

OVERVIEW

MBE の研究と応用

柳 山 脩

富士通研究所厚木研究所 〒243-01 厚木市小野 1667

(1984 年 7 月 27 日 受理)

Molecular Beam Epitaxy (MBE) for Research and Device Fabrication

Osamu RYUZAN

FUJITSU LABORATORIES LTD. ATSUGI
1677, Ono Atsugi-shi 243-01,

(Received July 27, 1984)

MBE is no longer a crystal growth technique in laboratories but has recently become a common production technology. GaAs devices, especially HEMT etc. have played an important role in making MBE technique thus popular. The progress of MBE technique also caused the progress of academic research in crystal growth and surface physics. In this paper, a couple of topics of the researches and developments of MBE is described. The present status of the device applications of it is also discussed.

1. MBE 概観

10 年前頃には最高の真空のもと結晶基板に極めて丁寧な蒸着を行なうことによって薄膜結晶をエピタキシャル成長させることが MBE (Molecular Beam Epitaxy) であるという認識があった。従って結晶成長の機構や表面構造を研究する上で MBE は最適のプロセス技術であると見做された。また数 $10\text{\AA}$ の薄膜をいくつも重ねるような構造を得るためにこそ MBE の高度な技術が真価を発揮するものと考えられてきた。このように MBE は本来真空、薄膜、表面、結晶成長といった学問分野の所産である。

1974 年頃から事情が少し変わったようである。半導体では光デバイス、マイクロ波デバイス等百花爛漫の状態では液相エピタキシャル法や気相エピタキシャル法がその美を競うような様相であった。このような中へかけだしの MBE が登場していった。仕掛人はベル研の Cho である。大抵の場合 MBE は LPE, VPE に比較して遜色がないという結論にはなったが、従来デバイスを MBE 技術によって製造するという改革は見られなかった。MBE 技術の売込みはこの段階で大成功をおさめたとは

言い難いが、大きな収穫は MBE 技術普及の兆しが見られたことであろう。

MBE 研究の本命は何といっても原子層オーダーのエピタキシャル成長による新材料或いは新構造の研究である。これはまた新デバイスの誕生につながっていく。漸くその時期が到来した。

1979 年ベル研に生れた変調ドープ構造の二次元電子ガス特性研究は高電子移動度トランジスタを産みだす結果になり堰をきったように到るところで MBE 研究が流行し始めた。研究がデバイスを産みデバイスがまた研究を刺激して MBE 黄金時代が出現した。Table 1 は現在までに MBE の研究が発表されている材料のすべてである。

MBE が関与する材料は化合物半導体が大半である。とりわけ III, V 族化合物及びその混晶が圧倒的に多いのは高速デバイス、光デバイスへの応用を意図する傾向の現れである。この理由から GaAs, AlGaAs は最もよく研究されている材料である。液相エピタキシャルでは馴染みの深い GaInAsP は MBE では特に有利な材料ではない。何故ならば蒸気圧の高い As と P の分圧比を制御することが容易でないからである。シリコンは化合

Table 1 MBE grown Materials. GaAs, AlGaAs and Si have been most extensively studied among them.

III-V			IV	II-VI	IV-VI
GaP	AlGaIn	AlGaInP	Si	ZnSe	PbTe
AlAs	AlInP	GaInAsP	Ge	CdS	PbSnTe
AlSb	GaAsP	AlGaInAs	Sn	ZnTe	PbSnSe
GaAs	GaInP	AlGaInSb		CdSe	
InP	AlGaAs			CdTe	
GaSb	InGaAs				
InAs	GaSbAs			CdHgTe	
InSb				CuInSe	

物と異り確立した技術と卓越した品質が既に保証されている材料であるために単に MBE で割込むことは仲々むづかしい事情がある。その他 II-VI, IV-VI 化合物も含めて今や MBE 技術は認知されてきている。しかも MBE は既存のデバイスの製作に利用されている液相エピタキシャル或は気相エピタキシャル技術を単におきかえるというのではなく MBE の正に本質を発揮するような結晶成長技術としと定着していきそうに思われる。

最近では MBE 研究が半導体のみならず NiSi_2 , CoSi_2 のような金属性材料や CaF_2 のような絶縁性材料にまで波及してきていることも注目に値する。

2. MBE 研究における最近の話題

最近の際立った研究成果を述べる前に MBE 技術の要点だけ触れておきたい。Fig. 1 は MBE 装置の心臓部成長室の概略図である。室はイオンポンプ、ソーブションポンプを駆使して 10^{-11} Torr まで高真空中に排気できる。基板は基板ホルダーにホルドされて基板温度が制御される。数個の分子線源は夫々ソースセルにチャージされて夫々必要な温度に制御される。セルは元来 Knudsen セルが用いられていたがビーム強度の増大をはかるためにかなり変形されたものになってきている。ビームはセルオリフィスから射出され基板面に衝突する。夫々のビームの断続はシャッターの操作で行なわれる。基板にエピタキシャル成長する結晶薄膜の均一性(組成, 厚さ, ドーピングレベル)を良くするために基板は回転できる機構になっている。大抵の場合反射形高エネルギー電子線回折 (RHEED) 装置が成長室に付加されていてエピタキシャル膜の表面構造を in-situ にモニターすることができる。サンプル交換のロードロック機構は成長室の真空を破ることなく基板を交換できるのでスループットの改善は勿論, エピタキシャル結晶の高品質化をもたらした。

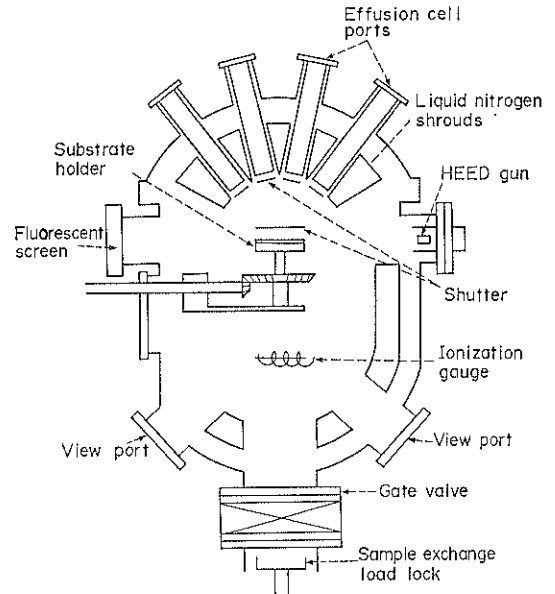


Fig. 1 MBE growth chamber. The basic components and layout are schematically shown.

2.1 GaAs MBE 成長

GaAs の成長機構については Joyce²³, Foxon¹³ の優れた仕事がある。As ビームのソースとして固体 As の昇華を利用する場合は As_4 が得られるが, GaAs 結晶の加熱を利用する場合には As_2 が得られる。Ga との相互作用の違いに由って As_4 と As_2 では成長過程が異ってくる。

(100) 面に対する As_2 及び Ga ビームのエピタキシャル成長の場合に基板温度が 600 K 以上では desorb する As_2 の分子の強度が温度にかかわらず一定であることと, As_2 の付着係数が基板温度 600 K 以上では直線的に増加して 1 に近づくことからエピタキシャル成長モデルとして Fig. 2(a) が得られた。この場合 As_2 分子は Ga 原子の上に化学吸着されて分解する。過剰の As_2 は再蒸発して stoichiometric GaAs が成長することになる。

一方 As_4 と Ga ビームによるエピタキシャル成長の場合表面滞在時間の基板温度依存性から離脱エネルギー 0.4 eV が求められた。 As_4 の付着は Ga 原子の存在によって影響を受けるが 600 K において付着係数の Ga フラックス依存性をみると, Ga poor の条件では付着係数は零に近いが, Ga と As の到達速度が等しくなるまでは Ga ビーム強度と共に増加して更に Ga ビーム強度が大きくなると略 0.5 で一定となる。このような事実から Fig. 2(b) に示されるようなモデルが考えられ

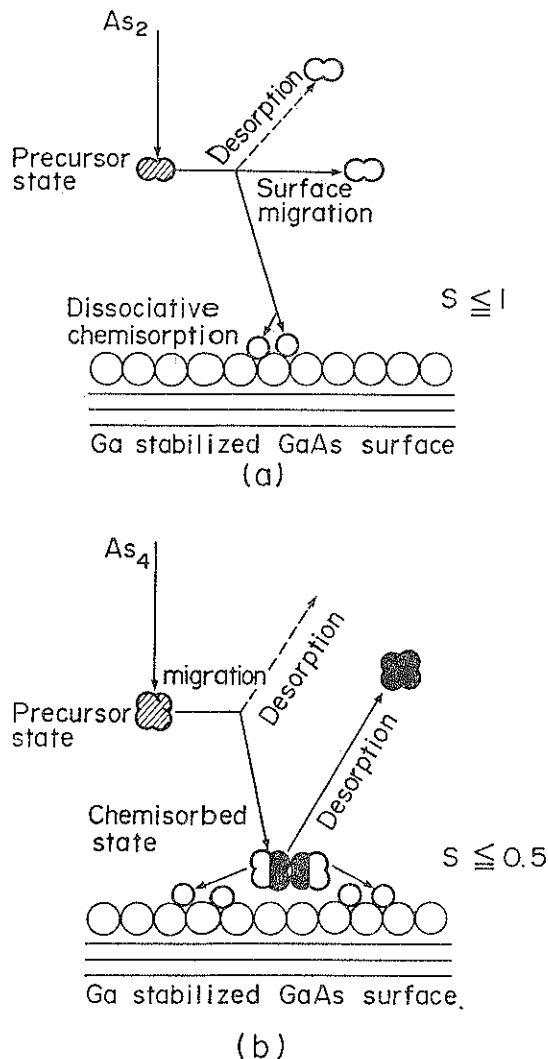


Fig. 2 A model of GaAs MBE growth¹⁾.

(a) growth from Ga and As_2 .

(b) growth from Ga and As_4 .

ている。 As_4 分子対が最近接 Ga 原子の上に化学吸着され、 As_4 desorption が As_4 の吸着に対して二次反応依存性を示す。この As_4 分子対の相互作用は膜の中に多くの点欠陥をつくると考えられる。

GaAs の MBE 成長を原子層レベルで捉えこれを in-situ にモニターする技術が RHEED の研究から生れた。即ち GaAs などの MBE 成長時に RHEED パターンの強度が時間的に振動している現象について詳細な研究が行なわれた²⁾。パターン強度の振動は成長がほぼ二次元 layer by layer であること、そして僅かな凹凸はストイキオメトリーからのずれや不純物原子によって起ることがわかってきた。振動の周期は Ga-As の単原子層

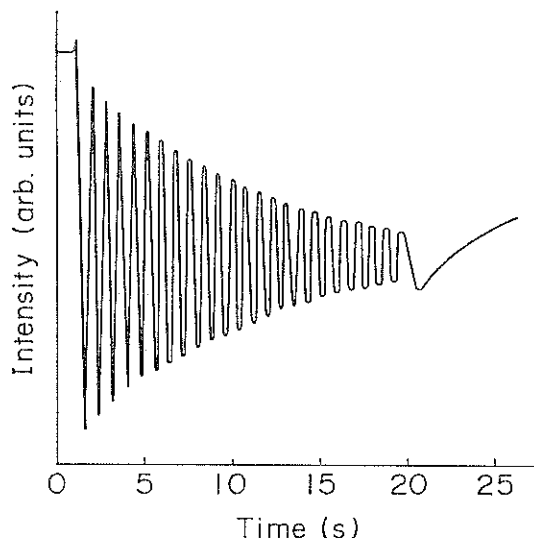


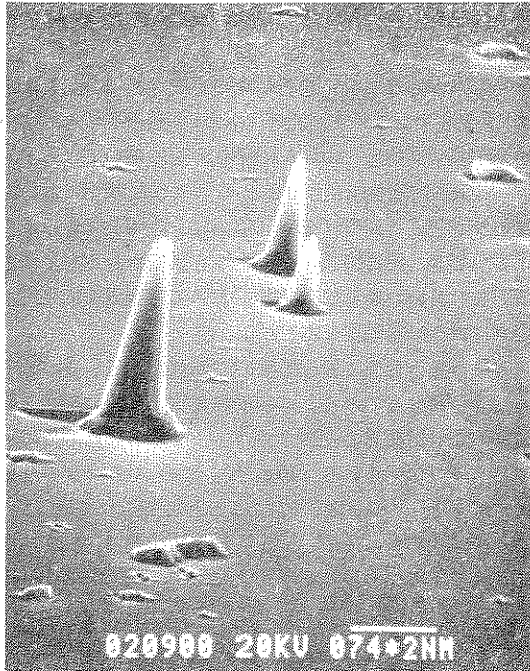
Fig. 3 Intensity oscillation of the specular beam in the RHEED pattern from a GaAs (001) surface.²⁾

の成長に対応するものであるから、成長速度を原子層の精度でモニターすることができることを意味する。この強度振動モニター手法は今後新しい研究のブレイクスルーをもたらすものとなるであろう。Fig. 3 は画期的ともいえる発見の RHEED パターン強度振動の模様を示したものである。

2.2 GaAs MBE 表面

GaAs MBE は最もよく研究され、成長技術もまたよく開発された材料である。GaAs に対しては既に高純度や高電子移動度の目標をほぼ達成して、現在では集積回路形成の目的からエピタキシャルの高均一、無欠陥の目標に専ら努力が集中されている。この段階でクローズアップしている問題がエピタキシャル表面の欠陥である。この欠陥について研究がすすむと共にわかってきたことは MBE 成長に特有の欠陥が存在することである。Oval defect とか、spit と呼ばれているものがそれである。Fig. 4 は GaAs MBE にしばしば見られる Oval defect の SEM 写真を示している。これらの成因が Ga のソースセルに由来するものであるらしいことが最近にわかってきた。即ち Ga セルから飛来した Ga droplet と As が反応してできるもの或いは Ga の酸化物が核になってできるものと考えられている。Oval defect は MBE のみに存在する欠陥であるからこれの絶滅は正に MBE 技術の存亡にかかわるくらい重大問題である。

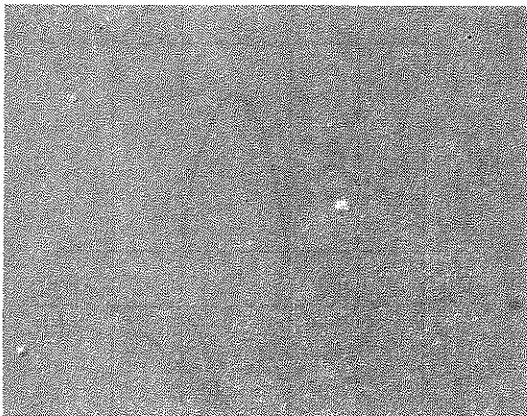
Oval defect 以外の欠陥としては基板の表面処理に関係するもので表面の汚れや傷が原因となって発生する欠



(a)

20 μm

(a) SEM photograph of a GaAs (100) surface grown at high growth rate



(b)

100 μm

(b) Typical Nomarsky photograph of GaAs (100) surface grown at the ordinary growth rate.

Fig. 4 Surface pictures of MBE GaAs.

陥と、基板自体にもともと存在した転位などの欠陥が原因となって発生する欠陥がある。これらは液相エピタキ

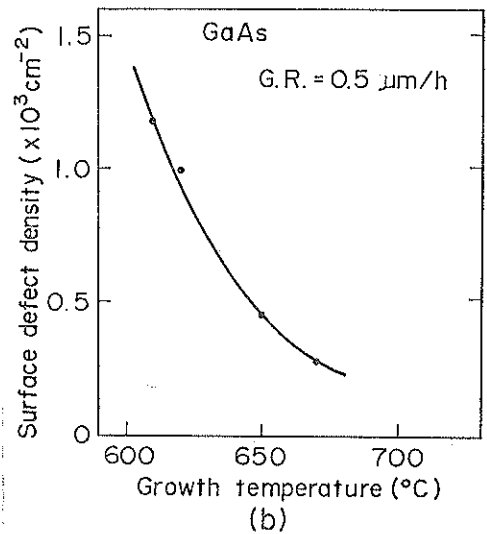
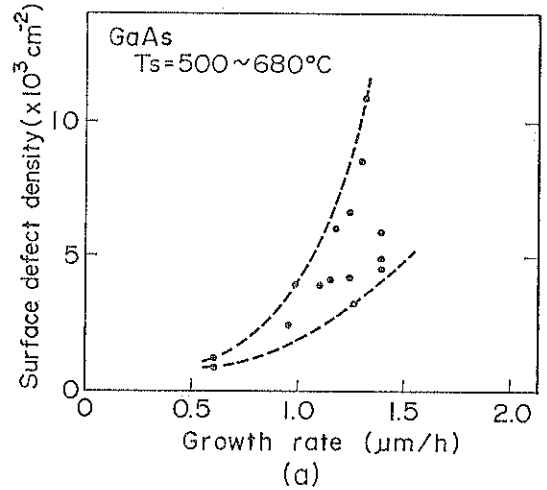


Fig. 5 (a) The relationship between surface defect density and growth rate of GaAs MBE.

(b) The relationship between surface defect density and growth temperature of GaAs MBE.

シャル法、気相エピタキシャル法など他の成長法においても存在する欠陥である。

Fig. 5(a) は表面欠陥密度と成長速度の関係を多くのサンプルについてプロットしたものである³⁾。成長速度は Ga の到達速度に、従って Ga セルの温度に関係する。即ち Ga セルの温度が高くなるに従って表面欠陥密度が大きくなる傾向がみられる。Ga セルの温度をできるだけ低くしてしかもビーム強度が減少しない方法が切望される。

表面欠陥密度はまた基板温度（成長温度）に依存することがわかっている。(Fig. 5(b))³⁾

2.3 Si MBE

Si MBE は GaAs MBE に比べると研究が少なかったが近年著しい進歩がみられる。事実 n 型のキャリア濃度が $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 程度のものは容易に得られるようになり、移動度もバルク結晶と比べて遜色のない値を示すようになった。Fig. 6 は電子移動度をいろいろな不純物濃度のものに対して測定した図である⁴⁾。これからもわかる通り Si MBE でもほぼバルク結晶の値と同一のものが得られるようになった。通常の蒸発ドーピング法では表面偏析のために 10^{18} cm^{-3} 以上のドーピングを得ることは困難であるが、イオンドーピング法ならば 10^{19} cm^{-3} 程度は容易にドーピングすることができる。この方法ではまた As や B イオンビーム強度をコンピュータ制御することによって複雑なドーピングプロファイルを実現することができる。

Si MBE における転位密度は酸素と、積層欠陥密度は基板とエピタキシャル成長層との界面にみられる炭素濃度と関係があることが明らかになってきた。

2.4 ヘテロ接合構造と二次元電子ガス

GaAs/AlGaAs 系のヘテロ接合構造を MBE によって形成しそこに二次元電子ガスを実現したことは最近5年間における MBE の最高傑作である。二次元電子の移動度はヘテロ接合界面の良否、GaAs 層の純度を評価

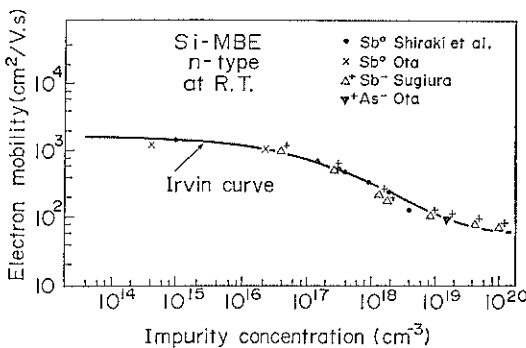


Fig. 6 Electron mobility versus donor concentration in MBE Si.⁴⁾

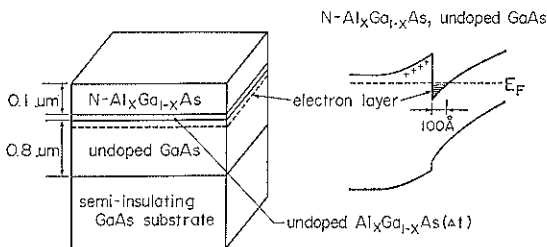


Fig. 7 GaAs/AlGaAs heterostructure and formation of 2-dim. electron gas⁵⁾.

するバロメータともなり 1981 年まで高移動度化の競争が続いた。

最も基本的な二次元電子ガスの形成法を Fig. 7 に示す⁵⁾。先ずアンドープ高純度 GaAs を積みその上に薄いアンドープ高純度 AlGaAs 層を、更に続いて Si ドープ AlGaAs 層を成長させる。このような構造においてはヘテロ接合界面の GaAs 側に電子のポテンシャルウェルができ、そこに Si ドナーから供給される電子が溜る。これがいわゆる二次元電子ガスで接合界面に平行な方向に大きい移動度を示す。

ヘテロ接合界面に対して垂直な磁場がある場合のホール測定を行なってみる。ホール伝導率は磁界の関数であるが、これを磁界の逆数でプロットすると段階的に増加するグラフが得られる (Fig. 8)。このステップの部分は理論上 e^2/h の整数倍になることが知られている⁶⁾。これを利用すれば e^2/h という物理定数を 10^{-6} の精度で決定できるいわゆる標準測定になることが Klitzing

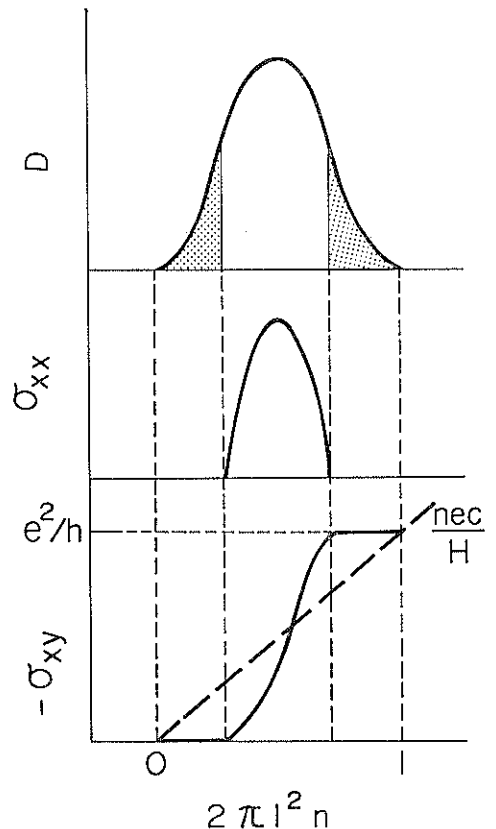


Fig. 8 Density of state (D) of Landau level, transverse magneto-conductivity (σ_{xx}) and Hall conductivity (σ_{xy}) are schematically shown.⁶⁾
 $l^2 = ch/eH$

らによって指適された。この2年後に予測もされなかった事実が発見された。即ち 300 K の磁場のもと、0.5 K の低温においてホール伝導率のステップが e^2/h の整数倍のみならず分数倍の値のところに相当するという事実である。これは従来の量子ホール効果とは異なるものでこの現象を説明するために新しい理論が必要になってきている。これはまさに技術の進歩が逆に学問を尻押しするパターンと言える。

3. MBE のデバイスへの応用

エピタキシャル成長技術の先輩である気相エピタキシャル成長や液相エピタキシャル成長に伍して MBE の実用性が認められるためにはデバイスへ実際に適用してみようという試練をうけなければならない。1974 年頃より MBE を先ずいろいろな既存のデバイスに適用する試みが始まった。

3.1 マイクロ波デバイス、高速デバイスへの応用

GaAs 系 MBE がこの分野で圧倒的に主役を演じてきている。Fig. 9 に GaAs 系と Si MBE のマイクロ波デバイス、高速デバイスへの応用の歴史を一覧表に示している。GaAs MBE は最初ミクサー、バラクタ、インパットダイオードというような高周波デバイスに応用されたが、中でも FET は最も馴染のあるデバイスである。MBE の特長であるエピタキシャル面の比類のない“平坦さ”は界面の“シャープさ”を改良することになり MBE 装置の進歩とも相俟って FET 特性は年々記録更新されてきた。Fig. 9 には低ノイズ FET の高周波化の模様と雑音指数が記されている。また高出力 FET の特性も併記されている。

柵らに始まる GaAs/AlGaAs 界面二次元電子ガスの研究は Dingle らの変調ドーピングされた超格子構造に発展したがこのアイデアが一つの実を結んだ。それは 1980 年

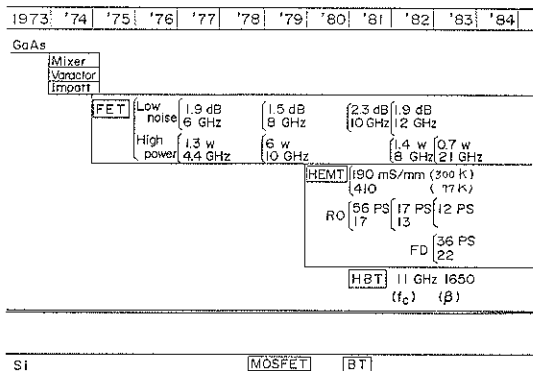


Fig. 9 Application of GaAs and Si MBE to high speed and microwave devices.

に生れた HEMT (High Electron Mobility Transistor) である⁷⁾。これはデバイスとしては FET であるが動作の本質は従来の FET とは全く異なるもので高速デバイスの分野に少なからざるインパクトを与えた。Fig. 10 に HEMT の概略構造を示している。FET と同様にディプレッションモードとエンハンスメントモードの二つのタイプがあるがいずれも半絶縁性 GaAs の基板の上に先ずノンドープの GaAs を、その上に Si ドープ n 形 AlGaAs を成長させることが基本である。エネルギーバンドダイアグラムでみられる通り Si ドナーから供給される電子は、AlGaAs の表面単位を満席にして尚余剰がある場合 AlGaAs と GaAs ヘテロ接合界面の GaAs 側にできるポテンシャルウェルに溜って二次元電子ガスを形成する。若し Si ドナーからの電子が表面単位を満席にするだけの十分な数でない場合には GaAs

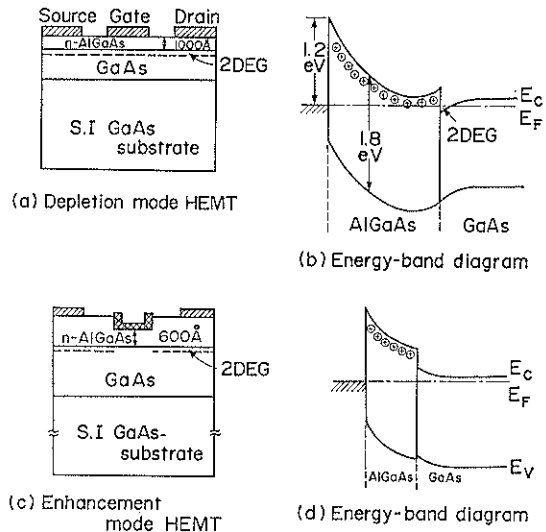


Fig. 10 HEMT structures and their energy-band diagrams.

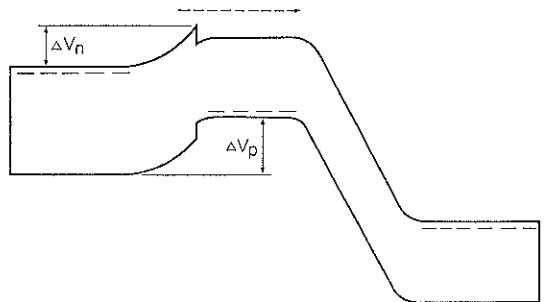


Fig. 11 Schematic energy-band diagrams of heterojunction bipolar transistors with abrupt junction.⁸⁾

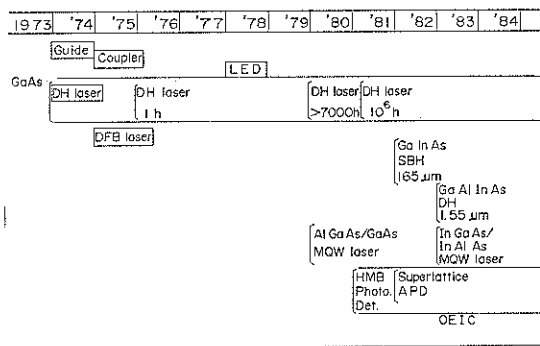


Fig. 12 Application of GaAs and related compounds MBE to optical devices.

A.Y. Cho (1976)

0.5 μ	p - GaAs	Mn
1.1	p - AlGaAs	Mn
0.24	n - GaAs	Sn
1.1	n - AlGaAs	Sn
1.0	n - AlGaAs	Sn
0.25	n - GaAs	Sn
Substrate		

$$\begin{cases} T_s : 580^\circ\text{C} & \text{Cw} \\ J_{th} : 2.7 \times 10^3 \text{ A/cm}^2 & \text{life} \sim 1 \text{ h} \\ \eta : 34\% \end{cases}$$

W.T. Tsang (1979)

0.4 μ	p - GaAs	Be
	p - AlGaAs	Be
	p or n - GaAs	Be or Sn
	n - AlGaAs	Sn
	n - GaAs	Sn
Substrate		

$$\begin{cases} T_s : 650^\circ\text{C} \\ J_{th} : 2 \times 10^3 \text{ A/cm}^2 \\ \eta : 34\% \end{cases}$$

Pulse

(1980)

2.0 μ	p - GaAs	Be
	p - AlGaAs	Be
	p or n - GaAs	Be or Sn
	n - AlGaAs	Sn
	n - GaAs	Sn
Substrate		

$$\begin{cases} T_s : 650^\circ\text{C} \\ J_{th} : 1.2 \times 10^3 \text{ A/cm}^2 \\ \eta : 40\% \end{cases}$$

Cw life > 7000 h

Fig. 13 DH laser structures grown by MBE. Note that growth temperature is closely connected to device characteristics.

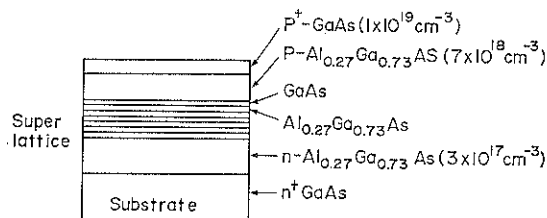


Fig. 14 Multi-quantumwell (MQW) laser structure grown by MBE.⁹⁾ GaAs well width 136 Å, 14 layers AlGaAs barrier width 130 Å, 13 layers.

側からも補給されることになりヘテロ接合界面にポテンシャルウェルが生じない。前者になるか後者になるかは Si ドナー濃度一定として AlGaAs 層の厚さに依存している。即ち AlGaAs 層が厚い場合は前者でこれをディプレッションモードと呼び、薄い場合が後者でこれをエンハンスメントモードと呼ぶ。エンハンスメントモードではゲートに正のバイアス電圧を与えることによりヘテロ界面に二次元電子を誘起することができる。

HEMT は期待通り大きなトランスコンダクタンスを示し (193 mS/mm, at 300 K, 409 mS/mm at 77 K) またエンハンスメントモードスイッチングとディプレッションモード負荷 HEMT 構成のリング発振器で 10 ps に近いスイッチングタイムが観測された。さらに 1/2 分周器では 5.5 GHz (RT), 8.9 GHz (77 K) の超高速分周器が得られている。これらはスイッチング時間 36 ps/ゲート (RT), 22 ps/ゲートに相当する。

HEMT が新生の高速デバイスとして脚光を浴びるようになって世界の数多くの研究機関においてこれの追試或は独自の研究開発が澎湃として起ってきた。この結果 MBE 技術は実用技術として急速に認知されるとともに結晶成長技術の安定した座を占めることになった意義は深い。

1981 年 HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) が登場した。ワイドギャップエミッタのアイデアは新しくないが AlGaAs 混晶製作技術の進歩が HBT の製作を可能にした。Fig. 11 に HBT のエネルギーバンドダイヤグラムの概略を示した。HBT はベース抵抗とエミッター接合容量を低減できるなどマイクロ波デバイスとしてまた高速ロジックへの応用が期待される。MBE 技術では傾斜組成をベース領域に作ることも容易にできるので電界による電子の加速が可能になる。AlGaAs/GaAs HBT で $f_t \sim 11 \text{ GHz}$ が得られている⁸⁾。

Si 系の MBE では漸く 1979 年に MOSFET が、1981 年にバイポーラトランジスタが製作されるに至った。概して GaAs 系のようにデバイスへの応用は活発でない。

3.2 光デバイスへの応用

MBE の光デバイスへの応用は 1974 年から始まっている。Fig. 12 に示されるように光ガイドやカプラーのような受動デバイスを始め、レーザー、発光ダイオード、ホトディテクタなど広範囲に適用が試みられてきた。材料としてはやはり GaAs 系が殆んどである。光デバイスでは従来から液相エピタキシャル技術が実用技術としても定着している。これは一つには非発光センターとなる深いトラップが少ないという液相エピタキシャルの特徴に由るものであるが、事実 MBE GaAs には深いトラップが多く存在した。1976 年に試作された DH

レーザーはしきい値電流も高く寿命も1時間程度のものであった。その後真空技術の改良やロードロック機構の導入など装置の進歩と成長温度を 70°C 上昇させることによって室温連続発振 10^6 時間という液相エピタキシャ

ル並のレーザーが得られるようになったのは1981年である。

AlGaAs/GaAs 以外に GaInAs/InP による SBH (Strip Buried Heterostructure) 構造で $1.65\ \mu\text{m}$ のレーザーが、また GaAlInAs/GaAs の DH 構造で $1.55\ \mu\text{m}$ のレーザーが夫々得られた。

MBE 技術の応用という意味において最もエキサイティングな成果は多重量子井戸レーザー (MQW LD) の発明であろう。通常の DH レーザーの活性層に当たる部分に超格子構造を導入したものである⁹⁾ (Fig. 14)。MQW レーザーはしきい値電流が小さい、特性温度が高い、損失が小さいなどいろいろな特徴をもっている。超格子構造に GaInAs と AlInAs を用いた MQW レーザー (波長 $1.55\ \mu\text{m}$) も報告されている。

光検知素子にも MBE 技術の傑作が生れた。APD (Avalanche Photo Diode) の高電界領域に超格子構造を織りこんだいわば超格子 APD がそれである⁹⁾ (Fig. 15)。この構造によってイオン化率比は非常に大きくなり最近 AlGaAs/GaAs 超格子 APD で10というイオン化率比が得られている。

HMB (Heterojunction Modulated Barrier) ホトディテクタは majority carrier 形であって高速応答が期待されている¹¹⁾。

最近 OEIC (Opto-Electronic Integrated Circuit) の研究も活発になってきているがこの分野において MBE 技術の果す役割はまた非常に大きいと思われる。Fig. 16 は AlGaAs MQW レーザーと GaAs MES FET を半絶縁性 GaAs 基板上にモノリシックに組合せた一例である。光出力は FET のゲートバイアスによって広い範囲にわたって制御できることが実証されている¹²⁾。

4. MBE 技術の進歩

MBE 技術の飛躍的な進歩をもたらした要因の一つは MBE 装置のめざましい向上であろう。1979年頃より MBE 装置は数社から市販されるまでになってその性能が競われた。Fig. 17 は最新 MBE 装置のブロックダイヤグラムである。装置は基本的に三室に分れていて夫々 loading 室, analysis 室, growth 室と呼ばれる。これら三室は load lock 機構によって連結されている。三室法の特長は基板の loading, 排気, 準備が成長最中においてもできる点である。従ってエピ成長と次のエピ成長の間の時間というのは成長の終了した基板を成長室から取りだして新しい基板を成長室に準備室から移すための時間とみなされる。このように load lock 機構を導入することによってスループットが著しく改善された。

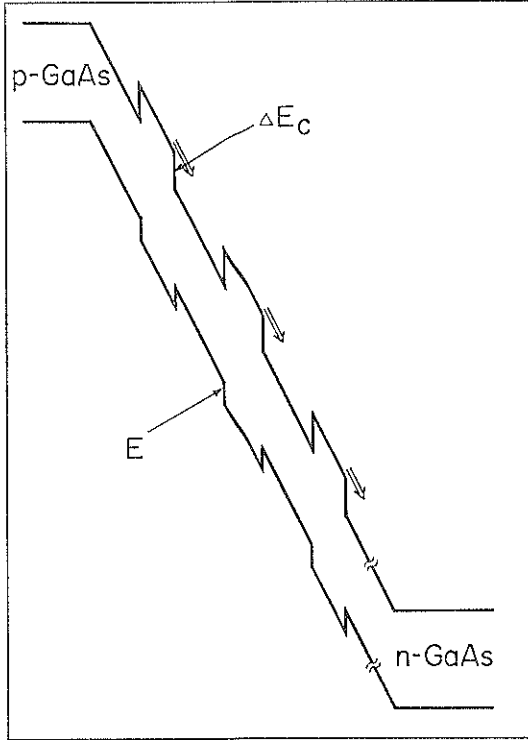


Fig. 15 Schematic energy-band diagrams of a avalanche photo diode with super lattice structure under negative bias voltage.¹⁰⁾

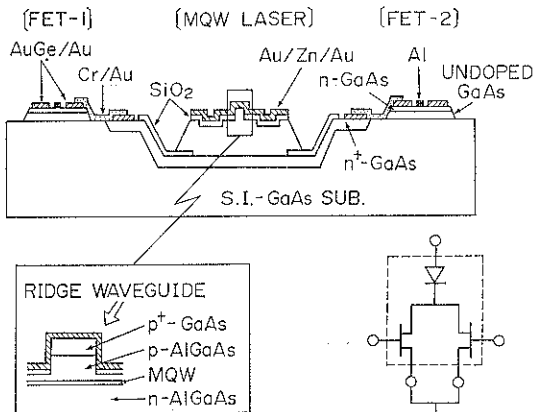


Fig. 16 MQW laser/FET monolithically integrated on semi-insulating GaAs and equivalent circuit.¹²⁾

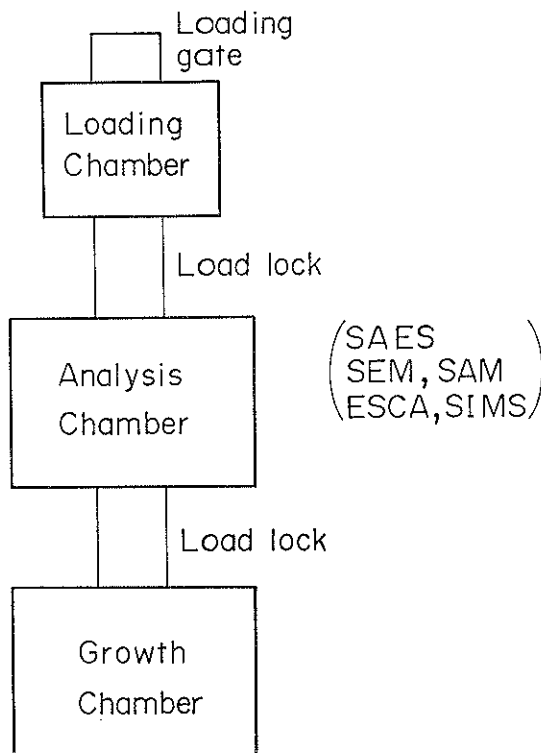


Fig. 17 Block diagram of the basic construction in recent MBE equipments.

基板ホルダーは回転方式になっていてエピタキシャル膜の均一度は最高1及至2%である。Fig. 18は実際にGaAs 2インチ基板にMBEを行なった場合のエピタキシャル膜厚の均一性が基板の回転の有無によって如何に違うかを示したものである。

成長室に水素を少量導入することによってGaAsエピタキシャル膜中への酸素のとりこみを減らし、またカーボンアクセプタを減らして高純度エピタキシャルが得られることがわかった。この方法はAlGaAs MBEに対しても有効であることが確認された。

ドーピングについて通常はエバポレーションドーピングと呼ばれるソースセルからの中性ビームに依っているが、 10^{18} cm^{-3} 以上の高濃度ドーピングレベルを得るためには一般に困難を伴う。このような場合にGaAsで開発されたイオンドーピング法が有効であり、Si MBEでも良く利用されている。Fig. 19はイオンドーピング機構をもったSi MBE装置の模式図である¹³⁾。イオン源としては固体As、或は BF_3 ガスを用いて As^+ 或は B^+ ビームがつくられる。ビームはコンピュータコントロールされて複雑なドーピングプロファイルもつくることができる。ビームはマスマスプロメータによって精

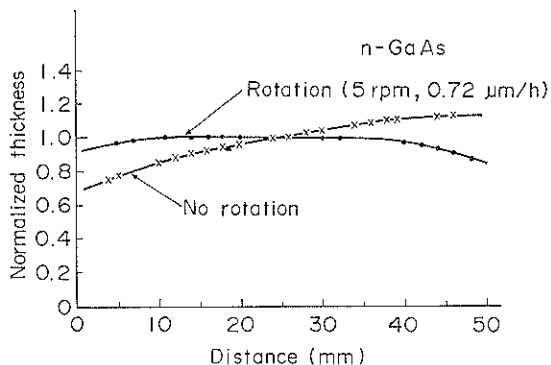


Fig. 18 Thickness uniformity of a 2 inch MBE GaAs wafer.

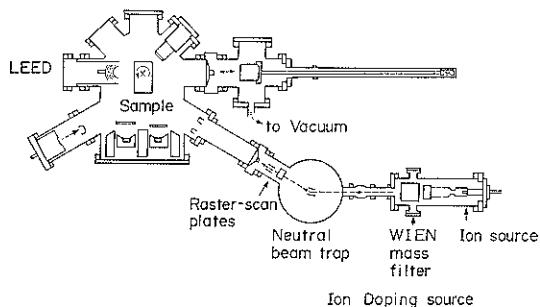


Fig. 19 A modern Si MBE equipment with an ion doping mechanism.¹³⁾

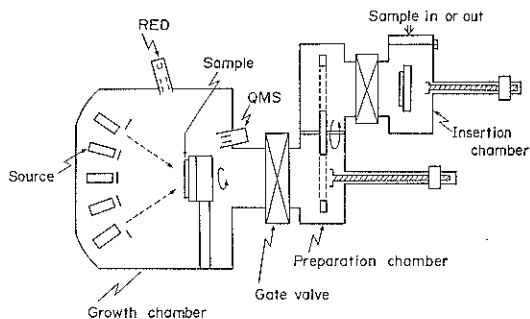


Fig. 20 A typical MBE equipment with load lock mechanism.

製されるから高純度ビームが得られる。またスキャナーによってビームを操作し選択ドーピングをすることもできる。

以上のように最近5年間にはMBE装置の著しい進歩がみられる。しかし一方装置が高度化することで高価になってきている。Mega Buck Evaporation (Buckはドルの俗語) などと言われる理由も容易に背ける。

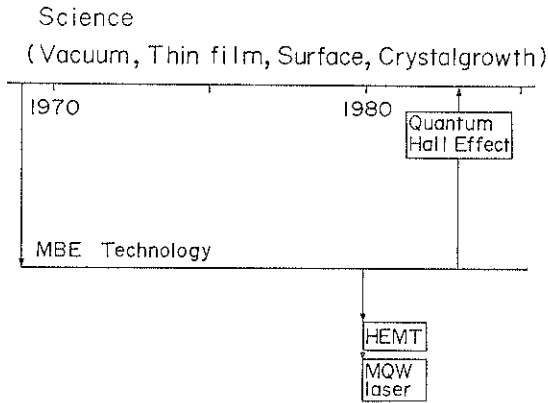


Fig. 21 Cooperative progress of science and technology.

Fig. 20 は代表的 MBE 装置の機構を示したものである。

5. む す び

今や MBE 装置メーカーと呼ばれるものが5社以上もあり、MBE の研究機関の数は数十を越えて MBE 技術は完全に普及したと言える。Fig. 21 に示されるようにもともと MBE 技術は真空、薄膜、表面、結晶成長などのサイエンスから生れてきたものである。この技術がリファインされて AlGaAs/GaAs ヘテロ接合に二次元電子ガスを形成することが可能になった。この電子のトランスポートの研究から最近異常量子ホール効果が発見されて注目を集めている。しかもこの効果を解釈するためには新しい固体理論が必要になると考えられている。このように MBE 技術の進歩が母体のサイエンスに新しい課題を提供する事態になってきている。サイエンスとテクノロジーとが相俟って進歩するという好例であろう。従って MBE はまだまだ陳腐化するような技術ではない。

では今後 MBE 技術はどのように発展していくだろうか。第一には in-situ モニタリングのもとで超薄膜、多層構造、超格子構造などを原子レベルの精度で制御する付加価値の高い結晶技術として新材料、新デバイスの研究に大活躍するものと思われる。第二は MOCVD と MBE の複合化、イオンビーム技術の併用などが実用上重要な技術となり、総合的ドライプロセスの実現の方向に進むものと考えられる。

文 献

- 1) C. T. Foxon: J. Vac. Sci. Technol. **B1** (2) (1983) 293.
- 2) J. H. Neave, B. A. Joyce, P. J. Dobson and N. Norton: Appl. Phys. **A31** (1983) 1.
- 3) J. Saito et al.: (unpublished)
- 4) 白木靖寛: 応用物理 52, 2 (1983) 125.
- 5) 冷木佐寿, 三村高志: 応用物理 50, 12 (1981) 1316.
- 6) T. Ando, Y. Matsumoto, and Y. Uemura: J. Phys. Soc. Jpn **39** (1975) 279.
- 7) T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii and K. Nanbu: Jpn J. Appl. Phys. **19** L (1980) 225.
- 8) P. M. Asbeck, D. L. Miller, W. C. Petersen and C. G. Kirkpatrick: IEEE Elec. Dev. Lett. EDL-3, (1982) 366.
- 9) W. T. Tsang: Appl Phys Lett., **38** (1981) 204.
- 10) F. Capasso, W. T. Tsang, A. L. Hutchinson and G. F. Williams: Appl Phys. Lett., **40** (1982) 38.
- 11) C. Y. Chen, A. Y. Cho, P. A. Garbinski, C. G. Bethea and B. F. Levine: Appl. Phys. Lett., **39** (1981) 340.
- 12) T. Sanada, S. Yamakoshi, O. wada, T. Fujii, T. Sakurai and M. Sasaki: Appl. Phys. Lett., **44**(3) (1984) 325.
- 13) J. C. Bean: J. Vac. Sci. Technol., **A1**(2) (1983) 540.