

# 全拡散大容量サイリスタ

## All Diffused High Power Thyristors

佐藤安行\* 白井禎一郎\* 松沢秀美\*  
Yasuyuki Sato Kiichiro Shirai Hidemi Matsuzawa

### I. ま え が き

すでに量産され、鉄鋼工業の分塊圧延設備およびピレットミル設備などにおいて良好な運転実績をあげている拡散合金形 2,500V 400A サイリスタ KGP 02 の静特性およびスイッチング特性をさらに改善するため、新たに全拡散形サイリスタ KGP 04 を開発し、量産段階に入った。

全拡散技術の開発、適用により、順電圧降下の低減、定格電圧における漏れ電流値の減少をはかるとともに、順電流上昇率の大幅な改良がなされ、素子の信頼性を増大させることができた。

本稿では KGP 04 の製造技術、素子構造、定格と特性および信頼性について述べる。

### II. 製 造 技 術

耐電圧特性、順電圧降下および  $dv/dt$ ,  $di/dt$ , ターンオフタイムなどのスイッチング特性の間には基本的に相矛盾する特性決定因子が存在する。これらの特性間の協調を最適化するための設計基準はすでに一部紹介されているが、これらの結果と今度新たに開発した全拡散法による製造工程上生ずる各因子について総合的な考察を加えることにより、シリコンの固有抵抗、直径、厚みおよび拡散プロファイルなどの最適設計が行なわれ、同時に再現性の良い製造工程が確立された。

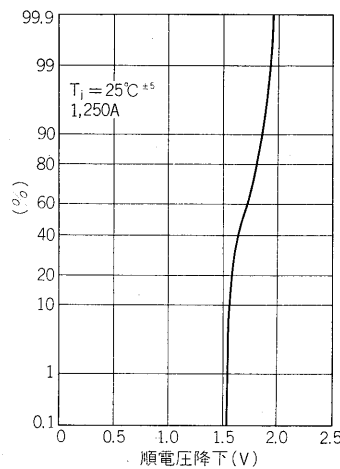
#### 1. 順電圧降下

拡散合金形サイリスタではカソード電極側に金-アンチモン箔を合金させることにより、n形層の形成と電極部形成を行なっているが、この場合カソードに隣接するpベース領域に金原子が拡散しライフタイムを低下させるという欠点があった。全拡散法ではV族元素の拡散によりn形層を形成させるため、このような欠点は除かれ、さらにその際の特異なゲッタ処理および徹底した拡散工程の管理による重金属混入の防止とあいまって、ライフタイムを従来素子に比べてさらに高水準に保つことができるようになった。

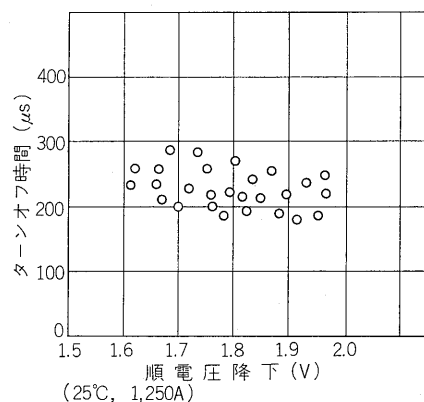
こうして作られたカソード部に対するオーミックコンタクトについては、その接触抵抗の少ないこと、および

熱的機械的特性の良好なことが不可欠の条件である。この点について種々の金属とその処理条件について検討を加え、接触抵抗のほとんどない条件を確立し、また 10 万回の熱サイクルに対しても熱的機械的に問題がなく、特性の劣化しないカソード電極の形成法を確立した。第 1 図に順電圧降下の分布を示す。

一方、ライフタイムを長く保つことは一般にターンオフ時間を長くするという不都合がある。この素子では接合構造の検討を行なってライフタイムが長いにもかかわらずターンオフ時間は短く保てるように考慮してある。その結果、第 2 図に示すように、ターンオフ時間は順電圧降下にあまり強い相関をもたずに短い値におさえることができた。



第 1 図  
KGP 04 の順電圧降下分布  
Fig. 1.  
Distribution of forward voltage drop (KGP 04)



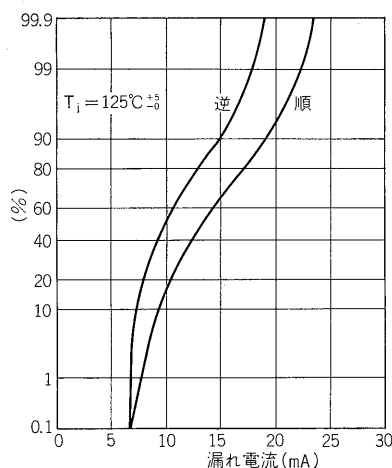
第 2 図 KGP 04 の順電圧降下とターンオフ時間の関係  
Fig. 2. Turn-off time vs. forward voltage drop (KGP 04)

\* 中央研究所

## 2. 耐電圧特性

当社のサイリスタでは n 形基板シリコンに対する p 形形成の拡散は III 族不純物を 2 種類用いたいわゆる二重拡散を行なっている。このため n ベース両端の不純物密度分布はゆるやかなこう配となっている。このことと、シリコン単結晶の転位密度、リニエイジ、固有抵抗の断面内ばらつきなどについての管理、ならびに加工精度の向上によって内部降伏電圧は充分高く保たれており、高温における漏れ電流も低くおさえられている。またこのような拡散プロファイルに対しては、実用上容易なベベル成形によって安定な表面耐圧が得られることが計算と実験の両方から確かめられている<sup>(3)</sup>。

第 3 図に高温における順、逆漏れ電流の分布を示す。



第 3 図 KGP04 の漏れ電流分布  
Fig. 3. Distribution of leakage current (KGP 04)

## 3. スイッチング特性

近時、臨界順電流上昇率 ( $di/dt$  耐量)、臨界順電圧上昇率 ( $dv/dt$  耐量) などのスイッチング特性の重要性について認識が高まっている。本素子においても次のような考慮をばらうことにより、従来の素子に比べて改良がなされている。

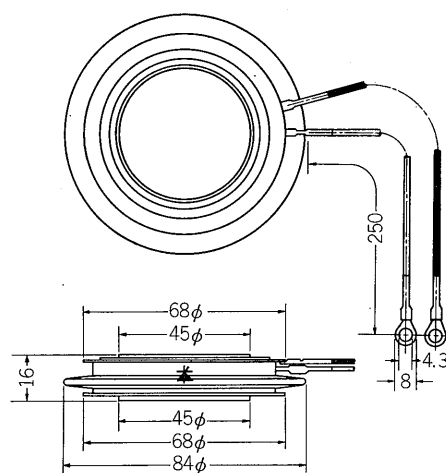
$dv/dt$  耐圧については、急峻な  $dv/dt$  印加に際してその変位電流がエミッタ効率を増大させないようにしていること、および全拡散形素子の特長の一つである接合面の良好な平坦度によって改良されており、 $2,000 \text{ V}/\mu\text{s}$   $\frac{1}{2}$  PFV まで耐える。

$di/dt$  耐量についても、平坦な接合面になっていることから均一な点弧過程を得られることが期待されるが、さらに初期導通領域を広げるためにゲート・カソード間の幾何学的配置構造について実験を行ない、最適なゲート構造を決定した。その結果ゲート近くのカソード面の広い領域にわたって同時点弧を行なうことが可能となった。ゲートの位置もセンタゲートとすることにより、導通領域の広がり時間を短縮させた。

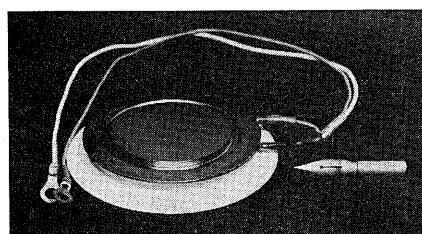
これらの実験およびその後の量産にあたってゲート・カソード間の位置関係を厳密に制御する方法は、フォトプロセス技術を駆使することによって確立した。

## III. 素子構造

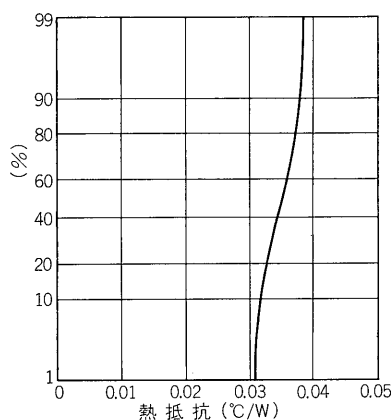
KGP04 の構造および外観を第 4 図、第 5 図に示す。周知のように平形素子は両面冷却方式の加圧接触構造のため、スタッド形素子に比べ内部熱抵抗を約半分に行なうことができることが特長である。本素子においても内部接触面の滑動、接触熱抵抗などについて、数多い熱疲労試験を



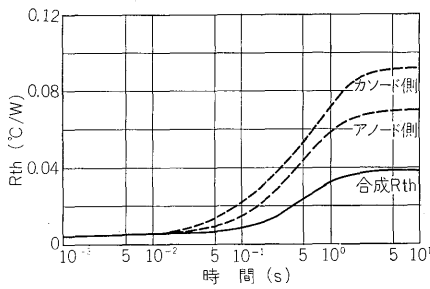
第 4 図 KGP04 の外形図  
Fig. 4. Size of the thyristor KGP 04



第 5 図 KGP04 の外観  
Fig. 5. Outer view of the thyristor KGP 04



第 6 図 接合部—冷却体内基準点間熱抵抗  
Fig. 6. Thermal resistance between junction and specified inner point of cooling fin (KGP 04)



第7図 KGP04 の過渡熱抵抗

Fig. 7. Transient thermal impedance (KGP 04)

わせ行なうことにより検討を加え、これらが最適の状態に保たれて平形素子の特長が充分発揮されるように考慮をはらった。その結果第6図に示すように、接合部と冷却体内基準点の間の定常熱抵抗はばらつきの少ない小さな値になっている。また、過渡熱抵抗は第7図に示すとおりであって、短時間領域での熱抵抗が小さいことから、良好なサージ電流耐量を得られることがわかる。

セラミックの沿面長はVDE規格のDグループ相当まで増加させることにより、過酷な使用ふんい気条件にも応じられるようにした。

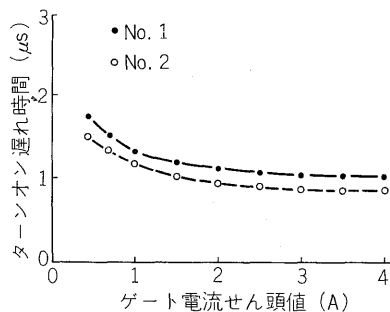
このほか、これまでの平形素子組立についての豊富な経験と実績をもとにした、ケース処理方法、ふんい気の制御、工程の自動化などにより、完全な表面処理を施されたエレメントは、特性劣化因子を全く付加されることなく封止されるようになっている。これらの結果、本素子の信頼度は高くなっている。

#### IV. 定格および特性

第1表に KGP04 形サイリスタの定格および特性を示す。素子適用上の諸問題を考慮しながら、素子開発を進めた結果、車両、鉄鋼、電解用などの大容量変換装置への応用上要求される性能を、十分に満足している。以下、代表的な事項について説明する。

##### 1. ターンオン特性

サイリスタを直並列接続して使用する場合、ターンオン



第8図 KGP04-25 のターンオン遅れ時間のゲート電流依存性

Fig. 8. Dependence of gate current upon delay time (KGP 04-25)

第1表 KGP04形サイリスタの定格および特性

Table 1. Ratings and characteristics of KGP 04 thyristor

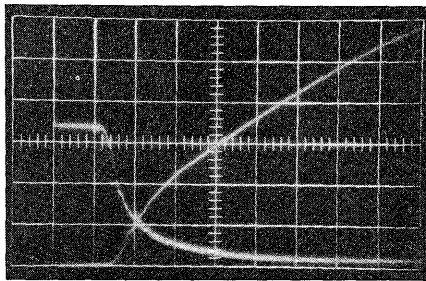
項目	KGP04	
	20	25
定格せん頭逆耐電圧	2,000 V	2,500 V
定格せん頭順阻止電圧	2,000 V	2,500 V
非くり返し逆耐電圧	2,200 V	2,750 V
臨界順電圧上昇率 (di/dt)	2,000 V/μs (1/2 × P F V)	
最大順電圧降下	2.0 V (T <sub>j</sub> =25°C, 1,250 A)	
定格平均順電流	485 A (正弦半波 180°導通, 基準点温度 80°C)	
臨界順電圧上昇率 (di/dt)	100 A/μs (1/2 P F Vからターンオンする. T <sub>j</sub> =125°C)	
せん頭ターンオン電流	200 A (1/2 P F Vからターンオンする. T <sub>j</sub> =125°C)	
サージ電流耐量	8,000 A (50Hz ベース半波 1 サイクル波高値)	
I <sup>2</sup> t 値 限 界 値	260,000 A <sup>2</sup> s	
最大保持電流	400 mA (T <sub>j</sub> =25°C)	
最大逆漏れ電流	30 mA (定格せん頭逆耐電圧にて)	
最大順漏れ電流	30 mA (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	0.04 deg/W (接合部基準点間)	
最大ゲートトリガ電流	300 mA (T <sub>j</sub> =25°C)	
最大ゲートトリガ電圧	3.0 V (T <sub>j</sub> =25°C)	
最小ゲート非トリガ電流	3.0 mA (T <sub>j</sub> =125°C)	
最小ゲート非トリガ電圧	0.2 V (T <sub>j</sub> =125°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 ≤ 100 μs)	
定格ゲート逆電圧	5V	
最大ターンオン時間	5.0 μs (ゲート電流 1.0 A <sub>peak</sub> , 1.0 A/μs)	
最大ターンオフ時間	300 μs (T <sub>j</sub> =125°C)	
標準締付圧力	1,000kg	
重 量	280 g	

ンの遅れ時間のばらつきが大きいと、電圧および電流に不平衡が生じ、ターンオンの遅れた素子にスイッチング損失が集中し、素子を損傷することがある。第8図にゲート電流と遅れ時間との関係の一例を示した。遅れ時間のゲート電流依存性が小さいことがわかる。その他、ターンオン直前のアノード電圧、接合部温度などの測定条件に対する依存性も小さく、しかも素子間のばらつきも小さい。変換装置を用いた並列接続実験の結果、ターンオン時の電流平衡が良好であることが確認された。

##### 2. 臨界順電流上昇率 (di/dt)

サイリスタ変換装置の大容量化にともない、素子の

$di/dt$  耐量に対して、一段と高い水準が要求されてきた。 $di/dt$  耐量の評価には、主回路電流の上昇率で決まる  $di/dt$  のほかにサージ電圧吸収用付属 RC 回路からのターンオン電流をも考慮しなければならない。過電圧抑制効果をあげるために、RC 回路はほとんど無誘導で構成されているので、ターンオン電流は素子のターンオン特性のみで決まる急峻な立ち上りを有し、かなりきびしいスイッチング損失を発生する。KGP04 形サイリスタに対しては、 $di/dt$  が  $100 \text{ A}/\mu\text{s}$ 、到達電流  $1,500 \text{ A}$  の主回路電流と、尖頭値  $300 \text{ A}$  のターンオン電流との合成電流波形で、接合部温度  $125^\circ\text{C}$  において耐量試験を行なった。第 9 図がそのときの電圧電流波形を示す。ターンオン電流の急峻な立ち上りが重畳されて、初期  $di/dt$  は  $400 \text{ A}/\mu\text{s}$  に相当し、素子に過酷な責務を課しているが、破壊素子はまったくなく、かなりの裕度をもって耐えることがわかった。



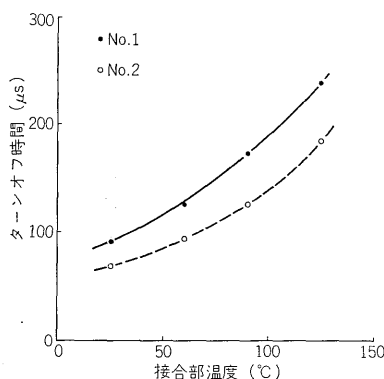
縦軸：電圧  $400 \text{ V}/\text{div}$   
電流  $200 \text{ A}/\text{div}$   
横軸：時間  $1 \mu\text{s}/\text{div}$

第 9 図 KGP 04-25 の  $di/dt$  試験波形

Fig. 9. Wave form in  $di/dt$  test (KGP 04-25)

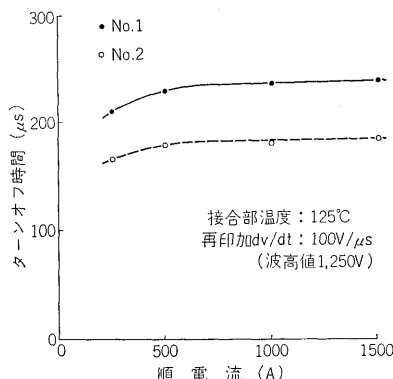
### 3. 臨界順電圧上昇率 ( $dv/dt$ )

最近、サイリスタの応用面の拡大とともに、素子に対して、高い  $dv/dt$  耐量が要求されてきた。サイリスタ変換器では、他のアームのサイリスタが点弧したとき、サイリスタのターンオン特性で決まる急峻な  $dv/dt$  が



第 12 図 KGP 04-25 のターンオフ時間の接合部温度依存性

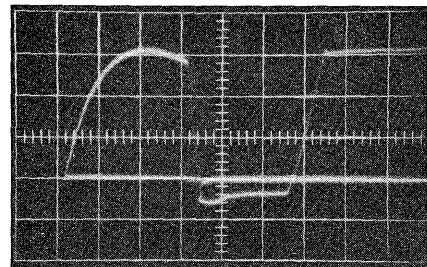
Fig. 12. Dependence of junction temperature upon turn off time (KGP 04-25)



第 13 図 KGP 04-25 のターンオフ時間の順電流依存性

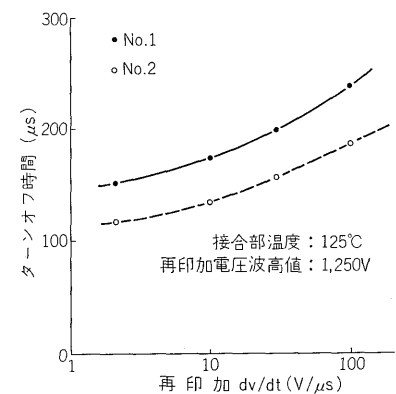
Fig. 13. Dependence of forward current upon turn off time (KGP 04-25)

縦軸：電圧  $400 \text{ V}/\text{div}$   
電流  $500 \text{ A}/\text{div}$   
横軸：時間  $100 \mu\text{s}/\text{div}$



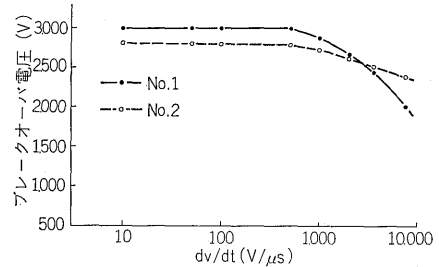
第 11 図 KGP 04-25 のターンオフ時間測定波形

Fig. 11. Wave form in turn off time measurement (KGP 04-25)



第 14 図 KGP 04-25 のターンオフ時間の再印加  $dv/dt$  依存性

Fig. 14. Dependence of reappplied  $dv/dt$  upon turn off time (KGP 04-25)



第 10 図 KGP 04-25 の  $dv/dt$  特性

Fig. 10. Forward breakover voltage vs  $dv/dt$  (KGP 04-25)

印加されることが多い。しかしながら KGP 04 形サイリスタは前述のようにカソード部に特別な考慮を払った結果、第 10 図の代表例で示すような高い  $dv/dt$  耐量を有するので  $dv/dt$  抑制用付属装置が非常に簡単なものですむようになった。

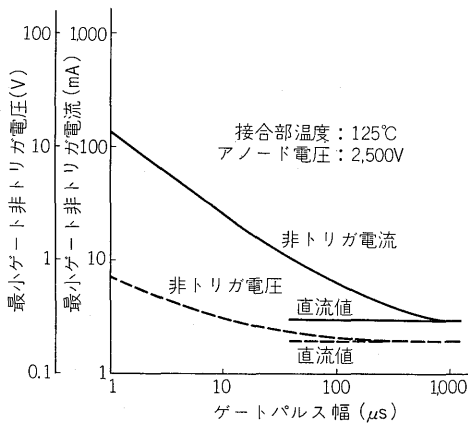
### 4. ターンオフ時間

第 11 図はターンオフ時間測定時の電圧電流波形を示したものである。第 12 図、第 13 図および第 14 図は、それぞれ、ターンオフ時間の接合部温度、順電流、および再印加  $dv/dt$  への依存性を示す。一般にターンオフ時間は測定条件の影響を受けるが、種々の測定条件でタ

ーンオフ時間を測定した結果、ほとんどの素子が 125℃ の接合部温度で、300 μs 以下であることがわかった。この程度のターンオフ時間であれば、レオナードなどの変換装置において、インバータ運転を行なうのに充分である。

5. ゲート非トリガ特性

ゲートノイズによるサイリスタの誤点弧の防止対策を行なううえで、ゲート非トリガ特性は重要な特性である。第 15 図はゲート非トリガ電流、ゲート非トリガ電圧のパルス幅による変化を示したものである。直流値として示されているのは、特性表中にあげられている保証値で、最小ゲート非トリガ電流が 3.0mA、最小非トリガ電圧が 0.2V である。これは一般に規格値として推奨されている値に対して、倍以上も大きく、実用運転で発生するゲートノイズはほとんど 10 μs 以下の短パルスなので、誤点弧防止対策にそれほど注意を払わなくてすむ。



第 15 図 KGP04-25 のゲート非点弧特性のゲートパルス幅依存性

Fig. 15. Dependence of gate pulsewidth upon gate nontrigger characteristics (KGP 04-25)

V. 信頼性

電力用サイリスタの信頼性に影響を与える劣化要因は多様に考えられるが、主なものをあげると次のようになる。

- 1) 接合表面の汚染にもとづく劣化。
- 2) 過度の接合部温度上昇やホットスポット形成にもとづくバルク劣化。
- 3) 熱的、機械的ストレスによる構成材料のひずみ。
- 4) 加圧接触構造における接触面の劣化。

素子の信頼性の保証は、劣化要因を充分に考慮した適切な信頼性試験のデータにもとづいて行なわなければならない。以下、KGP04 形サイリスタに対して実施した、主な信頼性試験について述べる。

1. 高温放置試験

素子を最高接合部温度で長時間放置する。この試験の主目的は、接合表面安定性と内部接触面の安定性を確

認することにある。多数の素子について試験を行なった結果、順逆阻止特性、順電圧降下、熱抵抗などの特性の変動はまったくなく、良好な安定性を示した。

2. 高温電圧印加試験

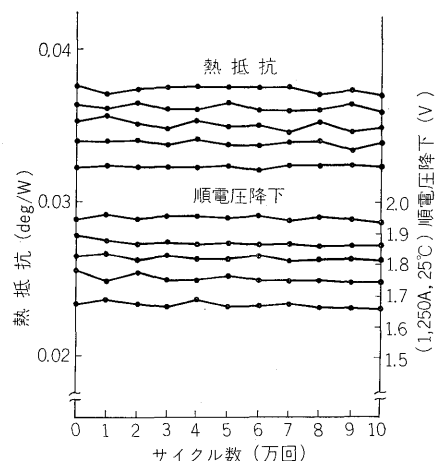
この試験は、最高接合部温度で、素子に定格せん頭耐電圧に等しい電圧を、長時間印加する。接合表面が汚染していると、付着イオンの動きが電圧印加によって活発になり、劣化が促進されるので、表面安定性を検証するのに有効な試験である。印加電圧の波形および極性などの条件を種々変えて試験を行なったが、いずれの場合も特性変動の大きな素子はなく、表面安定性がすぐれていることが確認された。

3. 連続通電試験

電流通電による接合表面の劣化は、電圧印加のときとは異なった劣化機構を呈するので、表面安定性試験として、高温電圧印加試験のほかに通電試験も実施しなければならない。その他、熱的応力に対する強度、接触安定性などについてもこの試験である程度検証できる。試験時の通電電流は定格平均順電流以上とし、そのときの接合部温度は最高接合部温度になるようにする。この試験には、低压通電試験と、阻止期間中に定格せん頭順逆阻止電圧に等しい電圧を印加する等価負荷試験とがある。8,000 時間以上の連続試験を行なった結果、いずれの試験においても、順逆阻止特性を始め諸特性の変動のある素子は、まったくなかった。

4. 熱疲労試験

KGP04 形サイリスタのような大容量素子では、使用されるエレメントの径が大きいため、間欠負荷通電を行なうと、温度変化にもとづく熱的ストレスが大きくなり、構成材料の熱疲労が問題となる。定格平均順電流以上の負荷電流を間欠的に通電し、接合部温度の変化量を 80℃ 以上にとって、責務を繰り返す。10 万回の試験を行なった結果、第 16 図の例に示すように、熱抵抗と順電圧降下は安定して、その他の諸特性もほとんど変



第 16 図 KGP04-25 の熱疲労試験結果

Fig. 16. Example of thermal fatigue tests (KGP 04-25)

動が認められず、構造的にも問題がなかった。

5. スイッチング損失寿命試験

ターンオン時のスイッチング損失によるホットスポットはシリコンペレットに局部的なひずみを与え、ひずみが蓄積されて素子故障にいたることがある。したがってスイッチング損失に対する素子の信頼性も信頼性試験にもとづいた保証をしなければならない。前述の  $di/dt$  耐量試験条件にほぼ等しいスイッチング損失を課し、平均接合部温度 125℃ で、5,000 時間以上試験を行なった結果、劣化素子は皆無であった。

第 2 表に KGP04 形サイリスタ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、良好な結果が得られ、従来の電力用サイリスタよりも、一段と高い信頼度を有することがわかった。

VI. む す び

2,500V 485A 全拡散平形サイリスタの新しい製法とその定格および特性について述べた。このクラスのサイリスタはすでに、広く工業用として使用実績を有して

第 2 表 KGP04 形サイリスタの信頼性試験

Table 2. Reliability tests of KGP04 thyristor

No.	試 験 項 目	No.	試 験 項 目
1	高温電圧印加試験	8	高温放置試験
2	連続等価負荷試験	9	高温高湿試験
3	連続低圧通電試験	10	塩水噴霧試験
4	スイッチング損失寿命試験	11	振 動 試 験
5	連続ゲート定格試験	12	衝 撃 試 験
6	熱 疲 労 試 験	13	加 圧 力 試 験
7	冷熱サイクル試験	14	ゲート端子強度試験

いるが、ここに述べたスイッチング特性の改良、信頼性の向上などにより、今後用途が一層拡大するものと期待される。

参 考 文 献

- (1) 春木・横山：サイリスタの電流電圧特性  
富士時報 40 No.9 (昭 42)
- (2) 小宮山・春木・木村：富士電力用サイリスタ  
富士時報 42 No.7 (昭 44)
- (3) 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)

発明の紹介

サイリスタの製造方法

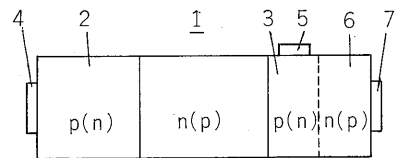
(特許 573667 号)

この発明は  $dv/dt$  値が大きく、点弧電流の小さいサイリスタを製造する方法に関するものである。

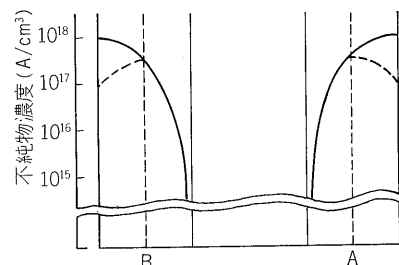
サイリスタは一般に第 1 図のような構造を持ち、次のような順序で作る。まず n (p) 形のシリコン基板 1 に両面からこの基板と反対の導電形を作る不純物を拡散して pnp (nnp) 3 層構成を形成し、次にこの 3 層構造の基板の一方の p (n) 形領域 2 にエミッタ電極 4 を設け、そして他方の p (n) 形領域 3 にゲート電極 5 と、基板と同じ導電形領域 6 およびこの領域に接続されるエミッタ電極 7 を設けて pnpn (npnp) 4 層構成に形成する。

この場合、3 層構成のシリコン基板中の不純物濃度分布は第 2 図に実線で示すように基板の表面が高不純物濃度になっているので、この発明においては、この基板中の不純物を逆拡散させることにより、不純物濃度分布を第 2 図の点線で示すように基板の表面で不純物濃度が低く、A、B 点で高不純物濃度となるように変えた後、P 形領域 3 の中に n 形領域 6 を設けて、4 層構成を形成する。

したがって、この発明によるサイリスタは、P 形ベース領域 3 の接合面付近が高不純物濃度となり、基板表面の不純物濃度が低くなる。これによって、サイリスタの点弧特性が改善され、 $dv/dt$  値を大きく、点弧電流を小さくすることができるようになる。



第 1 図



第 2 図



\*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。