

電力用半導体素子の動向

Trend of Power Semiconductor Engineering at Hitachi

電力用素子の高性能化の推移と最近の技術動向、及び課題について述べる。今後ともサイリスタの大容量化・高速化のニーズは強く、シリコン単結晶の大口径化に伴い、素子構造上の改善と単結晶内の動作の一様性の向上が重要な課題となっている。また、ゲートターンオフサイリスタの大容量化、光応用素子及び低損失整流素子などに新しい展開がみられる。素子の信頼性向上と低価格化の面では、ガラスボンドダイオードやテレビ用高圧ダイオードの開発など最近のグラシベーション技術の進歩が大きい役割を果たしつつある。今後、信頼性と価格の二つの課題を達成するには、ユーザーと協調のとれた素子開発とともに、従来のノウハウ(know how)から科学的基礎のうえに合理化されたプロセス技術への転換が重要と考えられる。

岩田幸二* Kôji Iwata
 小川卓三** Takuzô Ogawa
 守田啓一*** Keiichi Morita

1 緒言

車両応用を契機とし、ミル用電源への応用をはずみにして最近では民生用機器、インバータ、チョッパ、更にはサイリスタモータ、直流送電用コンバータとパワーエレクトロニクスは発展している。そのキーコンポーネントであるサイリスタ、整流素子は、多岐にわたる顧客ニーズを満たすべく、開発・量産化されてきた。本稿では最近の技術動向について概説する。

2 最近の技術動向

電力用素子の歴史は大容量化、多機能化、低価格化に次いで高速化と展開し、その間、適用技術の進歩と相まって高い信頼度が得られている。図1にはサイリスタの電圧、電流の推移と応用との関連と、素子の多様化の例を示した。表1は電力用素子に対する開発ニーズとそれに対する手段、技術の関連表である。最近、顧客ニーズは素子の限界設計を要求しますます基本技術の地道な開発が重要となってきた。

2.1 大容量化

多くの研究開発が積み重ねられ、60φ(直径60mm)単結晶を使用した直流送電用サイリスタ(800A、4kV)が製作されるようになった。

高耐圧化の場合、素子の最大変換容量を得る条件⁽¹⁾は、

$$V_{opt} \propto D_{7m}^6 \dots \dots \dots (1)$$

V_{opt} : 最大変換容量を与える最適電圧

D : アノード径

m : コンタリング構造に関する係数

であり、定格電圧を上げると最大変換容量を得る D は大きいほうにずれる。すなわち単結晶の大口径化が必要である。また定格電圧を上げると他の諸特性が悪くなる。

- (1) ベース層厚さは $V^{7/6}$ に比例し厚くなる。
- (2) 順電圧降下はベース層厚さが増すと大となる。このため通流面積を大きくし、ベース層の少数キャリアのライフタイムを増す必要がある。
- (3) ターンオフ時間はライフタイムに比例し増減する。
- (4) ターンオン時間はベース層厚さとともに増す。

4kV級サイリスタではベース層が厚くなり、上記(2)の配

慮が必要であるがライフタイムキラー^(*1)となる重金属のシリコン内許容レベルは $10^{13} \text{Atoms/cm}^3$ のオーダーとなり超微量分析法、拡散ウエハの非破壊ライフタイム測定法の開発とともに重金属の侵入源の解明と対策が重要である。同時に有効通流面積を増すためには、大口径化とともに接合端面のコンタリング構造^(*2)の最適化⁽²⁾を必要とする。大口径ウエハの抵抗率及びライフタイムの一様性と大口径拡散ウエハの接合諸元の精度に特に留意しなければならない。更に、直・並列接続時の電圧、電流分担のばらつきは前述した諸要因が関係し、今後単結晶の抵抗率の一様性、製作プロセスにおけるライフタイム制御の精度向上を図ってゆかねばならない。

高耐圧化とそれに伴うターンオン時間^(*3)の増加は所要スイッチングパワーの増加を来す。マイクロ波評価法⁽³⁾の開発はベース層内キャリアの直接観測を可能とし、理論計算と相まって最適ゲート構造、エミッタ構造^(*4)が設定されるようになった。今後、シリコン材料の純化、製作プロセスの無欠陥化、及び高精度化と理論計算の高精度化により、限界設計の素子にあっても高歩どまりが達成できるであろう。

2.2 高速化

チョッパ、インバータによる電動機制御、無停電電源への高速サイリスタの応用はかなり浸透したが、今後とも産業用、民生用の応用が広まるものと考えられる。ゲートやエミッタの構造上の改善が進み、数百アンペア、1,000V級の素子で、ターンオフ時間20~30μs、約5kHzまで使用できるものが製

- (*1) ライフタイムキラー：シリコン単結晶のキャリアのライフタイムを短縮する不純物。重金属にはこのような効果をもつものが多い。
- (*2) コンタリング構造：表面耐圧を確保するための半導体接合端面の構造をいう。
- (*3) ターンオン時間：サイリスタがゲートにスイッチオンのパルス信号を受けて後、順方向電流通電開始までの立上り遅れ時間をいう。
- (*4) エミッタ構造：サイリスタの3極、陽極、陰極、ゲート構造のうちの陰極部分の半導体構造をいう。

* 日立製作所日立工場 工学博士 ** 日立製作所日立研究所 理学博士 *** 日立製作所日立工場

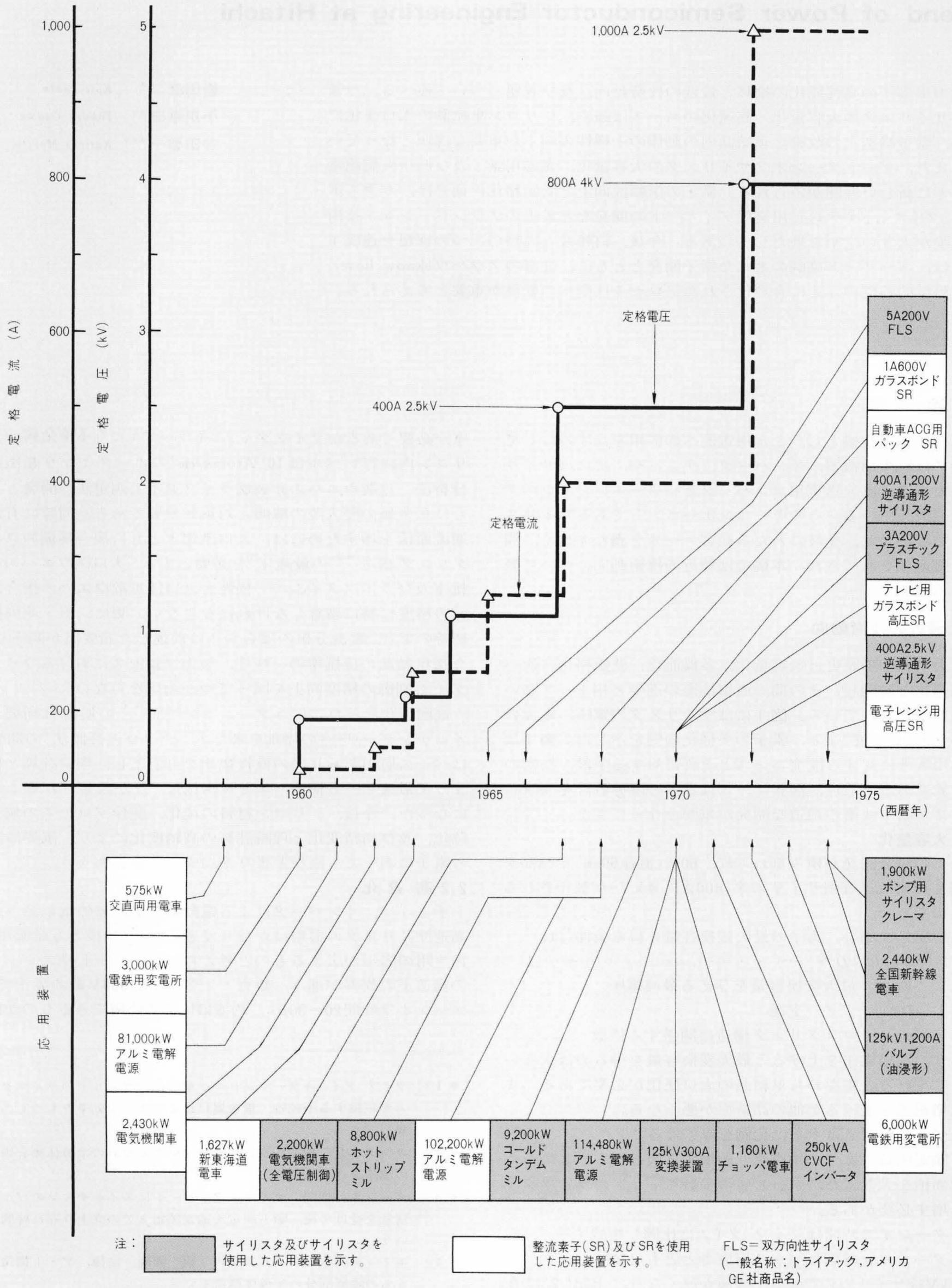


図1 サイリスタの定格電圧、定格電流並びに応用装置の推移
800A 4KVサイリスタは、直流送電用として開発、量産化され現在の記録品である。

表1 電力用素子の開発ニーズと技術
開発ニーズを達成するための手段と技術の関連を示す。

| ニ ー ズ | 手 段 | 技 術 |
|---|----------------|--------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> ● 大容量化 ● 高速化 ● 高信頼化 ● 低価格化 | 新デバイス, 複合 デバイス | デバイス構造 動作解析 |
| | 結晶の大口径化 | プロセス技術 (高純度・無欠陥・高精度化) |
| | 結晶の一様化 | 微量分析技術, 評価技術 |
| | 表面安定化 | グラシペーション |
| | パッケージング | プラスチック モールド |
| | プロセス合理化, 自動化 | 冷却 |
| | 素子面積低減 | レイアウト |
| | モジュール化 | |

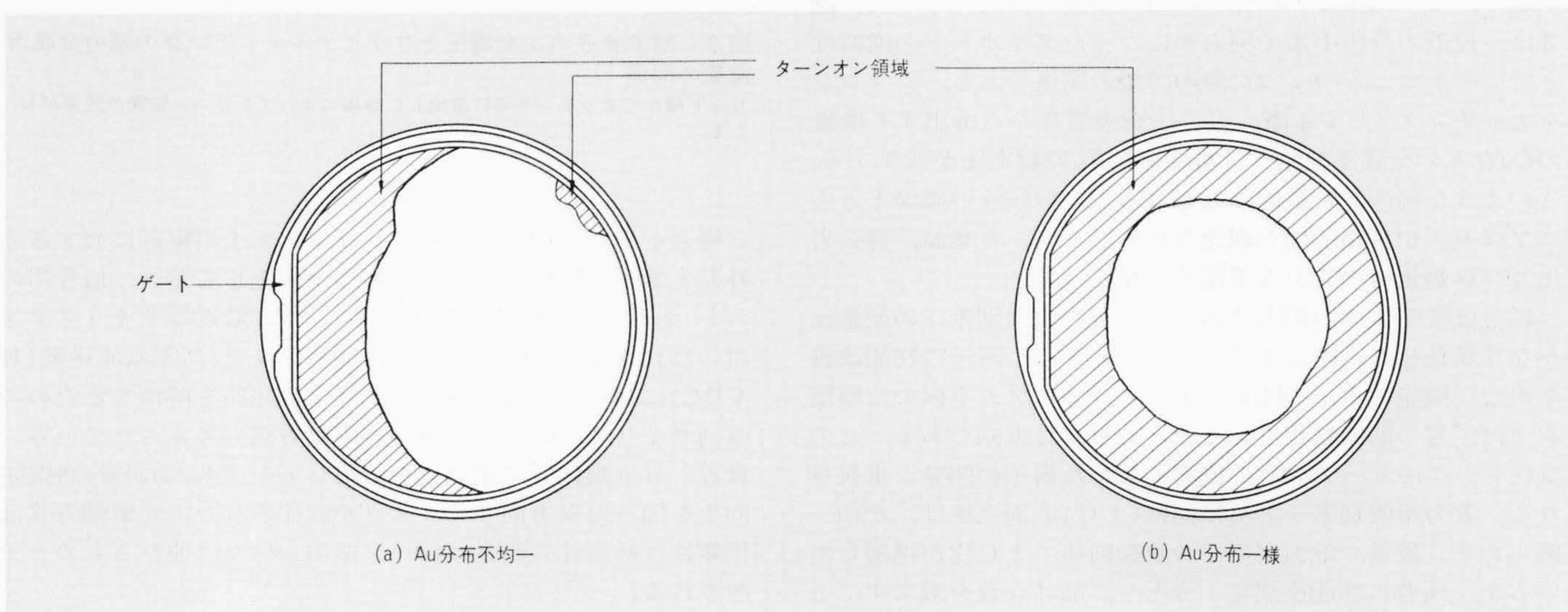


図2 リングゲート サイリスタにおけるターンオン領域の広がり と Auの分布
ターンオン領域はゲートに近い周辺から広がる。

品化されている。サイリスタの使用周波数は、今後とも若干拡大されよう。最近では400 A級のトランジスタが開発されており、サイリスタとトランジスタはそれぞれの特長の出る分野で使い分けられることになる。トランジスタはかなり高周波でも使用でき、転流回路も不要であるが、制御電力が小さく、過負荷に強いという点ではサイリスタが優れている。

チョップ用逆導通サイリスタ⁽⁴⁾は昭和45年(1970年)に初めて日立製作所で開発されたが、地下鉄線などでの実用化が進み浮遊インダクタンスの低減による高速化、回路の簡略化などの特長が明確になった。その後、新しい接合構造の採用によって大容量化され、400 A、2,500 V素子が実用段階に入っている。電気自動車や無停電電源への応用も広まりつつある。

最近、サイリスタの過渡動作が克明にとらえられるようになり、高速化のためにも結晶の一様性が極めて重要なことが明らかになってきた。高速サイリスタではターンオフ時間^(*5)を短縮するためにライフタイム キラーとなるAuをシリコンにドーピングする手法が採られる。単結晶中のAuの分布はオートラジオグラフで観測できるが、熱処理の工程などで転位が生ずると、その付近にAuが集まって分布が不均一になる。図2は(a)Au分布が不均一のもの(b)一様なサイリスタで、ターンオン開始後、一定時間経過したときのオン領域の広がり様子をマイクロ波法⁽³⁾によって調べた結果である。Auの不均一分布はターンオン特性ばかりでなく、オフ特性も損なう。Auを

ドーピング^(*6)すると一般に順電圧降下が大きくなるが、その程度は不均一な場合ほど著しい。単結晶並びにプロセス技術の進歩により、いっそうの性能向上が期待されよう。

2.3 信頼性と低価格化

信頼性の向上と低価格化はますます重視されており、電力用素子の開発でもこの2点に大きいウエイトがある。

従来、パッケージが汎用素子のコストの大きい割合を占めることからモジュール化、プラスチック化などのパッケージングに力が入られてきた。この場合、かなめとなるのは十分の信頼性を確保するための高耐圧表面安定化技術である。中・小容量のプラスチック モールド サイリスタでは、ガラス膜を用いる表面安定化技術(グラシペーション)により、いっそうの信頼度が確保できるようになってきた。また、ガラス モールドによって、パッケージングと表面安定化を施したガラス ボンド ダイオードは、高信頼化、小形化、低価格化への道を開いた製品である。このガラス ボンド技術はテレビ高圧

(*5) ターンオフ時間：サイリスタが順方向通電後、素子がオフ状態となってゲートの制御能力が回復するまでの時間をいう。

(*6) ドーピング：半導体結晶に、ある電氣的性質を与えるために意識的に不純物元素を加えることをいう。

電源用の高圧ダイオードにも応用され、信頼性の向上に著しい効果を挙げている。グラシベーションは、今後の展開により組立工程の簡素化ばかりでなく、製品としての能動素子チップの開発にも期待できるので、多様化するユーザーのニーズに答えるために重要な技術となろう。

材料とともに製造プロセスの合理化は、常に重要な課題である。しかし、従来のようにノウハウの積み上げを主としたのでは限界にきており、科学的に基礎づけられた合理的なプロセス技術の展開が必要である。半導体工業においてノウハウが極めて重要な役割を果たしてきた理由の一つは、微量の不純物を制御するための分析的アプローチが困難であったことにある。近年、イオンマイクロアナライザ、オージェ電子分光、原子吸光などの分析技術や、インプロセス計測技術が進み、より明確な半導体プロセスの解析が緒についた。図3は、最近の分析手法で明らかになったダイオードの逆特性とファイナルエッチングの際の汚染の関係である。シリコンをエッチング^(*)7)する際、リード線や電極から溶出する微量のCuなどの金属不純物が付着する結果、逆耐電圧が低下する。このような関係が定量的に知られると、信頼性の確保とともにプロセスが本格的に合理化される。また、省薬品、無公害化及び自動化への有力な手掛りとなる。

以上は素子自体の問題であるが、現在の個別素子の産業はかなり成長した段階にあることを考えると、素子の性能改善や新しい機能の素子の開発によって、システム全体の信頼度を上げ、且つ低価格化を図ることも重要な方向である。この意味で、ユーザーの設計と協調のとれた素子の開発が重視される。電力用個別素子と集積回路(IC)の両立性は、その一例である。最近、電力用素子の駆動回路のIC化が進展しているが、両者の性能協調を十分とり、部品点数を減らすことが大切である。

2.4 その他の展開

電流しゃ断機能をもつ素子として、ゲートターンオフサイリスタ(GTO)が早くから注目されていたが、最近ようやく200A、800V級の素子⁽⁵⁾が開発されるようになった。GTOの応用分野としては、インバータ、スイッチングレギュレータ、自動車点火回路、テレビ水平偏向回路などが考えられているが、現状ではまだあまり伸びていない。その理由は、主として経済性と大容量化の困難さにある。最近のサイリスタのプロセス技術と動作解析の進展で、これらの問題点はしだいに克服されよう。

電力損失の低減は常に電力用素子の重要課題であったが、民生用・産業用機器の省電力化の面から更に強いインパクトが加わっている。障壁電圧の低いショットキーダイオードを電力用素子として使おうとするのはその例で、既に数十アンペアの容量のものが製品化されているが、耐圧と温度特性向上の面からこのほかにも種々のアプローチがなされよう。電子計算機などの低電圧電源からしだいに応用が広まるものとみられる。

半導体素子を光で駆動すると、主回路と制御回路が絶縁される結果、回路が簡素化され、ノイズに強いシステムができ

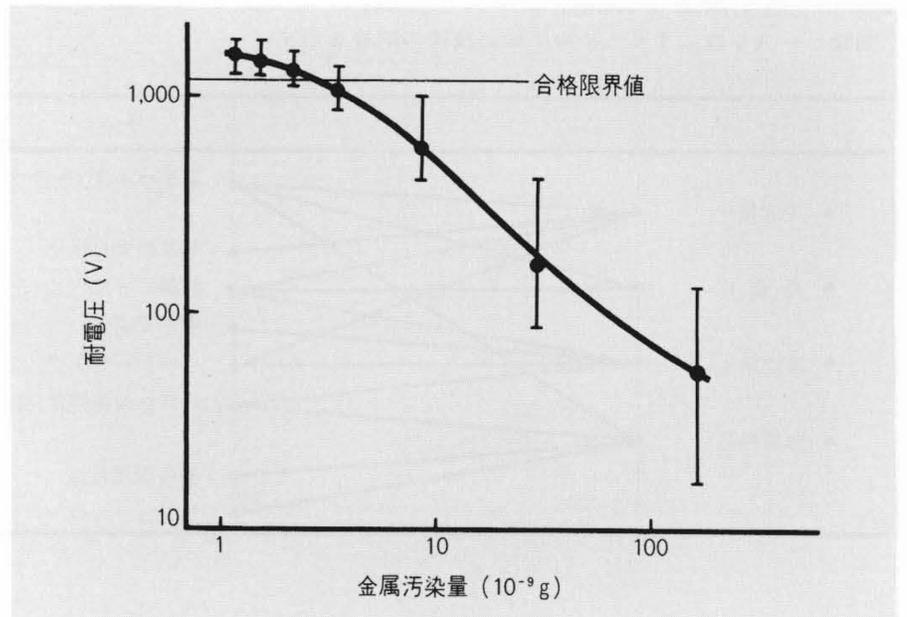


図3 整流素子の逆耐電圧とファイナルエッチングの際の金属汚染量の関係

リード線からエッチング液に溶出した金属によってシリコン表面の汚染がおこる。

る場合が少なくない。近年、シリコン素子の駆動に適する赤外発光素子(又はレーザ)の信頼性が向上しており、信号用のホトカップラが製品化されている。また、最近サイリスタを用いた10A級の光結合リレーが開発された。高圧直流送電(HVDC)において制御回路の高圧絶縁の問題を解消するための直列サイリスタの光による一斉駆動方式も考えられている。最近、日立製作所で光結合を応用して転流 dv/dt 耐量の飛躍的向上を図った双方向サイリスタが試作された。光駆動方式は信頼性と経済性の改良に伴い、応用が徐々に伸びるものと予想される。

3 結 言

電力用素子の大容量化、高速化及び光応用素子などの新素子の開発は、ニーズとともに今後とも進展するであろう。また、高信頼化とともに低価格化のためにグラシベーション^(*)8)技術の展開が大きな役割を果たしつつある。しかし、電力用素子に課せられる要求はますます厳しく、従来技術では限界にきており、一段の技術革新を必要とする。ノウハウ(know how)から動作解析、不純物分析などに基づく合理的プロセス技術への転換は、半導体工業の基本的課題であり、ユーザーと協調のとれた素子開発とともに、今後の高性能化と低価格化を図るうえでのキーポイントであると考えられる。

参考文献

- (1) T.Kamei, T.Ogawa, K.Morita and H.Asano: "Design and characteristics of 4,000V thyristors" IEE Conf. Publ. 53, 39(1969)
- (2) T.Ogawa, T.Kamei and K.Morita: "Electrical characteristics of ultrahigh-voltage thyristors and related problems" IEEE Trans. IA-10, 112(1974)
- (3) Y.Terasawa: "Observation of turn-on action in a gate-triggered thyristor using a news microwave technique" IEE Trans. ED-20, 714(1973)
- (4) T.Yatso, T.Ogawa, Y.Terasawa, K.Morita and K.Wajima: "A diode integrated high speed thyristor" Proc, 2nd Conf. on Solid State Devices, Tokyo(1970)
- (5) E.D. Wolley, R.Yu, R.Steigerwald and F.M. Matterson "Characteristics of a 200amp gate turn-off thyristor" IEE E Conf. Rec. IA, 251(1973)

(*7) エッチング:半導体製造工程において、表面を化学的に溶解し、清浄な結晶表面を出すことをいう。

(*8) グラシベーション:ガラスパシベーションの略称で、半導体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法をいう。