

最近の汎用サイリスタ，ダイオード

Recent Hitachi General-use Thyristor and Diode

本稿は、汎用サイリスタ、ダイオードの信頼度向上と動特性改善に関する最近の進歩について述べた。前者についてはグラシベーション、後者ではPtドーピングを中心とした。

グラシベーション化の達成によって、素子のDCブロック耐量、破壊パワー耐量、耐湿性の向上及び高耐圧化が可能となり、信頼性が向上した。Ptドーピングは高圧ダイオードにおける高温逆漏れ電流を低減し、許容動作温度を向上させた。また、交流100/200V回路の無接点固体スイッチとして適用が進められている双方向性サイリスタ(FLS)については、構造を含めた設計改善によりその動特性を改良した。

これら新技術の採用によるシリーズ製品への展開、並びにゼロボルトスイッチ、漏電しゃ断器など、汎用サイリスタの新しい応用回路についても、その概要をまとめた。

佐々木威* Takeshi Sasaki

高橋徹也* Tetsuya Takahashi

坂本 久* Hisashi Sakamoto

池田裕彦* Yasuhiko Ikeda

1 緒 言

電力用の半導体素子は直流送電、新幹線などの工業用としてその大容量化を中心に発展してきたものと、産業用制御機器や家庭電化製品、電装品などの民生用に適用される中・小容量の汎用素子に二分される。大容量素子の目覚ましい技術進歩とともに、汎用素子も着実な進歩発展をとげている。近年、省資源、あるいは社会的製品責任の問題が大きく採り上げられるようになってきており、また、汎用素子の適用も複雑なシステムの分野にまで及んでいる。従って、素子に対しては従来以上に高い信頼性、安定性が要求されており、同時に価格の面でもいっそうのコスト低減が必要になってきた。これらにに応じて、多くの設計、製造プロセス技術の改善、進歩が図られているが、本稿ではそれらのうち、特にユニークなグラシベーション及びPtドーピング技術とその適用製品について述べ、更に設計技術の進歩についても触れることにした。

2 汎用素子の課題

2.1 汎用サイリスタ

汎用サイリスタが直面している課題は、信頼性の向上と低価格化である。特に後者については各分野におけるサイリスタの適用が進むにつれ、その要求が一段と強くなっている。従来は単に製造工程を簡略化するとか、キャンパッケージをプラスチックモールド方式に変更するとかでこの問題に対処しているきらいがあったが、これらの方向ではいわゆる信頼性の向上を同時に満足することが困難であった。すなわち、半導体素子の信頼性はその構造上必然的に端面で露出するPN接合を、動作時、並びに周囲環境に対していかに保護し得るかという問題にかかっており、これの解決なしに信頼性を向上させることは不可能なためである。従って、我々はまずこの接合の表面保護に力点を置き、いわゆるチップユニットとして安定化させる方法確立して信頼度を維持することにより、その展開として低価格化を図る方向が全体として有効であると考えた。

一方、最近では家庭電化製品を中心に双方向性サイリスタ^① FLS(一般にトライアックという。以下、トライアックと記す)が多用される傾向にある。トライアックは周知のように、サイリスタを逆並列に接続した一種のモノリシックモジュールであり、その動作機構はサイリスタに比べ更に複雑である。特にトリガ領域が4モードにわたっており、この点弧機構がそれぞれ異なるために、トリガ電流の値を全体的に小さくすることが困難であった。この問題は既存の集積回路(IC)とトライアックの両立性(compatibility)を阻害する大きな要因になっており、改善が望まれている。更にサイリスタを一つのチップの中で逆並列接続しているために起こる転流時の dv/dt によるオフ動作失敗、並びに過電流耐量不足など、トライアックの本格的な適用に当たって改良すべき点が残されており、素子構造を含めた設計の再検討が必要であると考えられてきた。

2.2 汎用ダイオード

ダイオードは半導体素子としては既に壮年期を迎えた製品であるが、信頼性の向上、動特性の改善に対する要求は根強い。我々は既に信頼性の高いガラスモールド型ダイオードを市販しているが、カラーテレビのブラウン管高圧整流用の高圧ダイオードについても、ガラスモールド方式の適用が可能になり量産に入っている。

この高圧ダイオードは高電圧、高周波領域で動作するために、高温での逆漏れ電流(以下、 I_r と省略する)、逆回復時間(以下、 t_{rr} とする)などの特性が重視される。 t_{rr} を小さくするためのライフタイムキラーとしては、従来よりAuドーピング方式が多用されているが、この方法を用いると高温での I_r が増大するという本質的な欠点があり、高電圧(8~15kVp)動作時に逆電流損失が増大して、素子の許容動作温度が低いところで制限される。この問題を解決するため、高温での I_r 増大を少なくするライフタイムキラーの適用が望まれてきた。

*日立製作所日立工場

3 新しい技術の適用

3.1 グラシベーション

グラシベーションとは“glass passivation”の略称であり、端面に露出しているPN接合部をガラス被膜で保護する新しい表面安定化（passivation）方式である。

半導体素子の接合部は本来「面」であるが、表面ではこれが「線」、あるいは局部的には「点」となって露出しており、動作時には、この部分の電位傾度が高く外部ふんい気の影響を受けやすい。

従来の表面安定化法はシリコン系の樹脂（ワニス、ゴムなど）、あるいはシリコンの酸化被膜などで接合部を被覆、保護する方法を中心に発展してきたが²⁾、耐ふんい気性と素子動作時の安定性を同時に満足する点においてなお完全とは言えない。

これに対し、ある種のガラスによる表面安定化法は次のような特徴をもっている。

- (1) 界面におけるストレスが電界的に緩和される。
- (2) 対ふんい気性が良い。
- (3) 被膜中の可動イオンの動きが阻止されるため素子動作時の特性経時変化が抑制される。

これらは、表面保護被膜として要求される機能をほぼ完全に満足するもので我々は既存のガラス モールド型ダイオードの実績を基礎にして、高圧ダイオードのガラス モールド化、汎用サイリスタのグラシベーション化を達成した。従来方式と比較した本方式の特徴、並びに適用素子の構造概要を表1、図1、2にまとめて示す。

グラシベーション方式の採用により、製品の性能は次のように向上した。

- (1) 直流電圧印加（以下、DCブロッキングと略す）耐量の向上
 - (2) 耐湿性の向上
 - (3) 高耐圧化の達成（汎用サイリスタ定格600V、高圧ダイオード定格12～18kVp）
 - (4) アバランシェ破壊耐量の向上（日立製作所製品比、約10倍）
- (1)、(2)の効果を図3、4に示した。

3.2 トライアックの動特性改善

3.2.1 瞬時過電流耐量

瞬時過電流耐量(I_{TSM})は近似的に次式で表わされる。

$$I_{TSM} \propto \frac{T_j(\text{limit}) - T_j(0)}{Z_{th} \cdot V_f} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $T_j(\text{limit})$ ：素子が瞬時に破壊する温度
 $T_j(0)$ ：初期温度
 Z_{th} ：過渡熱抵抗
 V_f ：順方向電圧降下

I_{TSM} 向上には(1)式より、 $T_j(\text{limit})$ の向上、 Z_{th} 、 V_f の低減が有効である。 V_f は耐圧との関連できまるため、 $T_j(\text{limit})$ 、

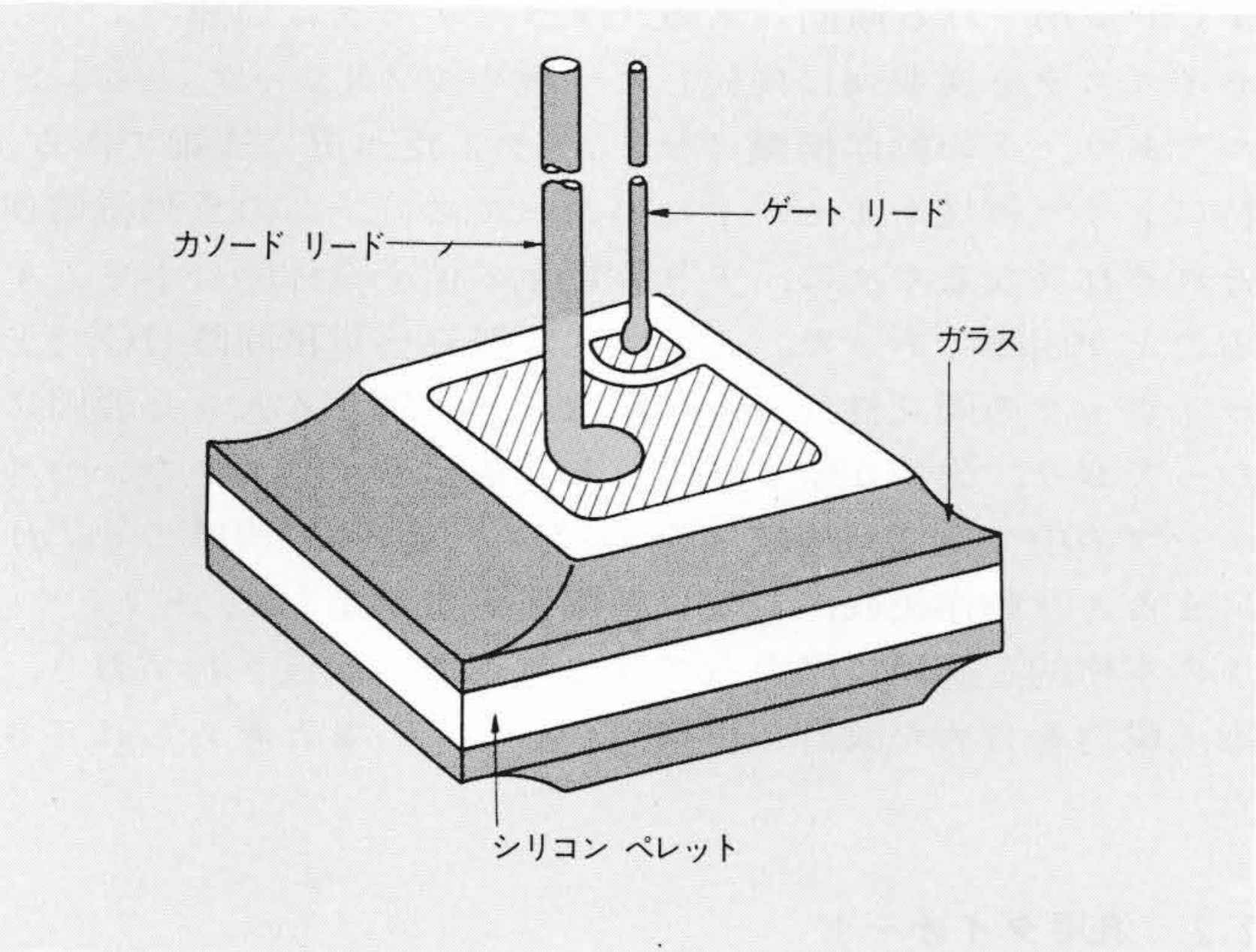


図1 グラシベーションサイリスタの内部構造 サイリスタの接合端面に露出しているPN接合部を安定なガラス被膜で保護し、高耐圧化、DCブロッキング耐量、耐湿性など諸特性を向上したグラシベーション素子の内部構造を示す。

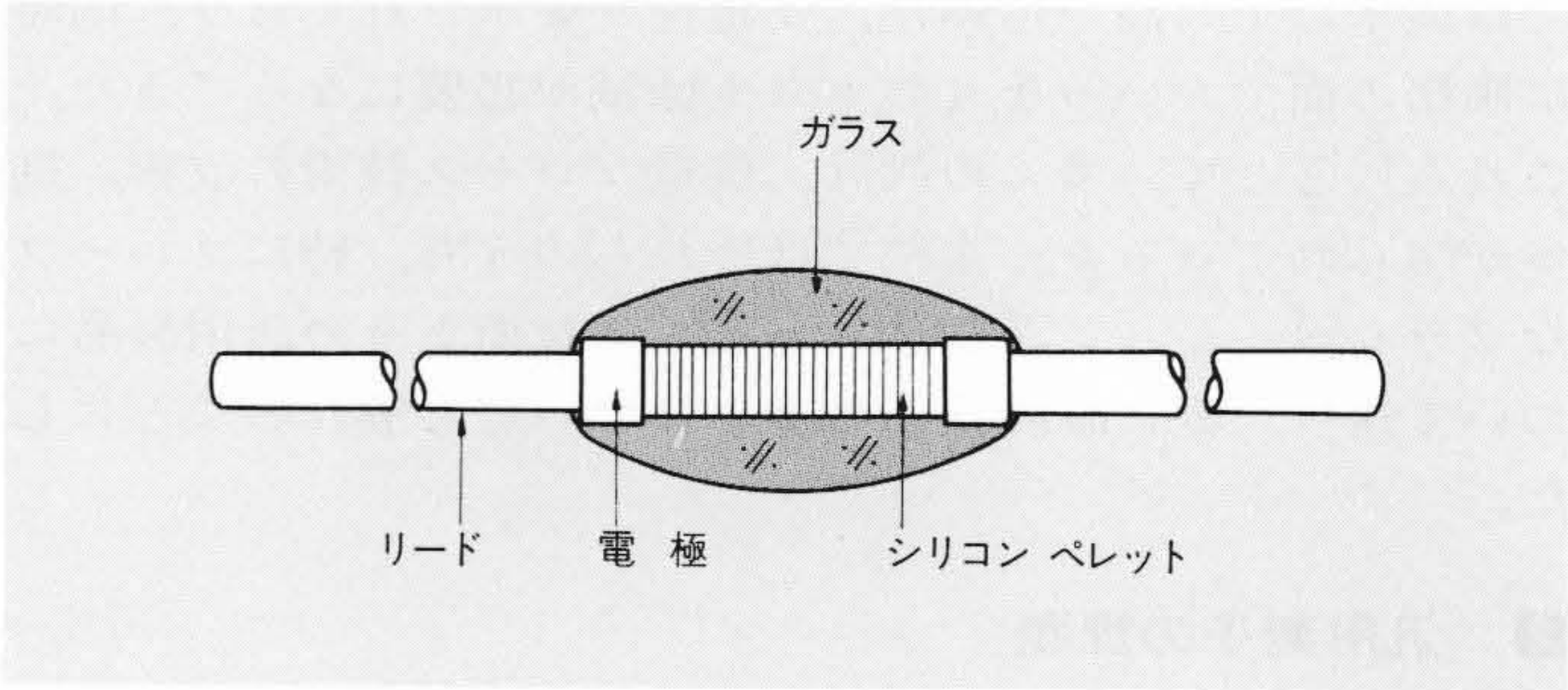


図2 ガラスモールド型高圧ダイオード(断面) ガラスモールドによって、高圧ダイオードの多層PN接合端面を安定なガラス被膜でおおうと同時にパッケージングを行なった。小形で長時間にわたり特性の安定な不燃性素子の構造を示す。

表1 表面安定化方式の比較 半導体接合の表面安定化方式の代表例の比較を示す。グラシベーションが素子の信頼度を高める方法の最も進んだ形であることが分かる。

表面安定化方式	利 点	欠 点
有機材料塗布 (シリコン系ゴム シリコン系ワニスなど)	1. 低温プロセスが可能	1. 再現性、安定性不足 2. DCブロッキング耐量不足 3. 耐ふんい気性不十分
無機酸化被膜形成 (SiO_2 $\text{SiO}_2\text{--P}_2\text{O}_5$ $\text{SiO}_2\text{--Si}_3\text{N}_4$ など)	1. 均一で薄い被膜形成が容易 2. 細かいパターンの加工が可能	1. 高温熱処理が必要 2. シリコンとの界面にストレスが残存 3. 電氣的安定性と耐ふんい気性の両立困難 4. 高耐圧素子に不適
グラシベーション	1. DCブロッキング耐量良好 2. 高耐圧素子に適用可能 3. 耐ふんい気性良好 4. 長時間の特性安定維持可能	1. 材料、プロセス制御が困難 2. パターン加工が困難

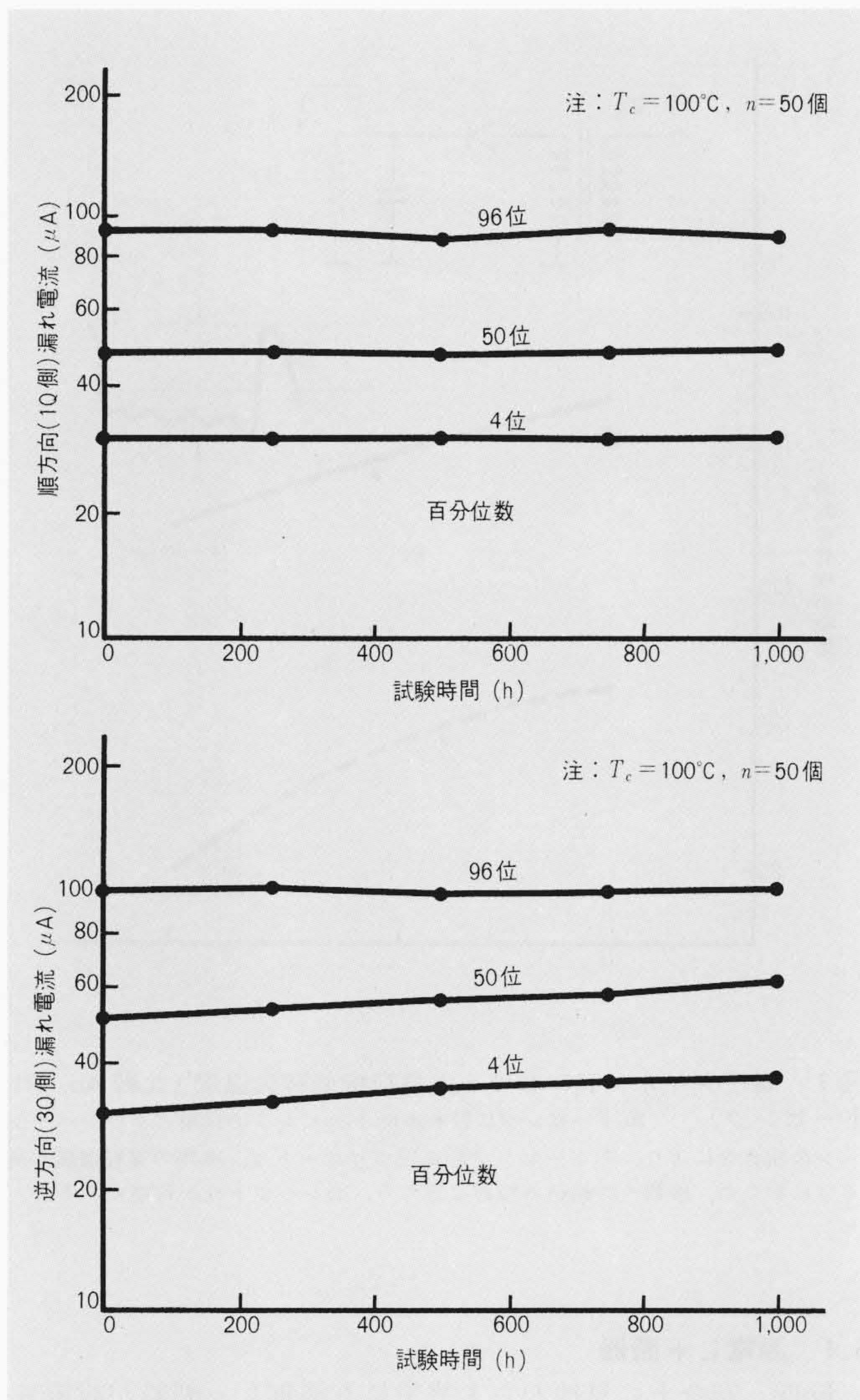


図3 グラシベーション素子(トライアック)のDCブロッキング耐量 (印加電圧: 400V) 半導体接合面の表面安定化法として、ガラス被膜を採用したサイリスタの高温寿命試験の結果を示す。漏れ電流の初期値が小さく、且つ1,000時間経過後もほとんど変化のない安定な特性の素子であることが分かる。

Z_{th} の改良を図った。前者についてはグラシベーション方式の採用で15~20%の向上が可能である。後者を小さくするためにはシリコンペレットのストレス緩和のために採用されているディスク部分を廃止する方法もあるが、長時間の熱サイクルによる疲労を考えると信頼性確保の面より疑問である。

以上のことから素子構造、構成部品の再検討を行ない、これにより、 I_{TSM} を1.4倍(日立製作所製品比較)に向上した。

3.2 転流 dV/dt 耐量

転流時におけるターンオフ失敗現象は、トライアックがサイリスタの逆並列接続を単一チップの中にまとめていることに起因する。従って、これら両サイリスタの境界において転流時に流れる電流($=C \cdot dV/dt$)を部分的に短絡(ショートエミッタ方式)して無効化することを考えた。この思想によれば、サイリスタ境界付近において転流時の dV/dt は、

$$\text{転流 } dV/dt = \frac{V_e}{\rho_s \cdot k} \cdot \frac{1}{R_{cp}} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 V_e : N_E 層の注入電位
 ρ_s : P_B 層のシート抵抗

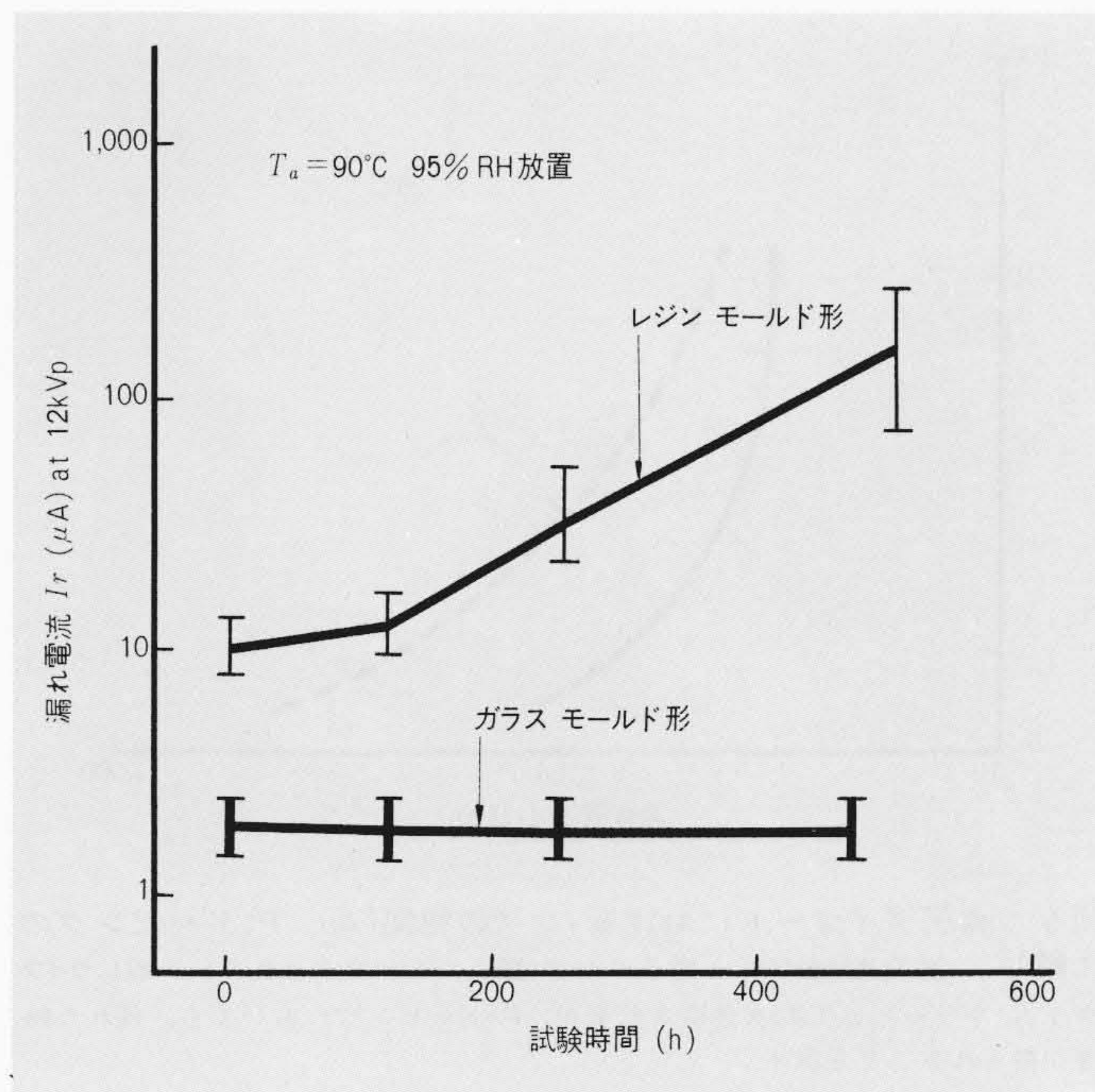


図4 高圧ダイオードの耐湿試験耐量(日立製作所製品比較) 12kV定格の高圧ダイオードにおけるレジンモールド形(旧形)とガラスモールド形(現状)の耐湿放置試験の結果を示す。ガラスモールド形では漏れ電流の初期値も小さく、且つ長時間にわたり特性が安定なことを示す。

k : キャリアの密度と分布による定数

R_{cp} : ショート エミッタの効果

となり、 R_{cp} を小さくする(転流 dV/dt 耐量を向上する)には境界付近でのショート エミッタを密にすればよいことを定量的に把握した。この方式で改善した素子の転流 dV/dt 耐量は、従来に比べ約5倍(日立製作所製品比較)に向上した。

3.3 Ptドーピング⁽³⁾

シリコン中に拡散された場合のPtのエネルギー準位はAuのそれに比べて浅いので、Auの代わりにPtをライフ タイムキラーとして採用すれば、高温での I_r が小さくなり、許容動作接合温度が向上する。

同時に t_{rr} についても図5に示すようにAuドーピング方式に対してそんな色のないことが確認された。図6は I_r の温度特性を、図7は実負荷時において機能喪失する際の周温限界値を両方式についてまとめたものであるが、Ptドーピングの効果が顕著であり、これと前記のグラシベーション(ガラスモールド)方式を組み合わせることによって許容動作接合温度も向上した。

4 製品シリーズ化への展開

以上のような新しい技術の適用により、表2に示すようなシリーズ製品への展開が進められている。特にグラシベーション方式の達成によって、いわゆるチップ ユニット化が可能になってきており、これらをダイオードに適用した、パワーモジュール製品の展開も進んでいる。

5 汎用サイリスタの応用

最近の新しい応用例として漏電しゃ断器及びゼロ ボルトスイッチへの適用があるが、その概要について述べる。

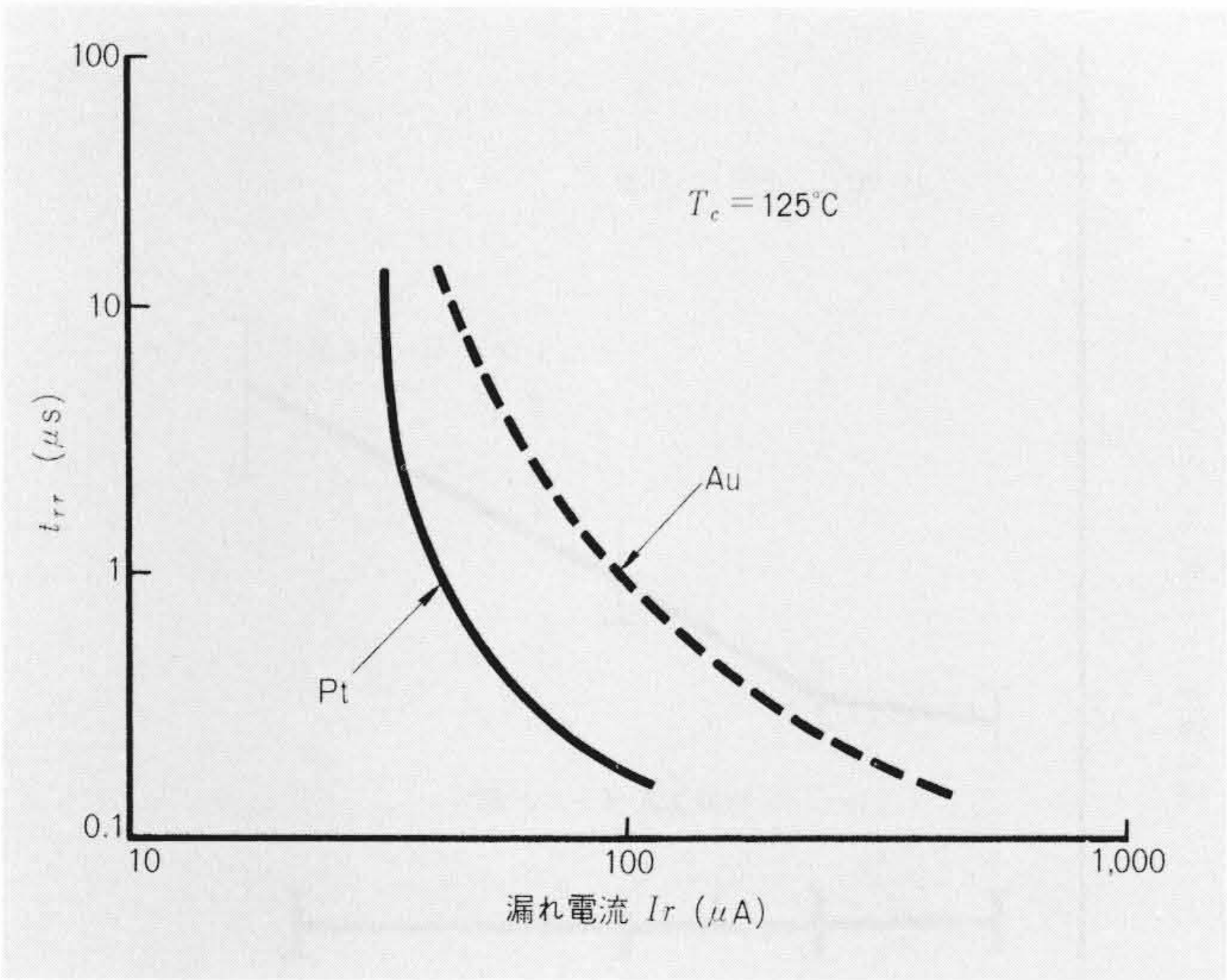


図5 高圧ダイオードにおける t_{rr} - I_r の相関 (Au, Ptドーピングの比較) 高周波で動作する素子は t_{rr} の短いことが要求される。一般にライフタイム キラーとしてAuが使用されるが、Ptドーピングにおいても、優れた特性が得られることを示す。

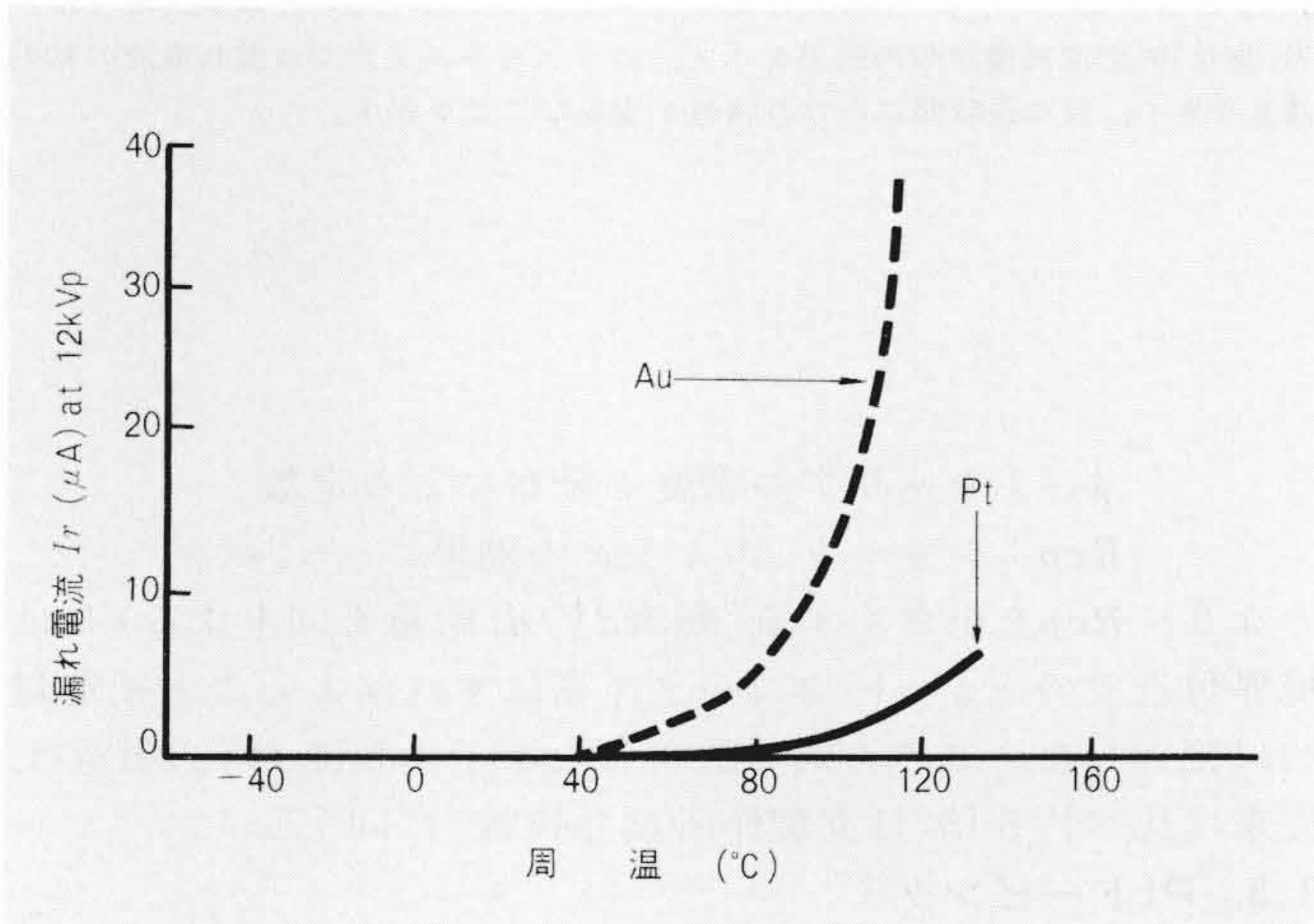


図6 高圧ダイオードにおける (Au, Ptドーピング比較) I_r 温度特性 高速ダイオードにおいて一般に用いられているAuドーピングに比べ、Ptドーピングでは、高温における漏れ電流(損失)が少ないことを示す。

表2 汎用サイリスタ、ダイオードのシリーズ製品化への展開 半導体接合表面安定化法としてグラシベーションを採用し、ダイオードの高速化にPtドーピングを採用した高性能、高信頼性の汎用サイリスタ、ダイオードの新シリーズ。

製 品	名 称	内 容
汎用サイリスタ (グラシベーション)	12/14シリーズ	1~10A/600V サイリスタ, トライアック プラスチックパッケージ TO202/220型
	07シリーズ	5~10A/600V サイリスタ, トライアック キャン パッケージ TO 66型
	08シリーズ	5~30A/600V サイリスタ, トライアック キャン パッケージ TO 48型
	09シリーズ	5~20A/600V サイリスタ, トライアック キャン パッケージ, フラット ベース型
高圧ダイオード (Ptドーピング+ グラシベーション)	Y 15/16シリーズ	12~18kVp ガラス モールド型
パワーモジュール (グラシベーション)	M4 シリーズ	3~10A/200V 単相ダイオード ブリッジ セラミック絶縁方式, レジン モールド型

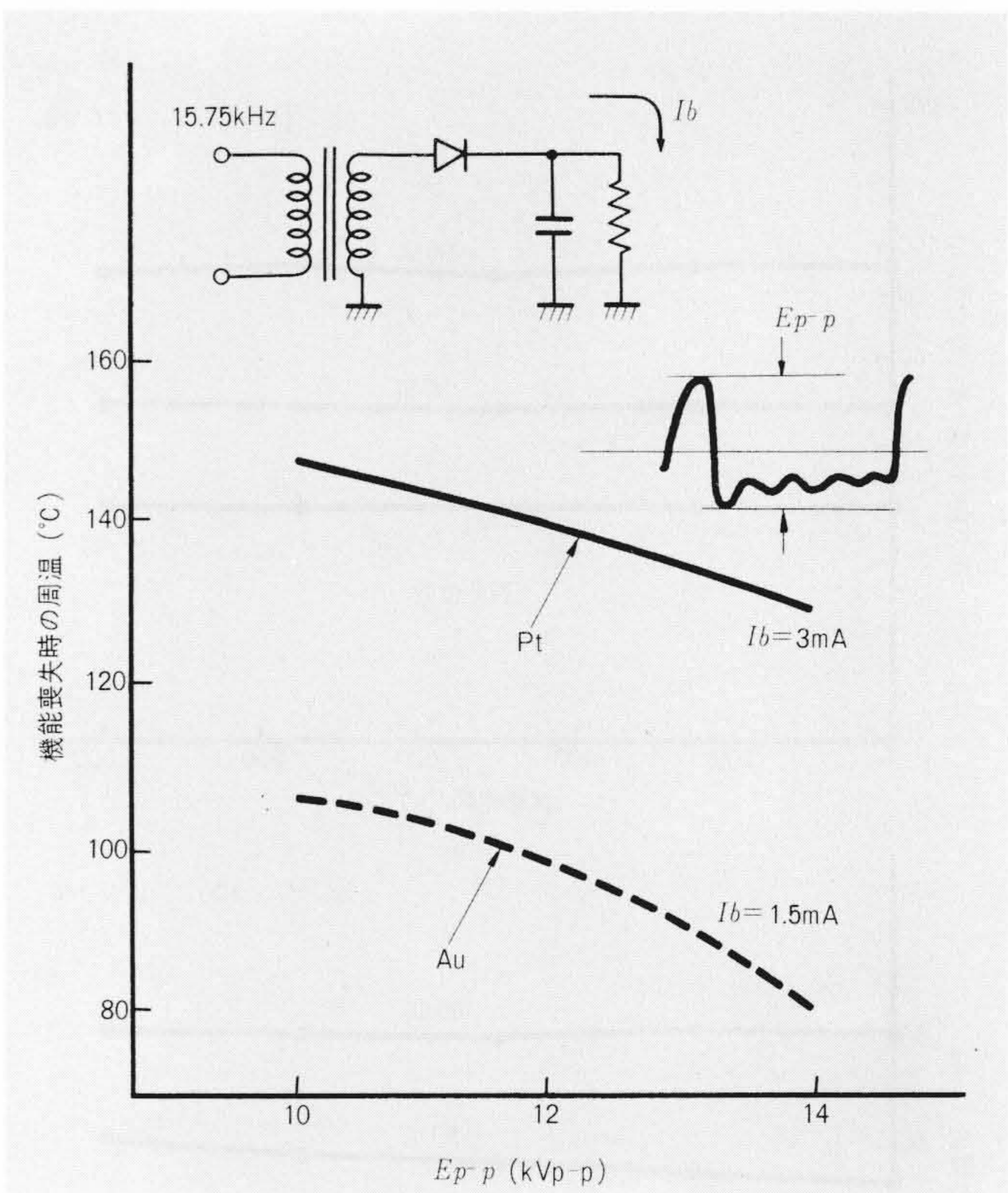


図7 高圧ダイオードにおける実負荷機能喪失温度 (比較 Au, Ptドーピング) Auドーピングに替わるPtドーピングの採用とグラシベーションの組合せにより、Ptドーピング形高圧ダイオードは、実際の運転温度が高くとれるため、機器への組込み設計に当たり、コンパクト化が可能である。

5.1 漏電しゃ断器

最近、安全上の見地から家庭用にも漏電しゃ断器が設置されるようになった。漏電による災害を防止するためには、従来より実施されている接地工事だけでは十分でなく、危険な漏れ電流をいち早く検出して直ちに回路をしゃ断しようとするのが漏電しゃ断器である。図8に漏電しゃ断器へのサイリスタ応用例を示す。漏電しゃ断器はわずかな故障漏れ電流を検出して、確実に速く動作することが必要で小さな信号入力で作動するサイリスタの特徴が利用されている。なお、この応用例では常時サイリスタに直流電圧が印加されるので、DCブロッキング寿命が永く、故障しゃ断時に発生する異常電圧に対して十分安全な電圧耐量をもった信頼性の高いサイリスタが必要である。

5.2 ゼロ ボルト スイッチ

一般産業あるいは家電民生機器にサイリスタ、トライアックが数多く使用されるにつれ、雑音誘導障害の問題が起こってきた。これはサイリスタ、トライアックのターンオン時に急激な電圧及び電流の変化が起こるために生ずるものである。この障害を低減するために、ゼロ ボルト スイッチという回路方式が採用されはじめた。これは交流電源電圧のゼロクロス位相でサイリスタ、あるいはトライアックを点弧させターンオン時の電圧、電流の変化を小さくすることにより雑音発生及び電源系統のじょう乱を低減しようとするものである。従って、位相制御は行わず、オンオフ制御方式である。図9に回路の一例を示す。我々は表2のトライアック シリーズの中にゼロ ボルト スイッチに適した素子を準備している。図10は20A ゼロ ボルト スイッチ用トライアックのターンオ

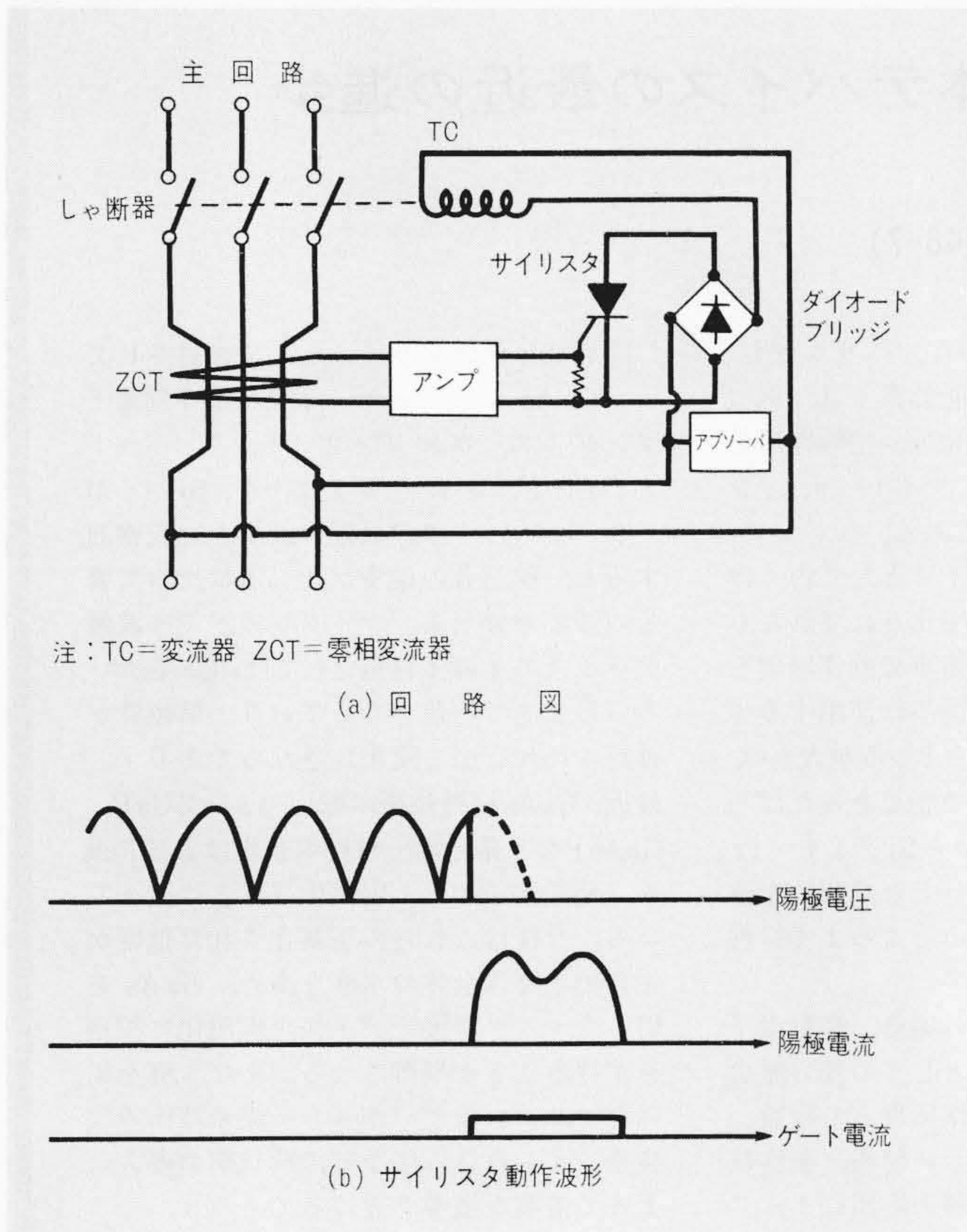


図8 漏電しゃ断器へのサイリスタ応用 本応用例では、サイリスタは漏電しゃ断器引はずしコイル(TC)の回路に電流を流す無接点スイッチの役目を果たす。従って、常時ダイオードブリッジで全波整流された直流がサイリスタに印加されており、DCブロッキング耐量が大きく、且つ安定なグラシベーション形サイリスタの採用が適している。

ン可能な電圧のゲート電流依存性を示すものである。ターンオン電圧が低いほど、またゲート電流が低いほど雑音の発生が少なくゼロボルトスイッチに適した素子といえることができる。

6 結 言

グラシベーション、Ptドーピングなどを中心に、中・小容量の電力用半導体素子に関する最近の進歩、改善について述べた。これらの新技術による汎用サイリスタの性能向上は、今後の素子適用範囲をますます拡大していくものと考えられる。応用面からの要求は更に多様化してくるものとみられるが、これらにこたえ得る設計・製造技術のよりいっそうの発展が、今後ともに大きな課題であろう。

参考文献

- (1) F.E.Gentry "Bi-directional Triode PNP Switches"

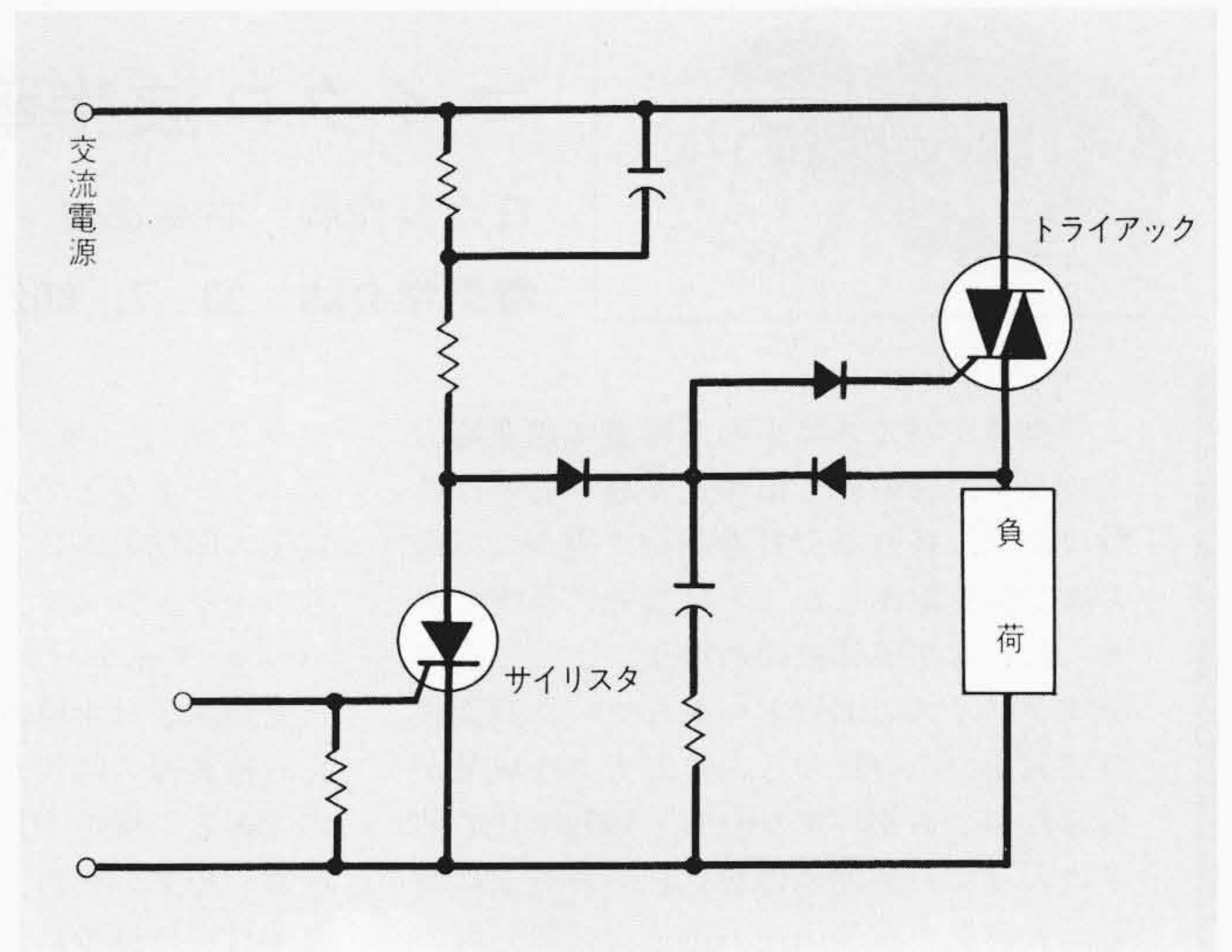


図9 ゼロボルトスイッチ回路例 トライアックを使用したゼロボルトスイッチ回路を利用することにより、機器のオン・オフに際し交流電源系統(電燈線など)への悪影響(例:大突入電流による電圧降下)や電波雑音障害の発生を予防することができる。

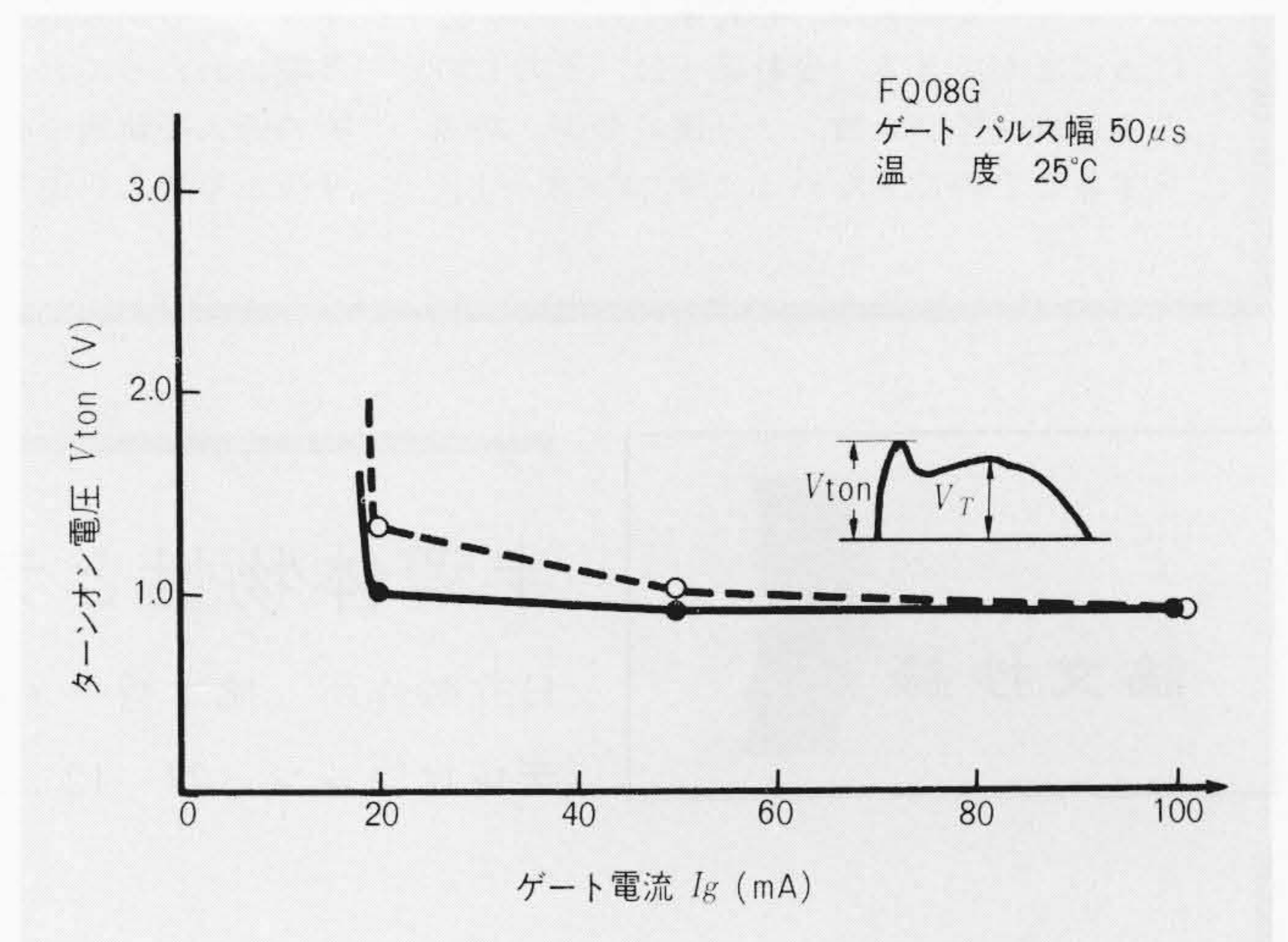


図10 20A トライアックのターンオンゲート電圧特性 ゼロボルトスイッチ用トライアックのゲート特性を示す。ターンオン電圧数ボルトが必要な一般のトライアックに比べ、高感度であることが分かる。

PIEEE, 53, 355 (1965)

- (2) 「MOS電界効果トランジスタ」日刊工業新聞社(1969)
(3) 小島, 石塚, 佐々木「Pt拡散を行なったダイオードの諸特性」昭和50年電気学会 No.460 (昭50-4)

マイクロ波半導体デバイスの最近の進歩

日立製作所 右高正俊

電気学会誌 93-7, 602 (昭48-7)

半導体デバイスは小形、軽量で消費電力が少なく、長寿命で信頼性が高いという特徴により、特殊な分野を除いて完全に従来の真空管を駆逐したことは周知の事実である。しかも半導体技術の進歩によって、半導体デバイスの弱点といわれていた高周波及び大出力の分野でも次々と大きな成果が得られつつある。すなわち、1970年代の前半に入って、高度の情報化社会の到来に備え、大容量の情報伝達、迅速な情報処理の要望が強くなったこと、GaAsなど新しい半導体のプロセス技術が進歩したこと及びガン効果やなだれ効果などの新しい原理が実用化素子に導入できたことなどによって、超高周波、高出力分野への半導体デバイスの進出は目覚ましいものがある。

マイクロ波半導体デバイスは、大別して次のように受動素子、能動素子の二つに分けることができる。受動素子は、そのものみではマイクロ波、ミリ波の発振、増幅をすることのできないミキサ ダイオード、

バラクタ ダイオード、ステップ リカバリ ダイオードなどであり、能動素子は、直流電圧の印加のみによって発振、増幅作用をもつトランジスタ、ガン ダイオード、インパット ダイオードなどである。

受動素子は半導体デバイスとして古くは鉱石検波器の時代から実用化されてきたものである。構造が比較的簡単で動作原理も理解しやすいため、その進歩は使用する半導体材料の進歩に依存するところが大きい。これはミキサ ダイオードの歴史をみれば明らかであり、鉱石検波器からSi ダイオード、更にGaAsミキサ ダイオードと飛躍的な進歩を遂げ、理論限界に近いところまで特性が向上している。

これに対して能動素子の場合、受動素子のような半導体デバイスとしての長い歴史がなく、しかも構造、動作原理とも複雑、多岐にわたっており、新しい材料、製作技術の導入や新規な動作原理の応用によって今後とも著しい進歩が期待される。

高周波半導体デバイスとして注目されているGaAsショットキー障壁形電界効果トランジスタ、ガン ダイオード、インパット ダイオード、ミキサ ダイオード、Siバイポーラ トランジスタの最近の進歩を比較検討すると、前三者の進歩が後二者に比べて著しいことが分かる。マイクロ波、ミリ波帯デバイスの半導体材料としては、GaAsがいろいろな面で特色をもっており、信頼性が確認されれば広く実用化されるであろう。最近、GaAs材料技術の転用によってGaP、GaAsPなど発光素子材料の技術は急速に進み、発光素子が広く実用化されるに至っている。今後はこれらの工業化された技術が化合物半導体全体の水準を高め、GaAsを用いたマイクロ波デバイスの実用化に拍車をかけることが期待される。また、Siを用いたマイクロ波デバイスも、従来技術の改良やイオン打込み法などの新技術の導入によって着実な進歩を遂げるであろう。

半導体物性とデバイス(V), プロセス技術(I)

日立製作所 橋本哲一・芦川幹雄

テレビジョン 27-12 956 (昭48-12)

半導体プロセスは、いかにして高純度の基板結晶に一定の幾何学的構造を保ちながら不純物を制御された状態でドープリ、要求されるデバイス特性を出すかの技術である。酸化、拡散、気相成長、電極形成など各プロセスにはそれぞれの理論はあっても、実際のデバイス製作では経験とそれに基づくknow-howによる所が極めて多い。そのため、現存するプロセス技術の多くはある会社が多く年月と人材を投入して築き上げたものである。

Siデバイス製作はCZ (Czochralski) 法あるいはFZ (Floating zone) 法により製作された単結晶(40~75mmφ)を内周に刃を持つダイヤモンドカッタにより切断し、結晶ひずみを最小とするよう研磨することから始まる。次いで酸化、拡散、気相成長、金属蒸着などの各プロセスがホトエッチング(写真製版技術)工程により結びつけられて、Si単結晶上にデバイスができる。

但し、個別(単体)デバイスと集積回路(IC, LSI)では後者に集積化のための素子間分離が必要である点で大きく異なる。

MOSデバイスのためのプロセスがより清浄なより安定なMOS (Metal Oxide Semiconductor) 構造への努力であるのに対して、バイポーラ デバイスのプロセスはより狭いベース幅を持つトランジスタを、いかに効率よく集積するかの高集積化が課題である。次々と新しい技術が生まれ、あるものは消えて行く。その中で定着しつつあるプロセス技術はIsoplanar (LOCOS) 技術とイオン打込みであろう。Isoplanar技術の基本はSi₃N₄膜が酸素の拡散マスクになることを利用してSi単結晶の一部を厚いSiO₂とし素子間分離に用いることにある。この技術はMOSデバイスにもバイポーラ デバイスにも適用でき、高集積化が実現できる。またイオン打込みは、従来のSi表面から不純物を熱拡散する方法に対し、

イオン化した不純物を高エネルギー(20~400keV)で加速しSi単結晶内に打ち込む技術で、イオンビーム電流の測定により不純物量を正確に制御できる特徴を持っている。

プロセスの課題はいかにして基本となる技術を向上させて行くかであるが、デバイス製作はバランスのとれた一つのシステムでないかぎり、信頼性ある素子、あるいは集積回路は生まれてこない。

以上、述べてきたプロセスは通常前工程と呼ばれ、その後検査、切断、組立て、封止、選別されて製品となる後工程がある。コスト面を考えると、この後工程は重要であり、いかに自動化、省力化してコスト低減を図るかの検討が進められている。

また最近、前工程にも自動化の波が押し寄せてきており、半導体プロセスはますます装置産業の色を濃くしている。