

みむらたかし

三村高志

(富士通研究所フェロー)

HEMT を開発し、IT に多大な貢献



わが国の応用物理学史を飾るに相応しい発明である HEMT (High Electron Mobility Transistor: 高電子移動度トランジスタ) は、それまでの研究での失敗という苦い経験から三村高志が会得した“研ぎ澄まされた感受性”によって、日常的な偶然の出来事の中から生まれた。HEMT は、携帯電話や衛星通信など、高周波の無線通信に使用されており、情報技術 (Information Technology: IT) 社会を支える基幹技術となっている。HEMT の普及で加速された衛星テレビ放送が、1989 年、相次いで東欧諸国の自由化を促し、世界史に残る社会システムの変革を誘発したことは、予期せぬ出来事ではあったにせよ、記憶に留めるべきであろう。

本項では、HEMT の研究開発に纏わるエピソードを含め、三村高志の足跡を辿る。

歴史的背景

先の大戦(第二次世界大戦)中、大砲の弾道を計算するため、数多くの真空管を用いた計算機が研究開発された。しかし、真空管は次々と故障し、とても実用に耐えられる状態ではなかったため、真空管に替わる信頼度の高い電子部品を開発するための研究が、アメリカのベル研究所で開始された。

そして 1947 年、ジョン・バーディーン、ウォルター・ブラッティン、およびウィリアム・ショックレー、等によって、真空管に比べて格段に信頼度の高い固体電子部品である半導体デバイス(トランジスタ)が発明され、三氏は 1956 年にその功績で、ノーベル賞を受賞した。

半導体デバイスの材料は、その後ゲルマニウム(Ge)から、より高性能なシリコン(Si)に移り、デバイスの構造も、バイポーラトランジスタあるいは、MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor:MOS 型電界効果トランジスタ)の実用化を経て、IC(集積回路)から LSI(大規模集積回路)、そして VLSI・ULSI へと進化し続け、小型化・高性能化・高集積化・低電力化に向け、弛まない発展を続け、「産業の米」と言われるまでになり、現代社会の凡そ総ての分野で基盤技術となっている。

そして現在でも、半導体デバイスを、さらに高速化、高集積化、高機能化、低消費電力化しようとする挑戦がとどまることなく続けられ、むしろ技術開発はそのスピードを加速さえしているように見受けられる。

わが国は、特に半導体デバイスの製造関連技術の研究開発において多大な貢献をしてきたのであるが、三村高志が発明・開発し、この項で記述する HEMT は、超高速半導体デバイスとして、今後ますます進展する情報技術社会においても必須の電子デバイスであり、わが国を代表する研究開発例の一つである。

HEMT とは

HEMT とは、High Electron Mobility Transistor(高電子移動度トランジスタ)の略で、エネルギー状態(バンドギャップ)の異なる半導体の接合部にある電子が、通常の半導体内に比べて高速で移動することを利用した電界効果型トランジスタである。1980 年に富士通が世界に先駆けて開発し、もともとはスーパーコンピュータや衛星放送用受信機などで採用されていたが、携帯電話の普及が急拡大したことにともない需要が急増した。現在では、その他に 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、IT 社会を支える基盤技術として幅広く採用されている。

絶縁性が高く、特性の良い伝走路を形成可能であること、動作周波数が高いことなどシリコン基板の IC に比較して通信機器に適した利点が多い。

HEMT の原理を、図を用いて簡単に説明する。

この項は、やや専門的な記述になって恐縮ですが、お許し願いたい。

図 1 に、HEMT の原理図を示す。

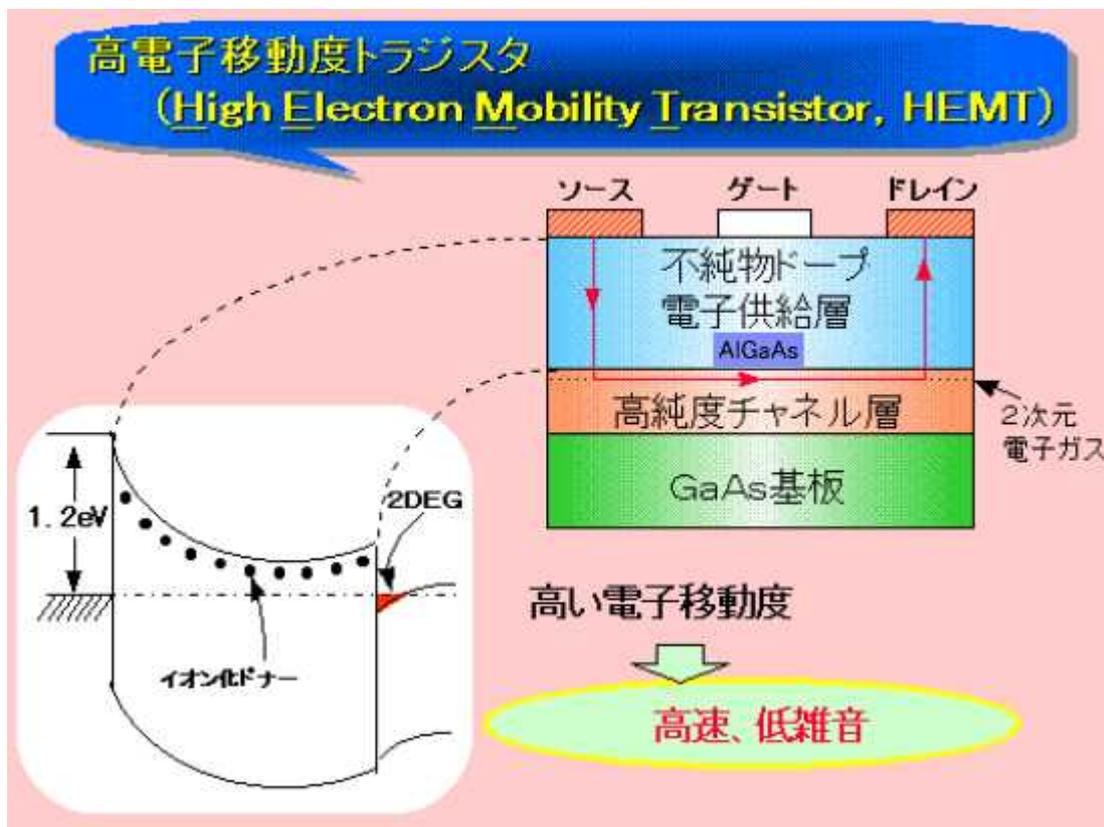


図 1. HEMT の原理図¹

バンド・ギャップの大きな半導体に N 型不純物をドーピングした電子供給層 (AlGaAs) と、電子供給層よりもバンドギャップが小さく、不純物をドーピングしていない高純度チャネル層 (GaAs) とを接合して、2 次元電子ガスの層に流れる電子を増やしている。

この 2 次元電子ガスの層では、電子走行層が不純物から空間的に分離され、2 次元電子ガスは不純物による散乱を受けることがないので、通常の半導体内に比べて、電子が高速で移動できる。結果として、高速なスイッチングと感度を高めることが可能になる。

HEMT は電界効果トランジスタ構造のため、ゲート長を短くすればするほど遮断周波数は向上する。遮断周波数の向上により、IC の動作周波数も高まる。

GaAs MOSFET の研究と挫折

三村らは、シリコン (Si) 半導体を素材とする Si MOS 型電界効果トランジスタ (MOSFET) より

も高速・高性能な動作特性が期待できる、ガリウム砒素(GaAs)半導体を用いた GaAs MOSFET の実現可能性を評価するため、研究活動をスタートさせた。

しかし、GaAs の表面にシリコン酸化膜(SiO₂)など色々な絶縁膜を形成しても、GaAs と絶縁膜との界面に高密度な“表面準位” ([*]参照)が発生してしまい、Si と SiO₂ との界面のように電氣的に安定した特性を得ることができなかった。

[*]・・・“表面準位”とは、構造が異なる種類の結晶界面に発生するものであり、主として結晶表面の電氣的特性に大きな影響を与えるものである。

GaAs の表面制御という研究テーマに、三村個人としては、尽きぬ興味を感じ、実験のたびに新しい知見を得、多数の論文を発表し、学位まで取得することができた。しかしながら、長年の“もの作り”の経験から、GaAs MOSFET が“もの”になるという感触が最後まで得られなかったことと、企業内での研究であることから、実用化の目途が得られない GaAs MOSFET の研究を2年間ほどで断念した。(1978年)

それまでの GaAs MOSFET の研究結果を整理し、その顛末を明確にしておきたいと思い、1979年の第37回デバイス・リサーチ・コンファレンス(通称DRC)で報告しようと考えた。DRCは、トランジスタが初めて発表されたことでも有名な、デバイスに関する由緒ある学会である。

発表論文の原稿を作成していた1979年2月の頃、偶然に米国ベル研究所の Raymond Dingle らの“変調ドープ超格子”の論文²(1978年)と出会った。ここでいう“変調ドープ超格子”とは、高純度の GaAs と Si をドープした n 型 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、“超格子構造”([*]参照)における電子移動度に焦点を当てたものであり、2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も記載されていた。GaAs MOSFET 構造では表面準位が発生してしまうため、GaAs 表面層の電子濃度の制御を断念せざるをえなかった三村にとって、この事実は極めて印象的なものであった。

しかし、超格子という極めて特殊な構造でもあり、その時点では何ら具体的なアイデアは生まれなかった。

[*]・・・“超格子構造”は、自然界に存在しない構造を有する人工超格子構造である。江崎玲於奈は、1969年、半導体単結晶に人工的に1次元の周期的な構造変化を組み込むことが出来れば半導体超格子となり微分負性抵抗効果など特異な現象が出現することを予言した。

新しいアイデアの捻出に専念

1979年6月29日のこと、DRC会議での研究者との雑談時に、『“変調ドーブ超格子構造”を実用的な新たなデバイスに結びつけることができないか』というアイデアが突然浮かんだ。唐突な出来事であり、三村は、今でも鮮明に記憶している。

半導体の基本的概念であるエネルギーバンド図(半導体中の電子の位置、濃度、あるいは、エネルギー状態を現す図)を使って、日夜、高速・高性能なデバイスの概念を追い求めていた。そして、HEMTのアイデアに辿り着いたのは、DRC会議から帰国後、数週間たった1979年の7月であった。

デバイスの動作原理をイメージするエネルギーバンド図は、半導体の知識を持っている人ならば誰でも理解できる程度の、極めて初歩的で簡単なものであり、格段高度な専門的知識は必要ではなかった。まさに“コロブスの卵”とでも言うべき出来事であった。

『一定期間辛抱強く考えを集中し続けることの方が、知識の多寡そのものよりも大切ではなからうかということです。』と、HEMT発明当時を振り返って、三村は述懐している。

HEMT 試作グループの結成

辿り着いたデバイスのアイデアを実証するため、それを明確な概念図に仕上げた三村は、HEMTを試作するための準備に取り掛かった。

HEMT構造を実現するには、形成する半導体薄膜の厚みを、原子層の数でいえば十数原子層、すなわち数nm程度の膜厚で厳密に制御しなければならず、当時としては大変高度な結晶成長技術が必要であった。

当時、三村が所属するデバイス開発部には、それ程高度な結晶成長技術はなく、他部門である結晶成長グループに協力を求めた。結晶成長グループには、結晶成長速度が毎秒約1原子層で厳しい精度で膜厚を制御できる、HEMT開発にとって願ってもない最先端の分子線エピタキシャル(Molecular Beam Epitaxy: MBE)結晶成長装置があった。

富士通では、1974年にMBEの装置を試作して、GaAs ICや光デバイスなどの研究を行っていたが、従来からの結晶成長法に比べて、MBEの利点を積極的に生かす分野を特定することができず、MBEグループの研究は極めて厳しい社内環境に置かれていた。このような状況も手伝ってか、冷水佐壽らのMBEグループ2名と三村との、3名だけの非公式のHEMT試作サークルが誕生させることができた。HEMTのアイデアから数週間後のことであった。

この非公式な試作グループ結成こそが、HEMT誕生の礎であった。

全力投球で栄誉

HEMT試作サークルをスタートさせた直後に、前記した“変調ドーブ超格子”論文の著者で

あるベル研究所の Dingle から、「GaAs MOSFET について討論したい」旨の一通の手紙を受け取った。

1979年8月30日、Dingle らが富士通研究所を訪問し、GaAs MOSFET に関する討論が行われた。後に分かったことであるが、そのときの議論はお互いに、まさに虚々実々のやり取りなのであった。

三村らは、HEMT 開発が進行中であることに触れることはなく、Dingle らも何等かの新しい GaAs デバイスのアイデアについて語ることはなく、そのとき三村は、安堵感を覚えていた。

しかし、Dingle が帰国して間もない9月上旬、彼のグループが、変調ドープ超格子構造を用いる新型デバイスを指向した研究結果を、その年の GaAs シンポジウムで報告することが分かった。同じような時に、同じような事を考えて研究している競争相手がいることを、改めて強く認識せざるを得なかった。

我々は、GaAs を用いた新型の超高速デバイス HEMT の研究開発活動を、さらに一段とスピードアップさせた。

冷水らの MBE グループでは、HEMT デバイスの試作に対応できるまでに結晶成長技術の開発が進んでいたが、三村が担当したエッチング加工技術、すなわち超薄膜の半導体層を精度よく部分的に除去するという気の遠くなるような技術は、開発途上にあった。しかし、“発表一番乗り”という最高の榮譽を得ることが最重要であると考え、より早く、一個でも動作をする HEMT デバイスを得ることを目指して、試作をスタートさせた。

数回の失敗の後、HEMT 動作をするデバイスを見つけることができた。試作グループを充足してから、四ヵ月後のことであった。

HEMT 動作を確認後、1979年12月の末に特許³を申請した。

実用化を確信

HEMT デバイスの優れた基本特性は確認できたが、デバイス作成過程で、厳密な寸法制御を必要とするエッチング工程での再現性には未だ課題が残っており、HEMT が、単なる“実験室での逸品”に終わってしまうのではないかと、実用化には、なお一抹の不安を感じていた。

そして、この難題の解決を入社間もない常信和清 研究員に課したのである。常信が優秀な新人であるとはいえ、その難問解決の成否に、三村は半信半疑であった。しかし、予想に反して常信はこの難題を見事に解決した。これは常信が、ひたむきに努力した成果であり、“案ずるより生むが安し”という諺は当てはまらないのであるが、言いようもなく嬉しく、三村は HEMT の実用化を確信することができた。

商品化のきっかけ

HEMT の市場は、衛星放送の普及と共に拡大した。受信用コンバーターに使われる低雑音アンプとして用いられ、パラボラアンテナのサイズを従来の半分以下に小さくできたからである。

図 2. に、その応用例を示す。

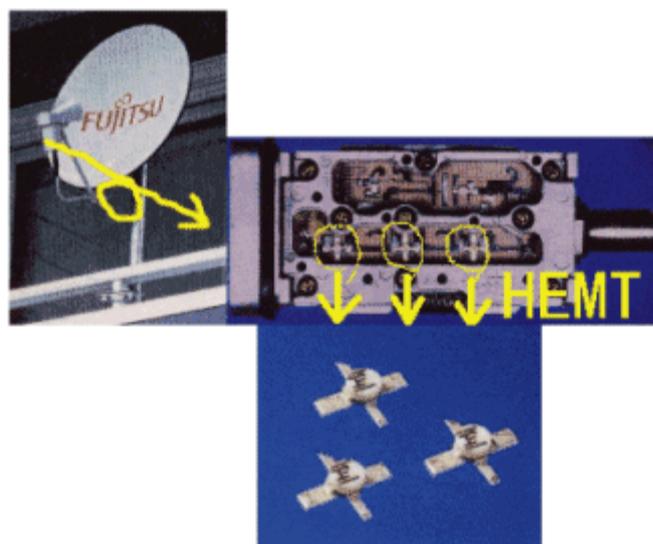


図 2. 衛星放送などを受信するためのパラボラアンテナへの応用例。¹

しかし、このような商品のアイデアが当初から在った訳ではない。後に述べる電波望遠鏡用の低雑音受信機に適用された、はじめての製品化の件も、1983 年、国際固体回路会議 (ISSCC) での発表を終えて席に戻ってきたときに、米国の電波天文台の関係者から『あなたが今発表した HEMT を打って欲しい』と、請われたのをきっかけとして実現したのである。

HEMT に纏わるエピソード

その1:「青色発光ダイオードを止めて、HEMT を開発せよ」

窒化ガリウム (GaN) を用いた青色発光ダイオードの開発者として、さらには、「特許権は誰のものか」と、退社後に会社 (日亜化学工業株式会社:「日亜」) を相手取って高額な報奨金を要求した裁判でも勇名を馳せた、中村修二:現カリフォルニア大学教授は、日亜在職中、創業者である小川信雄社長に「青色発光ダイオードの開発をしたい」と直訴したところ、小川信雄社長は、約 3 億円の予算をこのプロジェクトに付けてくれた。

しかし、その約 1 年後、後任の社長となった娘婿の小川英治は、中村が目指す GaN 系青色発光ダイオードの開発に強く反対し、中村に「青色発光ダイオードの開発をすぐに中止せよ」

と強く命じた。

1980年代の後半、光の三原色のうち「赤色」と「緑色」の発光ダイオードはすでに開発されていたが、実用に耐え得る「青色」発光ダイオードの開発は難航しており、「今世紀(20世紀)中は無理だろう」と、一般に考えられていたからである。

ところが、中村はこの社長命令を無視して、四面楚歌の中、GaN系青色発光ダイオードの開発を続け、1995年春に高輝度の青色発光ダイオードの開発製品化に成功し、これにより高輝度発光ダイオードの3原色がそろうことになった。

後任の小川英治社長が、「青色発光ダイオードの開発をすぐに中止し、新製品を開発せよ」と中村に命じたのは、なんと、“三村が発明し開発したGaAs/GaAlAs系のHEMT”を、日垂でも製品化することであった。

HEMTは超高感度・低雑音の半導体デバイスとして、衛星放送受信アンテナ用として普及していたが、携帯電話用の素子としても、需要が今後急速に拡大すると予想されていたからである。

HEMTに纏わるエピソード

その2:東西冷戦構造の崩壊を加速

「HEMTは全世界の社会システムに対して、非常に大きな影響を及ぼした」と言っても過言ではない。東欧共産圏の崩壊を急加速したのである。80年代の後半、東欧諸国の多くのアパートには、パラボラアンテナがすでに設置されており、その衛星放送受信用のシステムにはHEMTが必須のデバイスとして用いられていたのである。

1989年11月9日、東ドイツ政府から突如として“国外旅行自由化の指令”が発表された。この発表は、正しくは“誤報”だった(実は、“旅行制限の緩和”であり“完全自由化”ではなく、また、実施期日も即日ではなかった)のであるが、この記者会見の様子は夕方のニュース番組において、生中継で放送されてしまった。

すでにお互いのテレビ番組を視聴することが可能であった東西両ベルリン市民は、この報道を見て“ベルリンの壁”周辺に集まりだし、“誤報”を信じた市民と警備隊との間でトラブルが発生した。

事態の悪化を恐れた東ドイツ政府は、実施期日を無視してゲート開放を直ちに決定し、東西ベルリンの国境は、即時開放されることになってしまった。

1961年に建設が始まった「ベルリンの壁」は1989年11月9日の夜、突如としてその役割を終えることになり、翌日から壁の崩壊がはじまった。

HEMTの実用化によって、東西ドイツ国境の開放 冷戦終結 東欧への波及 東

西ドイツ統一 ソヴィエト連邦の崩壊、が急速に進展し、世界地図が塗り替えられることになったのである。

HEMT の進化と波及効果

HEMT は、その超低雑音特性を生かして、1985 年、国立天文台野辺山に設置された電波望遠鏡用の低雑音受信機に適用され、はじめて製品化された。宇宙のはるか彼方から送られてくる電波信号は、発信源での信号が如何に巨大であっても、地球で観測するときには、超微弱な信号になってしまう。したがって、受信機器に起因する雑音のレベルは、受信すべき信号の大きさよりも、はるかに微弱でなければならない。HEMT は、超低雑音デバイスの特徴を如何なく発揮して、暗黒星雲にある未知の星間物質(炭化水素分子)を発見するなど、電波天文学の進歩に寄与した。現在では、世界中の電波天文台に設置されるまでになっている。

また、その優れた超高速特性から、当初スーパーコンピュータなどに採用されていたが、衛星放送受信機や携帯電話機などに急速に普及し、さらには、カーナビゲーション受信機、ミリ波自動車レーダなど IT 社会を支える基盤技術として広く使われており、今後いっそうの市場拡大が期待されている。

図 3.及び図 4.に、それらのへ応用例を示す。

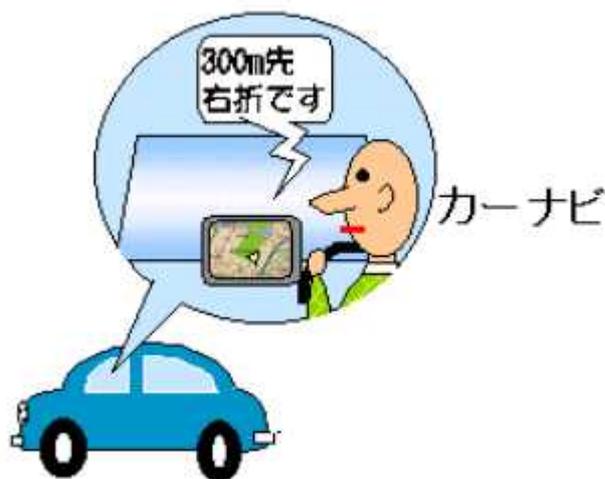


図 3. カーナビへの応用例。¹

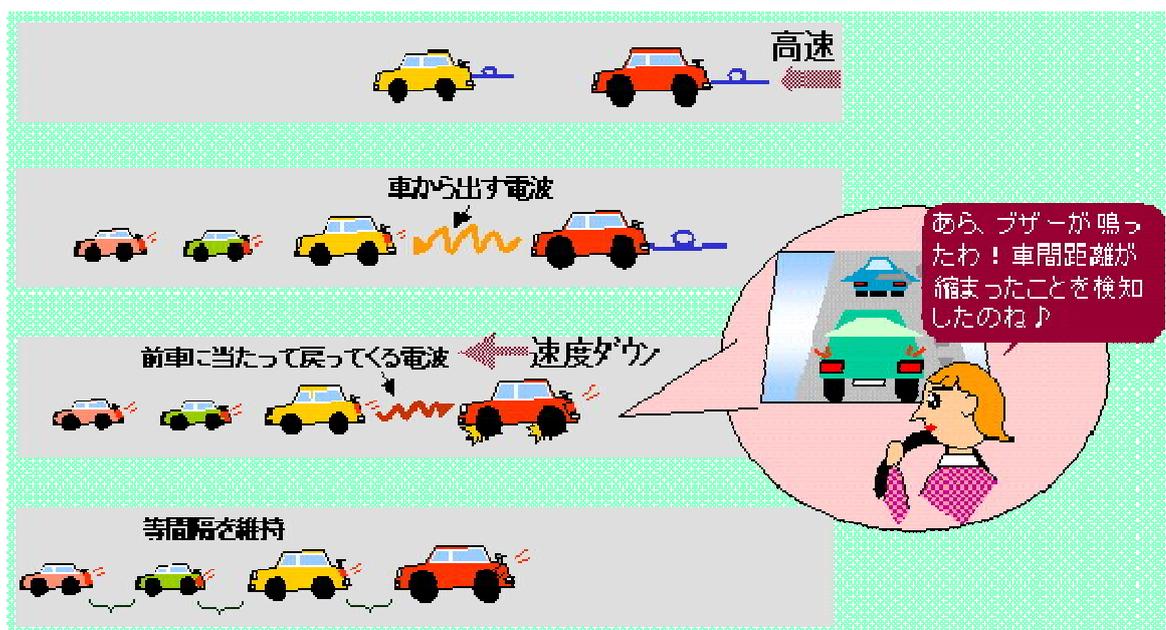


図 4 自動車用レーダーシステムへの応用例。¹

そして、HEMT の構成や材料も、当初の AlGaAs/GaAs 系から InGaP/GaAs 系、さらには InAlAs/InGaAs 系へと開発が進み、高速動作特性や低雑音特性が大幅に改善されてきている。

最近では、AlGaN/GaN 系やひずみ Si/SiGe 系など、将来の多様なニーズに向けた開発が進展し、実用レベルの 100 ワット(以下、W)以上の出力を得ることに成功し、窒化ガリウム HEMT 結晶上に SiN 絶縁膜を堆積することで、ゲート電極からの漏れ電流を従来の 100 万分の 1 以下に低減することで、次世代携帯基地局増幅器向け高出力 HEMT としての高効率動作が可能になっている。

富士通(株)が発表した GaN 系デバイス⁴の断面図を、図 5. に示す。

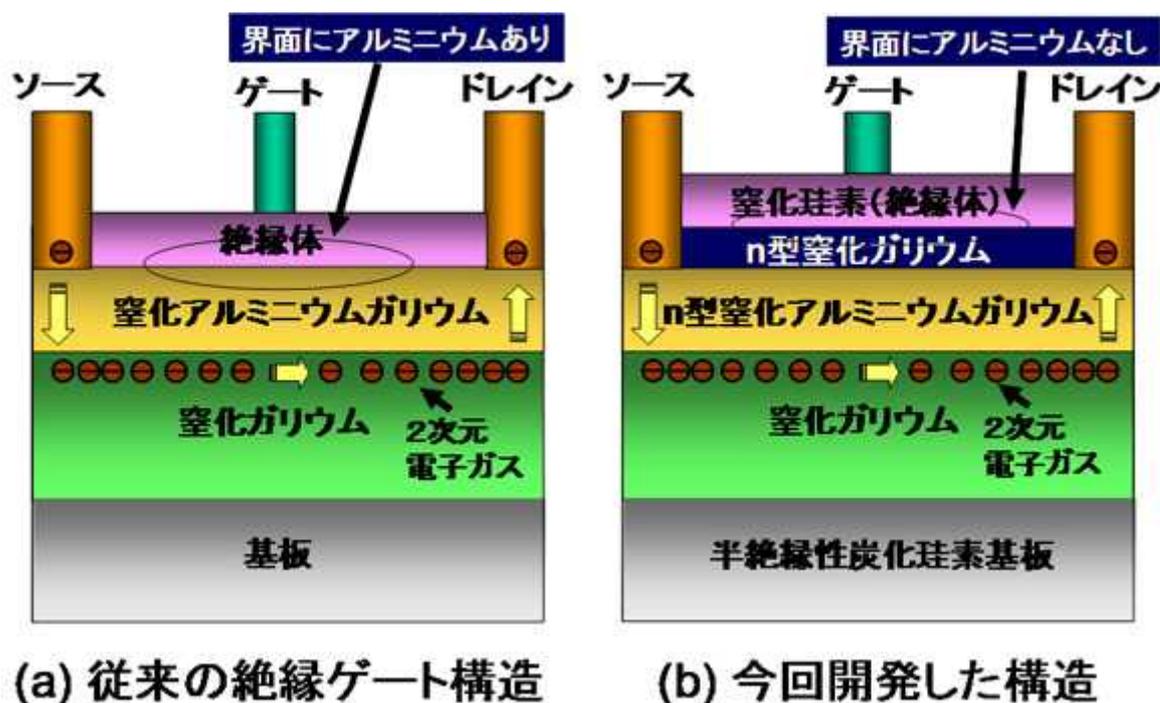


図 5 (a)従来および(b)今回開発した窒化ガリウム HEMT の断面図。⁴

そして、『アメリカのクリントン政権が2000年1月に発表した National Nanotechnology Initiative において、ナノテクノロジーの成功例の一つに HEMT があげられ、ナノテクノロジーが世界的に注目を集める一翼を担った。』さらには、『HEMT の発明は、MBE や MOCVD など、原子層オーダーの精度で結晶組成を変化させえる薄膜成長技術の進展を加速させ、その後の、化合物半導体を用いた電子デバイス、光デバイス技術の発展に大きな貢献をした。』等々として、第4回(2003年度) 応用物理学会業績賞(研究業績)を受賞している。

業績の評価(IT 社会の基盤技術)

三村の業績に関しては、応用物理学会の会長に就任した榊 裕之が、「21世紀の世界と応用物理学の未来」と題する応用物理学会誌の巻頭言⁵で、以下のように述べている。

『応用物理学は、光学や真空工学を含めて数百年を超える長い歴史をもちますが、現代物理学を基盤として数十年前に生まれたトランジスタやレーザーなどの新領域が次々と開拓されており、今や学術の広大な領域を包含する状況にあります。本学会の関係者も、Si LSI や超高速トランジスタ、半導体レーザーや LED、液晶やプラズマ表示装置などに関する先端的な研究を活発に推進し、世界に誇る貢献を達成した例も少なくありません。例えば、80年に JJAP 誌上で三村らにより世界に先駆けて発表された高電子移動度トランジスタ(HEMT)の場合を考えてみましょう。この素子は、原子スケールで制御可能な結晶成長学、量子的に閉じ込められた

二次元電子の物理学, FET 素子工学, 無線通信工学など異なる学問分野の知恵が結集されて大きな成長を遂げ, 衛星放送や携帯電話システムを実現させ, 人間と社会に大きく寄与しています。』

まさに、応用物理学会史を飾るに相応しい業績と位置づけられている。

青少年時代の思い出

『高校入試直前に虫垂炎に罹り、ベッドの上で受験した。病室には、試験監督の先生と三村の二人だけで、大変緊張した。その試験監督の先生が高校の数学の先生で、2年間にわたりクラス担任の先生として温かい指導を受けた。その後、半導体素子分野の仕事に関連して数学を楽しめるのも、そのときの先生との運命的なご縁のお蔭だと感謝している。』とのことである。

また、昆虫観察が大好きで、夏休みなどには終日、野山を散策していた。

仕事を楽しむ

『GaAs MOSFET の研究での失敗という苦い経験が、HEMT の発明に最も影響を与えた出来事であったのかもしれない。失敗によってのみ研ぎ澄まされる“感受性”によって、日常的な偶然から何かをすくい上げることができたのだと思えるからである。』と、三村は述懐している。

専門分野の異なる方々との交流を心がけ、あるいは、もろもろの社会の動きなどをよく理解して、ニーズ、課題、シーズ、に対する柔軟な“感性”を常に育み、持ち続けていること、が大切なのであろう。

また、非公式の HEMT 試作サークルについて、三村は次のように述べている。

『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、いろいろな干渉にされされ、開発活動のフレキシビリティが失われる結果、失敗の危険性が増大すると想像できるからである。生まれたばかりのアイデアにとって、とかくこの世は住みにくいと思ったほうが良い。

そして、HEMT デバイスの開発には、MBE 等による製造技術を含めたデバイス技術の開発が重要であった。この点から冷水佐壽と共に、HEMT 研究開発を行うことができたことは、極めて幸運であった。』

三村に限ったことではなく、議論の分かれる所であるかもしれないが、それなりの仕事を成し遂げることができる人とは、仕事を楽しむことができる人のことなのであろう。

略歴

- 1944年： 大阪府生まれ
1967年： 関西学院大学理学部物理学科卒業
1970年： 大阪大学大学院基礎工学研究科物理系修士課程修了
1970年： 富士通株式会社入社
1975年～現在： 株式会社富士通研究所
1981年： 科学技術庁長官賞受賞
1982年： 大阪大学より工学博士学位授与
1982年： 電子情報通信学会業績賞受賞
1986年： 伴記念賞受賞
1990年： IEEE Morris N. Liebmann Memorial Award 受賞
1992年： 発明協会恩賜発明賞受賞
1998年： 紫綬褒章受章
1998年： 富士通研究所フェロー
1998年： SSDM Award 受賞
1998年： ISCS Heinrich Welker Award 受賞
2001年： 電子情報通信学会フェロー
2003年： 第4回 応用物理学会業績賞（研究業績）受賞

引用・参考文献

- 1 . <http://jp.fujitsu.com/group/labs/techinfo/techguide/list/hemt.html>
- 2 . R. Dingle, H. L. Stormer, A. C. Gossard and W. Wiegmann: "Electron Mobilities in Moduration-Doped Semiconductor Hetero-junction Superlattices", Appl. Phys. Lett. 33, 7, pp. 665-667 (Oct.1978)
- 3 . 三村: "半導体装置"、特願昭 54-171027(特許第 1409643)
- 4 . <http://pr.fujitsu.com/jp/news/2005/12/5-1.html>
- 5 . 応用物理学会誌巻頭言(2004年): 「21世紀の世界と応用物理学の未来」
- 6 . 多くの部分で、三村高志: "HEMTの開発ストーリー"、映像情報メディア学会誌 Vol. 52, No. 4, pp. 461-464 (1998)、を参考にした。