

# 全自動MBE装置の開発

## Development of Full Automatic Molecular Beam Epitaxy Equipment

近年、超高速素子や半導体レーザに代表される化合物半導体デバイスの実用化には目覚ましいものがある。これらのデバイスの生産には、原子層オーダーの結晶成長制御技術が要求され、分子線エピタキシー法による成長が注目されている。これに呼応して、従来の装置に比較してより生産設備に適したカセット方式のカセット方式の分子線エピタキシー装置を開発した。

開発した装置は、基板を導入してから成長し搬出するまでの工程を全自動化することで、生産デバイスの安定化を図ったもので、自動化に適した機構と精度を持つ基板の搬送、ハンドリングシステムや、分子線源の低放出ガス化と大口径化などに特徴がある。

高橋主人\* Kazue Takahashi  
 蒲原秀明\*\* Hideaki Kamohara  
 高橋 進\*\*\* Susumu Takahashi  
 物集照夫\*\*\*\* Teruo Mozume  
 村松公夫\*\*\*\*\* Kimio Muramatsu  
 田村直行\*\*\*\*\* Naoyuki Tamura

### 1 緒 言

GaAsに代表される化合物半導体デバイスは、超高速素子や半導体レーザとして急速に実用化されている。これらのデバイスの結晶成長には、原子層レベルの制御が要求され、その技術としてMBE(Molecular Beam Epitaxy:分子線エピタキシー)法が注目されている。MBE法は高度化された真空蒸着法であり、超高真空技術を基礎に結晶成長中の不純物汚染を極限まで抑え、蒸着速度を数オングストローム毎秒程度で高精度制御することによって、原子層レベルの結晶成長を可能としている<sup>1)</sup>。

このように、ほかの結晶成長法には見られない優れた結晶制御性を利用して、新しいデバイスを開発する動きがここ数年急激に活発化してきた。一方、現在生産段階にあるデバイスを、より高品質化するためにMBE法で生産するという動きも強くなっている<sup>2)</sup>。

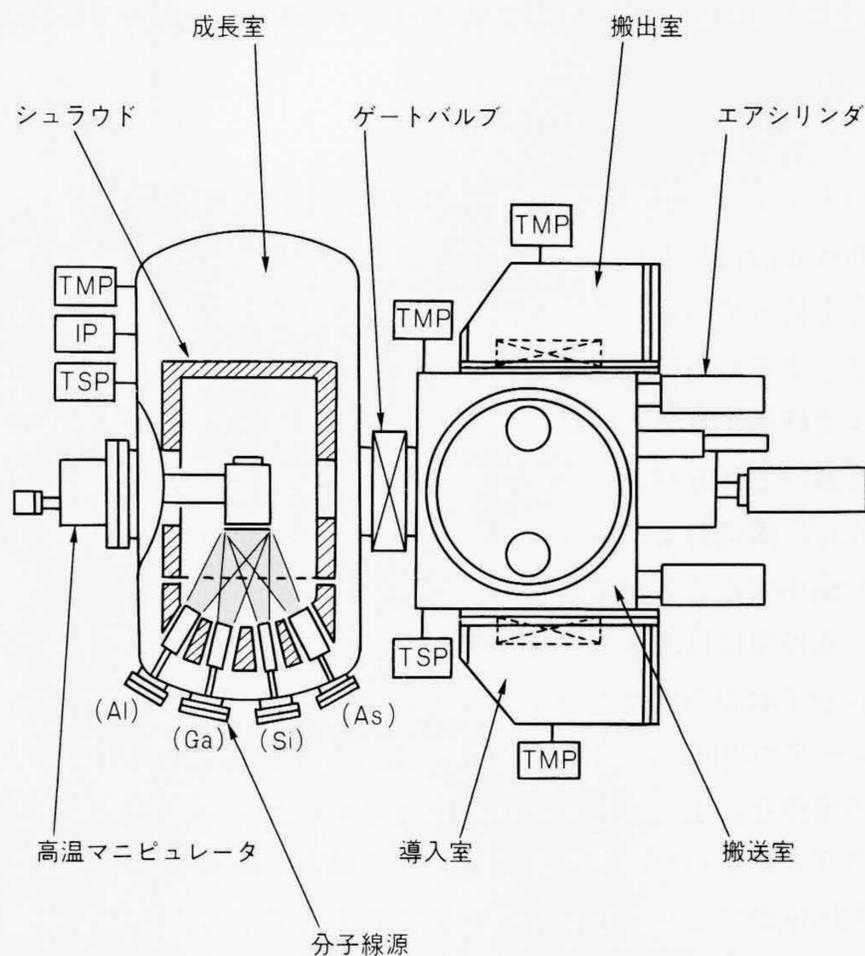
日立製作所では、このような状況に呼応して半導体デバイスの研究開発にも生産設備としても活用できる分子線エピタキシー装置を3年前に開発した<sup>3)</sup>。さらに今回、より生産設備に適した装置<sup>4)</sup>を開発したので、その主な点について述べる。

### 2 装置の構成と仕様

装置の全体構成を図1に、外観を図2に示す。

装置は、搬送室の両側に導入室と搬出室を配置し、成長室と合わせて4室で構成されている。

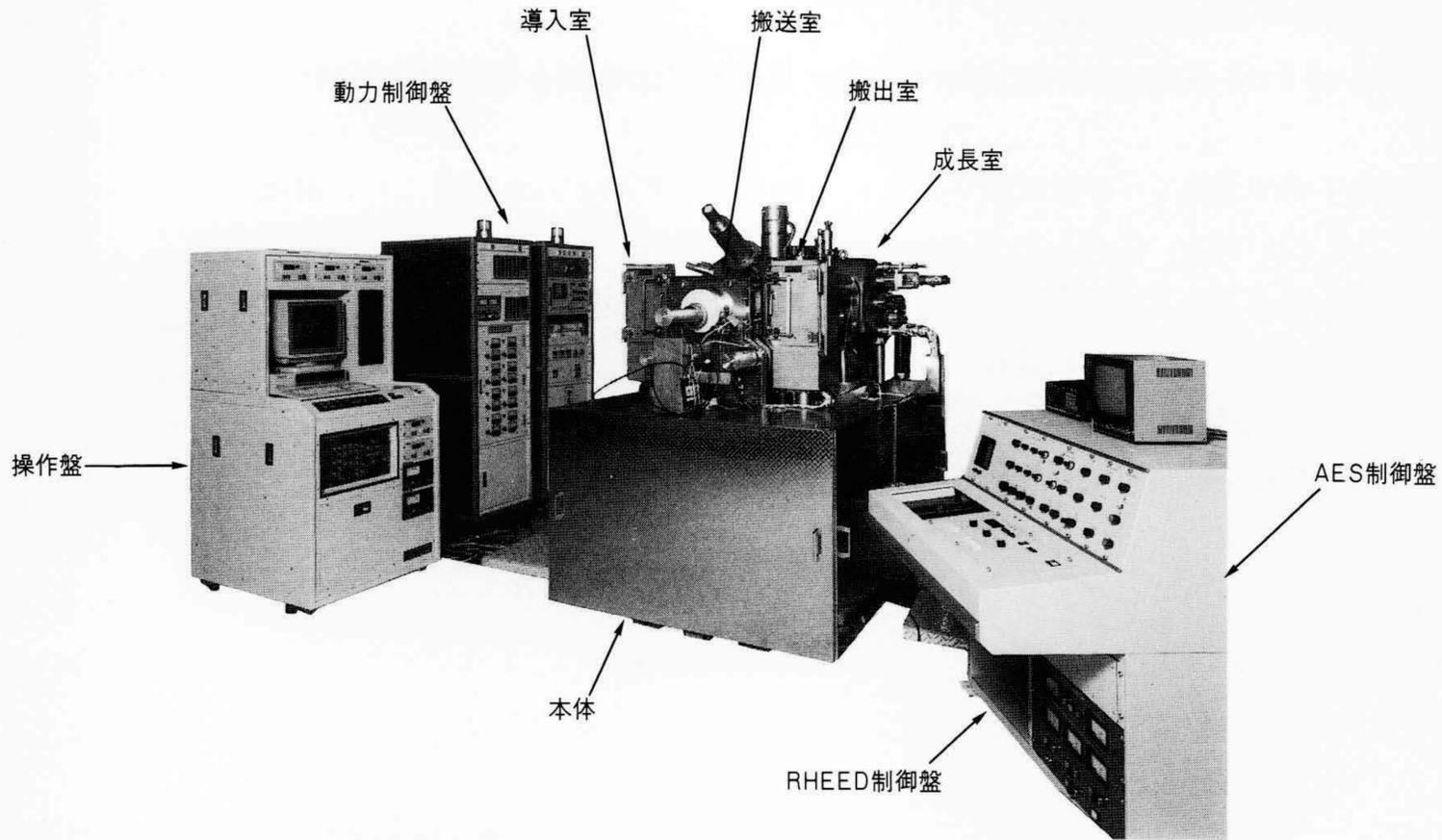
導入室と搬出室は左右対称に設計されている。搬送室は、



注：略語説明 TMP (ターボ分子ポンプ)  
 IP (イオンポンプ)  
 TSP (チタンサブレーションポンプ)

図1 全自動分子線エピタキシー装置の概要 基板の導入室、基板を超高真空中に格納し、成長前の予備加熱などを行う搬送室、液体窒素のシュラウドで囲まれた成長室、そして成長後の基板を取り出す搬出室の4室で構成されている。

\* 日立製作所機械研究所 \*\* 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 \*\*\*\* 日立製作所生産技術研究所  
 \*\*\*\*\* 日立製作所半導体設計開発センター \*\*\*\*\* 日立製作所笠戸工場



注：略語説明 AES (オージェ電子分光器), RHEED (反射高速電子回折)

図2 全自動分子線エピタキシー装置の外観 導入室, 搬出室側から見た装置の外観を示す。本体は架台(幅1,320 mm, 奥行き2,020 mm)の上に組み立てられている。すべての操作は左端の操作盤から行うことができる。

導入室から導入された基板を超高真空中に収納する役目と、基板表面に吸着しているガス分子を脱離させる予備加熱の機能を持っている。さらに、本装置では、装置の占有面積を小さくするために搬送室を長方形とし、基板をターンテーブルで移送するとともに、搬送室から成長室への搬送を折りたたみのできるパンタグラフ式移送機構で行うようにした。これらの構造および構成により、装置の占有面積を従来の $\frac{1}{3}$ まで縮小することができた。

成長室には、8本の分子線源を取り付けることができる。各分子線源の周囲と、基板を保持して加熱する高温マニピュレータの周囲は、結晶成長に悪影響を及ぼす残留ガス分子(分子線源と高温マニピュレータを加熱すると、一酸化炭素などのガス分子が放出される。)と、分子線の再脱離を防ぐために液体窒素で冷却したシュラウドで囲まれている。特に分子線源の周りについては、他の分子線源からの分子線が侵入しないようにするため、分子線源だけでなくシャッタまでシュラウド内に収めるように配置し、蒸発源のコンタミネーションを最少に抑えるようにした。

成長室には、基板表面の結晶性を見るためのRHEED(反射高速電子回折)と、槽内の残留ガス成分を分析するための四重極質量分析計を設け、搬送室には基板表面の清浄性を調べるためのAES(オージェ電子分光器)を取り付けた。

なお、本装置では、真空排気や基板の搬送、成長、搬出といった全工程を自動化した。自動化するためには、基板の搬

送、ハンドリングでの位置決め精度や信頼性が、手動時のそれに比較して格段に厳しいものが必要とされる。そこで、機構そのものを自動化に適した構造や方式とした。また、センサの採用や誤動作を回避するためのリトライ機能を付加し、ソフトの面からも自動化の信頼性向上をバックアップした。

表1 装置の仕様 装置の開発に際して設定した各室の真空特性、高温マニピュレータ、分子線源などに関する仕様を示す。

項 目		仕 様	
真空特性	成 長 室	$\leq 6.7 \times 10^{-9}$ Pa { $5 \times 10^{-11}$ Torr }	
	搬 送 室	$\leq 6.7 \times 10^{-8}$ Pa { $5 \times 10^{-10}$ Torr }	
	導 入・搬 出 室	$\leq 6.7 \times 10^{-6}$ Pa { $5 \times 10^{-8}$ Torr }	
高温マニピュレータ	温 度	最 高	800 °C
		安 定 性	$600 \pm 0.5$ °C
		均 一 性	$\pm 5$ °C (3 インチ)
	回 転 数	10~60 r/min	
基 板 ホ ル ダ	インジウムフリー(2 インチ, 3 インチ)		
分子線源	温 度	最 高	1,400 °C
		安 定 性	$1,300 \pm 0.3$ °C
	本 数	8 本	
基 板 投 入 枚 数	10枚/カセット		
膜 質(電子移動度)	$\geq 7,000$ cm <sup>2</sup> /V·s		
本 体 寸 法	1,320×2,020 mm <sup>2</sup>		

本装置の開発に際して設定した仕様を表1に示す。

本装置は、クリーンルームの有効利用の観点から小形化を図ったが、さらに、導入室と搬出室の基板取り出し用扉付近にスルーザウォール(Through the Wall)を設置し、本体をクリーンルームの外に置くことも可能である。

### 3 装置の特徴

#### 3.1 全自動基板搬送, ハンドリングシステム

本装置は、デバイスの生産現場で活用できる装置であることを前提としており、結晶成長ばかりでなく基板の搬送、ハンドリングの自動化が不可欠である。これを可能にするには、高精度位置決めができる自動化に適した搬送機構であることと、十分な信頼性を持つことが基本である。

本装置の基板搬送機構を図3に示す。

基板を専用の基板ホルダに収めてカセットに装着し、導入室に導入する。引き続き、旋回アームによって搬送室のターンテーブルに配設する。その後は、必要に応じてパンタグラフ式の伸縮アームで基板を成長室の高温マニピュレータの直下まで搬送し、高温マニピュレータの下に取り付けてある上

下機構を作動させて基板の受け渡しを行う。高温マニピュレータへの基板の保持は、基板ホルダの外周部に設けられた溝をつめで挟み込む方式としている。つめとつめの開閉機構は高温マニピュレータに取り付け、つめの開閉機構を作動させたり、所定の位置まで基板を移送する機能を上下機構に持たせた。

以上述べた基板の搬送は、基板表面に異物が付着するのを防ぐため、基板表面を下側に向けて行われ、成長中も基板表面がわずかに下側を向くようになっている。

本搬送装置の駆動機構の特徴は、大気から真空への運動の導入方法にある。従来の超高真空装置での運動の導入機構としては、磁気カップリングを用いたものやペローズの旋回を真空中で回転運動に変換した回転導入機などが一般的であるが、大気側と真空内の運動に差が生じやすいこと、および自動化の際に移動量や回転角の検出が必要であるという問題がある。本装置では、以上の点を考慮し、大気から真空への運動は、すべてペローズの直線運動による伸縮で行う方式を採用した。本方式により、大気側と真空内での位置が完全に一致する。しかも、大気側のアクチュエータをエアシリンダと

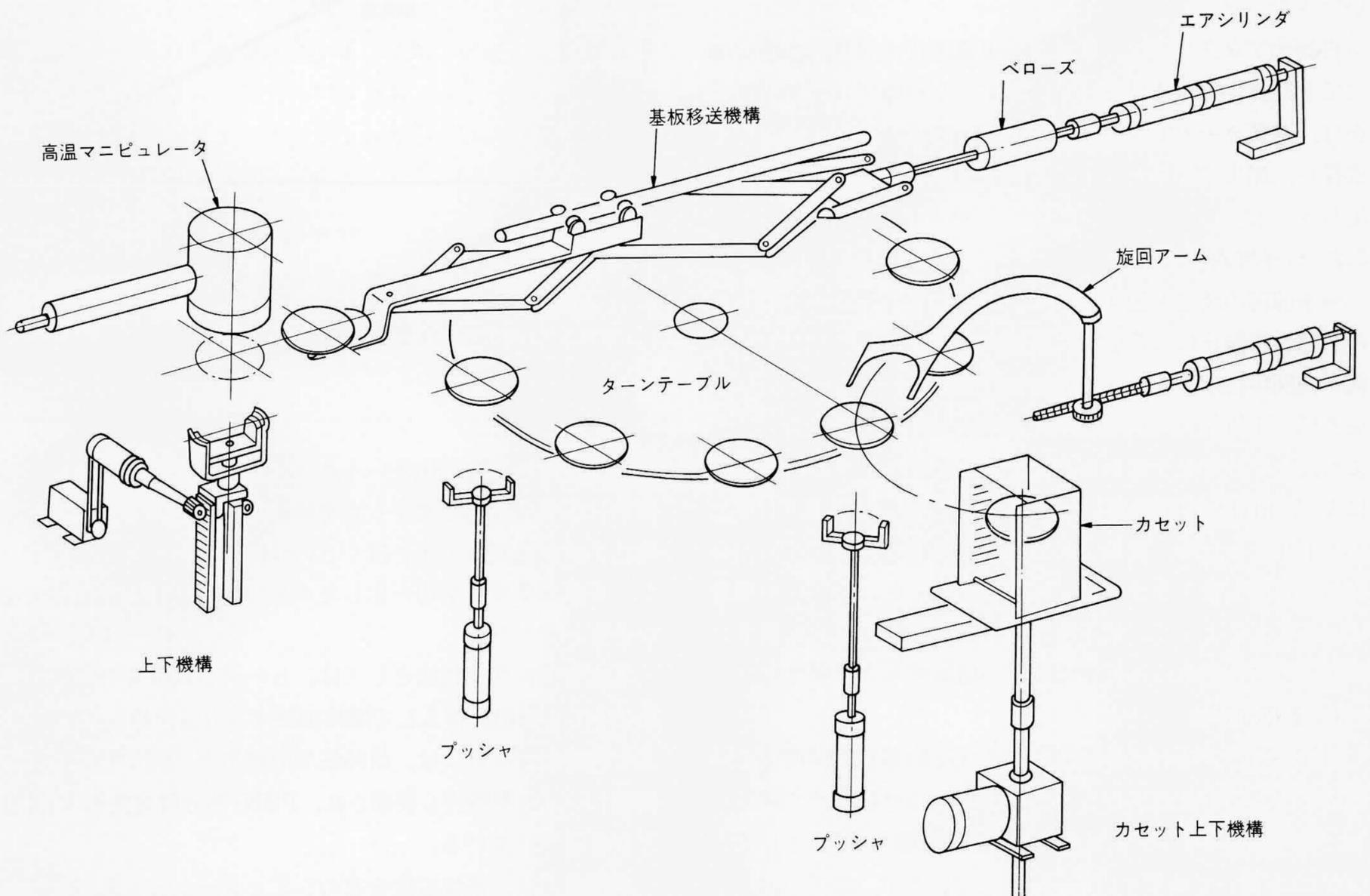


図3 全自動基板搬送機構の概要 基板をカセットに収納してから、導入室のカセット上下機構に装着する。旋回アームやパンタグラフ式基板移送機構によって成長室まで搬送された基板は、上下機構によって高温マニピュレータに受け渡され成長が行われる。

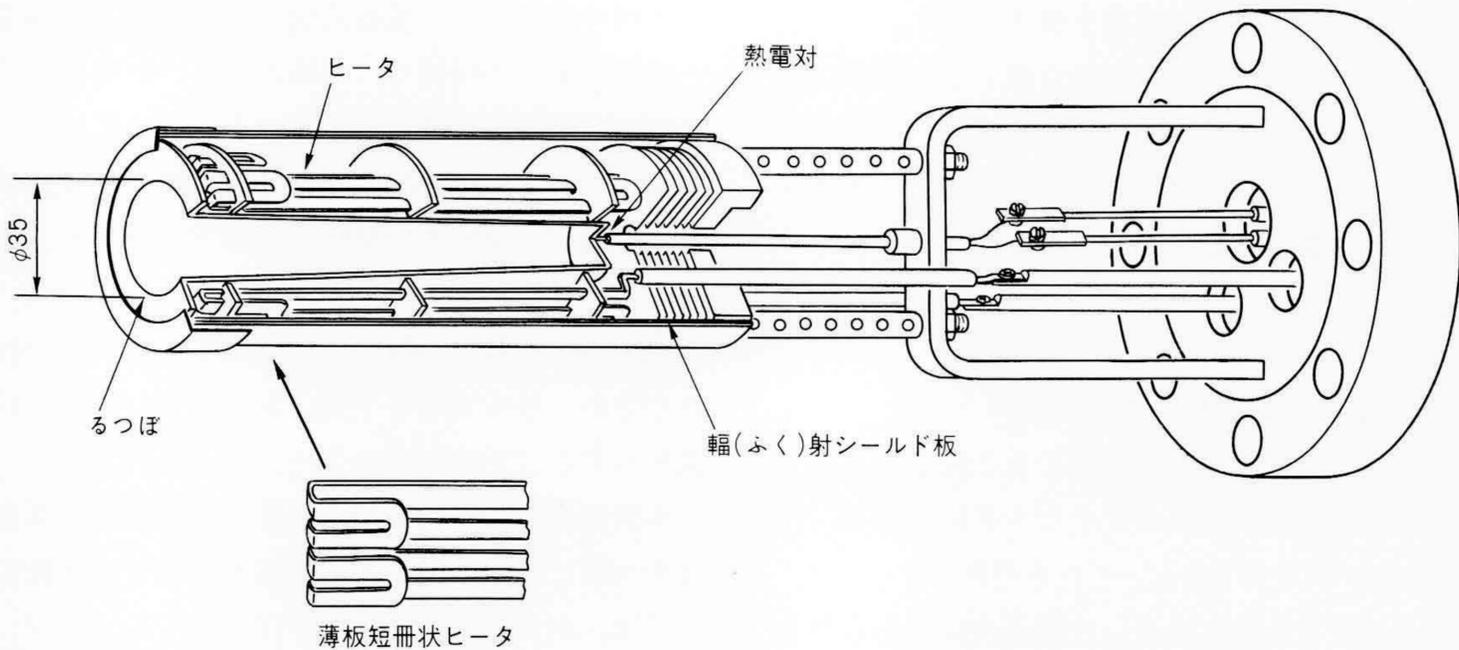


図4 大口径分子線源の構造 るつぼ容量100 ccの大口径分子線源の断面構造を示す。るつぼ出口で温度が低下するのを防ぐために、ヒータを折り曲げて加熱効率の向上を図った。

し、さらにシリンダのストロークエンドで位置決めするようにしたため、搬送系の停止位置は常に同じとなる。また、本方式では、エアシリンダの動作をモニタすることで、搬送位置の確認や受け渡の確認ができる。これらによって、位置決め精度、信頼性、搬送系の動作確認とも高いレベルで実現できるようになり、自動化に適した搬送機構を完成することができた。

自動化プログラムは、何種類か用意されており、必要に応じて手動操作も可能になっているが、全自動プログラムの場合、基板カセットを導入室に収納した後、基板を搬送して成長し、搬出室のカセットに基板を格納するまでが自動的に実行される。

### 3.2 分子線源

分子線源の構造を図4に示す。開発した分子線源は、原料の突然沸騰防止による表面欠陥低減の観点から、ヒータ先端部を同図中に示したような折り曲げ構造とし、るつぼ出口の温度低下を防ぎ、るつぼ軸方向の温度分布の均一化を図った。

また、ヒータ形状を薄板短冊状として加熱効率を高めることにより、消費電力を低減した。さらに、分子線源容量を100 ccと大形化したため、成長に必要な分子線強度を得るための分子線源温度も低下させることが可能となった。これらの構造にしたことによって、分子線源からの放出ガスを、図5に示すように従来品に比較して著しく低減することができた。

### 3.3 基板加熱法

MBE装置でのGaAs基板の加熱は、GaAs基板の強度上の問題などから、専用の基板ホルダ(サセプタ)を使用して行われる。従来は、モリブデン製のサセプタに低融点金属(主にインジウム)を用いて基板を貼(てん)付していたが、最近では、インジウムで貼付せずに取り付けるインジウムフリーの基板保持法が主流となった。インジウム貼付式の基板保持法は、基

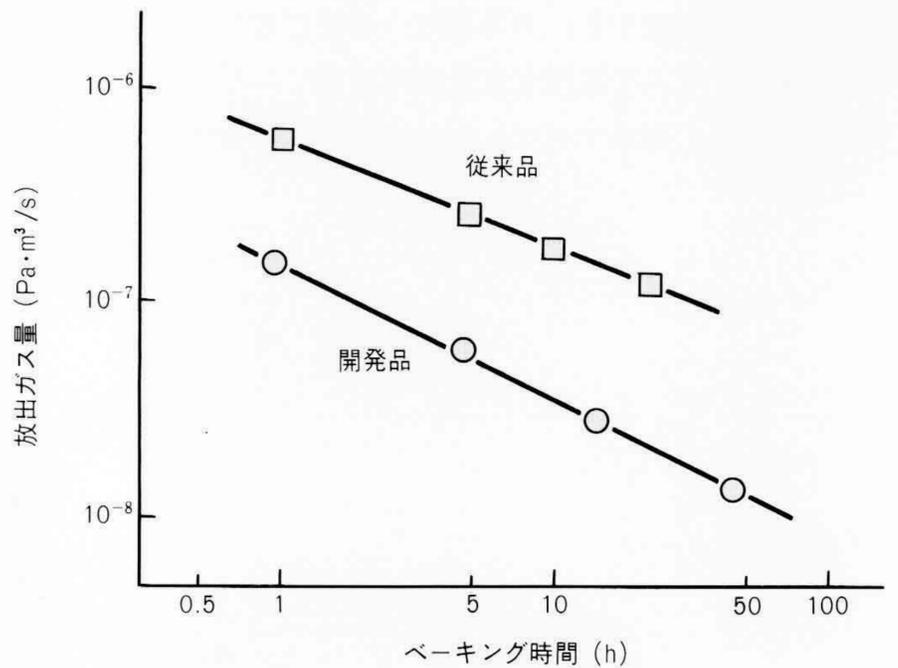


図5 分子線源の放出ガス量 1,400℃でベーキング処理を施した後、1,200℃での分子線源の放出ガスを測定した。分子線源のるつぼには原料を入れずに加熱した。

板の温度分布の均一化という点では優れている。しかし、基板貼付作業に熟練を要する点や結晶成長中にインジウムが蒸発して結晶品質の劣化を招くという問題があった。したがって、基板温度分布を均一化したインジウムフリー基板保持法が必要となった。

温度分布の均一化法としては、ヒータと基板との間に均熱板と称する部材を挿入して間接加熱する方法が知られている。また均熱板の材料には、耐熱性や低放出ガス特性のほかに、高輻(ふく)射率特性も要求され、PBN(熱分解窒化ほう素)などが使用されている。

本開発では、基板温度分布のシミュレーションと基板加熱実験の両面から検討を進め、ヒータの密度を最適化することで温度分布の均一化を図った。

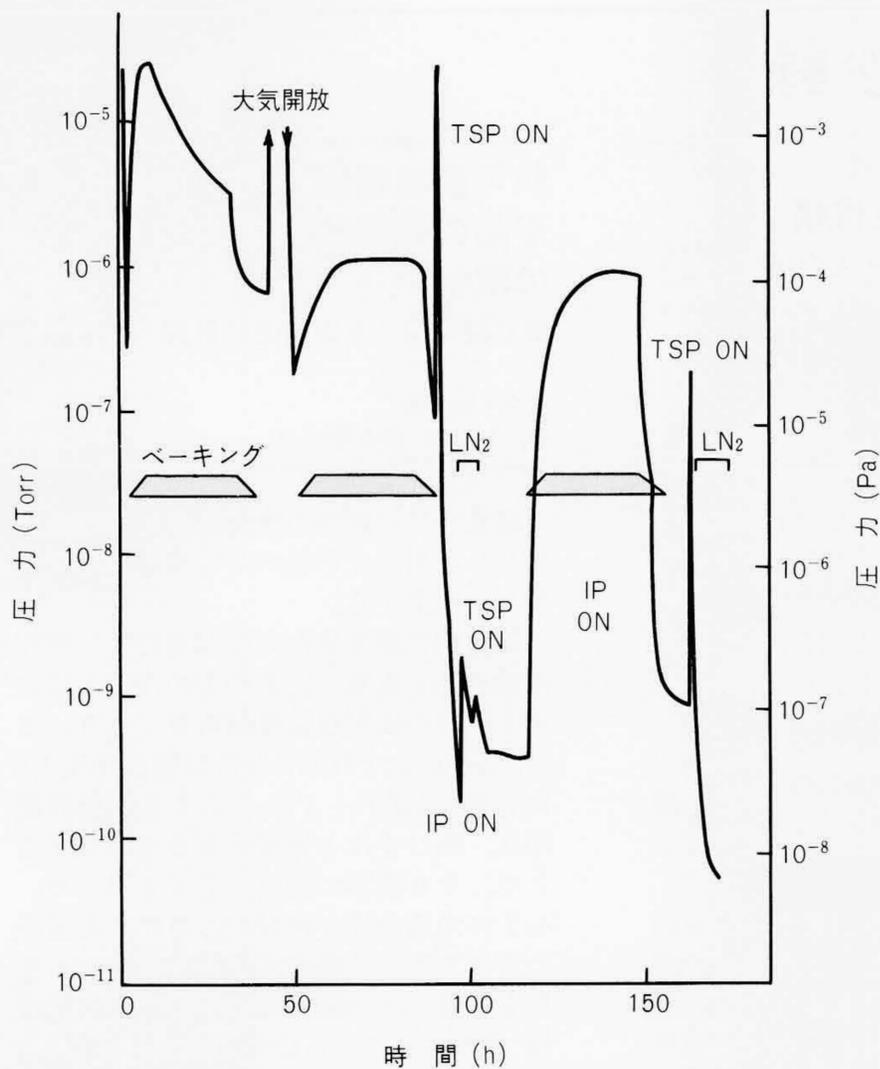


図6 成長室の真空排気特性 真空排気試験時の成長室の圧力変化特性を示す。150℃、85時間のベーキング処理で $6.7 \times 10^{-9}$  Pa {  $5 \times 10^{-11}$  Torr } を達成した。

### 3.4 真空排気システム

本装置の真空排気システムは、図1に略語で併記した。各室ともTMP(ターボ分子ポンプ)を主排気ポンプとした。さらに、成長室にはIP(イオンポンプ)とTSP(チタンサブリメーションポンプ)を、搬送室にはTSPを併設した。

真空槽と槽内部品は、事前に所定の高温ベーキング処理(450℃加熱処理)を施して使用した。装置としては、150℃のベーキング処理で $6.7 \times 10^{-9}$  Pa {  $5 \times 10^{-11}$  Torr } の達成が可能となった。成長室の当初の真空排気特性を図6に示す。150℃、85時間のベーキング処理で $6.7 \times 10^{-9}$  Pa {  $5 \times 10^{-11}$  Torr } を達成した。

### 3.5 膜質

一例として、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図7に示す。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、仕様を十分満たしている。

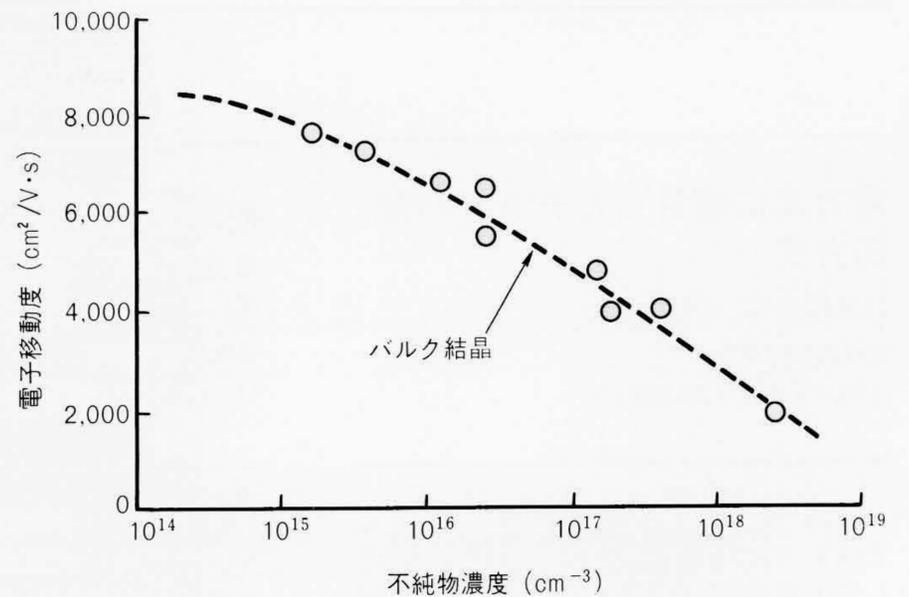


図7 GaAs膜の電子移動度 SiドーピングGaAs結晶薄膜の各不純物濃度に対する電子移動度を示す。バルク結晶とほぼ同じ値となっており、不純物濃度 $4 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ で、仕様 $7,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を達成した。

## 4 結 言

基板の搬送、ハンドリングシステムや大口径分子線源に特徴を持ち、デバイスの生産現場で活用できるMBE装置を開発した。今後、分子線エピタキシー装置が本格的に生産設備として使用されるにつれ、装置に対する信頼性や成長プロセスの安定性と再現性、結晶の高品質化などへの要求がますます強くなると考えられる。

日立製作所では、これらの要請に呼応して、装置全体の信頼性を向上させるとともに、結晶の高品質化が可能な装置とするため、分子線の挙動解析などを検討している。

最後に、本装置の開発に際し終始ご指導をいただいた東京大学助教授先端科学技術センターの白木靖寛工学博士に対し深謝する。

### 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) 榎：分子線エピタキシー1988研究の動向と将来展望，Semiconductor World, 9, 85~87(1988)
- 3) 蒲原，外：分子線エピタキシー装置，日立評論，68, 9, 693~698(昭61-9)
- 4) 高橋，外：全自動MBE装置の開発，第48回応用物理学会講演予稿集，第1分冊，p.197(1987-秋季)

# 論文抄録

## 電力流に着目したチョッパ制御方式

日立製作所 能見 誠

電気学会論文誌D

108D, 4, 387~394(昭63-4)

従来、車両用チョッパの制御方式として採用されていたのは、制御した結果としての電動機電流の平均値を制御系に帰還し、目標値との偏差によって新たな制御量を決定する平均値電流帰還制御方式が採用されていた。これに対して、新たな制御方式としてチョッパの電力流に着目し、その電力を瞬時制御する電力注入制御方式を提案した。

この電力注入制御方式は、電動機が消費する電力は、その電力を供給するチョッパの出力電力に等しいというエネルギー保存則に基づき、チョッパの瞬時出力を計測・積算し、それが所定の値となったときゲートを閉じることで、所望の出力を得るものである。本方式を計算機シミュレーションによって特性解析を行った結果、従来の制御方式と比較して、指令応答性・外乱耐性とも向上し、車両用チョッパの制御方式として有効なことを確認した。

## MOSカメラ用雑音低減回路

日立製作所 今出宅哉・野田 勝

テレビジョン学会誌

41, 11, 1033~1038(昭63-11)

MOSカメラの雑音低減を目的として、新しいリサンプリング方式を考案した。この方式では、ホットダイオードから転送される信号電荷を順次センサ出力端子に蓄積していく。得られた階段状の信号波形に、画素内平均化処理を加えて低雑音化した後、隣接画素間の差分により原信号を再生する。階段状の信号の振幅を減じるために、センサ出力端子を緩やかにリセットすることにし、4 MΩ帰還の低雑音プリアンプを開発した。後段の平均化、差分処理回路はIC化した。

これらにより雑音を5 dB低減し、F1.6のレンズで最低照度10 lxの高感度化を達成した。さらに、本方式は特に高周波雑音の抑圧効果が大きく、高解像度化にも好適である。水平760画素のMOSセンサを用いて、500TV本以上の解像度を達成した。本稿はこれらの理論解析と試作、検証を中心にした報告である。

## 感熱記録音の発生機構

日立製作所 下出新一・大内勝文・他1名

日本音響学会誌

44, 5, 369~376(昭63-5)

オフィスの労働環境を改善する観点から、低価格で低騒音のファクシミリに対する市場ニーズが高い。

本論文では、実験と理論によって感熱記録音の発生機構の解明と制御手法を検討した。

最初に、記録音が紙搬送開始時にはく離力によって発生すること、このはく離力が感熱ヘッドの表面温度に逆比例することを示した。

次に、記録音の大きさが最小となる紙送りタイミングが存在し、この場合の低減効果がきわめて顕著であることを実験で明らかにした。最後に、この力が感熱ヘッドと記録紙間の接着面積に比例すると仮定した理論によって、紙送りタイミングによる制御方法の妥当性を確かめ、併せて感熱紙の顔料を増し、発色剤を変えることによってはく離力を小さくし、記録音を低減することの有効性をも指摘した。

## 長方形振動面周辺音場の予測精度

日立製作所 下出新一

日本音響学会誌

43, 12, 936~940(昭62-12)

機器の表面が振動し、その放射音が問題となる場合、機器各部の振動特性と周辺の放射音場の関係を明確にするためには、振動面の離散化の手法はきわめて重要である。

本論文は、離散化誤差の設計指針を得ることを目的として、無限バフル内に単純支持の条件ではめ込まれた長方形振動板モデルに関する理論検討結果を述べたものである。

振動板を有限個の点音源の集合体として近似し、級数定理を利用して、離散化誤差を簡単な式で表し、図示している。

この図から、例えば音波の波長と振動板の波長に対し、それぞれ4個とするように板上に点音源を分布させると、遠距離音場での誤差が2 dBになることがわかる。また、長方形ピストン音源の集合体として取り扱う場合の誤差についても、点音源との比較で論じた。

## 熱可塑性樹脂を用いた射出成形品の成形収縮率とそり変形の解析

日立製作所 丸山照法・日部 恒・他1名

高分子論文集

45, 3, 253~262(昭63-3)

既報のひけ解析の概念と熱応力理論を結合し、射出成形品のそり変形の物理モデルを提案する。

熱可塑性樹脂成形の冷却過程で、樹脂補給が絶え質量一定条件下の冷却が成立する時点が成形収縮開始時点であり、また、SpencerとGilmoreの状態式や圧力-比容積-温度データから求まる成形収縮率は、熱ひずみと等価であるとみなすことで、そり変形の物理モデルを導いた。モデルの適合性を検討するため、洗濯機のプラスチック部品、ダブル槽のそり変形を解析した。温度解析結果と圧力-比容積-温度データから成形収縮率を計算し、この値と熱応力ひずみ解析からそり変形を算出した。ダブル槽の変形モードの予想と観察結果は定性的に一致し、そり変形の計算値と測定値の一致も満足できるものであった。

## 大型基板上に成長させたGaAlAs膜の組成ばらつき

日立製作所 轟 悟・他2名

材料科学

25, 4, 199~204(昭63)

GaAlAsに代表されるスライドポート式液相エピタキシャル成長法は、良質の結晶が得られる反面、成長させるべきGa-Al-As溶液の熱対流や引き込み現象によって大面積の成長が難しい。

本論文では、成長炉内温度分布の調整可能な炉を用いて、大型基板上に成長させたGaAlAs結晶(40 mm角)の発光特性を、溶液の動きを考慮した成長機構と関連づけて調べた。溶液が静止し、成長がAs原子の拡散に律速する場合、ウェーハ面内の経時的温度分布の変動によって生じる膜厚ばらつきが発光特性を支配する。一方、溶液が常に動いている成長初期では、溶液の移動速度が遅いほど、また、溶液中の過飽和濃度分布が小さいほど、均一で良好な発光特性分布(ホトルミネセンス強度による評価、±4%以下)が得られる。