

分子線エピタキシー装置

Molecular Beam Epitaxy Equipment

近年、高速コンピュータ用超高速・超高周波デバイスとして注目され、既に一部実用化されているGaAs半導体デバイスを、エピタキシー法で製作する分子線エピタキシー装置を開発した。開発した装置は従来のそれと比較して、超高真空排気システム、基板の搬送・ハンドリングシステムに特徴をもち、特に前者に関してはクリーンな超高真空ターボ分子ポンプの開発、アトムプローブ及び昇温脱離スペクトル装置を用いて、材料の低放出ガス化の研究を行ない、装置の開発をバックアップした。後者に関しては実寸模型による信頼性の検討を行なった。このほか、薄膜の成長速度、膜厚分布に関するシミュレーション計算なども行ない、新しいデバイスの研究を効率よく推進するだけでなく、生産現場でも活用できるように考慮して開発した。

蒲原 秀明* Hideaki Kamohara
 上田 新次郎* Shinjirō Ueda
 白木 靖寛** Yasuhiro Shiraki
 加藤 重雄** Shigeo Katō
 長友 克明*** Katsuaki Nagatomo

1 緒言

情報化社会の高度な発展に伴い、半導体デバイスの高度化の要請は高まるばかりである。半導体デバイスの高度化の方向の一つは、超LSIに代表されるような微細化及び高密度化であり、他の方向は新しい半導体材料の開発である。その代表例がGaAs(ガリウムヒ素)を用いた各種のデバイスである。その中にはシリコンデバイスより高速化を実現する各種のトランジスタや集積回路(IC, LSI)ばかりでなく、シリコンでは実現が困難な半導体レーザといったオプトエレクトロニクスデバイスがあり、急速に実用化されている。

これら半導体デバイスの高度化、高性能化に共通な重要基本技術として結晶成長、特に薄膜結晶成長(エピタキシャル)技術がある。エピタキシャル技術はデバイスの進歩に伴い、ますます高度なものが要求されている。

例えば、次世代の超高速コンピュータ用の高速デバイスとして期待されているGaAsを母体とするヘテロ接合デバイス(HEMTやHBTなど)では結晶成長の制御に原子オーダーの精度が要求され始めている。このような要請にこたえることのできる高度な結晶成長技術として、近年、大きな関心を集めているのが分子線エピタキシー(Molecular Beam Epitaxy: MBE)法である¹⁾。

そこで、次世代半導体デバイス実現のキーテクノロジーとしてのMBE技術は各方面から強い関心をもたれ、ここ数年、その研究開発は爆発的に活発化している。

MBE技術は超高真空技術を基礎としており、1980年代から超高真空技術が急速に発展したものの、まだ開発途上にあるため、MBE技術もまだ未完成の技術である。したがって、MBE装置を他の半導体装置と比較すると、その未完成度は歴然としている。すなわち、現行のMBE装置はすべて手動であり、真空部品をはじめ各種部品の信頼性が低い。また、装置の性能もオペレータの技量に著しく依存しているのが現状である。MBE法を応用した新しいデバイスの開発研究は大きな成果を挙げ、いよいよ工場での生産まで議論される段階になっているにもかかわらず²⁾、その生産手段である装置がこのようになり遅れた状況にある。

このような状況に呼応して、日立製作所では新しいデバイ

スの開発研究が効率よく推進できるだけでなく、近い将来、生産現場でも活用できる装置を開発した。開発した装置の主な特徴は、薄膜の品質とスループット向上の観点からクリーンな連続排気システムを採用したこと、省人化の観点から槽内機構部の信頼性を検討して搬送・ハンドリング系の自動化を図り、安定した性能が得られるようにしたことなどである。

2 構造の概要

装置の槽の構成を図1に、外観を図2に示す。搬送室の両側に試料導入室、準備・分析室、成長室、試料搬出室を配置

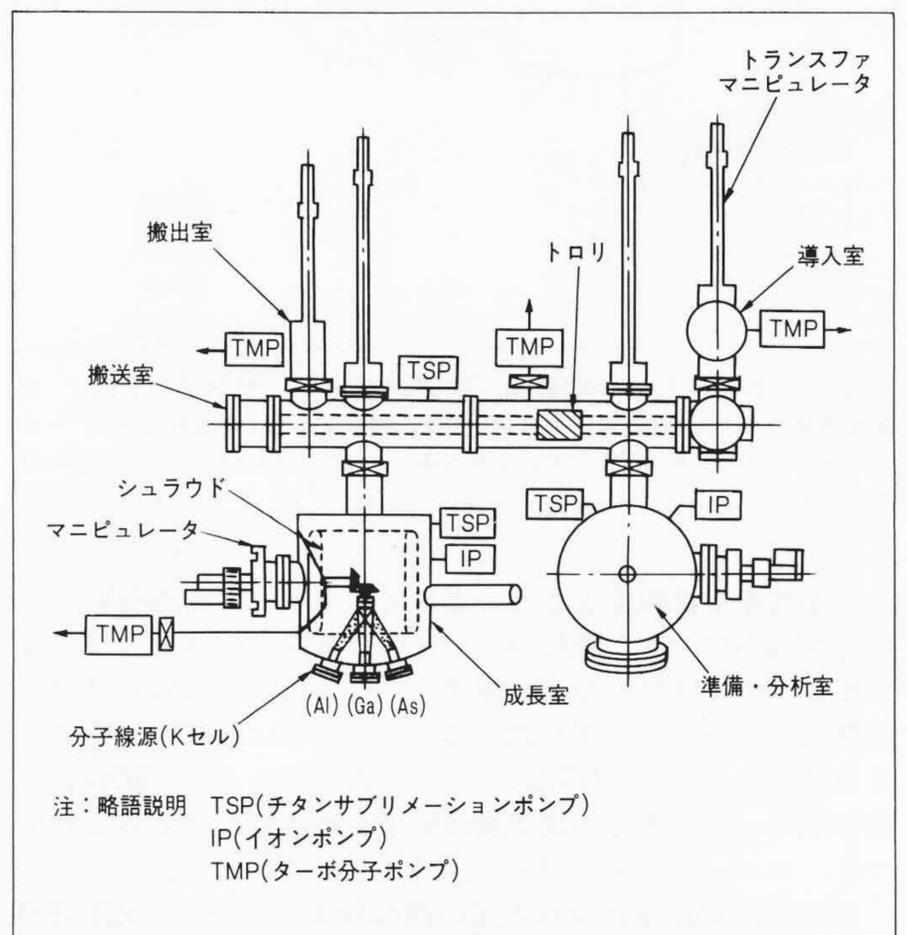


図1 MBE(分子線エピタキシー)装置の概要 基板をカセットに装着して導入室から導入し、所定の槽にはトロリとトランスファマニピュレータで搬送する。準備・分析室、成長室では基板をマニピュレータに装着する。

* 日立製作所機械研究所 工学博士 ** 日立製作所中央研究所 工学博士 *** 日立製作所笠戸工場

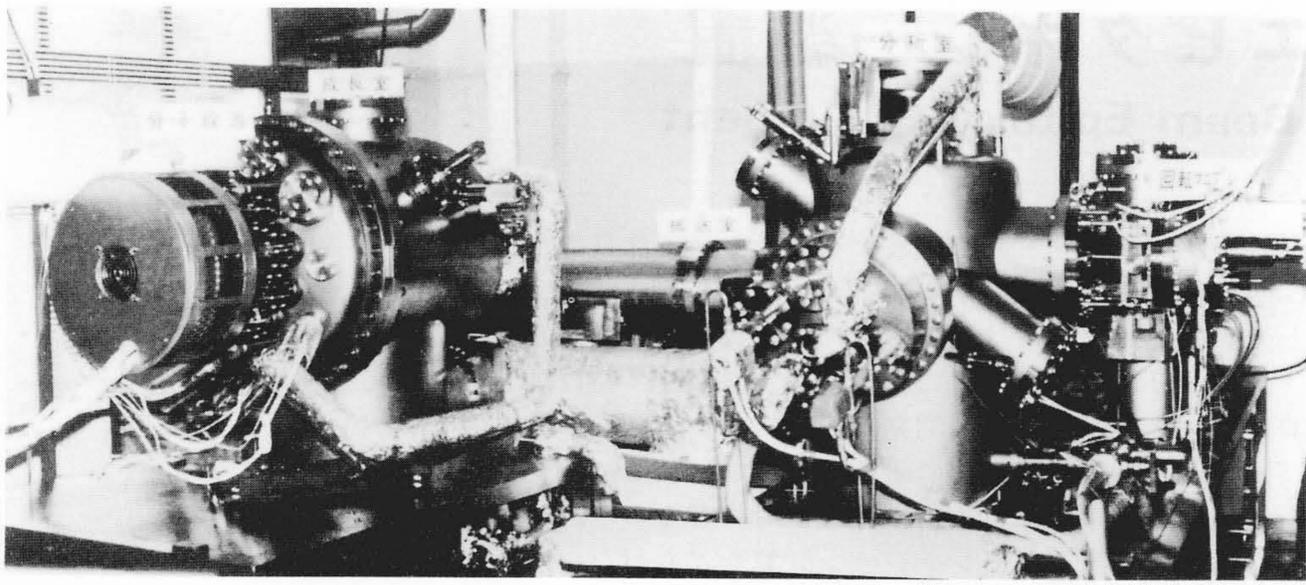


図2 分子線エピタキシー装置の外観 分子線源側から見た外観を示す(幅3,100mm, 奥行き3,250mm, 高さ1,800mm)。右側が準備・分析室, 左側が成長室, それらを結合しているのが搬送室で, 導入室は右側の奥に, 搬出室は左側の奥に位置する。

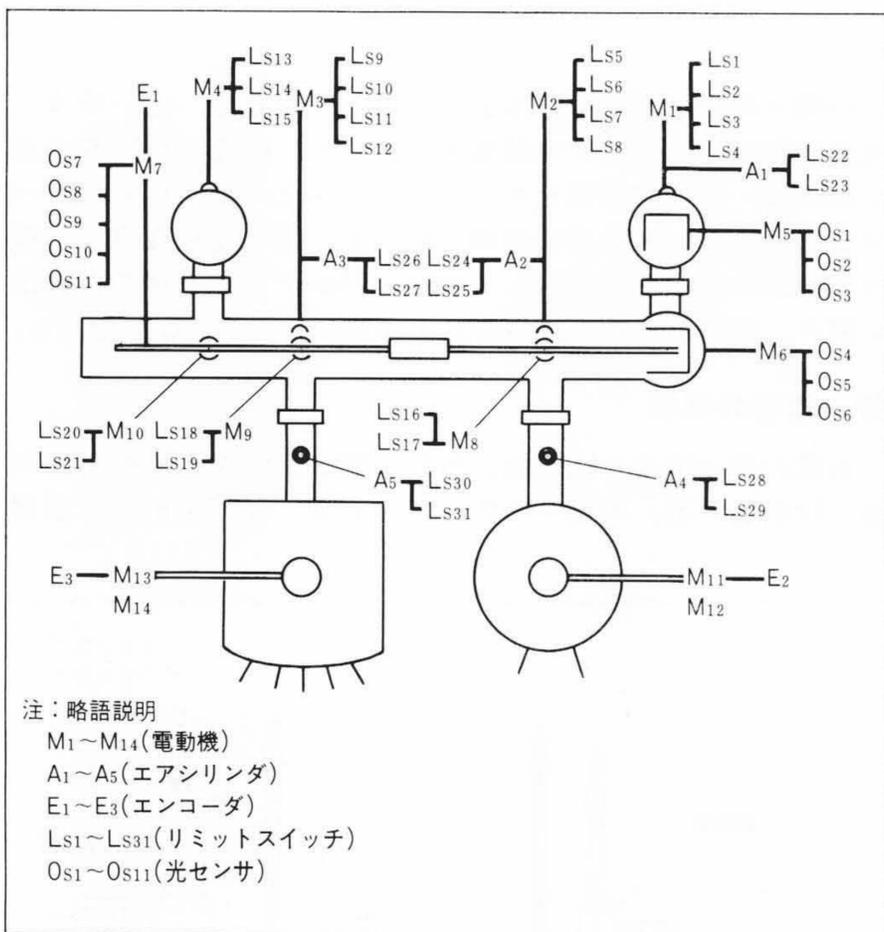


図3 自動化のための電動機, エアシリンダ, センサの配置 自動化の動力源である電動機, エアシリンダ, 搬送系を制御する光センサ, リミットスイッチの配置状況を示す。これらは, ベーキング処理に対し, 信頼性確保のため水冷を行なった。

し, 搬送室を拡張することによって, 主室である成長室の多槽化が容易にでき, 新しいデバイスの生産用の装置としても活用できるようにした。真空ポンプは各槽ごとに取り付け, 槽間にはゲートバルブを設けて, 各槽ごとに真空を保持できる構造(ロードロック構造)とした。これによって, 試料を各槽に搬入・出すとき真空度の低下を最小限に抑えることができ, スループットの向上を図ることができる。

計測器は成長室に試料表面の結晶性を見るためのRHEED(電子線回折装置)を, 槽内の残留ガスを分析するためのQマス(四重極質量分析計)を, 準備分析室に表面の清浄性をみるためのAES(オージェ電子分光器)を取り付けた。

試料の搬送, ハンドリングの自動化のための電動機, エアシリンダ, センサなどの配置を図3に示す。同図中のMは電動機, Aはエアシリンダ, Lはリミットスイッチ, Oは光セン

サを示す。

これらの部品で超高真空装置に特有のベーキング処理(槽内表面及び槽内部品からガスを放出させるために行なう加熱処理, MBE装置の場合の加熱温度は150~200℃)に対して耐熱性をもっていないものは水冷式とし, 装置に装着したまま処理が行なえるように対策を施した。

なお, 装置の開発に際して, 各槽の真空度, 試料ホルダ・分子線源の性能, 膜質に関し表1に示すように仕様を設定した。これらの仕様は良質なエピタキシャル膜を効率よく生成させるのに十分なものである。

3 成長室

本装置の主室である成長室には, 図1に示したようにシュラウド(槽内に装着しているリング状の円筒容器), 試料(サセプタに基板を取り付けたもの)を取り付けるマニピュレータ, 及び分子線源が装着されており, ガス負荷が大きい。なお, 本装置は生産現場でも活用できることを目標としており, 累積ガス負荷が大きくなるので, 主ポンプにはイオンポンプなどのように, 排気されたガスをポンプ内部に保持するため込

表1 装置の目標仕様 装置の開発に際して設定した各室の真空度, 試料ホルダ, 分子線源, 膜質などに関する仕様を示す。成長室, 準備・分析室の真空度の目標値は 6.7×10^{-9} Paである。

項目	目標値	
真空度	成長室	6.7×10^{-9} Pa (5×10^{-11} Torr)
	準備・分析室	6.7×10^{-9} Pa (5×10^{-11} Torr)
	搬送室	6.7×10^{-8} Pa (5×10^{-10} Torr)
	導入・搬出室	6.7×10^{-6} Pa (5×10^{-8} Torr)
試料ホルダ	温度	最高 800℃ (at 300W) 均一度 ± 5 ℃ (at 800℃)
	回転数	1~10/10~120rpm
分子線源	ポート数	10個(分析室2個)
	温度	最高 1,300℃ 安定度 ± 0.5 ℃
膜質	$> 7,000 \text{ cm}^2/\text{v.s}$	
スループット	$< 3 \text{ h/枚}$	
ウェーハ寸法	3 in	

み式ではなく、連続排気ができる高性能のターボ分子ポンプを採用した。なお、本MBE法では、分子線源及び基板の温度を高精度に制御することも非常に重要なことである。表1に示したように分子線源は最高1,300℃、試料は800℃に加熱され、それぞれ温度安定度で±0.5℃以下の制御性が要求される。このため、各々の温度設定値からの偏差を検討して、ヒータ出力を比例、積分、微分の三動作で制御するPID温度調節計を用いた。結晶の成長はPID温度調節計の上位にコンピュータを接続し、分子線源、試料温度を集中管理して自動的に行なう方式とした。

基板上に蒸着する薄膜の成長速度と膜厚分布は、分子線源の噴出口での分子線強度の空間分布と、基板に対する分子線源のレイアウト(取付け位置と方向)に密接な関係があり、次の式でシミュレーション計算を行なった。

いま、噴出口直径 D の分子線源と基板との距離を L 、それらのなす角を θ とすると、基板の中心から r の位置での成長速度 v は次式となる。

$$v = C \frac{\pi D^2}{L^2} \frac{P(T)}{(MT)^{1/2}} \cdot F(l/D, \varphi) \cdot A(\theta, L, r) \quad (\mu\text{m/h})$$

ここで C は定数、 $P(T)$ は温度 T で決まる試料の飽和蒸気圧、 M は分子量、 $F(l/D, \varphi)$ は分子線源の噴出口での分子線強度の空間分布を与える係数、この値は噴出口から試料までの位置 l と直径 D の比、及び分子線源中心軸からの角度 φ で決まる。また、 $A(\theta, L, r)$ は基板に対する分子線源のレイアウトで決まる。なお、基板は自転させ、 v の平均値をとることで膜厚の均一性を図る。

本装置では、成長室に10個の分子線源を基板に対して同心円状に、かつ等間隔に配置することにした。この場合、表1に示した目標仕様(3in基板の膜厚均一度±5%、成長速度1.0 $\mu\text{m/h}$)を満足するレイアウトは、 $L=150\text{mm}$ 、 $\theta=30^\circ$ となる。この条件での計算結果を図4に示す。なお、同図には後述する実験結果をも併記する。

4 真空システム

真空装置で、所定の圧力を得るための主な要因は、図5に示すようにポンプの排気能力と構成材料からの放出ガスである。そこで、超高真空を達成するためには、排気システム、材料の選定と処理方法の研究が重要である。

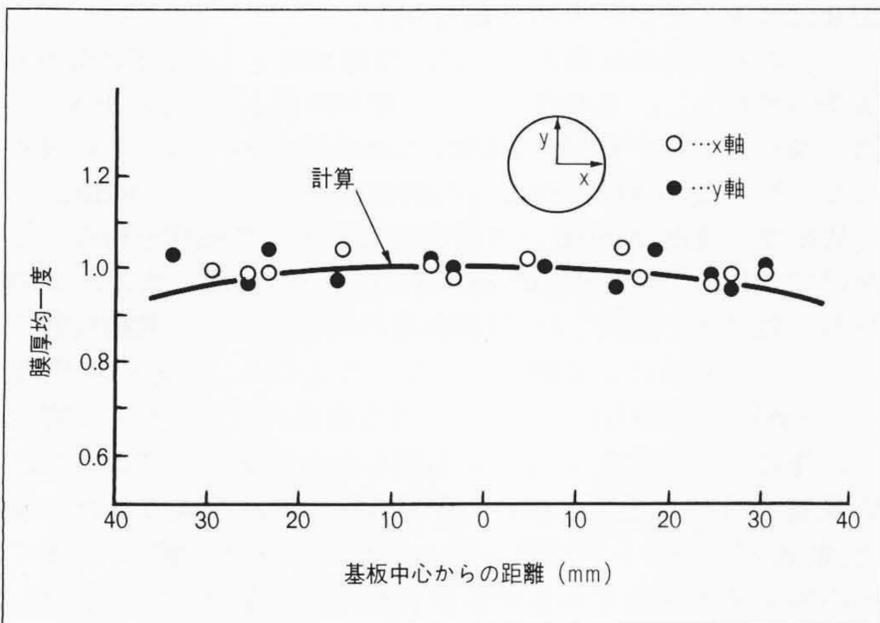


図4 3in基板での膜厚均一度 基板上に結晶を成長させた後の、半径方向の膜厚分布の一例を示す。計算値と実験値はほぼ一致し、目標値±5%以下となっている。

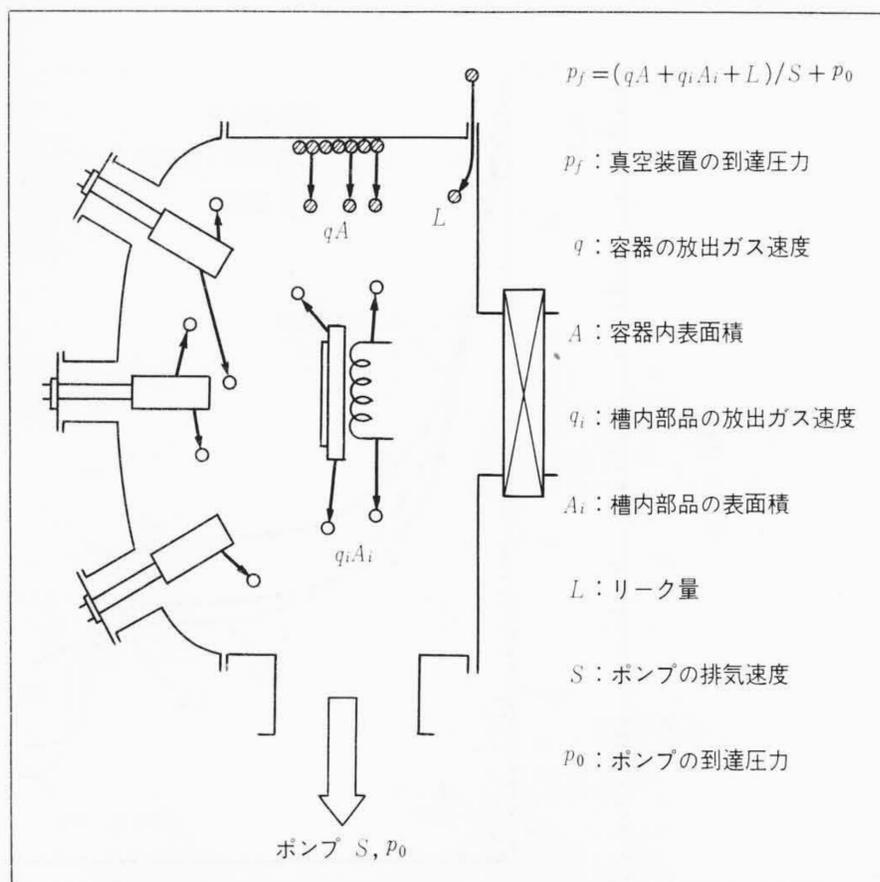


図5 真空装置の到達圧力 真空槽で、所定の圧力を得るための要因について示す。各構成材料からの放出ガス及びポンプの性能が主要な要因である。

4.1 排気システム

従来のMBE装置の排気系は、ほとんどイオンポンプとチタンサブプリメーションポンプが用いられてきた。しかし、デバイスの生産用装置を前提とすると、成長室に累積されるガス負荷は極めて大きくなるので、イオンポンプのようにため込み式でなく、クリーンでかつ連続排気ができるポンプを用いることが望ましい。そこで、本装置の成長室には日立製作所が開発した高性能のターボ分子ポンプを採用し、これとチタンサブプリメーションポンプとを組み合わせることにした。このターボ分子ポンプは、高真空側に磁気軸受を用いるとともに、回転翼をチタン合金製としている。これによって、アルミ製のポンプに比べて高速化されているとともに、ベーキング処理温度を200℃まで上げることができる。本ターボ分子ポンプのロータの外観を図6に示す。本ポンプ

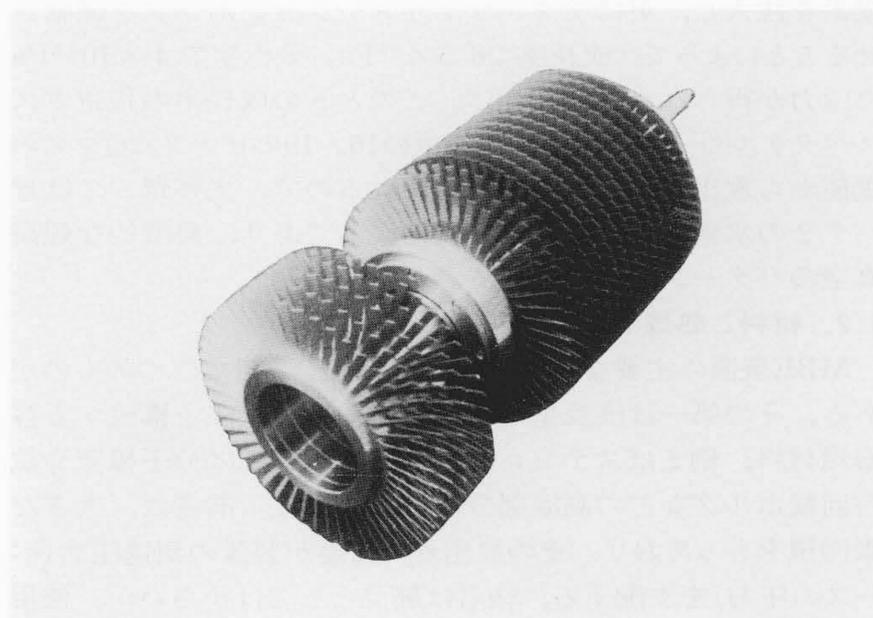


図6 ターボ分子ポンプのロータ外観 写真の手前が高真空側で、途中のすき間部が磁気軸受の装着部である。翼はチタン合金製で、翼先端の周速は415m/sである。

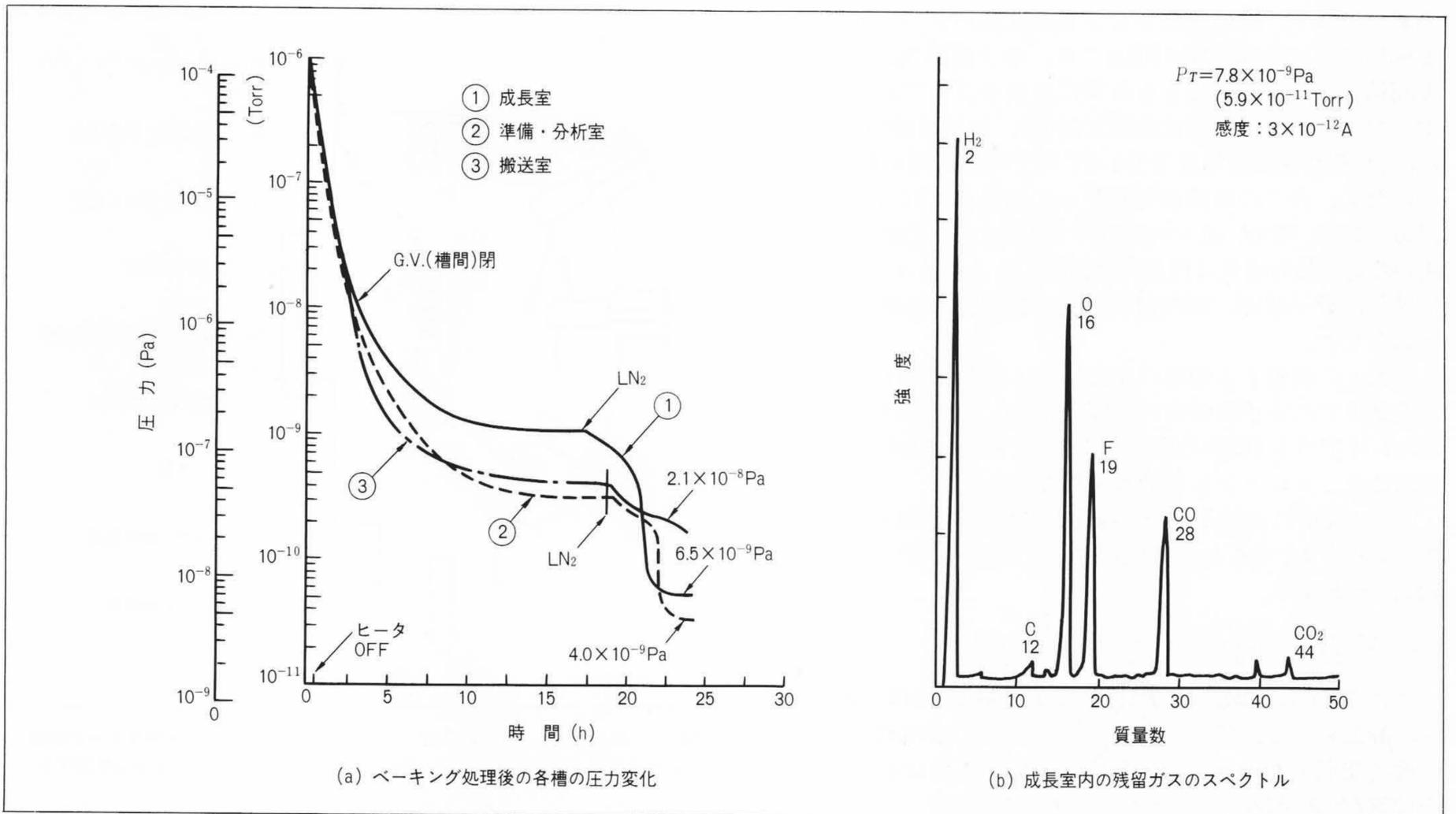


図7 MBE装置成長室の真空性能 各槽のベーキング処理後の圧力変化の状況，成長室内の残留ガスのスペクトルを示す。ベーキング処理後，約10時間で各槽とも 10^{-7} Pa以下となっている。

は，ポンプ単体で 2.7×10^{-9} Paまで到達することができ，従来のターボ分子ポンプに比較してほぼ一けた低い圧力を得る性能をもっている。このような排気系を用いた他の一つの効果として，大気開放した後の真空立上げ時間を短くすることができることが挙げられる。MBE装置では，分子線源の試料の交換のために成長室の定期的な大気開放が不可欠であるが，本装置ではベーキング処理を伴う真空立上げ時，上記ターボ分子ポンプだけで排気できるので，操作が簡単であるとともに，1回のベーキング処理で所定の圧力まで下げることができる。図7(a)は成長室の真空排気特性の一例で，20時間のベーキング処理を行なった後の各室の圧力の変化を示したものである。槽の温度の低下とともに圧力が下がり，成長室は約10時間で 10^{-8} Pa台に達している。この後，シュラウドへ液体窒素を注入し，更にチタンサブレーションポンプを運転させることによって，成長室で 6.5×10^{-9} Pa，分析室で 4×10^{-9} Paの圧力が得られた。同図(b)は，このときの成長室の残留ガススペクトルの一例である。同図中の16，19のピークはQマスの電極から放出される成分と推定されるので，主残留ガスはピーク2の水素とピーク28の一酸化炭素であり，典型的な超高真空のパターンとなっている。

4.2 材料と処理方法

MBE装置の主要な材料として，大きく分けて二つのものがある。その第一は成長室の槽，シュラウドなどを構成する容器用材料，例えばステンレス鋼であり，第二は分子線源や試料回転ホルダなどの高温部分の材料である。前者は，大きな表面積をもっており，その放出ガス速度が装置の到達圧力(ベースの圧力)を支配する。後者は部品としては小さいが，使用時の温度が高温であるため，単位面積当たりの放出ガス速度がけた違いに高くなる場合がある。また，良質の薄膜を作成するためには全圧だけでなく，残留ガスの成分も問題で，特

にCO(一酸化炭素)， CO_2 (二酸化炭素)など炭素系の成分をできる限り少なくすることが望ましい。このような観点から，容器材料及び高温材料について放出ガス速度をできる限り少なくすること，また残留ガス成分としてCO及び CO_2 を低減させることを目的として研究を行ない，その成果を本MBE装置に適用した。

研究方法としては，供試体の放出ガス速度を容器間の圧力差によって，マクロに評価するスループット法，供試体を高温加熱し，材料の表面及びその近傍からの放出ガスと，ガスの脱離エネルギーを評価する昇温脱離スペクトル法，更に，材料表面の原子配列と成分を一原子層ごとに分析が可能なアトムプローブを用いた極めてマイクロな評価法などを用い，総合的に進めた^{3),7)}。図8に昇温脱離スペクトル装置の外観を，図9にアトムプローブの外観を示す。

これらの研究の成果をもとに，容器材料としてはSUS316L真空溶解材とし，処理法として，電解研磨と $450^\circ C$ ，30hの高温予備ベーキング処理， $250^\circ C$ ，24hの部品ベーキング処理を行なった。この処理を行なった模型容器($\phi 250 \times 1500$ mm)での放出ガス速度は $150^\circ C$ ，6時間のベーキング処理を行なっただけで， $1.3 \times 10^{-10} Pa \cdot m^3 / s \cdot m^2$ の値が得られた。また，この材料，処理法を適用したMBE装置の成長室では，実動状態でスループット法による測定を行なったところ， $2.8 \times 10^{-10} Pa \cdot m^3 / s \cdot m^2$ の値が得られた。このような放出ガス特性をもつ容器と，先に述べた排気システムを組み合わせることによって，成長室の目標到達圧力 $6.7 \times 10^{-9} Pa$ を容易に達成できた。また，前述のベーキング処理条件と放出ガス速度の値は，今まで国内外で公表されている資料より優れた値を示している^{4)~6)}。

高温材料としては，タンタル，モリブデンを中心に昇温脱離スペクトル法により，表面のガス吸着特性，表面近傍からのガスの拡散状態などを調べた。それらの結果から，不純物

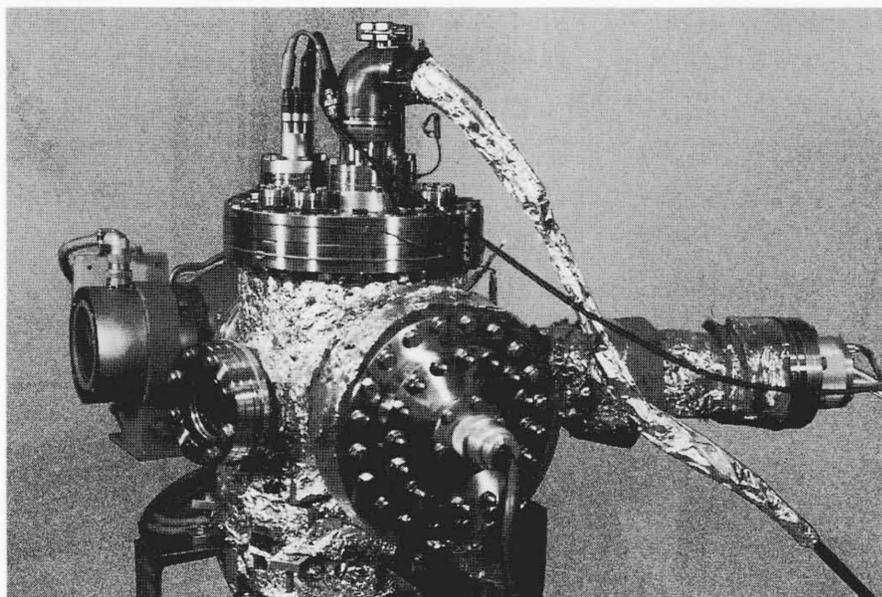


図8 表面ガス脱離スペクトル計測装置 試料を赤外線又は直接通電により一定昇温速度で加熱し、表面から放出されるガスの圧カスペクトルから、ガスの吸着状態(吸着量, 吸着エネルギー)を評価する装置である。

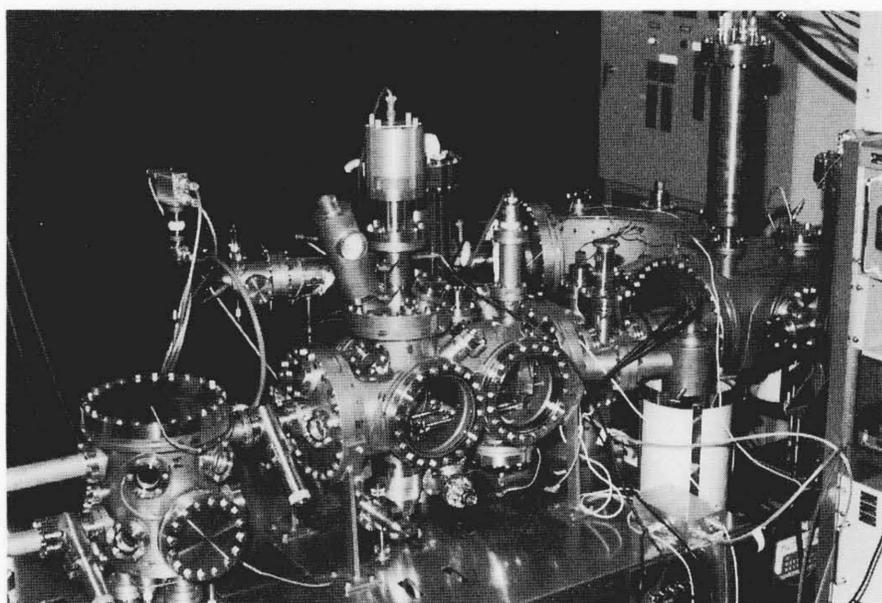


図9 アトムプローブの外観 左手前が試料処理室, 中央が電界イオン顕微鏡, 右側の大きく曲がった部分が飛行時間質量分析器である。空間分解能 3 \AA , 質量分解能 $\frac{1}{2,000}$ の性能が得られている。

としてのCOを減らすためには、長時間の高温焼出しが必要であること、高温焼出しを行なった結果は大気に戻した後も履歴として材料に残ること、また同じ材料でもメーカー間でもかなりの差があることなどが明らかになった。これらの結果をもとに、分子線源、試料回転ホルダなどの処理を行なった。

5 搬送・ハンドリングシステム

5.1 基板の搬送方法

本装置では、デバイスの生産現場でも活用できる装置であることを前提としており、試料搬送の自動化は不可欠である。自動化を可能にするには、自動化に適した搬送・ハンドリング方式であることと、十分な信頼性をもっていることが基本である。

本装置の構成上の特徴と超高真空装置での従来の実績から、搬送室内の搬送には試料をトロリに載せて、これをレール上でエンドレスチェーンでけん引する方式とし、槽間の搬送には磁気カップリングを用いたトランスファマニピュレータを採用した。なお、搬送時に室内に存在する微小異物から基板表面を保護するため、試料は搬送中すべて下向きにした。搬送のための駆動源は、図3に示したように回転導入機構を介

したDCサーボモータを用い、試料を移し換えるときの上下機構の駆動源には、直線導入機構を介したエアシリンダを用いた。試料の位置検出には、真空槽内についてはビューポートを介した耐熱性をもつ光センサを、大気側には耐熱性をもつリミットスイッチを用いた。

なお、図3に示した搬送機構全体の制御はパーソナルコンピュータで行ない、試料の挙動はカラーディスプレイ上に表示する方式とした。

5.2 試料回転マニピュレータ

成長室及び準備・分析室に装着される試料回転マニピュレータは、試料回転ホルダ部と外部からの運動導入機構部及び3次元方向微調整機構部から構成されている。試料回転ホルダは図10に示すような構造で、(1)試料をトランスファマニピュレータから受け取り保持する、(2)試料を分子線源に対向させる(公転と呼ぶ)、(3)試料を回転させる(自転と呼ぶ)機能をもち、自動化に対応できる構造となっている。

なお、試料は結晶成長中、ホルダの裏面に配設したタンタルヒータで最高 800°C まで加熱される。

本構造で、下部の傘歯車及びホルダの回転軸を支える転がり軸受などの機械部品が高温かつ超高真空下で潤滑不良が原因でロックや発じん(塵)が生じないように、傘歯車表面はTiN処理を、軸受は球に銀イオンプレーティング膜処理を行なった。これらの部品は、ヒータ下部の適正な断熱設計で試料加熱温度 800°C に対して、 250°C 以下となるようにした。

なお、本マニピュレータは実体寸法の模型で、信頼性を事前に十分に検討して実用化した。

6 膜質

本装置ではGaAsを母体とするヘテロ接合デバイスの開発研究を行なっている。いま一例として、図11にSiドーピングGaAs薄膜の不純物濃度と電子移動度の関係を示す。電子移動度は各不純物濃度でバルク結晶とほぼ同じ値となっており、不純物濃度 10^{14}cm^{-3} で $8,150(\text{cm}^2/\text{v}\cdot\text{s})$ である。この値は目標仕様($>7,000\text{cm}^2/\text{v}\cdot\text{s}$)を十分に満足している。

一方、膜厚は3in基板での実測結果を、図4に示したシミュレーション計算上に打点しているが、均一度は目標の $\pm 5\%$

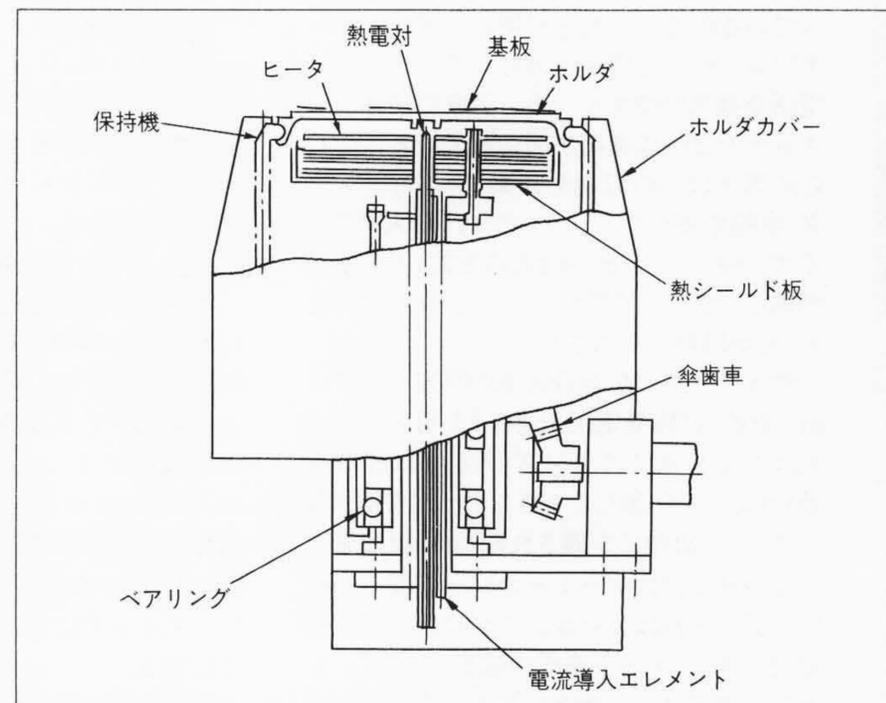


図10 試料回転ホルダの概要 成長室、準備・分析室に装着している試料回転マニピュレータの回転ホルダ部を示す。試料の保持、公転、自転、加熱の機能をもつ。

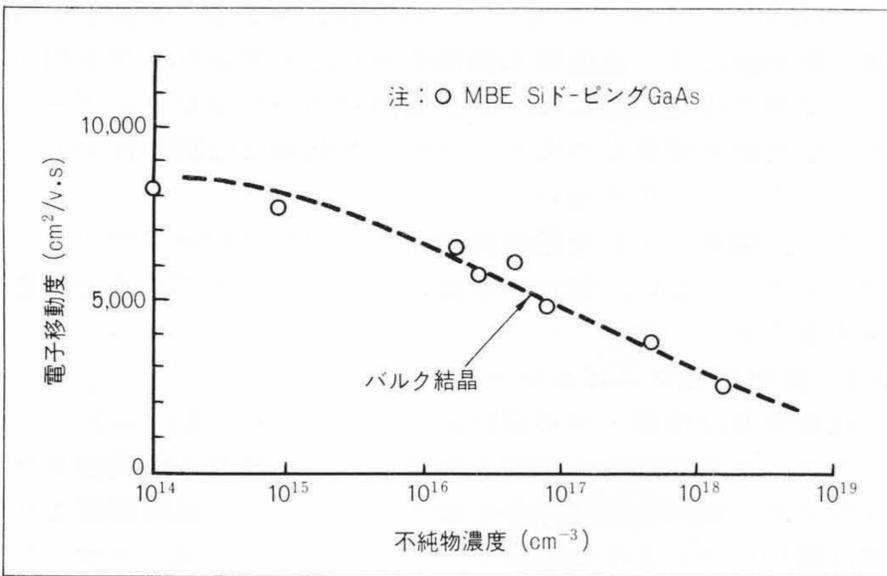


図11 GaAs膜の電子移動度 SiドープングGaAs結晶薄膜の各不純物濃度に対する電子移動度を示す。バルク結晶とほぼ同じ値となっており、不純物濃度 $10^{14}/\text{cm}^3$ で $8,150\text{cm}^2/\text{v}\cdot\text{s}$ である。

以内になっている。また計算結果とほぼ一致し、計算の妥当性が認められる。

7 結 言

以上、述べたように超高真空排気システム、基板の搬送・ハンドリングシステムなどに特徴をもち、新しいデバイスの開発研究が効率よく推進できるだけでなく、生産現場でも活用できる装置を開発した。なお、近い将来、分子線エピタキ

シー装置が本格的にデバイスの生産現場に導入される場合のユーザーのニーズは、(1)オペレーションが全自動であること、(2)信頼性がなおいっそう高いこと、(3)成長プロセスがフレキシブルに制御できること、(4)低コストであること、などである。

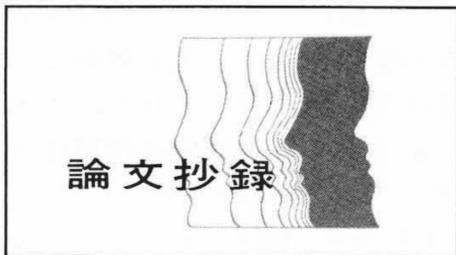
このようなニーズに呼応して、日立製作所では装置全体をコンパクトにするとともに、

- (1) 基板の搬送・ハンドリングを更に精度よく行なう方法
- (2) 大気開放後の真空立上げ時間を短くする方法
- (3) 基板・分子線源の温度を更に高精度で制御し、測定する方法

などの検討を行なっている。

参考文献

- 1) 高橋：分子線エピタキシー技術，KK工業調査会(1984)
- 2) T.L.Hierl, et al.: Collected Paper of MBE-CST-2, 147 (1982)
- 3) 応用物理学会，第46回応用物理学会学術講演会予稿集，232 (1985-10)
- 4) 蒲原，外：超高真空技術について，日本機械学会誌，88, 799, 609(昭60-6)
- 5) R.Nurolone: J.Vac.Sci.Technol., 14, 5, 210(1977)
- 6) J.R.Young: J.Vac.Sci.Technol., 6, 3, 398(1969)
- 7) 日本金属学会，第98回日本金属学会講演会概要，404(1986-4)



複合形pnpnスイッチの dv/dt 特性解析モデル

日立製作所 鈴木政善・佐川明男・他2名

電子通信学会論文誌 68—11, 877~884 (昭60-11)

pnpnスイッチ(サイリスタ)は高耐圧化が図れ、オン時の抵抗を低くできる特長をもっている。これを利用して電子スイッチアレーへの応用が進められており、特に電話交換用切換スイッチ、医療用超音波スキャナなどへの適用が図られている。これらの素子はその両端を浮動(フローティング)状態で使うことが多いので、侵入するノイズに強いこと(高い耐雑音性能)とわずかの電流で素子を開閉できること(高い制御感度)とが同時に要求される。

サイリスタの耐雑音性能の目安としては dv/dt 耐量(臨界電圧上昇率)を用いる。これはサイリスタにランプ(あるいは指数関数)状電圧を印加したときちょうど点弧するときの dv/dt 値で定義される。 dv/dt 耐量を向上させるにはゲート~カソード間短絡抵抗を低くすればよいが、これに伴って点弧電流の増大(ゲート感度の低下)を招く。しかし、電子スイッチとして用いる場合は高 dv/dt 耐量と低ゲート点弧電流の両立が不

可欠であり、従来の短絡エミッタ形サイリスタ回路ではこの実現が困難であった。

そこで我々はサイリスタのゲート~カソード間にトランジスタを接続しスイッチ(アノード~カソード)間に侵入するノイズの立上りをすばやくとらえてトランジスタをオンさせ、ゲート~カソード間を瞬間的に短絡する複合サイリスタ回路(耐ノイズ機能内蔵pnpnスイッチ回路)を提案した。

本複合回路は 0.1mA のゲート点弧電流で $1,000\text{V}/\mu\text{s}$ ($=200\text{V}/0.2\mu\text{s}$)以上の dv/dt 耐量を実現でき、耐雑音性能とゲート感度との両立ができる特長をもっているが、単体のpnpnスイッチでは見られない特異な dv/dt 特性となる場合が見いだされた。この状態では複合形の回路構成にもかかわらず極めて低い dv/dt 値でpnpn素子が誤点弧し、スイッチは元来の耐ノイズ機能を失ってしまう。

我々はこの誤点弧現象を検討・解析し、原因がサイリスタとトランジスタのターン

オフ時間(厳密にはサイリスタのnゲート回復時定数とトランジスタの蓄積時間)の競合によって生ずることを突き止め、解析に有用な回路モデルを提案し、点弧動作を明らかにした。この回路モデルを用いて点弧現象がサイリスタのpnpの電流増幅率 h 、nゲート回復時定数 τ 、トランジスタの蓄積時間 t_s などの値に影響されることを明らかにし、点弧特性の目安となる動的阻止電圧 V_F が次式によって近似できることを理論的及び実験的両面から求めた。

$$V_F = \frac{V_B \cdot \tau}{CRh} \epsilon^{1/\tau}$$

ただし、 V_B :サイリスタのゲート~カソード間導通電圧(約 0.6V)、 C :nベース端子静電容量、 R :ゲート~カソード間抵抗を、それぞれ表わす。

また、上式を用いて阻止電圧 V_F に対するパラメータサーベイを行ない、電流増幅率 h 、ゲート回復時定数 τ 、蓄積時間 t_s などの影響、その余裕度を数値的に検討した。