

高電子移動度トランジスタHEMT の発明と情報通信分野への貢献

Invention of High Electron Mobility Transistor (HEMT) and
Contributions to Information and Communications Field



(株) 富士通研究所名誉フェロー

三村 高志 Takashi Mimura

ま え が き

富士通がHEMT (High Electron Mobility Transistor: 高電子移動度トランジスタ) を1980年に発表して、早三十数年が経つ⁽¹⁾。この間HEMTは、衛星放送用受信機や携帯電話システム、ミリ波自動車レーダー、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、情報通信における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。更に、将来の情報通信技術の一層の高度化に向け、従来のGaAs (ガリウムヒ素) 系HEMTに加え超高周波InP (インジウムリン) 系HEMT^{(2), (3)} や省電力・高効率GaN (窒化ガリウム) 系HEMT⁽⁴⁾ の開発など、世界的な研究開発は現在も極めて活発である。

本稿では、筆者が体験したHEMTの発明から製品化に至る一連の研究開発を振り返り、発明の背景や実用化を成功させた要因について述べる。

HEMTの着想

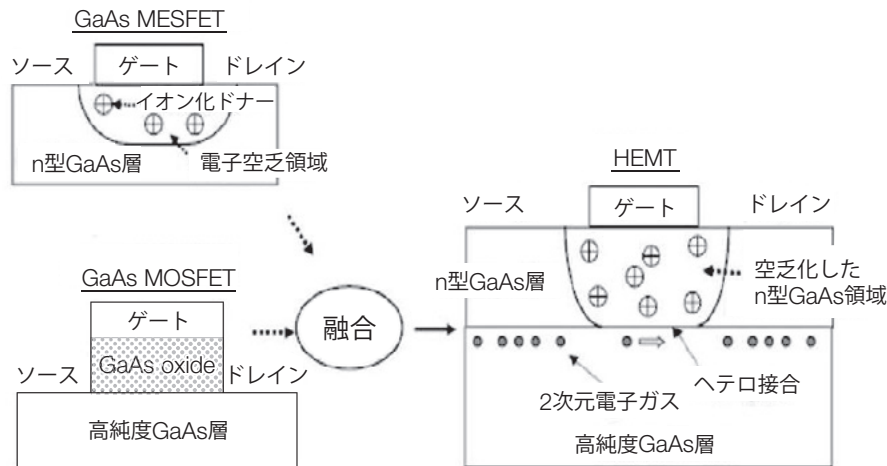
HEMTの開発当時 (1979年)、筆者はGaAs MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) を開発する研究部に所属していた。GaAs MESFETは、1966年にC. A. Meadによって発明されたコストパフォーマンスが極めて高い究極の高速デバイスである⁽⁵⁾。高速デバイスを追求していた筆者にとって、これを改良する仕事しか残されていないのではないかと考えていた。しかし、後追いの研究テーマでは面白味がないため、MESFETとは異なるGaAs MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) に関する研究を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実現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、様々な手法を試みたが、蓄積が起きるほどには界面準位密度を低減できなかった。

GaAs MOSFET研究の継続に危機感を持っていた1979年2月、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」と呼ばれる構造である。この構造は、ドナーをドーピングしたAlGaAs (アルミニウムガリウムヒ素) 層とノンドープのGaAs層から成る超格子である。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極めて常識的な現象であったが、筆者には大きなショックであった。GaAs MOSFET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における現象であったこともあり、その時点では何らアイデアは生まれなかった。

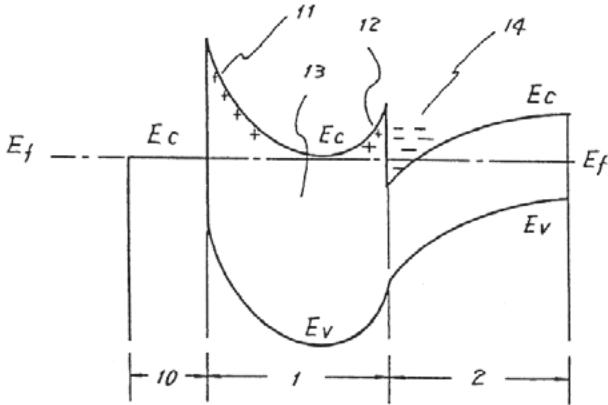
HEMTのアイデアを得たのは、1979年7月である。アイデアのポイントは、n型AlGaAsとGaAsとのヘテロ接合構造とし、n型AlGaAs層表面に空乏層を作り出すショットキー接合を導入してn型AlGaAs層中の電子を排除し、GaAs層内の2次元電子ガスに電界効果が及ぶようにしたことである。

図-1は、特許明細書に掲載したHEMTの動作原理を表現するエネルギーバンド図である。空乏化したn型AlGaAs層をSiO₂ (二酸化ケイ素) のよう



出典：電子情報通信学会論文誌 Vol.J100-C No.10 (2017)

図-2 既存のデバイス概念の融合から生まれたHEMT



出典：映像情報メディア学会誌 Vol.52, No.4 (1998)

図-1 HEMTのエネルギーバンド図

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ー接合は、GaAs MESFETにおけるゲート電極の機能そのものである。したがって、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とが新しい結合を形成して、HEMTという新しいデバイス概念が生まれたと言える（図-2）。

HEMTの動作実証

アイデアはそれだけでは絵に描いた餅にすぎず、実験によって実証されなければ意味がない。実証に際しては、様々な技術が必要となる。HEMTを

試作するためには、とりわけ高度な結晶成長技術が不可欠であった。当時、筆者はデバイスを開発する部門にいたが、そこにはHEMTに要求される精度で結晶を作る技術はなかった。

HEMTの電流チャネルとなる2次元電子ガスが存在するのは、GaAsとAlGaAsのヘテロ接合界面から電子の波動関数の拡がり程度のわずかな領域、原子層数で言えば十数原子層という極めて狭い領域である。したがって、結晶成長には原子層オーダーの制御精度でヘテロ接合を作成する技術が要求される。このような厳しい精度を満足するものとして、分子線エピタキシャル成長法（MBE：Molecular Beam Epitaxy）が当時唯一の方法であった。

MBEの特長は、結晶成長速度が毎秒約1原子層と、従来の結晶成長法に比べ1桁以上遅い点と、メカニカルなシャッター操作によって異種半導体の連続成長を容易に実現できる点である。

そこで、部門の異なるMBEグループに協力を求め、HEMTの試作サークルが発足した。サークルといっても、研究員の個人的興味で参加してくれたMBEグループの実質2名と筆者だけの極めて小規模なものである。このような非公式の試作サークルという形態で活動できたことが、HEMTの成功の重要な要因の一つであったと思う。もし、アイデアの段階で正式な研究テーマとして取り上げられていたならば、様々な干渉にさらされ、開発活動のフレキシビリティが失われることで、失敗

の危険性が増大したと想像できたからである。

このような試作サークルをスタートさせた直後、一通の手紙を受け取った。驚いたことに、変調ドーブ超格子の論文の著者であるベル研のR. Dingle氏からであった。筆者が研究していたGaAs MOSFETについて、議論したいとのことであった。1979年8月30日、彼は来社した。彼の変調ドーブ超格子や我々のMOSFETについて議論したが、新しくスタートした我々のHEMT開発については当然秘密にしていた。彼との議論を通して、彼らはまだHEMTのような明確なデバイスコンセプトには達していないと安堵した。

しかし、彼が帰国した直後の9月上旬、彼のグループが変調ドーブ超格子中の電子を制御する実験結果を発表することが、その年のGaAs ICシンポジウムのプログラムを見て分かった。明らかに、何らかのデバイスを指向した研究に移行した動きである。HEMTとは異なるらしいことは推察できたものの、手強い競争相手として意識せざるを得ない状況になった。

これが契機となり、我々の研究は一段と活性化した。1979年11月になると、MBEグループの技術レベルは、先のDingleらのレベルにまで追いつくことができた。一方、筆者はデバイスプロセスを担当しており、プロセスの中でも困難であったのはエッチング技術であった。HEMTが動作するためには、ゲート電極とヘテロ接合界面とに挟まれた半導体層の厚みを数nm程度という、当時の技術レベルからすれば正に気の遠くなるような高い精度でエッチングする必要があるからである。様々なエッチング液を作っては試してみるといった単純な実験を繰り返したが、エッチング精度の再現性に課題が残った。

しかし、プロセスに時間をかけすぎた結果、HEMTの発表一番乗りという最も栄誉な瞬間を逸するのは避けねばならないと判断し、再現性を度外視して試作をスタートさせた。1個でもいいから、HEMTとして動作するものを競争相手よりも早く実現したいという一心からである。二、三の失敗を経て、1979年12月下旬、歩留まりの低いウエハの中にHEMTとして動作するチップを見つけることができた。非公式のHEMT試作サークルを結成して約4か月後のことであった。

このHEMTの研究成果を、1980年6月に開催された第38回DRC (Device Research Conference) で発表したときのことである。筆者が発表を終えて席へ戻ると、ふいに後ろから肩を叩かれ、振り返ると見知らぬ男が何か書類を差し出してきた。それは驚いたことに、我々のHEMTと類似のデバイス (HEMTのAlGaAsとGaAsとを上下さかさまにした逆HEMTと呼ばれるデバイス) に関する論文の原稿であった。後で話を聞くと、彼はフランスのトムソンCSF社 (当時) の研究者であり、我々に先を越されたことを非常に残念がっていた。いずれにせよ、HEMT一番乗りの栄誉を手にすることができたが、実にタッチの差であった。こうしたことは技術開発競争においてよくあることであり、いつも強力な競争相手の存在を想定して油断しないことが肝心である。

実用化を確信

HEMTは誕生してすぐに高周波デバイスの片鱗を見せ始めたが、前述したようにエッチングなどデバイス寸法を精密に制御する技術が未熟であった。このため、デバイスの実用化まで成長させていけるかどうか、筆者自身、半信半疑であった。いわゆる「Laboratory Curiosity (製品化できないレベル)」で終わるデバイスかも知れないという嫌な予感もあった。というのも、その頃HEMTの素子試作プロセスを担当していたのは筆者一人であったし、HEMT試作プロセスの再現性の低さに困り果てていたからである。

HEMTは、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しきい値を得る必要がある。しかし、AlGaAsはAlを含むため、GaAsに比べて極めて活性である。そのため、空気中に放置しておくだけで表面にAl₂O₃ (酸化アルミニウム) 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。このことは、HEMTの実用化にとって正に致命的であった。

この難しい技術課題のブレークスルーとなったのが、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 (RIE) 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

初めて電極部分のキャップ層のみを選択的にRIE加工によって取り除くという、至ってストレートな発想である。このようにすることで、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の作製が格段に容易になるはずであると考えた。こうした方法が使えるのは、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。これらの技術によって、初めて特性のそろったHEMTが再現性良く作れるようになり、実用化に確信が持てるようになった。

HEMTの製品化

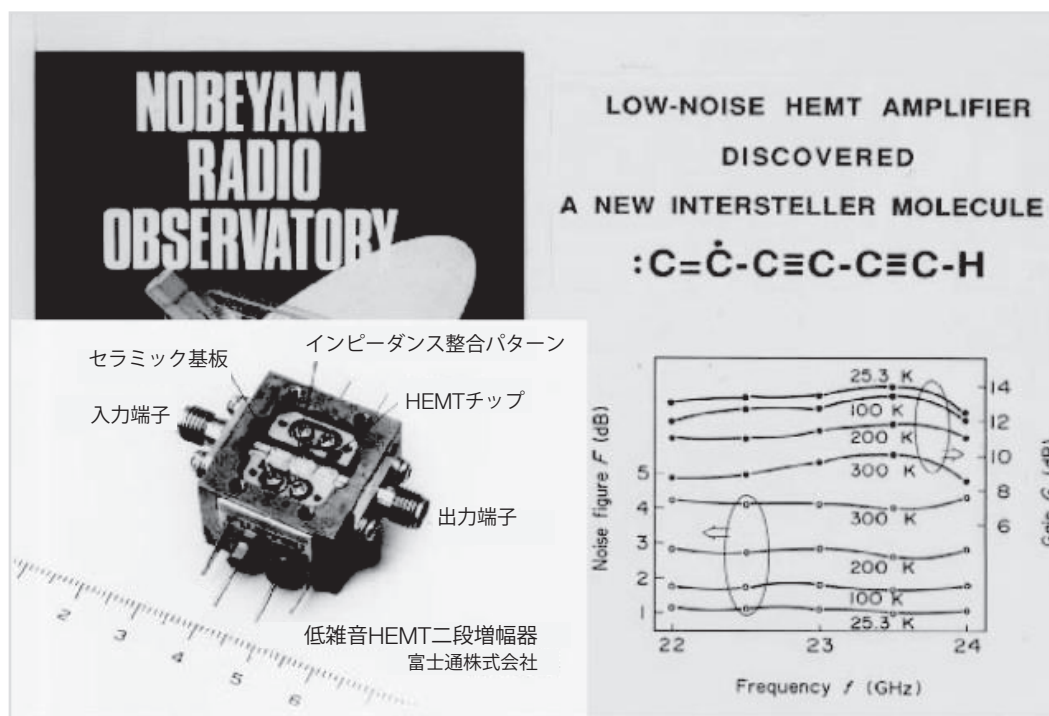
HEMTの製品化は、全く想定外の出来事からスタートした。1983年の国際固体回路会議（IEEE International Solid-State Circuits Conference：ISSCC）において、マイクロ波帯の衛星通信分野への適用を想定し、HEMTの低雑音四段増幅器を発表したところ⁽⁶⁾、出席していた米国の電波天文台関係者の注目するところとなった。発表したHEMTの低温環境における雑音特性が、従来のパラメトリック増幅器やGaAs MESFET増幅器を

置き換える性能を持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年に国立天文台の野辺山電波天文台に設置されたHEMT増幅器（図-3）は、暗黒星雲の中の未知の炭化水素分子の発見に貢献し⁽⁷⁾、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。開発初期に、ニッチではあるが低温下でのHEMTの性能を活かせるマーケットに巡り合えたことが、イノベーションへの極めて重要な一歩となった。マーケットの出現によりビジネス活動が始動され、それによってデバイス関連技術の改良を継続的に行うことが可能になった。そして、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、新たな応用分野への道が開かれた。

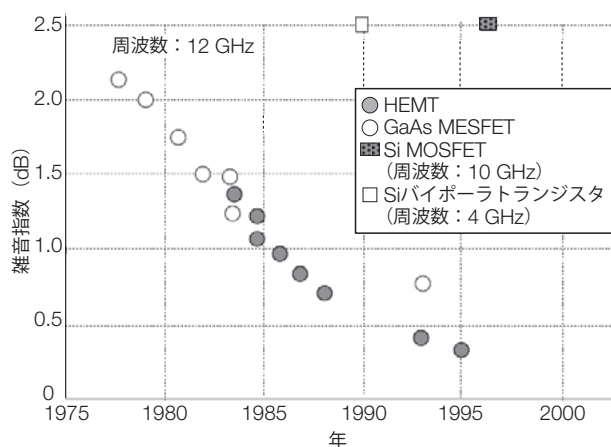
HEMTの普及

HEMTが本格的に普及し始めたのは、1987年頃からである。従来のGaAs MESFETに代わり、衛星放送受信用コンバータの低雑音増幅器としてHEMTが使用されるようになった。HEMTを使用



出典：半導体シニア協会 会報 No.66 (2010)

図-3 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



出典：電子情報通信学会論文誌 Vol.J100-C No.10 (2017)

図-4 HEMTとGaAs MESFETの12 GHzにおける雑音指数の推移

することで、パラボラアンテナのサイズが従来の半分以下まで小さくなり、衛星放送は日本やヨーロッパにおいて爆発的に普及した。

このような急速な普及が可能となった背景には、結晶成長法の高品質化と高スループット化に加えて、選択ドライエッチングなど、HEMTに固有の量産化プロセス技術が開発されたことの寄与が大きかった。ここでもう一つの重要な要因として指摘しておきたいのは、HEMTが従来のGaAs MESFETの回路設計技術や測定評価技術などの基盤技術を、ほぼ共用できたということである。これにより、HEMTの低雑音化のための要因解析など、性能向上が極めて効率的に進展した。

図-4は、GaAs MESFETとHEMTの12 GHz（衛星放送周波数）における雑音指数の推移をプロットしたものである。参考として、異なる周波数におけるSiバイポーラトランジスタとSi MOSFETの雑音指数もプロットしている。

1983年頃の時点では、HEMTとGaAs MESFETの性能には有意差がなかった。しかし、その後徐々にユーザーにHEMTが評価され始め、ユーザーからのフィードバックと経済的市場原理により低雑音化技術の進歩が加速した。これにより、HEMTの最小雑音指数は約0.3 dBまで低減し、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ことで、衛星放送の普及に大きく貢献した。

また、HEMTは様々な化合物半導体への応用が

可能である点も特長であり、従来のGaAs系HEMTに加え、InPを用いた超高周波HEMTや、GaNを用いた高効率・高出力HEMTの研究開発が活発に進められている。InP系HEMTについては、超高周波特性を活かした高速ダウンローダや、セキュリティチェックなどで用いられるイメージセンシングへの応用が期待されている。一方、GaN系HEMTは携帯電話の基地局向けに既に実用化されており、基地局の消費電力低減や小型化に貢献している。今後は、5G（第5世代移動通信システム）におけるミリ波無線通信や、サーバ電源への応用が期待される。

む す び

本稿では、筆者が体験したHEMT発明の背景と製品開発の経緯について述べた。

個々のテーマの内容は、当然HEMT開発に固有のものであるが、これらを遠くから眺めると、過去の多くの開発事例と共通するある種の普遍性が感受されよう。アイデアの本質は既存概念の融合であり、概念の新しい融合を見つけ出す能力が創造性である。筆者は、失敗を含めた様々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考えている。

若い方々の今後のチャレンジにより、HEMTが更に普及し、情報通信やエネルギーの高効率利用に加え、宇宙空間までのボーダレスな無線通信や革新的医療技術など、新たなイノベーションの実現を期待したい。

参考文献

- (1) T. Mimura et al. : A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions. Jpn. J. Appl. Phys., Vol.19, No.5, 1980, p.L225-L227.
- (2) X. Mei et al. : First demonstration of amplification at 1THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process. IEEE Electron Devices Lett., Vol.36, No.4, 2015, p.327-329.
- (3) 中舎安宏ほか：数十Gbpsの高速無線通信に向けたテラヘルツ波帯小型受信機. FUJITSU, Vol.68, No.1, p.9-14 (2017).
<http://www.fujitsu.com/jp/documents/about/>

resources/publications/magazine/backnumber/
vol68-1/paper03.pdf

- (4) 常信和清ほか：窒化ガリウムHEMT技術の展望.
FUJITSU, Vol.64, No.5, p.600-605 (2013).
[http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol64-5/
paper21.pdf](http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol64-5/paper21.pdf)
- (5) C. A. Mead : Schottky Barrier Gate Field Effect
Transistor. Proceedings of the IEEE, Vol.54, No.2,
1966, p.307-308.
- (6) M. Niori et al. : A 20GHz high electron mobility
transistor amplifier for satellite communications.
EEE ISSCC Dig. Tech. Paper, 1983, p.198-199.
- (7) H. Suzuki et al. : Detection of the interstellar
C₆H radical. Publ. Astron. Soc. Japan, Vol.38,
No.6, 1986, p.911-917.