

## HEMT の R&amp;D はいかに実行されたか

三村 高志<sup>†a)</sup>

## How was the HEMT R&amp;D Carried Out?

Takashi MIMURA<sup>†a)</sup>

あらまし 1980年に誕生した HEMT は、素子の基本構造や製作技術において従来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ため実用化にはかなりの困難が予想されたが、5年後の1985年には電波望遠鏡の低雑音受信機としてデビューした。更に1987年頃には衛星放送受信用アンテナの低雑音増幅器として広く普及し、年間約1億個の量産デバイスにまで成長した。ここでは、HEMTのR&Dを振り返り、若い方々の参考になると思われることなどについて述べる。

キーワード HEMT, 高電子移動度トランジスタ, 衛星放送受信用アンテナ, 電波望遠鏡

## 1. ま え が き

HEMT (High Electron Mobility Transistor: 高電子移動度トランジスタ) を発表して早 30 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、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。更に将来の情報通信技術の一層の高度化に向け、従来からの GaAs 系 HEMT に加え超高周波 InP 系 HEMT [2] や省電力・高効率 GaN 系 HEMT [3] の開発など、世界的な研究開発は現在もきわめて活発である。ここでは、筆者が富士通研究所において体験した HEMT の発明から初期の実用化にいたる一連の R&D を振り返り、若い方々のこれからの研究開発において留意してほしいと思う事柄などについて述べたい。なお今回の内容の一部は、既に発表したものがあるので、あわせて読んでいただければ幸いである [4]。

## 2. 発 明

話の順序として HEMT の発明 [5], [6] に至る経緯から始めたい。

## 2.1 失敗: GaAsMOSFET 研究の行き詰まり

HEMT 発明当時、私は GaAs を使った MOSFET に関する研究を約 2 年間ほど行っていた。SiMOSFET より高速な GaAsMOSFET を実現させ、GaAsMOSLSI の可能性を探るのが研究の目的である。周知のように、MOSFET は LSI に必須のデバイスである。ゲート酸化膜上に設置されたゲート電極によって、半導体表面に電子またはホールを誘起して動作する。したがって、まずやるべきことは GaAs の表面にゲート酸化膜を作り、ゲート酸化膜上の電極に電圧をかけ、GaAs 表面に電子を誘起することである。いろいろな方法で、何度もゲート酸化膜をつくり実験を繰り返したが、GaAs 表面に電子を誘起することはできなかった。Si では表面に SiO<sub>2</sub> 膜を作ると、いとも簡単に電子を誘起することができるのに、GaAs ではできないのである。GaAs とゲート酸化膜との界面に高密度の表面準位が発生するためである。いくら試みてもこの表面準位をなくすことができなかったのである。

ところで、この GaAs の表面制御という研究は、個人的には大変面白いテーマであった。実験するたびに新たな知見が得られたからである。お陰で学位をとることもできた。しかし、企業の実用化研究であるからには、具体的なブレイクスルーが必要である。継続すべきかどうか、判断に悩むことが日増しに多くなっていった。

GaAsMOSFET の研究をスタートして約 1 年位経った 1978 年頃だったと思う。電子を蓄積させることを

<sup>†</sup> (株) 富士通研究所, 厚木市

Fujitsu Laboratories Ltd., 10-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi-shi, 243-0197 Japan

a) E-mail: mimura@jp.fujitsu.com

とうとう断念した。研究を著しく進展させ得るようなアイデアが枯渇したという思いが限界に達したからである。断念後、電子を蓄積しなくても動作するバルクチャネル型のデバイスでスイッチングスピードを評価することに研究を変更した。ねらっていた電子蓄積型デバイスが絶望的となった以上、GaAsMOSFETの研究に幕をひく前に、研究の到達地点を示しておきたかったからである。幕をひく舞台として、1979年の第37回デバイス・リサーチ・コンファレンス（通称DRC）をえらんだ[7]。

## 2.2 偶然：異分野技術情報との出会い

DRCでの発表論文の原稿を書いていた丁度その頃に、われわれの研究とは若干異なる技術分野でなされた「変調ドーブ超格子」の論文に偶然遭遇した。1979年2月頃であったと記憶している。その前年の1978年の10月にApplied Physics Lettersという論文誌に掲載されたBell研究所のR. Dingle氏らの仕事である[8]。この変調ドーブ超格子というのは、高純度のGaAsとシリコンをドーブしたn型のAlGaAsの2種類の非常に薄い半導体層を交互に何十層も積み重ねたものである。この論文は超格子中の電子移動度に焦点を当てたものであったのだが、実はこの論文の著者たちが全く言及していないある実験事実に関し強く印象付けられた。二層のAlGaAsに挟まれたGaAs層に電子が蓄積するという実験事実である。このこと自体は当時の超格子の技術分野ではなんら目新しいものではなく、いわゆる周知の事実であったと思われたが、GaAsの表面準位と悪戦苦闘していた筆者には新鮮な驚きであり、きわめて印象的であった。前述したように、GaAsMOSFETでは表面準位のため電子を蓄積させることができなかったからである。ちなみに、変調ドーブ超格子中のGaAsとAlGaAsは、結晶構造の特徴が類似しているために、電子を捕獲してしまう表面準位が少なく、電子の蓄積が起きるのである。

電子が蓄積するという実験事実は印象的ではあったが、変調ドーブ超格子という特殊な構造でのことでもあり、その時点では何ら具体的なアイデアやインスピレーションも生まれなかった。ただ漠然とした興味がある後も続いていたような気がするが、普段はほとんど意識にのぼってこない程度のものであったと記憶している。ところが、先に述べた第37回DRCでGaAsMOSFETの発表をした直後、同会議に出席していたIBMワトソン研究所のN. Braslau氏と雑談していたときに、変調ドーブ超格子からなにか実用的

なデバイスが引き出せるかもしれないという思いが突然浮かんだ。1979年6月25日のレセプションの会場でのことである。私自身にとってもまさに唐突なものであったため、鮮明な記憶として残っている。恐らく、MOSFETの研究に何とか幕がひけたという気持ちと、これからの研究テーマをどうするかという相当に切羽詰まった思いがあったためであろうか。いずれにしろ、新しいデバイスのアイデアについて考える意欲を与えてくれたのは、まさにこの出来事である。ちなみに、Braslau氏はn型GaAsからの連続マイクロ波発振を成功[9]させた人物である。氏とは次の年にも再会した。HEMTを第38回DRCで初めて発表するため渡米し、IBMワトソン研究所を訪問したときである。彼は既にわれわれの成果を知っており、研究所内での講演会を準備して歓迎してくれた。

変調ドーブ超格子という異分野の技術との出会いや研究者との技術情報に関する雑談、これらの偶然がHEMTを発明する決定的なチャンスを作ったことは間違いない。細菌学者ルイ・パスツールの名言、「チャンスは備えあるところに訪れる」ということであろうか。HEMTの場合、備えあるところを育んだのは、GaAsMOSFETにおける失敗であると思っている。

## 2.3 アイデア：既存デバイスの融合

第37回DRCから帰国後、すぐにアイデアを得ることに集中した。トランジスタのようなデバイスの原理を考える際には、量子力学から生まれたエネルギーバンド図といわれるものが基本的な武器となる。半導体の中での電子の位置や、濃度、エネルギー状態などを表現する抽象的な図のことである。四六時中このエネルギーバンド図を使って、動作原理を考え続けた。HEMTのアイデアにたどり着いたのは、DRCから帰ってきてから数週間経った1979年7月である。

HEMTのアイデアのルーツを明確にするために表現したのが図1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（変調ドーブ超格子の基本単位）の界面を電流チャネルとし、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みなせば、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。そして、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、GaAsMESFETの

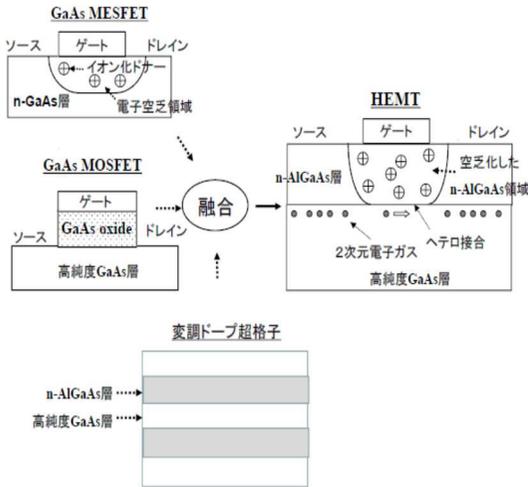


図1 既存のデバイス概念 (MESFET, MOSFET, 変調ドープ超格子) の融合から生まれた HEMT

Fig. 1 Fusion of existing device concepts (MESFET, MOSFET, Modulation-doped superlattice) leading to the HEMT.

ゲート電極の機能そのものである。図1に示すように GaAsMESFET や GaAsMOSFET という既存のデバイス概念と変調ドープ超格子という既存のナノ構造が融合して、HEMT という新規なデバイス概念を生み出したといえる。たとえ話に置き換えれば、HEMT というジグソーパズルを完成させるためには、GaAsMESFET や、GaAsMOSFET、変調ドープ超格子という異なる三つのピースが必要不可欠であった。どんな分野の研究開発においてもそうだと思うが、新たなアイデアを創出するためには、研究の scope を拡げておくことが有効である。このことが HEMT の R&D から確認できたということである。

### 3. イノベーション

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、誕生当時 HEMT に対するマーケットニーズは当然ならなかった。こういう状況下で生まれた新しい技術が、どのようにイノベーションにまで成長して行ったかを振り返ってみよう。

#### 3.1 電波望遠鏡：最初の製品化

全くの想定外の出来事から HEMT の製品化はスタートする。1983 年の国際固体回路会議 (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 [10]、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 GaAsMESFET 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の未知の炭化水素分子の発見に貢献し [11]、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企業活動が始動され、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り、マーケットにおいて従来技術である GaAsMESFET 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からである。

#### 3.2 BS 受信機：家電製品への展開

HEMT が本格的に普及し始めたのは 1987 年頃からである。従来からの GaAsMESFET にかわり、衛星放送受信コンバータの低雑音増幅器として使用されるようになったからである。HEMT を使うことでパラボラアンテナのサイズが従来の半分以下にまで小さくなり、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、MBE や MOCVD といった結晶成長法の高品質化と高スループット化、選択ドライエッチングなど HEMT に固有な量産化プロセス技術が開発されたことの寄与が大きい。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 が従来からの GaAsMESFET の回路設計技術や測定評価技術などの基盤の技術をほぼ共用できたということである。このため 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2は、GaAsMESFET と HEMT の 12 GHz (衛星放送周波数) における雑音指数を年ごとにプロットしたものである。参考までに異なる周波数での Si バイポーラ・トランジスタと SiMOSFET の雑音指数もプロットしている。1983 年頃の時点では HEMT と GaAsMESFET の性能には有意差がなかったが、その後徐々にユーザに評価され始め、ユーザ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され、衛星放送受信機の低雑音化に向けた素子

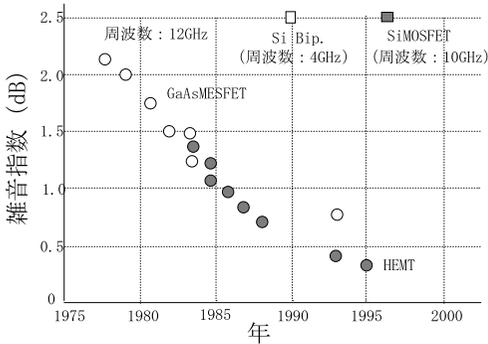


図2 HEMTとGaAsMESFETの12GHzにおける雑音指数の年代推移  
Fig.2 Evolution of noise figures at 12GHz in HEMTs and GaAsMESFETs.

技術に関し一応の完成をみたと言える。

#### 4. む す び

HEMTのR&Dを通して経験したことの一部を二、三のテーマにして述べてきた。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、これらを速くから眺めると、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。したがって、筆者の拙い経験も様々な研究開発分野で活躍する若い方々の何かの参考になればとの思いから筆を執った次第である。アイデアの本質は既存概念間の融合であること、概念間の新しい融合を見つけ出す能力が創造性であり、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、長所を活かせるニッチマーケットへの早期投入と、マーケットからのフィードバックを活用することが大切である。若い方々のチャレンジを期待したい。

#### 文 献

[1] T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, and K. Nanbu, "A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterojunctions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.19, no.5, pp.L225-L227, May 1980.  
[2] X. Mei, W. Yoshida, M. Lange, J. Lee, J. Zhou, P.H. Liu, K. Leong, A. Zamora, J. Padilla, S. Sarkozy, R. Lai, and W.R. Deal, "First demonstration of amplification at 1THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process," *IEEE Electron Devices Lett.*, vol.36, no.4, pp.327-329, April 2015.  
[3] 常信和清, 吉川俊英, 増田 哲, 渡部慶二, "窒化ガリウムHEMT技術の展望," *FUJITSU*, vol.64, no.5, pp.600-605, Sept. 2013.

[4] 三村高志, "HEMTの開発経緯," *信学誌*, vol.76, no.3, pp.230-233, March 1993 など.  
[5] 三村高志, 日本特許 1,409,643 (1987.11.24).  
[6] T. Mimura, US Patent Re33,584 (07, May, 1991).  
[7] T. Mimura, N. Yokoyama, H. Kusakawa, K. Suyama, and M. Fukuta, "GaAs MOSFET for low-power high-speed logic," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.26, no.11, p.1928, Nov. 1979.  
[8] R. Dingle, H.L. Stormer, A.C. Gossard, and W. Wiegmann, "Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices," *Appl. Phys. Lett.*, vol.33, no.7, pp.665-667, Oct. 1978.  
[9] N. Braslau, J.B. Gunn, and J.L. Staples, "Continuous microwave oscillations of current in GaAs," *IBM J. Research and Development*, vol.8, no.5, pp.545-546, Nov. 1964.  
[10] M. Niori, T. Saito, K. Joshin, and T. Mimura, "A 20GHz high electron mobility transistor amplifier for satellite communications," *IEEE ISSCC Dig. Tech. Paper*, pp.198-199, NY, Feb. 1983.  
[11] H. Suzuki, M. Ohishi, N. Kaifu, S. Ishikawa, T. Kasuga, S. Saito, and K. Kawaguchi, "Detection of the interstellar C<sub>6</sub>H radical," *Publ. Astron. Soc. Japan*, vol.38, no.6, pp.911-917, June 1986.

(平成 29 年 1 月 31 日受付, 4 月 22 日再受付, 9 月 12 日公開)



三村 高志 (正員:フェロー)

1967 関西学院大学・理卒. 1970 大阪大学大学院修士課程了. 同年富士通(株)入社. 以来, 半導体デバイスの研究開発に従事. 1975 (株)富士通研究所へ移籍. 現在, 同社フェロー, 国立研究開発法人情報通信研究機構協力研究員. 1982 本会業績賞.