

題名	トランジスタと歩んだ半世紀
Title	My Fifty Years with Transistor
著者名	三村 高志
Author(s)	Takashi Mimura
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	Inamori Foundation: Kyoto Prize & Inamori Grants
受賞回	33
受賞年度	2017
出版者	公益財団法人 稲盛財団
Publisher	Inamori Foundation
発行日 Issue Date	8/31/2018
開始ページ Start page	104
終了ページ End page	131
ISBN	978-4-900663-33-6

## トランジスタと歩んだ半世紀

三村高志

### はじめに

半導体デバイスの研究に携わる者の一人として荣誉ある京都賞をいただき、大変うれしくかつ光栄に思います。

京都賞の対象になりましたHEMT (High Electron Mobility Transistor) こと高電子移動度トランジスタを発表して40年近くが経ちます。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ております (Fig. 1)。現在は主に無線システムに使われていることがわかります。

本日の講演では、まず、アニメーションを使ってHEMTの概略を紹介いたします。続いて、幼少期から企業に就職するまでを振り返ります。最後に、富士通および富士通研究所において体験しましたHEMTの発明から初期の実用化技術の開発にいたる一連の研究開発についてお話したいと思います。まずはアニメーションをご覧ください。(アニメーションによるHEMTの概略の紹介)

次に、私の幼少期を振り返りたいと思います。まず、父母の話から始めたいと思います。私の父は、婦人服のデザイナーとして大阪にあったデパートに勤務しておりました。私が生まれたのは戸籍上は大阪市で、1944年の12月の生まれですが、その頃は第二次世界大戦の末期であり、日本の都市に対する空襲が激しくなっていましたので、母は実家がある岡山県笠岡市に疎開し、私はそこで誕生しました。実は私が生まれる少し前に、すぐ上の兄が夭折したために、私を夭折した兄の生まれかわりとして失意の中にあつた父母の寵愛を受けて育てられたように思います。

戦後、一家は神戸にいた母の叔母の勧めにより大阪から神戸に居を移しました。私

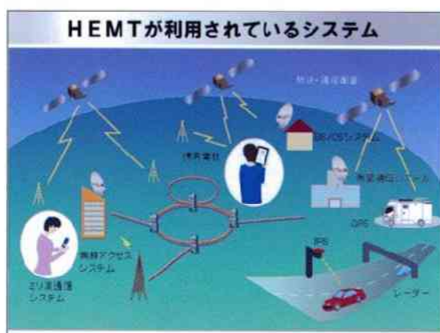


Fig. 1

## My Fifty Years with Transistor

Takashi Mimura

### Introduction

It truly is a great pleasure and honor for me to receive the 2017 Kyoto Prize for my research on semiconductor devices.

It has been nearly forty years since I developed the high electron-mobility transistor (HEMT), for which I have been awarded this prestigious prize. Over the years, HEMTs have found a broad range of applications as one of the fundamental technologies advancing innovation in information and telecommunications systems, including satellite broadcast receivers, mobile phone systems, automotive millimeter wave radars, GPS navigation systems, and broadband wireless access systems (Fig. 1). As you can see from this slide, the current main application for HEMTs is in wireless systems.

In this lecture, I will first show you an animation that will give you a brief introduction to the concept of HEMTs. Then, I will look back at my personal history from childhood to my first employment at a company. Finally, I will talk about my series of research and development efforts at Fujitsu Ltd. and Fujitsu Laboratories Ltd., covering everything from the invention of HEMTs to the development of technologies for their early practical applications. First, let's watch the animation. (Animated introduction of HEMTs)

Next, I would like to share some of my childhood memories with you. First, I'll tell you about my father and mother. My father was a women's clothing designer at a department store in Osaka. According to my family registry, I was born in Osaka City in December 1944, but this is incorrect. At that time, World War II was drawing to a close, and Japan's major cities were the target of frequent air raids, so my mother took shelter at her parents' house in Kasaoka City, Okayama Prefecture, where I was born. Just before my birth, my immediate elder brother died prematurely. Partly because of this, I was raised with tender loving care by my parents, who must have been heartbroken over my brother's untimely death and treated me as if he had been reborn through me.

After the war ended, my family moved from Osaka to Kobe at the suggestion of my mother's aunt, who was living in Kobe at the time. My earliest memories of that city are of the downtown area known as Shinkaichi. There were movie theaters everywhere you looked, showing all kinds of films. I was fond of science-fiction films from the United States and would watch them often. I still remember how astonished I was when I saw my first color film, which I think were advertised as "Technicolor." Unfortunately, I don't recall the title of the first color film I saw, but it was a full-color image of lava



の記憶は神戸の新開地という繁華街から始まります。そこには映画館がひしめくように林立しており、いろいろなジャンルの映画が上映されていました。私は、アメリカの空想科学映画を好んでよく見ていました。総天然色映画と呼ばれていたと思いますが、カラー映像を初めて見た時の驚きを今でも覚えています。映画の題名は忘れてしまいましたが、溶岩が真っ赤な川となって流れているカラー映像でしたが、映画とは分かっているのですが、音響効果と映像のあまりの迫力に映画館が本当に火事になるのではないかと心配したことを憶えています。どのようにすればカラーにできるのか、子ども心に大変不思議な思いがいたしました。アメリカの空想科学映画を見過ぎた影響でしょうか、小学校の卒業文集に将来、科学者になりたいと書いてあるのを発見して驚いたことがありました。

父は、私たち子どもの進路に関して子どもの主体性に任せてくれたように思います。母も基本的には父と同じでしたが、子どもが進路を選ぶのに必要な情報を子どもたちの担任の先生や自分の知人たちから収集し、子どもたちに伝えてくれたように思います。概して「好きなことをやりなさい」という両親の寛大な支援に感謝しつつ、大変居心地の良い家庭生活を過ごさせてもらったように思っています。実際、結婚して家庭を持つまで、実家を離れるという決断をしたことはありませんでした。

大学は、関西学院大学の理学部物理学科に進みました。同大学初の理系学部として1961年に新設され、私は1963年に第3期生として入学しました。一、二年生が履修する一般物理を担当された堀健夫先生の授業は、高校の物理の授業とは異なり、講義実験を主体とした授業でした。われわれ学生目の前で実際に実験を見せてくださり、大きな感銘を受けました。この授業スタイルは、先生が量子力学の揺籃期(1926～1928)にコペンハーゲンにあるニールス・ボーア研究所に滞在し実際に研究された折に、天文学者のケプラーや哲学者のヘーゲルらを輩出したドイツのチュービンゲン大学で行われていた授業スタイルを長期間観察して考え出されたそうです。今考えますとこのような授業は、単に知識を伝えるという面だけではなく、若い学生たちに科学の方法論や科学の精神といったものを浸透させるという意味においても大変意義深いものであったと思っています。卒業研究は堀健夫光学研究室で、物質の旋光現象と呼ばれる、光の振動面が回転する現象、に関する研究を行いました。そのまま同大学の大学院に進むつもりでいましたが、先生が一年後に定年退職されるとのことで、大阪府豊中市にあります大阪大学基礎工学研究科の半導体光物性研究室にお世話になることになりました(Fig. 2)。

flowing like a bright red river. Of course, I knew it was only a film, but the sound effects and visual impact of the image were so impressive that I started to worry that the theater would be set on fire! In my childlike mind, I wondered deeply about how such a color film could possibly be made. It's probably because I had watched too many American science fiction films, but I was once surprised to find that I wrote in my elementary school graduation essay that I wanted to be a scientist in the future.

Looking back, I can see how my father let his children decide their own career options. My mother was also basically like that, but she collected information that she believed would be necessary for her children's career decisions from our homeroom teachers and her acquaintances and shared it with us. As a result, I was very comfortable in my life at home, thanks to my parents' generosity in telling us to "Do whatever you like." Because of this, I actually didn't choose to live separately from them until I was married and started a family.

After high school, I chose to attend Kwansei Gakuin University, where I majored in physics in the School of Science, which was established in 1961 as the first science school of Kwansei Gakuin. I was enrolled there in 1963 as part of the third cohort of students. My physics teacher in general education for first- and second-year students was Dr. Takeo Hori. Unlike my physics classes at high school, his classes were mainly based on demonstrations conducted during lectures. He conducted hands-on experiments before his students' eyes, and this impressed me profoundly. Later, I learned that Dr. Hori formed the idea behind his teaching method by observing for a long time the teaching style at the University of Tübingen in Germany—where the astronomer Johannes Kepler and philosopher Hegel once studied—while he was staying there and conducting research at the Niels Bohr Institute in Copenhagen at a time when quantum mechanics was still in its infancy (1926–1928). Thinking about it now, I realize how significant his teaching style was, in that it not only conveyed knowledge, but also helped to instill the scientific method and the spirit of scientific discovery among the young students. For my graduation research, I investigated the optical rotation of substances, that is, the rotation of the plane of polarization of light, at Dr. Hori's optical research lab. I was planning to enter Kwansei Gakuin University's graduate school at the time. However, knowing that Dr. Hori would retire after one year, I decided to join the Optical Property of Semiconductor Laboratory at the Osaka University Graduate School of Engineering Science in Toyonaka City, Osaka Prefecture (Fig. 2).





Fig. 2

### トランジスタとの出会い

私とトランジスタとの出会いは、今からおおよそ半世紀前にさかのぼります。私の大阪大学時代の恩師であります成田信一郎先生の勧めもあり、1970年に神戸の富士通株式会社に入社しました。成田先生は1946年からの約10年間、後に富士通と合併する神戸工業株式会社に勤務され、1953年には我が国で最初の国産トランジスタの研究に有住徹弥博士のもとで江崎玲於奈博士らと共に従事され、今日の半導体エレクトロニクス発展の嚆矢を放たれました。私が先生の研究室に在籍した時には、研究室のテーマはトランジスタのようなデバイスの研究ではなく、新しい化合物半導体結晶の作成とその光物性の研究に移られていました。そのため、先生がかつて神戸工業時代にトランジスタの研究に従事されていたことは、先生の定年退官近くの1984年ごろまで知りませんでした。

富士通での私の配属部署も半導体の光物性を研究する部署に配属されると聞かされていましたが、実際に配属されたのはトランジスタの開発を行う部署でした。配属された直後だったと記憶しておりますが部長の前川俊一博士からトランジスタの説明をしていただきました。「トランジスタというのは、二つのpn接合を背中合わせにして貼り合わせたようなものだ」と言われたことを鮮明に記憶しております。ところが、そもそもpn接合すらろくに知らなかった私には、トランジスタの動作原理は全く理解できませんでした。後で同じグループの先輩にこのことを報告すると、とりあえず読んでおくようと渡されたのが、1948年にpn接合トランジスタを発明しましたW. Shockleyのpn接合に関する論文でした。pn接合のいわゆる整流特性が、実にシンプルに表現されていたことに驚嘆しました。この直後、配属される予定であった部署から転属願いを出すよう要請がありましたが、すでにpn接合に魅せられ、デバイ

### My encounter with transistors

My first encounter with transistors dates back to about half a century ago. Partly upon the recommendation of Dr. Shin'ichiro Narita, my advisor at Osaka University, I joined Fujitsu Ltd. in Kobe in 1970. For about ten years from 1946, Dr. Narita had worked at Kobe Industries Corp., which later merged with Fujitsu. In 1953, along with Dr. Reona Esaki, he was involved in a project to develop what would become Japan's first domestic transistor under the lead of Dr. Tetsuya Arizumi, laying the groundwork for the current prosperity of semiconductor electronics. While I was a member of Dr. Narita's lab, the main research theme there was no longer devices such as transistors, but had shifted to the formation of new compound semiconductor crystals and research on their optical properties. Because of this, I didn't realize that Dr. Narita had also been involved in transistor research at Kobe Industries until around 1984, when he was about to retire.

Before I joined Fujitsu, I was told that I would be assigned to a section that worked on the optical properties of semiconductors, but in reality, I ended up being assigned to a section that developed transistors. As far as I can remember, immediately after I assumed my position, Dr. Shun'ichi Maekawa, who was a General Manager of that section, gave me an explanation on transistors. I can remember his words like they were yesterday—"Simply put, transistors are made by sticking two p-n junctions together back to back." Unfortunately, I had no idea what a p-n junction even was, and so I didn't understand how transistors operated. When I reported this to a senior researcher in my group, he handed me a paper on p-n junctions by William Shockley, who invented p-n junction transistors in 1948, saying that I should read that paper first. I was struck with admiration of how p-n junctions' "rectification properties" were described in elegant simplicity. After that, the section I had originally been assigned to asked for my reassignment, but I had already become so entranced by p-n junctions that I wanted to continue my work in the device field, and they finally allowed me to have my way. Soon, an orientation for new hires began and, under the instruction of my senior researchers, I was able to put a transistor into operation as my very first semiconductor device. Its static current-voltage characteristics as measured by the curve tracer were exactly what I saw in the textbook on transistors. I marveled at the high technological level of semiconductor device production while simultaneously experiencing the great joy of creating something.

About a year or two after I joined the company, I was seized by the urge to create a



分野の仕事を続けたいという思いが勝っており、最終的には私のわがままを認めていただきました。やがて新人研修が始まり、先輩たちから手ほどきを受けながら、私にとって初めての半導体デバイスとなったトランジスタを動作させることができました。カーブトレイサで測定した静的電流・電圧特性はまさにトランジスタの教科書でみる特性そのものであり、半導体デバイスを製作する技術レベルの高さに驚くのと同時に、モノづくりの喜びを深く感じた体験となりました。

入社から一、二年くらいたったころ、自分でも新しいデバイスを創り出したいくなりました。身の程知らずの若気の至りです。以来数年間、提案したさまざまなデバイスはまったく役に立たずまさに死屍累々といった有様でした。米国電気電子学会(IEEE)などの論文誌に掲載されて終わりとなるのが関の山でしたが、半導体デバイスに対する興味はますます強くなっていきました。この根底には、父母から受けた「好きなことをやりなさい」という励ましの影響もあったと思いますが、当時の私のいた神戸の職場の先輩方は、後輩たちの新しい方向への挑戦に対してエンカレッジする風土があったように記憶しております。

1975年には、神奈川県川崎市にある(株)富士通研究所に転籍となり、それまでのシリコンから化合物半導体の高速電子デバイスの開発に携わることになりました。

## 速さを求めて

歴史的にみますと、トランジスタの高速化という技術課題は、1948年に米国のベル研究所においてpn接合型トランジスタが発明されて以来、半導体素子の重要な技術課題でありました。トランジスタが高速になれば、大量の情報を短時間で処理したり、高い周波数の電波信号を送受信することが可能になるなど、各種情報通信システムの飛躍的な性能向上が期待できるからです。そこでまず、トランジスタの高速性を支配する基本的なメカニズムとはどんなものかを考察したいと思います(Fig. 3)。

トランジスタにはいろいろなタイプがありますが、ここでは最もポピュラーな電界効果トランジスタ(Field Effect Transistor略してFET)を取り上げます。FETは、ゲート電極直下の電子の総数をゲート電極に印加される信号電圧の大きさに応じて増減させ、ドレイン電流をそれに応じて変化させて動作するトランジスタです。電子の総数が増減するのに必要な時間は、電子がゲート電極直下の電流路を走り抜けるのに

new device on my own. I'll admit that I was young and self-conceited at the time, and for several years after that, the various devices that I proposed proved to be nothing but one useless device after another. The best I could hope for was to have one of my papers published in the journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) in the United States, but my interest in semiconductor devices only grew stronger. Behind it all were the encouraging words, "Do whatever you like," that my parents had always told me, but at the same time I fondly remember that the Kobe lab's senior researchers had a culture of encouraging their junior researchers to take on challenges in new directions.

In 1975, I was transferred to Fujitsu Laboratories Ltd. in Kawasaki City, Kanagawa Prefecture, and became involved in the development of high-speed compound semiconductor electronic devices, instead of the silicon semiconductor devices that I had worked on before.

## The need for speed

Historically speaking, the development of high-speed transistors was one of the key technological challenges involving semiconductor devices after the invention of p-n junction transistors by Bell Laboratories in the United States in 1948. This was because higher-speed transistors were expected to significantly improve the performance of various information and telecommunications systems, by processing huge amounts of data in a short time and sending and receiving high-frequency radio signals. Now, allow me to walk you through the basic mechanism that governs the speed of transistors (Fig. 3).

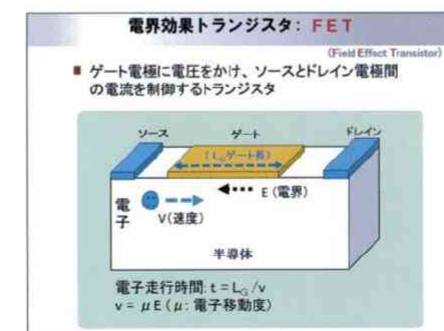


Fig. 3



要する時間程度かかります。電子走行時間といわれます。電子走行時間を短くできると、短時間で変化する入力信号にも追従できるようになり、トランジスタの高速化が実現されます。このことから、高速化には二つの方法が考えられます。一つは、ゲート電極を細くする、つまり微細化です。これは、シリコンの集積回路などで世代ごとに微細化が進むのを見ても分かるように、半導体デバイスでは伝統的な手法です。

トランジスタを高速化するもう一つの方法は、電子の走行速度をアップしてやることです。では、どうすれば走行速度をアップさせることができるでしょうか。オームの法則が役に立ちます。電流の大きさは加えた電圧の高さに比例するというのがオームの法則です。電流が増加するのは、実は電圧とともに電子の走行速度が増加するからです。スピードアップのしやすさを移動度とかモビリティと呼びます。したがって、トランジスタを高速にするためには、電子移動度をできるだけ高くしてやればよいことが分かります。電子移動度は半導体の種類によって異なります。化合物半導体のガリウムヒ素(GaAs)はシリコンの5倍くらい高い移動度を持っているため、1970年代の初めころからマイクロ波帯の高速トランジスタとしてGaAs MESFET(GaAs Metal Semiconductor FET:ガリウムヒ素メスフェットと読む)が注目され、活発な研究開発が進められていました。

## 挑戦と挫折

HEMTを発明した1979年当時、私はGaAs MESFETを開発する職場に所属していました。GaAs MESFETは図のような構造をしており、ゲート電極に電圧を印加して、電流を増減させることができます(Fig. 4)。GaAs MESFETは、1966年にC. A. Meadによって発明された高速デバイスで、デバイス開発者にはこれが究極の高速デバイスであり、もはやこのMESFETを改良する仕事しか残されていないのではないかとされていました。そこで、MESFETとは異なるGaAs MOSFET (GaAs Metal Oxide Semiconductor FET:ガリウムヒ素モスフェットと読む)に関する研究を1977年からスタートさせていました。周知のようにMOSFETは大規模集積回路には不可欠のデバイスであり、Si MOSFETより高速なGaAs MOSFET実現の可能性を探るのが研究の目的でした。Si MOSFETは、ゲート酸化膜上に設置されたゲート電極によってシリコン表面に電子を誘起して動作します。しかし、当時までSi MOSFETと同様にGaAsの表面に電子を誘起して動作できるGaAs MOSFETを

There are many different types of transistors, but let's look at field effect transistors (FETs), which are the most popular. FETs operate as drain current changes in proportion to the total number of electrons directly under the gate electrode that is increased or decreased according to the level of signal voltage applied to the gate electrode. The time required for the total number of electrons to increase or decrease approximates the time required for electrons to run through the current path directly under the gate electrode. This is time known as the electron transit time. If the electron transit time can be decreased, it becomes possible to keep pace with input signals that alter in shorter timeframes, thus increasing the speed of the transistor. Such being the case, there are two ways to develop high-speed transistors. One is to make the gate electrode thinner, that is, to miniaturize it. This is the traditional approach for semiconductor devices, and can be observed in the way that silicon integrated circuits have become increasingly miniaturized with each new generation.

The other approach for increasing a transistor's speed is to increase the transit speed of electrons. Now, how can we make this happen? Here we can use Ohm's law, which states that the amount of current is proportional to the level of voltage applied. The amount of current increases due to increase in electrons' transit speed, as well as the level of voltage. Now, mobility refers to the ease of increasing the speed, and to increase the speed of transistors, one simply has to increase the electrons' mobility as much as possible. Different semiconductor materials differ in their electron mobility characteristics. Because the compound semiconductor gallium arsenide (GaAs) has about five times as much electron mobility as silicon, the GaAs metal semiconductor FET (MESFET) drew much attention as a material for high-speed transistors in the microwave band from the early 1970s, and a great deal of effort was put into its research and development.

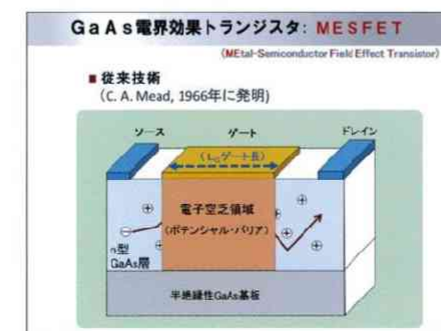


Fig. 4



成功させた研究者はいませんでした。まさに前人未踏の挑戦です。いろいろな方法でゲート酸化膜をつくり実験を繰り返しましたが、GaAs表面に電子を誘起することは最後まで出来ませんでした。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では出来ないのです。GaAsとゲート酸化膜との界面近傍に存在する表面準位といわれる、電子を捕獲する結晶上の不完全性が発生するためであることが推測できましたが、いくら試みてもこの表面準位をなくすることができなかったのです(Fig. 5)。

研究をスタートして一年位経った1978年ごろですが、研究を進展させ得るようなアイデアが枯渇したという思いが強くなり、電子を蓄積することを断念し、挫折感を味わうことになりました。断念後、表面準位が比較的多くても動作できるドナーを添加した電流路を持つタイプのMOSFETでスイッチング性能を評価することに目標を変更しました。ねらっていた電子蓄積層を持つタイプのMOSFETが絶望的となってしまった以上、GaAs MOSFETの研究に幕をひく前に開発の到達地点を示しておきたかったからです。幕をひく舞台として1979年、米国で毎年開催される第37回デバイス・リサーチ・コンファレンス、通称DRCと呼ばれるデバイスに関する研究会議を選びました。DRCは、トランジスタや半導体レーザが初めて発表されたデバイスに関する最も歴史のある研究会議です。

## 異分野技術との遭遇

そ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異なる技術分野でなされた「変調ドープ超格子」の論文に遭遇しました。1979年2月ごろのことです。この変調ドープ超格子というのは、高純度のGaAsとシリコンをドープしたn

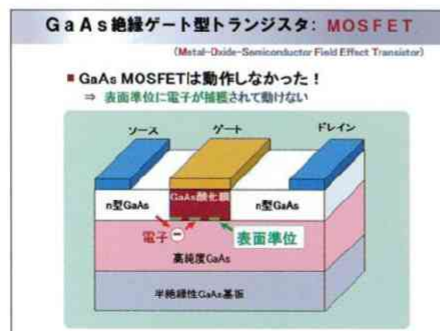


Fig. 5

## Challenges and setbacks

Back in 1979, when I first invented HEMTs, I was part of a team working on the development of GaAs MESFETs. You can see the structure of GaAs MESFETs illustrated here. By applying voltage to the gate electrode, its current can be increased or decreased (Fig. 4). Now, GaAs MESFETs are high-speed devices that were designed by Carver Andress Mead in 1966. It had long been assumed by device developers that they were the ultimate high-speed devices, and all that could be done in the future would be to modify them. From there, my team began research into GaAs metal oxide-semiconductor FETs (MOSFETs), which were completely different from MESFETs. As you may know, MOSFETs are indispensable devices for large-scale integrated circuits, and our research objective was to explore the possibility of creating GaAs MOSFETs that were even faster than Si MOSFETs. Si MOSFETs operate by using a gate electrode positioned over the gate oxide film to induce electrons across the silicon surface. However, at the time, no researcher had succeeded in creating a GaAs MOSFET that would operate by inducing electrons along the GaAs surface like a Si MOSFET. We were truly going where no one had gone before. We created gate oxide films in various ways and repeated our experiments, but could not induce electrons on the GaAs surface no matter how hard we tried. With Si, electrons could be induced with ease by simply creating SiO<sub>2</sub> films on the surface, but this wasn't the case with GaAs. Presumably, this was due to the surface state formed near the interface between the GaAs and the gate oxide film or crystal imperfections that captured electrons, but all of our efforts to eliminate the surface state were in vain (Fig. 5).

In 1978, about one year after we first embarked upon this research, I had become increasingly convinced that I was running out of ideas that could possibly advance the research any further. I gave up on the idea of accumulating electrons and felt that I had reached an impasse. It was at that time that I changed my goal and began assessing the switching performance of MOSFETs with a current path that had been equipped with a donor capable of moving even with a relatively high surface state. Since there was no longer any chance of developing MOSFETs with an electron accumulation layer as we had intended, I wanted to show just how far the development team had come before closing the curtain on GaAs MOSFET research for good. We chose the 37th Device Research Conference, or DRC, in 1979 as the occasion to do this. Held in the United States, where transistors and semiconductor lasers were first introduced, DRC was the longest-running annual conference on device research.



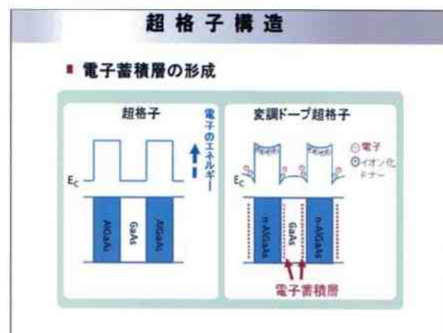


Fig. 6

型のAlGaAsの二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構造をしています(Fig. 6)。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したが、実はこの論文の著者たちが言及していないある実験事実強く印象付けられました。二層のn型AlGaAsに挟まれたGaAs層に電子が蓄積するという実験事実です。このこと自体は当時の超格子の技術分野ではいわゆる周知のことであったと思いますが、GaAsの表面準位と悪戦苦闘していた私には新鮮な驚きであり、きわめて印象的でありました。前述したように、GaAs MOSFETでは表面準位のため電子が蓄積することがなかったからです。変調ドーピング超格子中のGaAsとAlGaAsとは結晶構造の特徴が類似しており、それらの結晶界面には表面準位が少ないため、電子が蓄積することが可能になったのです。

電子が蓄積するという実験事実は印象的ではありましたが、変調ドーピング超格子というかなり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は生まれませんでした。ただ漠然とした興味がその後も続いていたような気がしますが、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ます。しかし人の心理というのは唐突に変化するものなののでしょうか、先に述べた第37回DRCでGaAs MOSFETの発表をした直後、同会議に出席していたある米国の研究者と雑談していた時に、変調ドーピング超格子から何か実用的なデバイスが引き出せるかも知れないという思いが突然浮かびました。1979年6月25日のDRCのレセプションの会場でのことでした。私自身にとってもかなり唐突であったため、今でも鮮明な記憶として残っています。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す。

異なる技術分野の論文との出会い、研究者との雑談、これら偶然の出来事がHEMTを発明するきっかけを作ったことは上述したとおりです。しかし今あらため

### My encounter with technology from a different field

While I was writing the paper for DRC, I stumbled upon an article on “modulation-doped superlattices,” which had been penned by researchers in a technological field different from my own. This was around February 1979. Now, modulation-doped superlattices feature a structure in which two different types of very thin semiconductor layers (highly pure GaAs layer and n-AlGaAs layer doped with silicon) are stacked alternately in several dozen layers (Fig. 6). The main focus of the article was on electron mobility within a superlattice, but what impressed me so profoundly was an experimental fact that was not even mentioned by the authors of the paper. In their experiments, electrons accumulated in the GaAs layer sandwiched between two n-AlGaAs layers. I believe that this was something simply taken for granted in the technological field of superlattices at that time, but it gave me a fresh jolt and left a strong impression on me, since I was directly engaged in a desperate struggle with GaAs’s surface state. This is because, as I mentioned earlier, no electrons accumulate in GaAs MOSFETs due to their surface state. Since GaAs and AlGaAs in the modulation-doped superlattice shared similar crystal structure characteristics and the surface states of those crystal interfaces were low, electrons could be accumulated.

Impressive as the experimental fact of electron accumulation was, it occurred in a highly special structure of modulation-doped superlattices, and so I wasn’t able to gain any concrete ideas or inspiration at the time. I think I maintained a vague interest in this subject that lasted for some time, but it was so subtle that it rarely came to my conscious mind during the course of my daily activities. However, it seems that the human mind can change very suddenly. While I was chatting with an American researcher at the 37th DRC immediately after I had presented my paper on GaAs MOSFETs, the idea popped into my mind that I could somehow make a practical device out of modulation-doped superlattices. This was at the reception of DRC on June 25, 1979. It came to me totally out of the blue, and so the moment is still vivid in my memory. It was this event that gave me the willpower to focus my thoughts on coming up with ideas for a new device.

To sum up, these casual incidents—an encounter with an article from a technological field different from my own and some small talk with a fellow researcher—triggered the invention of HEMTs. In retrospect, the bitter experiences of failure in GaAs MOSFET research made the greatest contributions to the invention of HEMTs. You could say that my senses had been sharpened by those failures, and it is probably those senses that helped me to discover something new in daily coincidences.



て振り返ってみますと、GaAs MOSFETの研究に失敗したという苦い経験が、実は HEMTの発明に最も貢献したのではないかという気がします。物事に対する感受性とでもいうようなものが、失敗によって研ぎ澄まされ、日常的な偶然から何かをすくい上げることができるのは、多分、この感受性によってであろうと思われるからです。細菌学者レイ・パスツールの名言、「チャンスは備えある心に訪れる」ということでしょうか。HEMTの場合、備えある心を育んだのは、GaAs MOSFETの失敗であったと思っています。

### 既存デバイスの融合

第37回DRCから帰国後、創造的なアイデアを得ようと超格子構造に思考を集中しました。そして一つの単純な結論を得ました。トランジスタのような実用的なデバイスを考える時には、できるだけ単純な構造こそが最良であるという一種の指導原理に至りました。これに従うと、最も単純な構造は高純度GaAs層とn型AlGaAs層の二層から作られる一層の電子蓄積層を電流チャネルとする構造であることは明らかです。その次に明らかにすべきことは、どうすれば変調ドープ超格子の中の電子をコントロールできるかということです。

HEMTのアイデアにたどり着いたのは、考え始めてから数週間経った1979年7月です(Fig. 7)。HEMTの動作原理を説明するためのこの手書きのエネルギーバンド図は、1979年8月に社内の特許部に提出した特許原稿の一部です。この図はHEMTの層構造と電子蓄積層をどのように制御してトランジスタ動作をさせるかという原理を表現しておりますが、多少抽象的な表現が難点であります。

もう少し具体的にHEMTの素子構造のルーツを表現します(Fig. 8)。既存のデバイス構造が融合してHEMTを誕生させたことが分かります。アイデアのポイントは、変調ドープ超格子の基本単位であるn型AlGaAsとGaAsとの単一ヘテロ接合の界面を電流チャネルとすること。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て、GaAs層内の電子蓄積層に電界効果が及ぶようにすることです。電子がいなくなったn型AlGaAs層を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に類似することがわかります。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、GaAs MESFETのゲート電極の機能そのものです。GaAs MESFETやGaAs MOSFET

As the great microbiologist Louis Pasteur once said, “Fortune favors the prepared mind.” In the case of HEMTs, I believe that it was those failures with GaAs MOSFETs that cultivated my prepared mind.

### Integration of existing devices

After returning home from the 37th DRC, I concentrated my thoughts on the superlattice structure, desperately seeking out creative ideas until I was able to reach one simple conclusion. It was a kind of guiding principle that, when working on ideas for a practical device like a transistor, the simplest structure is always the best. In accordance with this principle, it was clear that the simplest structure would be one in which the current channel is a single electron accumulation layer made from the combination of a high-purity GaAs layer and an n-AlGaAs layer. The next thing that needed to be clarified was how to control electrons within modulation-doped superlattices.

It was in July 1979, a few weeks after I had started thinking about this, that I happened upon the idea of HEMTs (Fig. 7). This hand-drawn energy band diagram explaining HEMT's operating principle is an excerpt from a patent application submitted to the internal Patent Department in August 1979. It illustrates the principle of how the HEMT's layer structure and electron accumulation layer should be controlled to operate the transistor, but its drawbacks can be found in its rather abstract expressions.

Let me show you more specifically the roots of the HEMT device structure (Fig. 8), which reveals that it was born out of an integration of existing device structures. The key point behind this idea involved using the basic unit of modulation-doped superlattices, that is, the single heterojunction interface between n-AlGaAs and GaAs, as a current channel, and allowing the electric field effect to reach the electron

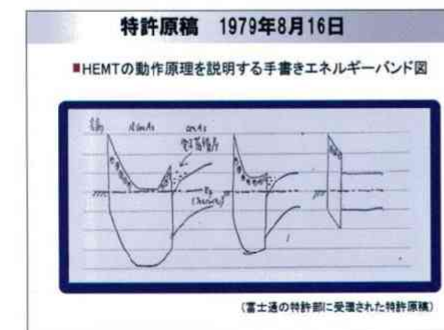


Fig. 7

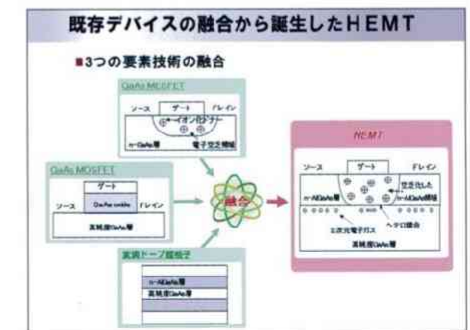


Fig. 8



という既存のデバイス概念と変調ドーピング超格子という既存の層構造が融合して、HEMTという新しいデバイス概念を生み出したといえます。例えば、HEMTというジグソーパズルを完成させるためには、GaAs MESFETや、GaAs MOSFET、変調ドーピング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ということです。どんな分野の研究開発においてもそうだと思いますが、新たなアイデアを創出するためには、研究のスコープを拡げておくことが有効な方法論の一つであること、このことがHEMTの発明に際しても確認されたということです。ここで強調しておきたいことは、挫折したGaAs MOSFETもHEMTの素子コンセプト形成にはなくてはならない重要なパーツの一つであったことは極めて教訓的であると思っています。

失敗した経験も役に立つという大切なことを、HEMTの研究開発を通して学ばせてもらったと思っています。

### 組織の壁を越えて

HEMTのアイデアは、1979年8月に特許出願原稿として富士通の特許部門に受理されました。しかしアイデアだけでは、絵に描いた餅にすぎません。アイデアは実験によって実証されなければなりません。実証に際しては、さまざまな技術が必要となります。HEMTを試作するためには、高度な結晶成長技術が必要でした。当時私はデバイスを開発する部門にいましたが、そこにはHEMTに要求される精度で結晶を作る技術はありませんでした。

HEMTの電流チャネルとなる電子蓄積層が存在するのは、GaAsとAlGaAsのヘテロ接合界面からわずかに電子の波動関数の広がり程度、原子層数でいえば十数原子層という、極めて狭い領域です。したがって、結晶成長としては、原子層オーダーの精度で、ヘテロ接合を作成する技術が要求されます。このような厳しい精度を満足する結晶成長技術として、分子線結晶成長法(MBE)が当時唯一の候補でした(Fig. 9)。MBEは基本的には半導体の真空蒸着法です。結晶を構成する元素をそれぞれのセルに入れて加熱します。各セルにはシャッターがあり、これを開くと元素がビームのように結晶基盤に照射されます。1973年にIBMの研究グループがごく薄いGaAs層とAlGaAs層を交互に百層程度積み重ねた構造、いわゆる超格子を試作して以来、微細なヘテロ構造を成長する技術として一躍脚光を浴びるようになりました。MBEの最大の特徴は、メカニカルなシャッターの開閉操作で異なる種類の半導体を連続的に成

accumulation layer within the GaAs layer by eliminating electrons within the n-AlGaAs layer through the introduction of Schottky junctions that would create a depletion layer on the n-AlGaAs layer's surface. If we assume that the n-AlGaAs layer without electrons is a gate insulator, we could say that the device concept of the HEMT is structurally similar to that of a MOSFET, and Schottky junctions, which are used to deplete the n-AlGaAs layer, function exactly the same as the gate electrode of a GaAs MESFET. It is therefore safe to say that the concepts of existing devices such as GaAs MESFETs and GaAs MOSFETs and the structure of existing layers of modulation-doped superlattices were integrated to create the new device concept of HEMT. To use the analogy of a jigsaw puzzle, the three different pieces of GaAs MESFETs, GaAs MOSFETs, and modulation-doped superlattices were essential to complete the HEMT puzzle. I believe that this is true of research and development in any field, but one of the most effective methodologies for creating a new idea is to expand the scope of one's research. The process of inventing HEMTs is a testament to this. Now, what I wish to emphasize here is that it was extremely instructive that GaAs MOSFETs, in which I experienced failure, were also an integral part of the formation of the HEMT device concept. Through research and development of HEMTs, I believe that I was able to learn the important lesson that even experiences of failure can be useful.

### Beyond organizational barriers

I compiled my ideas on HEMTs into a patent application, which was duly received by Fujitsu's Patent Department in August 1979. However, the mere idea of such a thing was nothing more than a castle in the air. Any idea must be demonstrated by experiments. To demonstrate your idea, all sorts of techniques are required. An advanced crystal growth technique was necessary to prepare a HEMT prototype. I was

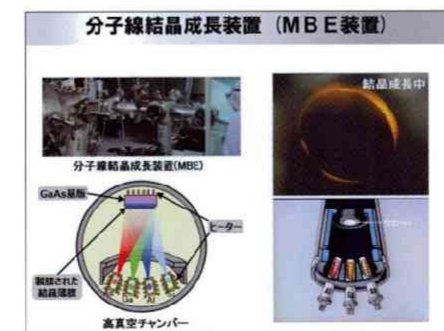


Fig. 9



長ができる点にあります。日本においても、1973年から1975年にかけて、数多くの企業や大学、国立研究機関で本格的にMBEの研究が始まりました。

幸いにも、富士通研究所でもMBEでガリウムヒ素やアルミニウム・ガリウムヒ素を成長する研究を行っていたグループがありました。グループリーダーは、冷水佐壽研究員(現大阪大学名誉教授)でした。そこで、MBEグループに私のアイデアを説明したところ、ヘテロ接合結晶の製作を全面的に協力してくれることになりました。この日からわれわれの組織を越えた小規模な試作サークルによる共同研究が開始されました。もちろん、この研究は当初、研究所から正式にオーソライズされたものではなく、いわゆる「もぐり」の研究でしたから、これに割ける研究時間もごく限られたものでした。

## HEMTの誕生

ところで、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りました。驚いたことに、例の変調ドーピング超格子の論文の著者の一人であるBell研究所のDingle博士からでした。私が研究していたGaAs MOSFETについて、議論したいとのことでした。1979年8月30日、来社した彼と変調ドーピング超格子や、われわれのGaAs MOSFETについて議論しましたが、新しくスタートしたわれわれのHEMTについては伏せておきました。

このようなことが契機となって、われわれの研究は一段とスピードアップしました。11月ごろになると、MBEグループの技術レベルは向上し、2次元電子ガスの移動度もBell研究所のレベルにまで追いつきました。驚異的な早さであったと思います。MBEグループの熱意の表れでした。このテーマはまさにMBEグループの存亡が賭けられた、勇敢なチャレンジでもありました。一方、私はデバイスプロセスを担当しました。プロセスのなかでも困難だったのは、エッチング技術でした。ゲート電極下のn型AlGaAs層全体を空乏化させて、HEMT動作を得るためには、ゲート電極とヘテロ接合界面とに挟まれた半導体の厚みをエッチングによって、数nm程度という当時の技術レベルからすれば、まさに気の遠くなるような高い精度で、コントロールする必要があったためです。いろいろなエッチング液を作っては、試してみるといふ単純な実験を営々と繰り返し、貴重なMBEウエハを何度も駄目にしてしまいました。しかし、この段階で時間をかけすぎて、HEMTの発表一番乗りという、最も貴

in a team working on the development of devices at the time, but we didn't have a technique for growing crystals with the accuracy necessary for HEMTs.

The electron accumulation layer, which serves as the HEMT's current channel, can exist in an extremely narrow region that is only as wide as the spread of an electron wave function from the heterojunction interface between the GaAs and AlGaAs layers, or several dozen atom layers. This meant that we needed a crystal growth technique for producing a heterojunction with a degree of accuracy on the order of atom layers. At that time, the only crystal growth technology capable of meeting such stringent accuracy requirements was molecular-beam epitaxy (MBE) (Fig. 9). Technically, MBE was a vacuum evaporation method for semiconductors. Elements that form crystals are placed in each cell and then heated. Each cell has a shutter, and when it opens the elements are radiated to crystal substrates like a beam. MBE caught the spotlight as a technique for growing fine heterostructures in 1973, when a research group from IBM created the prototype for a "superlattice," that is, a periodic structure in which about 100 very thin GaAs layers and AlGaAs layers are alternately stacked. MBE's most distinctive feature is that it is capable of continuously growing semiconductors of different types by opening/closing a mechanical shutter. In Japan, many companies, universities, and national research institutions began working in earnest on MBE between 1973 and 1975.

Fortunately, there was one research group at Fujitsu Laboratories that used MBE to grow gallium arsenide and aluminum gallium arsenide. The group was led by Researcher Satoshi Hiyamizu (now Professor Emeritus at Osaka University). When I explained my idea to that MBE group, they agreed to offer their full support for the fabrication of heterojunction crystals. From that day, we formed a cross-organizational small-scale prototype research group to commence joint research. Of course, this research began as an "unauthorized" project without letting our laboratories know about it, and so each researcher had only limited amount of time to allocate to it.

## The birth of HEMTs

Immediately after the prototype research group got started, I received a letter. To my great surprise, it was from Dr. Ray Dingle of Bell Laboratories, one of the coauthors of the aforementioned paper on modulation-doped superlattices. He said he wished to discuss the GaAs MOSFETs that I was working on. On August 30, 1979, he visited our laboratory to compare notes on his modulation-doped superlattices and our GaAs



重なる栄誉を逃すのは絶対避けねばならないと判断し、再現性を度外視し、試作をスタートさせました。一個でもいいから、動作するHEMTを早く実現したいという一心からです。二、三の失敗を経て、その年の12月下旬、歩留まりの低いウエハの中にHEMT動作するチップを見つけることができました。非公式のHEMT試作サークルができて約4ヶ月後のことでした。再現性を確かめるためにもう一度試作して確認をし、その時得られた実験データをHEMTの最初の論文発表に使用しました。HEMTの誕生を確認した時の気持ちは、達成感と嬉しさはありましたが、協力してくれたMBEグループのメンバーに恩返しができる安堵感が一番大きかったことを憶えています。

ちなみに、このHEMTの研究成果を1980年6月、ニューヨーク州にあるコーネル大学で開かれた第38回DRCで発表したときのことですが、私が発表を終えて席へ戻ると、ふいに後ろから肩をたたかれ、ふりかえると見知らぬ人が何か書類を差し出すので、見ると驚いたことに、われわれのHEMTと類似のデバイスでした。それは、HEMTのAlGaAsとGaAsとを上下逆さまにした、現在“逆”HEMTとよばれるデバイスに関する論文の原稿でした(Fig. 10)。あとで話を聞きますと、彼は企業の研究者で、われわれに先を越されたことを非常に残念がっていました。われわれはHEMT一番乗りの栄誉を手にすることができましたが、その差僅か数か月の差でしかありませんでした。

## 量産化技術

HEMTは、ヘテロ接合界面近傍の十数原子層という従来のデバイスサイズの常識からは考えられないくらいにきわめて薄い領域を電流路として使うため、当初は信

MOSFETs, but we deliberately kept our new initiative on HEMTs secret.

With this and other events as our motivation, our research continued to gather pace. By November of that year, the technological level of the MBE group had improved so much that our mobility of two-dimensional electron gases caught up with the level at Bell Laboratories. I must say that we achieved this at an astonishing speed, which was made possible only by the zeal of everyone in the MBE group. In fact, the fate of the MBE group hinged on this courageous challenge. I was responsible for the device process in the group, and what I found particularly challenging in the process was the etching technique. In order to operate HEMTs by depleting the entire n-AlGaAs layer under the gate electrode, we needed to control the thickness of the semiconductor between the gate electrode and the heterojunction interface with an accuracy down to several nanometers by etching. Given the technological level at the time, this demanded an overwhelmingly high level of accuracy. Trying one new etching solution after another, we repeated simple experiments endlessly, only to waste so many precious MBE wafers. When we started the prototype research, we decided to disregard reproducibility, since we did not want to spend too much time in this stage, at the cost of the greatest honor, namely, that of being the first to announce the development of HEMTs. It was purely about our ardent desire to develop even a single working HEMT as soon as possible. In late December of that year, after a few failures, we were able to develop a HEMT chip that would function in low-yield wafers. This was about four months after the “unauthorized” HEMT prototype research group had been formed. To determine reproducibility, we performed another prototype study and used the experimental data gained thus far for our first paper on HEMTs. When we finally confirmed the birth of HEMTs, I certainly did feel a great sense of achievement and pleasure, but I also remember feeling a sense of relief most of all, as I would be able to give back to all of the members of the MBE group who had so kindly cooperated with us.

This is not the end of the story, however. In June 1980, I presented the paper on our HEMT research project at the 38th DRC at Cornell University in New York. After I returned from the podium to my seat, someone behind me tapped my shoulder. When I looked back, someone I had never seen before presented a document to me. To my great surprise, it was about a device similar to our HEMTs. Actually, it was a paper on a device now referred to as a “reverse” HEMT, where the AlGaAs and GaAs layers are inverted (Fig. 10). He later told me that he was a researcher at a corporate laboratory, and that he was sorely disappointed to find out that we were one step ahead of him. We won the honor of being the first to develop HEMTs, but only by a few months.

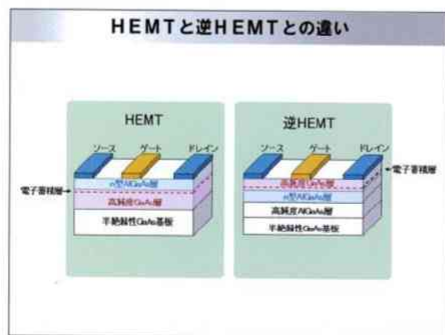


Fig. 10



頼性が危惧されていました。実用化に関して懐疑的な意見が多かったと思います。私自身もHEMTを実用化できるかどうか半信半疑でした。理由は二つありました。一つは当時HEMTの唯一の結晶成長技術であったMBEの製造能力が低いという問題がありました。歴史的に見て、MBEはもともと研究目的に向けて開発されたものであり、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す。これには有機金属ガスを原料とする量産型の有機金属化合物気相成長法(通称MOCVD)が開発され、HEMTのウエハの量産体制ができました。

もう一つの実用化を阻む当時の技術課題は、HEMTのプロセス技術の難しさでありました。ゲート電極とヘテロ接合界面との間の距離を高精度にコントロールして、所望の厚さに設定する必要があったからです。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 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (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のです。このことは、HEMTの実用化にとってまさに致命的です。この制御が難しい技術課題をブレイクスルーしたのが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(反応性イオンで不要部分を食刻すること)技術です。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す。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す(Fig. 11)。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により、制御電極が設置される部分のGaAsキャップ層を除去します。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します。AlGaAs表面に化学的に安定なフッ化アルミニウム( $\text{AlF}_3$ )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す。したがって、このプロセスは、人間がエッチング時間などを厳密に監視する必要がなく、極めてシンプルです。こういう巧い方法が使えるのは、HEMTがAlGaAsとGaAsという化学的に性質が異なる材料から作られていたからです。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ます。これらのブレイクスルー技術によって、初めて特性のそろったHEMTが再現性良く製造できるようになりました。実用化されたHEMTでは、GaAsキャップ層が除去され、窪んだゲート領域にゲート電

## Mass production technology

Because HEMTs use a current path formed by an extremely thin region of about a dozen atom layers—incredibly thin compared to that of conventional devices—near the heterojunction interface, their reliability had been called into question from the very beginning. As such, many were skeptical about their practical application. I was also dubious about their commercial use, and there were two reasons for this. First of all, MBE was the only crystal growth technology for HEMTs at that time, but its productivity was low. Historically speaking, MBE was originally developed for research purposes, and its architecture was not designed for mass production. In other words, to put HEMTs into practical use, crystal growth systems for mass production would need to be developed first. Subsequent development of the metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) technology for mass production, which uses metalorganic gases as materials, solved this, and the mass production setup for HEMT wafers was in place.

The second technological challenge that hindered practical application of HEMTs at the time was the difficulty of the HEMT fabrication process. It was necessary to control the distance between the gate electrode and the heterojunction interface with a high degree of accuracy in order to achieve the desired thickness. Because it contains Al, AlGaAs is extremely chemically active compared to GaAs. Simply leaving it exposed to the atmosphere will result in a natural oxidation film with a main component of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (aluminum oxide) forming on the surface, thus altering the AlGaAs film thickness. This would prove nothing less than fatal for the practical application of HEMTs. Then, a breakthrough was made in this difficult-to-control process in the form of a GaAs cap layer structure (which is stacked on the AlGaAs layer) and reactive ion etching technology (etching unnecessary portions using reactive ions). The idea is very straightforward: the GaAs cap layer protects the AlGaAs surface from being oxidized

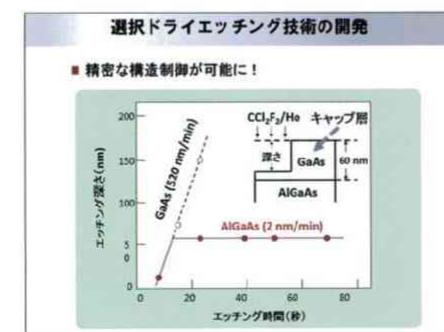


Fig. 11



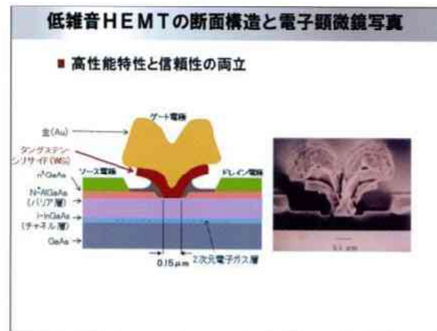


Fig. 12

極が形成されています (Fig. 12)。

### 最初の製品

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す。誕生した当時、HEMTに対するマーケットニーズは当然ありませんでした。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しました。1983年の国際固体回路会議(通称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りました。発表したHEMTの低温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持っていたためです。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りました。1985年に長野県にある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、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りました。開発初期にニッチではありますが低温での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りました。マーケットの出現により企業活動が開始され、それによってデバイス技術が継続的に改良され、新たな応用分野への道が開かれたからです。

### 家電製品へ

HEMTが本格的に普及し始めたのは1987年ごろからです。従来からのGaAs

and, when setting a control electrode, only the cap layer of the electrode section is selectively removed through reactive ion etching. In this way, it was assumed, the accuracy of AlGaAs film thickness could be maintained during crystal growth, making it dramatically easier to prepare HEMTs (Fig. 11). Reactive ion etching uses fluorinated gases activated by high-frequency electricity to remove the GaAs cap layer in the region where the control electrode is set. When the GaAs cap layer has been etched to expose the AlGaAs surface, etching stops automatically, because chemically stable aluminum fluoride ( $\text{AlF}_3$ ) has been formed on the AlGaAs surface to prevent the etching from penetrating any further. As such, this process does not require people to rigorously monitor the etching time and other parameters, and thus is quite simple. This clever method is possible because HEMTs are made from AlGaAs and GaAs, which have different chemical properties. That is to say, another distinctive feature of HEMTs is their high degree of freedom in production engineering. These breakthrough technologies finally made it possible to repeatedly produce HEMTs with consistent properties. In commercially available HEMTs, the GaAs cap layer is removed and a gate electrode is formed in the hollowed-out gate region (Fig. 12).

### The very first product

Having been brought into existence as the result of research seeking high-speed devices, HEMTs were basically a product of chance. Naturally, there was no demand for HEMTs in the market at the time of their birth. In fact, HEMTs came into the commercial market seemingly out of nowhere. At the International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) of 1983, we presented a HEMT low-noise, four-stage amplifier for possible application in the microwave band for satellite communications, and the product drew the attention of those working at radio observatories in the United States who were present at the conference. Thanks to HEMT's superior noise characteristics at low temperatures that we announced during that conference, our amplifier could potentially replace conventional parametric amplifiers or GaAs MESFET amplifiers. We therefore decided on low-noise amplifiers for radio telescopes as the target for HEMT's first product application. The HEMT amplifier that was installed at the Nobeyama Radio Observatory (NRO) in Nagano Prefecture in 1985 helped to discover unknown hydrocarbon molecules in dark nebulae, and it was later installed in the world's major radio observatories. The discovery of this market, which was niche yet valued HEMT's performance at low temperature, helped us to take an extremely important step toward





Fig. 13

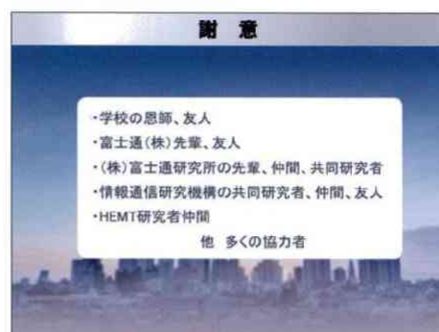


Fig. 14

MESFETにかわり、衛星放送受信用コンバータの低雑音増幅器として大量に使用されるようになりました。低雑音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できたため、衛星放送は日本やヨーロッパにおいて爆発的に普及し、情報のボーダレス化が進展しましたことは皆さんがご存知のとおりです。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に固有な量産化に必要な数々のブレイクスルー技術が大きく寄与しました(Fig. 13)。

## おわりに

トランジスタと出会って半世紀近くになりますが、改めてふりかえてみると、私の研究遍歴は偶然性に支配され、紆余曲折の連続であったように思います。予想外の配属先の変更や研究での挫折、異分野の技術情報との偶然の出会い、国際会議場での研究者との雑談など、これら偶然の出来事がすべて現在の私を作り上げたと言っても過言ではありません。異質なものと予想外の事と出会うことで、驚きや感動が生まれ、これらがモチベーションとなって、新しいものに挑戦し続けられる忍耐力を生み、平凡な技術者に過ぎない私でも、これまでに存在しなかったものを作りだせたのではないかと考えています。これらのことを心に刻み、これからも努力していきたいと思っています(Fig. 14)。

これまで、私を導き、支援してくださいました多くの方々に、心から感謝申し上げます。ご清聴ありがとうございました。

innovation during the early days of development. The emergence of a market encouraged corporate activity, which then ensured constant improvement of the device technology, thus opening up the way toward new application areas.

## Use in home electronics

It was around 1987 that the adoption of HEMTs began in full swing. Replacing conventional GaAs MESFETs, they started to be used in large quantities for low-noise amplifiers in satellite broadcast receivers. Use of a low-noise HEMT made it possible to reduce the size of parabolic antenna by more than half, which, as you might recall, triggered the explosive spread of satellite broadcasting in Japan and Europe, thereby eliminating the “borders” of information. Behind this rapid adoption were the achievement of higher quality and throughput of MBE, MOCVD, and other crystal growth methods, and numerous technological breakthroughs that were unique to HEMTs and necessary for their mass production, including selective dry etching (Fig. 13).

## In conclusion

Nearly a half-century has passed since I first encountered transistors. As I look back again, I can see that my career as a researcher has been shaped by chance and has been rife with vicissitudes. Unexpected change of assigned position, setback in my research, encounter with technological information from other fields, and talking with a researcher at an international conference—It is not hyperbole to say that I owe what I am today to these fateful events. By encountering new things and unexpected events, I was amazed and inspired, which in turn motivated me to patiently continue taking on new challenges. This is how I—just an ordinary engineer—was able to create something that had not existed before. Keeping these things firmly in my mind, I will continue to give my best effort going forward (Fig. 14).

In closing, I would like to express my most heartfelt appreciation to the many people who have given me their guidance and support up to this day. Thank you very much for your kind attention.



稲盛財団2017——第33回京都賞と助成金

発 行 2018年 8 月31日

制 作 公益財団法人 稲盛財団

〒600-8411 京都市下京区烏丸通四条下ル水銀屋町620番地

Tel: 075-353-7272 Fax: 075-353-7270

E-mail [press@inamori-f.or.jp](mailto:press@inamori-f.or.jp) URL <https://www.inamori-f.or.jp>

**ISBN978-4-900663-33-6 C0000**