダイオードの定格および特性の一覧表を第1表、第2表に示す。

IV. 信頼性

最近の電力用半導体応用装置は、大きなシステムの一部として運転されることが多く、サイリスタおよびダイオードの信頼性に対する要求が高まっている。以下、大電流半導体素子に対して行なった、主な信頼性試験について述べる。

1. 高温放置試験

接合表面の安定性と内部接触面の安定性を確認するために、本試験を行なった。素子を実電圧状態にして、定格最高接合部温度で長時間放置する。EGR01形サイリスタ、ERR01形ダイオードとも、耐電圧特性、順電圧降下、熱抵抗などの特性変動はほとんど認められず劣化素子はまったく見られなかった。

2. 高温電圧印加試験

定格最高接合部温度において、定格耐電圧を長時間印加する試験を行ない、サイリスタ、ダイオードとも劣化がまったくないことを確かめた。

3. 連続通電試験

接合表面が汚損していると、電流通電により付着イオンの動きが活発になり、表面劣化を生じやすい。低圧通電試験と等価負荷試験とを実施した結果、サイリスタ、ダイオードとも劣化はまったくなく、良好な安定性を示した。

第1表 EGR01形サイリスタの定格および特性

Table 1. Ratings and characteristics of EGR 01 thyristor

項目	EGR01	
	20	25
定格せん頭逆耐電圧	2,000V	2,500V
定格せん頭順阻止電圧	2,000V	2,500V
過渡せん頭逆耐電圧	2,200V	2,750V
臨界順電圧上昇率 (dv/dt)	2,000V/ μ s ($1/2 \cdot P F V$ $T_j=125^\circ C$)	
最大順電圧降下	2.0V (25°C, 3,200A)	
定格平均順電流	1,000A (正弦半波180°導通, 基準点温度76°C)	
臨界順電流上昇率 (di/dt)	200A/ μ s ($1/2 \cdot P F V$ からターンオン, $T_j=125^\circ C$)	
せん頭ターンオン電流	200A ($1/2 \cdot P F V$ からターンオン, $T_j=125^\circ C$)	
サージ電流 (波高値) (正弦半波180°導通50Hzベース)	1サイクル 18,000A	5サイクル 12,000A
	15サイクル 9,000A	
最大保持電流	400mA ($T_j=25^\circ C$)	
最大逆もれ電流	50mA (定格せん頭逆耐電圧にて)	
最大順もれ電流	50mA (定格せん頭順阻止電圧にて)	
許容接合部温度	-40°C ~ +125°C	
保存温度	-40°C ~ +125°C	
熱抵抗	0.025°C/W (接合部基準点間)	
最大ゲートトリガ電圧	3.0V ($T_j=25^\circ C$)	
最大ゲートトリガ電流	300mA ($T_j=25^\circ C$)	
最小ゲート非トリガ電圧	0.2V ($T_j=125^\circ C$)	
最小ゲート非トリガ電流	3.0mA ($T_j=125^\circ C$)	
定格平均ゲート損失	5W	
定格せん頭ゲート損失	70W (パルス幅 $\leq 100 \mu$ s)	
定格ゲート逆電圧	5V	
最大ターンオン時間	6 μ s (ゲート電流 1.0A _{peak} , 1.0A/ μ s)	
最大ターンオフ時間	400 μ s ($T_j=125^\circ C$)	
標準縮付け圧力	2,000kg	
重量	480g	

第2表 ERR01形ダイオードの定格および特性

Table 2. Ratings and characteristics of ERR 01 diode

項目	ERR01	
	20	25
定格せん頭逆耐電圧	2,000V	2,500V
過渡せん頭逆耐電圧	2,200V	2,750V
最大順電圧降下	1.5V (25°C, 5,000A)	
定格平均順電流	1,600A (正弦半波 180° 導通, 基準点温度83°C)	
サージ電流(波高値) (正弦半波180°導通50Hzベース)	1サイクル 30,000A	5サイクル 20,000A
	15サイクル 16,000A	
最大逆もれ電流	50mA (定格せん頭逆耐電圧にて)	
許容接合部温度	-40°C ~ +150°C	
保存温度	-40°C ~ +150°C	
熱抵抗	0.025°C/W (接合部基準点間)	
標準縮付け圧力	2,000kg	
重量	480g	

第3表 EGR01形サイリスタおよびERR01形ダイオードの信頼性試験項目

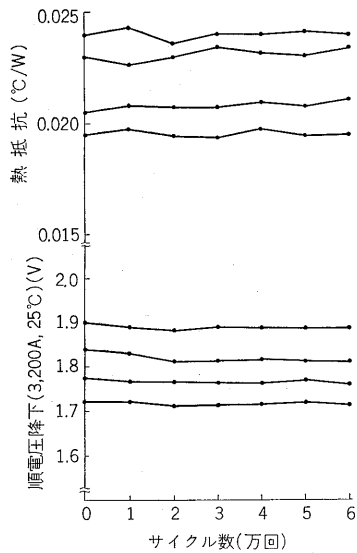
Table 3. Reliability tests of EGR 01 thyristor and ERR 01 diode

No.	試験項目	No.	試験項目
1	高温放置試験	8	冷熱サイクル試験
2	高温電圧印加試験	9	高温高湿試験
3	連続等価負荷試験	10	塩水噴霧試験
4	連続低圧通電試験	11	振動試験
5	※ di/dt 寿命試験	12	衝撃試験
6	※連続ゲート定格試験	13	加圧力試験
7	熱疲労試験	14	※ゲート端子強度試験

※はEGR01形サイリスタのみ実施

4. 熱疲労試験

大電流半導体素子は、シリコンペレットをはじめとして構成材料の径が大きくなるので、間欠負荷時の熱的ストレスが従来の素子に比べて一段ときびしくなる。そこで信頼性検証にあたっては、間欠電流通電による熱疲労試験に最重点をおいて試験を行なった。試料に定格平均順電流以上の電流を間欠通電して、接合部温度の変化量をサイリスタでは 80℃ 以上、ダイオードでは 110℃ 以上にした条件で、6 万回の繰り返し試験を実施した。その結果、EGR01 形サイリスタおよび ERR01 形ダイオードとも、順電圧降下、熱抵抗、耐圧などの諸特性の変動はほとんどなく、劣化素子は皆無であった。第 13 図は EGR01 形サイリスタでの試験結果の一例である。



第 13 図 EGR01-25 形サイリスタの熱疲労試験結果
Fig. 13. Example of thermal fatigue tests (EGR 01-25)

5. di/dt 寿命試験

前述の di/dt 耐量試験条件にほぼ等しいスイッチング責務を課し、平均接合部温度 125℃ で 5,000 時間以上の試験を行なった。その結果、劣化素子はまったくなく、定格表に示してある di/dt 耐量は、長期信頼性の観点からも充分保証できることがわかった。

6. そのほか

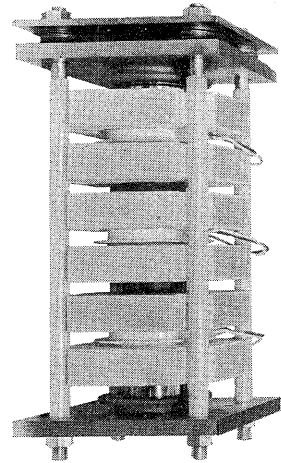
第 3 表に EGR01 形サイリスタおよび ERR01 形ダイオードについて実施した信頼性試験項目を示す。

これら一連の信頼性試験の結果、従来の電力用半導体素子と比較して、同等以上の信頼性を有することが確認された。

V. 冷却体

ここに紹介した大電流半導体素子は 1,000~2,000W におよぶ損失を発生するので、効率のよい冷却を行なう必要がある。冷却方法としては、水冷、油冷、化学冷媒によるふっとう冷却などが現在有効な冷却法とされている。

EGR01-25 形サイリスタを油冷スタックに組み込んだ一例を第 14 図に示す。本スタックは 2 組で三相純ブリッジを構成し、直流 2,500A 連続定格を満足する。



第 14 図 大電流サイリスタスタック
Fig. 14. Thyristor stack of EGR 01-25

スタック諸元

サイリスタ : EGR01-25

構成 : 1S1P3アーム (3 個)

冷却方式 : 送油 (冷却フィン間油速 1 m/秒)

冷却フィン : 銅 (CuP1-1/2H) 130□×29 t

2 フィンを 1 組とする

締付け圧力 : 2,000kg ± 10%

なお、この油冷スタックには、ERR01 形ダイオードも組み込むことができ、この場合三相純ブリッジ整流回路において、直流 4,000A 連続定格が可能となる。

VI. む す び

2,500V, 1,000A 級サイリスタおよび 2,500V, 1,600A 級ダイオードの製造技術、定格と特性、および信頼性について述べた。

これらの素子は現在、世界最高級の電流定格を有するものである。しかし、その応用面で大電流半導体素子の特長が充分発揮されるためには、冷却方式、過電流保護、過電圧保護協調などの素子応用技術に負うところが大きい。これら応用技術の一層の進歩とあいまって電気鉄道、鉄鋼、電解などの大容量変換装置へ本素子が広く応用されることが期待される。

参考文献

- (1) 佐藤・白井・松沢 : 全拡散大容量サイリスタ 富士時報 43 No.10 (昭45)
- (2) 角野・梅村 : サイリスタの表面電界強度 富士時報 43 No.7 (昭45)
- (3) 鈴木・沢・星 : サイリスタ変換装置の保護 富士時報 42 No.7 (昭44)



*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。