

# HEMT の開発

三村 高志 (株式会社 富士通研究所フェロー)



## 1. まえがき

1980年にHEMT (High Electron Mobility Transistor: 高電子移動度トランジスタ)を発売して早30年が経つ。この間HEMTは、衛星放送用受信機や携帯電話機、ミリ波自動車レーダ、GPSを利用したナビゲーションシステム、広帯域無線アクセスシステムなど、情報通信イノベーションを推進した基盤技術の一つとして広く普及した。また2000年にアメリカのクリントン政権が発表した National Nanotechnology Initiative において提唱されたナノテクノロジーの代表例の一つとしてHEMTがあげられ、将来の情報通信技術のさらなる高度化に向け、世界的な研究開発は現在もきわめて活発である。HEMTはFETの一種であるが、素子の基本構造や製作技術において従来からのデバイスとは一線を画するユニークなデバイスであった。そのため、実用化にはかなりの困難が予想されたが、1985年には電波望遠鏡の低雑音増幅器としてデビューした。さらに1987年頃には衛星放送の爆発的な普及に貢献するなど、現在全世界で年間約10億個の量産デバイスにまで成長した。ここではHEMTの開発経緯を振り返り、発明の背景や実用化を成功させた要因などに触れる。

## 2. HEMTの着想

HEMT 発明当時 (1979 年)、筆者は GaAs MESFET (GaAs Metal Semiconductor FET)を開発する職場に所属していた。GaAs MESFET は、1966年に C. A. Mead によって発明されたコスト・パフォーマンスが極めて高い究極の高速デバイスである。高速デバイスを追求していた私にとって、これを改良する仕事しか残されていないのではないかと思っていた。しかし後追いの研究テーマでは面白味がないため、MESFET とは異なる GaAs MOSFET に関する研究を約2年ほど進めていた。周知のように MOSFET

は LSI には不可欠のデバイスであり、GaAs MOSFET による LSI の可能性を探るのが研究の目的であった。研究のポイントは、GaAs とゲート酸化膜との近傍に存在する界面準位を除去し、電子の蓄積層を実現させることであった。しかしいろいろ試みたが結論的にいえば、蓄積が起きるほどには界面準位密度を低減させることはできなかった。GaAs MOSFET の研究の継続に危機感をもっていた 1979 年の 2 月ころ、GaAs MOSFET とは異なる技術分野の仕事に興味を持った。それは「変調ドープ超格子」とよばれる構造である。この構造は、ドナーをドーピングした AlGaAs 層と「ノンドープ」の GaAs 層からなる超格子である。この超格子構造においては、両側を n 型 AlGaAs に挟まれたノンドープ GaAs 層に電子が蓄積する。この分野の研究者にとってはきわめて常識的な現象であったわけであるが、私には大きなショックであった。GaAs MOS では実現できなかった電子の蓄積が紛れもなくそこに見られたからである。印象的ではあったが、変調ドープ超格子という馴染みのない構造でのことでもあり、その時点では何らのアイデアも生まれなかった。

HEMT のアイデアを得たのは 1979 年の 7 月である。アイデアのポイントは、n 型 AlGaAs と GaAs とのヘテロ接合構造とし n 型 AlGaAs 層表面に空乏層を作り出すショットキ接合を導入して n 型 AlGaAs 層中の電子を排除し、GaAs 層内の 2 次元電子ガスに電界効果が及ぶようにしたことである。空乏化した n 型 AlGaAs 層を SiO<sub>2</sub> のようなゲート絶縁膜と見なせば、HEMT のデバイス概念は構造的には MOSFET に類似することが理解されよう。また n 型 AlGaAs 層を空乏化させるのに利用したショットキ接合は、GaAs MESFET のゲート電極の機能そのものである。図 1 に示すように GaAs MESFET という既存のデバイスと MOSFET という既存のデバイス

概念が新しい結合を形成して、HEMT という新規なデバイス概念が生まれたといえる。

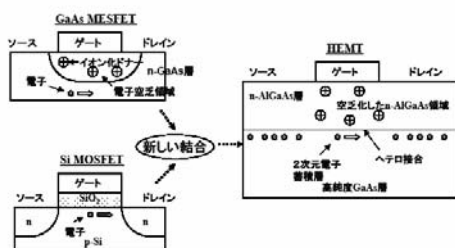


図1 GaAsMESFETとSiMOSFETのコンセプトの新しい結合により生まれたHEMT

### 3. 製品化のきっかけ

HEMT は高速デバイスを追求するという研究動機の下で、たまたま誕生したデバイスであり、誕生した当時 HEMT に対するマーケットニーズは当然のことながら無かった。こういう状況下で生まれた新しい技術が新製品に成長してゆくためには何が必要であったかを振り返ってみたい。実は、まったくの想定外の出来事から HEMT の製品化はスタートする。1983 年の固体回路会議(ISSCC)においてマイクロ波帯の衛星通信分野への適用を想定し、HEMT の低雑音四段増幅器を発表したところ、出席していた米国の電波天文台関係者の注目するところとなった。発表した HEMT の低温環境における雑音特性が、従来からのパラメトリック増幅器や GaAs MESFET 増幅器を置き換える性能をもっていたためである。このことが契機になり、電波望遠鏡用の低雑音増幅器が HEMT の最初の製品ターゲットになった。1985 年に野辺山電波天文台に設置された HEMT 増幅器は暗黒星雲の中に未知の炭化水素分子(C<sub>6</sub>H)の発見に貢献し、その後世界の主要な電波天文台にも設置されるようになった。図2は HEMT 最初の製品となった低雑音増幅器の外観写真と温度をパラメータとした雑音性能を示す。背景は野辺山にある直径 45m の電波望遠鏡である。

開発初期にニッチではあるが低温(20K 程度)での HEMT の性能を活かせるマーケットにめぐりあえたことはその後の HEMT の発展にとって重要な意味を持つ。マーケットの出現により企業活動が始動

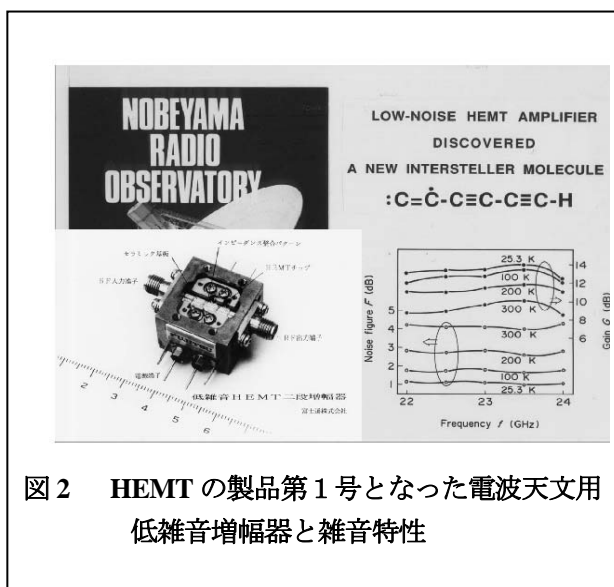


図2 HEMT の製品第 1 号となった電波天文用低雑音増幅器と雑音特性

され、デバイス関連技術の改良が連続的に行われた結果、マーケットにおいて従来技術である GaAs MESFET に対する競争力が強化され、新たな応用への道が開かれたからである。

### 4. 家電製品へのブレイクスルー

1980 年 5 月、はじめて HEMT の論文を発表した。この発表は大きな反響を呼んだが、一方実用化に関しては懐疑的な意見が多かった。理由は二つあった。一つは当時 HEMT の唯一の結晶成長技術であった分子線エピタキシャル結晶成長法(MBE: Molecular Beam Epitaxy) の量産性能の低さである。試作に使った我々の MBE 装置では、平均すると 2 週間に一度くらいの割合で 1 cm x 2 cm くらいのウエハを成長できる程度であった。図3は HEMT のウエハの製造に使われた MBE 装置と AlAs と GaAs とのヘテロ接合界面近傍の電子顕微鏡写真を示す。平坦な界面形状が形成されていることがわかる。一方この MBE 装置はもともと結晶成長技術の研究用に内製されたものであり量産用のアーキテクチャにはなっていない。つまり、HEMT の実用化には、まず量産用結晶成長装置の開発が前提であったわけである。これには内外の装置メーカーさんの努力のお陰でその後ずいぶんと改良され、3 インチウエハで月産数千枚の量産型装置が実用化された。さらに有機金属をガス化して成長させる有機金属気相成長法 (MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition) が開発され、現在 HEMT のウエハを製造する国内ベンダーはほぼ 100% MOCVD によ

り供給できるまでになった。

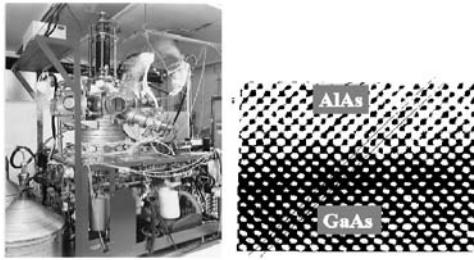


図3 HEMTのウェハを成長したMBE装置とGaAs/AlGaAsヘテロ接合界面の電子顕微鏡写真(右)

もう一つの実用化を阻む技術課題は、HEMTの製作技術の難しさであった。制御電極下のAlGaAs層の厚みが極めて薄く、厚みを数原子層の精度でコントロールして、所望の閾値に設定する必要があったからである。AlGaAsはAlを含むため、GaAsに比べ、化学的に極めて活性であり、空气中に放置しておくだけで表面に $\text{Al}_2\text{O}_3$ を主成分とする自然酸化膜が形成され、AlGaAs膜厚が変動してしまうのである。このことは、HEMTの実用化にとってまさに致命的であった。この制御が難しい技術課題をブレークスルーしたのがAlGaAs層上に積層されたGaAsキャップ層構造と、反応性イオンエッチング技術である。つまり、GaAsキャップ層がAlGaAs表面を酸化から保護し、制御電極を設置するときにはじめて電極部分のキャップ層のみを選択的に反応性イオンエッチング加工によって取り除いてやるという、いたってストレートな発想である。こうすれば、AlGaAsの膜厚は結晶成長時の精度を保つことができるため、HEMTの作成が格段に容易になるはずだと考えたわけである。反応性イオンエッチングでは、高周波電力で活性化させたフッ素系ガス中にHEMTのウェハをいれてやり、制御電極が設置される部分のGaAsキャップ層を除去(エッチング)する。GaAsキャップ層がエッチングされAlGaAs表面が露出すると、エッチングは自動的に停止する。AlGaAs表面に化学的に安定な $\text{AlF}_3$ が形成され、それ以上エッチングが進行しなくなるためである。したがって、このプロセスは、人間が処理時間などを厳密に監視する必要がなく、極めてシンプルである。こういう巧い方法が使えるのは、HEMTがAlGaAs

とGaAsという化学的にも性質が異なる材料から作られているからである。つまり、製造技術上の自由度が大きいこともHEMTの特徴であるといえる。これらのブレークスルー技術によって、はじめて特性のそろったHEMTが再現性良く作れるようになり、実用化に確信がもてるようになった。

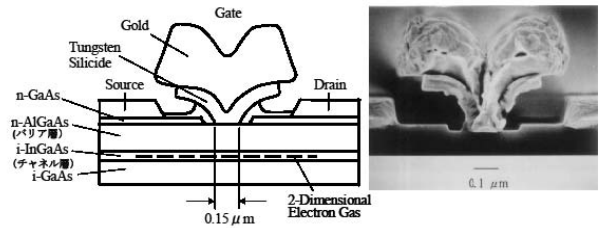


図4 低雑音HEMTの断面構造と電子顕微鏡写真(右)

図4は、実用化された低雑音HEMTの代表的な構造断面図である。AlGaAs層の厚さは約20nm、チャンネル層はGaAsよりさらに移動度の高いInGaAsであり、電子蓄積層の電子濃度は $10^{12}\text{cm}^{-2}$ 程度である。衛星放送周波数(12GHz)における最小雑音指数は約0.3dBまで低減され、衛星放送を受信するパラボラアンテナのサイズ縮小化効果の限界に到達した。

## 5. おわりに

HEMTの発明の背景と製品開発経緯について述べた。アイデアの本質は既存概念間の新しい結合、融合であること、これらの新しい結合、融合を見つけ出す能力が創造性であり、日ごろからの訓練や感受性を研ぎ澄ます失敗を含めたさまざまな経験を積むことにより創造性を高めることができると思っている。また新しいデバイスが実用化に成功するためには、新デバイスの長所を活かせるニッチマーケットの早期発掘とそれによる技術進化のフィードバックループの形成を図ることが重要である。若い方々の何かのご参考になれば望外の幸せである。