

化合物半導体デバイス — 限りなき可能性を求めて —

林 秀 樹

Development of Compound Semiconductor Devices for Pursuit of Infinite Possibilities — by Hideki Hayashi —
Many different compound semiconductors can be formed by changing the combination of constituent elements. Properties of alloy semiconductors composed of a plurality of compound semiconductors can be changed in a continuous fashion by changing composition ratios. Very thin alloy semiconductor multilayers showing interesting properties can be formed by sophisticated epitaxial growth methods such as MOVPE and MBE. Based on these matters, innumerable compound semiconductor devices with a wide variety of functions and characteristics have been developed. This is a feature unique to compound semiconductors and not found in silicon semiconductors. Sumitomo Electric has been developing various kinds of compound semiconductor materials for about half a century, and is the world's largest manufacturer of compound semiconductors. The Company has been supplying GaAs and InP substrates and their epitaxial wafers to the consumer and communications markets as its leading compound semiconductor products, and recently succeeded in developing GaN substrates for blue-violet lasers that are being used in the next-generation optical disk systems. As to compound semiconductor devices a large number of optical and electron devices have been developed and commercialized for power and communications market. This paper describes the past quarter century's history of development of various kinds of optical and electron devices, focusing mainly on Sumitomo Electric's research and development activities.

1. 緒 言

2種類以上の元素から構成される化合物半導体は、その元素の組み合わせにより多くの種類の化合物半導体が構成できる。また2種類以上の化合物半導体の混ざり合った混晶半導体では、その混合比を変えることにより物性値を連続的に変えることができる。さらに異種の化合物半導体や混晶半導体の薄膜を多層に積層させることにより、無限と言えり種類の半導体構造が形成でき、それによって多種多様な機能、特性を持った半導体デバイスが実現できる。ここがSi半導体とは全く異なる点であり、化合物半導体の魅力でもある。

当社では、約半世紀前から化合物半導体材料の開発・事業化に取り組んできた。通信用や民生用のGaAs基板、InP基板とそのエピタキシャルウェハが主な製品であったが、最近では次世代光ディスクに使われる青紫レーザー用のGaN基板の開発・製品化を実現させており、世界最大の化合物半導体材料総合メーカーとなっている。

本論文では、これら化合物半導体や、混晶半導体、エピタキシャル成長による半導体薄膜形成等について述べた後、光通信用InP系半導体レーザー、受光用OEIC、白色LED等の光デバイス、GaAs MESFETおよびIC、SiCパワートランジスタ等の電子デバイスについて、当社の取り組みを中心に、ここ四半世紀の開発について述べる。

2. 化合物半導体

2-1 元素半導体と化合物半導体

20世紀後半のエレクトロニクスの革命的な進歩は我々の社会を大きく変えてきたわけであるが、この主役は何といても集積回路(IC)であり、その材料はシリコン(Si)半導体である。その前座的な役割を果たしたゲルマニウム(Ge)(トランジスタが発明された時に用いられた材料はGe)とSiとは共に単一の元素から成る半導体であり、このような半導体は元素半導体と呼ばれる。

一方、元素半導体とは異なり2つ以上の原子がイオン結合により結合してできる半導体があり、これらは化合物半導体と呼ばれる。一般的に、イオン結合は陽イオンと陰イオンとの強い静電引力によって絶縁体となるが、陽イオンと陰イオンの組み合わせによっては静電引力が弱く、半導体となる。これまでに実に数多くの化合物半導体とそれらを用いた半導体デバイスが開発され、実用化にも華々しいものがある。これらの化合物半導体は、周期律表(表1参照)の第何族の元素から構成されるかによって分類され、主なものとしてⅢ-Ⅴ族、Ⅱ-Ⅵ族、Ⅳ-Ⅳ族の化合物半導体がある。Ⅲ-Ⅴ族半導体には、GaAs、InP、GaN、AlNなど、Ⅱ-Ⅵ族半導体には、ZnSe、ZnS、CdTeなど、Ⅳ-Ⅳ族半導体にはSiC、SiGeなどが代表的な化合物半導体である。住友電工では、世界に先駆けて約半世紀前から化合物半導体基板の開発・事業化を進めてきており、主と

してGaAs、InP、GaP、GaSb、InAs等のⅢ－Ⅴ族半導体の開発、製品化を行い（写真1）、また最近では次世代DVD用青紫レーザの基板としてGaN基板の量産を行っている。

表1 化合物半導体の主な構成元素の周期律表

Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
	B	C	N	O
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te



写真1 GaAs, InP等各種化合物半導体

2-2 化合物半導体と混晶半導体 化合物半導体は、その元素の組み合わせにより多くの種類が存在するが、さらに複数の異なる化合物半導体を組み合わせることにより、結晶構造は保ったままで人為的に3種類、あるいは4種類といった元素からなる半導体を作ることができる。例えば、GaAsとInAsとを混ぜることにより、 $Ga_xIn_{1-x}As$ ($0 < x < 1$) という半導体が、またGa、In、As、Pといった4種類の元素から成る $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ ($0 < x < 1, 0 < y < 1$) という半導体も形成できる。これらの半導体は、混晶半導体と呼ばれ、その組成比を連続的に変えることにより半導体の格子定数（原子間距離に相当する値）やエネルギーバンドギャップ（ E_g ）を連続的に変えることができる。この化合物半導体の特長こそが、Siでは得ることのできない数多くの種類の半導体デバイスを生み出し得る大きな要因である。図1にこれら代表的な化合物半導体と3元混晶半導体の E_g と格子定数を示す。

混晶半導体とは異なり、厚さ数原子層の2種類の化合物半導体の積層構造により、元の化合物半導体とは異なる新しい物性を持った半導体材料を生み出す超格子半導体とい

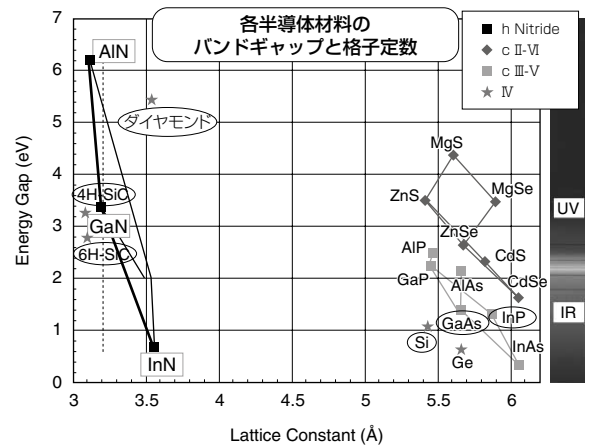


図1 各種半導体材料のエネルギーバンドギャップと格子定数

う概念も提唱された。筆者らはInAsとGaAsとの極薄膜積層構造を後述するMBE成長で形成し^{(1)~(4)}、これを動作層とするトランジスタの試作も行った^{(5)~(7)}が、混晶半導体を超える半導体材料は得られなかった。

2-3 エピタキシャル成長 種々の機能を持った半導体デバイスを形成するには2種以上の異種半導体を積層させることが必要となる。このような異種半導体の積層をヘテロ接合と呼び、格子欠陥が少なく結晶軸が揃った半導体層の結晶成長をエピタキシャル成長（エピタキシー）と呼ぶ。エピタキシー（epitaxy）とはギリシャ語で“epi-（～の上に）+ taxis（整列する）”という意味で、半導体基板上に結晶軸が揃った結晶成長のこと。高性能な半導体デバイスを作製するうえで、このエピタキシャル成長は極めて重要なプロセスとなる。一般にエピタキシャル成長において成長層の結晶欠陥の密度を低くするためには、成長する半導体の格子定数が下地の半導体の格子定数にできる限り近くする必要がある（前述の図1において縦軸に平行な線上での結晶成長が望ましい）。上記した種々の混晶半導体ではその格子定数は組成比を制御することにより変えることができるため、格子整合のとれた（界面の上下半導体層の格子定数が同じ）ヘテロ接合を作ることができる。

化合物半導体のエピタキシャル成長には、種々な手法が用いられているが、その主な手法としては、液層エピタキシャル成長（LPE：Liquid Phase Epitaxy）、分子線エピタキシャル成長（MBE：Molecular Beam Epitaxy）、と有機金属気相エピタキシャル成長（MOVPE：Metal Organic Vapor Phase Epitaxy）とがある（図2参照）。高性能なデバイス形成には、数nmといった薄膜半導体層が必須となるが、このような極薄膜半導体層を成長させるためには、MBEとMOVPEが優れており、その中でも量産性に優れたMOVPEが実用化されている光ディスク用レーザ、光ファイバ通信用レーザ等の製造等に広く用いられている。

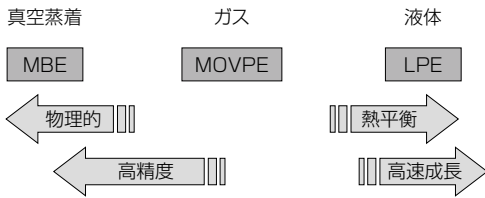


図2 各種エピタキシャル成長法の比較

定した。その測定結果を図3に示すが、6 Å (単原子層厚) という極めて薄い量子井戸からも鮮明な発光が観測できており、当時としては最高品質の量子井戸構造が形成できていることを実証した^{(8)~(10)}。

3. 光デバイス

3-1 光通信量子井戸 (MQW) レーザ 前述のMQW構造は、それを半導体レーザの活性層として用いることによりその特性を大幅に向上させることができる。筆者等はInGaAsP系4元混晶のMQW構造で長波長帯 (発光波長1.31ミクロン) の光通信用レーザを作製し、その閾値電流、スロープ効率、温度特性等のレーザ特性が、従来構造のレーザより優れていることを初めて報告した⁽¹¹⁾。また、2インチInPウェハ全面に形成したレーザ特性のウェハ全面での面内均一性が高めるとともに、MQW構造の活性層成長だけでなく、埋め込み成長、クラッド成長なども含めた全エピタキシャル成長のMOVPE化を初めて実現させた。この半導体レーザ製造プロセスの大変革は、それまで小さい面積の基板を用いた液層エピタキシャル成長 (LPE) によるレーザ製造に比べて、MQW構造採用によるレーザ性能の大幅向上、2インチウェハでの製造による製造コストの大幅低減、などを実現させ、高性能MQWレーザの普及に多大な貢献をした。

上記1.3μm帯MQWレーザは、温度特性が良く、また高性能、低コストであったため、その後当社内の光データリンクに大量に用いられたのを始め、国内外の多くの顧客に採用され、これまでに1000万個を超える出荷を果たしている。また、上記MQW構造形成技術は、他の種類のレーザ開発に展開され、光CATV用の無温調同軸型のアナログDFB (Distributed FeedBack: 分布帰還型) レーザ⁽¹²⁾、光ファイバアンプ励起用の1.48μm高出力レーザ^{(13)~(15)}、0.98μm励起レーザ^{(16)~(18)}や、DVD用の赤色MQWレーザ^{(19)~(28)}の開発や製品化に用いられた (写真2参照)。

2-4 ヘテロ接合と量子井戸構造 前述したように、化合物半導体デバイスの形成には多くのヘテロ接合が用いられるが、急峻な界面を持つ (半導体の組成が界面で急峻に変わる) ヘテロ接合は高性能デバイスを作製するために必須となる。またEgが小さい半導体層がEgの大きい半導体層に挟まれた構造は量子井戸 (QW: Quantum Well、一般には量子井戸の個数は複数なのでMQW: Multiple Quantum Well) 構造と呼ばれ、高性能な半導体レーザを形成するためには必須の構造であるが、良好なMQW構造を作製するためには急峻なヘテロ接合を形成する必要がある。筆者等は1980年代半ばに、この急峻な界面を持つ半導体ヘテロ接合を作製するために、反応ガスの配管系に工夫を凝らすとともに、反応炉の構造に特徴を持たせたMOVPE装置を開発した。ヘテロ接合のできの良し悪しは、MQW構造の光学特性 (例えばフォトルミネッセンス測定: 光を照射することによって生じた電子と正孔が再結合する際に放出される光のスペクトルを観測することにより、半導体結晶中に存在する格子欠陥、不純物や薄膜構造を高感度に検出する手法) を評価することで判定することができるが、GaInAs系の3元混晶やGaInAsP系の4元混晶を用いたMQW構造を上述のMOVPE装置で作製し、フォトルミネッセンスを測

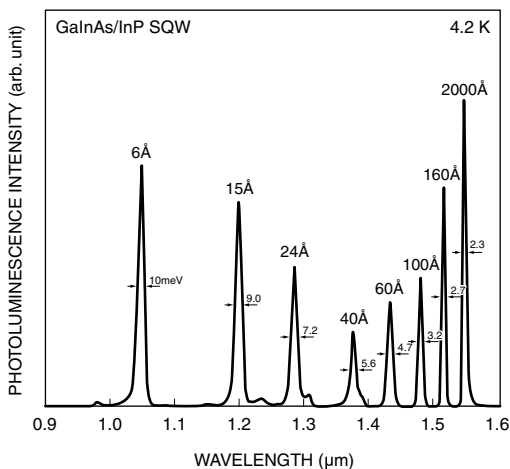


図3 GaInAs量子井戸からのフォトルミネッセンス⁽⁹⁾



写真2 各種半導体レーザ

3-2 光通信用受光OEIC 化合物半導体を用いると前節で述べたような半導体レーザや受光素子と言った光デバイスを作製することができる。また、高速のトランジスタ、ダイオードなどの電子デバイスも作製できるので、光デバイスと電子デバイスを同一半導体基板上の1チップに集積化することができる。これがOEIC (Opto-Electronic Integrated Circuit : 光電子集積回路) と呼ばれるデバイスである。1990年代に光通信システム用のOEICについて多くの研究がなされた。レーザ等の発光デバイスはそのエピタキシャル構造が複雑であり、また共振器(通常はチップの両端面で共振器を形成する)を作り込むのが難しいのに対して、フォトダイオードなどの受光デバイスは、そのエピタキシャル構造が比較的簡単であると共に、高速化という意味で初段の増幅器を受光素子の近くに配置する意義が大きいので、主として受信側のOEICの研究がなされた。

受信OEICは、それぞれのデバイスをハイブリッド集積したもの比べて、その性能、信頼性、サイズの小ささ、と製造コストで優れたものが得られると予想された。筆者等は、前述のMOVPE技術を駆使し、InP基板上にPINフォトダイオードと受信アンプとを集積化した受信OEICを作製した^{(29)~(31)}。さらには、イコライザーを内蔵した低雑音の受信OEIC^{(32)、(33)}、8本からなるリボンファイバからの信号を一括して受信できる世界初の8チャンネル受信OEIC^{(34)、(35)}や超高速受信OEICの作製にも成功した^{(36)、(37)}。上記OEICは集積化する電子デバイスとしてはHEMT(後述 4-1)を用いていたが、さらに性能を上げるためにHBT(Heterojunction Bipolar Transistor)を用いたOEICも開発し⁽⁷⁷⁾(**図4**、**写真3**参照)、集積度の高いものとしてパラレル光インターコネクション向けの16x16のOEICを試作した⁽⁷⁸⁾(**写真4**参照)。これらのOEICは形を変え、受光デバイスと複数の受動部品とを集積化した簡易型OEICとして製造コスト低減という観点から当社の光データリンク製品に数多く用いられた。現在ではこれらOEIC技術は、ユーディナデバイス㈱に引き継がれ研究開発が進められている^{(75)、(76)}。

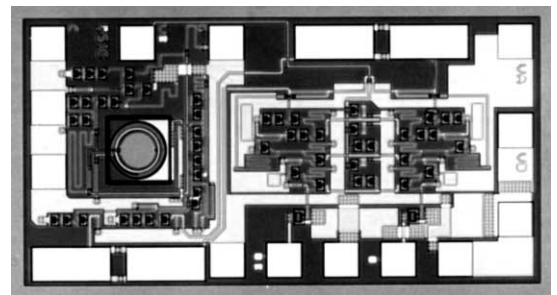


写真3 コンパレータ内蔵型のpin/HBT OEIC⁽⁷⁷⁾

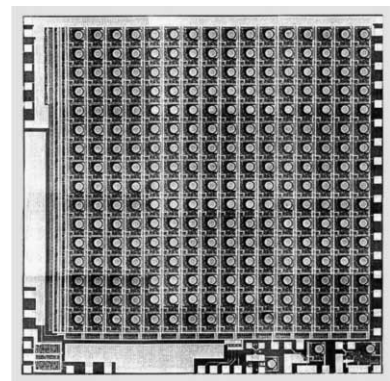


写真4 16x16 受信OEICアレイ⁽⁷⁸⁾

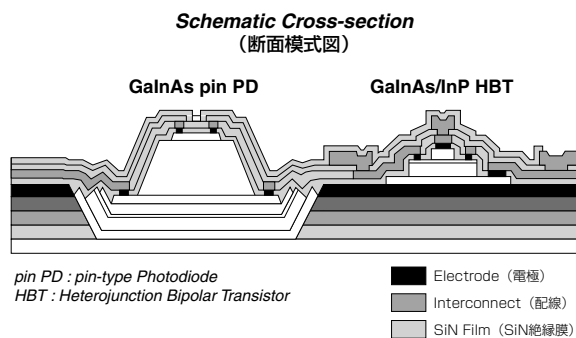


図4 pin型受光素子とHBTとを集積化したOEICの断面図⁽⁷⁷⁾

3-3 光ディスク用青紫色レーザ 光ディスク用レーザは化合物半導体デバイスの大きな応用市場である。先ずレコードを完全に置き換えたCDの読み出し用レーザとしてAlGaAs系の近赤外レーザが登場するが、このレーザの製造には最初はLPEやMBEも用いられていたが、最終的にはMOVPEによるMQWレーザとなった。次にDVDの市場が立ち上がるが、ここにはAlGaInPといった4元混晶を活性層とする赤色レーザが用いられた。これらのCD用およびDVD用レーザの基板はGaAsであり、GaAs基板に格子整合したAlGaAs系、AlGaInP系のエピタキシャル層が活性層として用いられている。当社は、このGaAs基板を市場に供給している。

一般に光ディスクに書き込む情報量を増やすためにはディスクへの書き込みや読み出しに用いるレーザの波長を短くすればよい。CDからDVDへは、近赤外光から赤色へと短波長化が進んだがブルーレイなど次世代ディスク用には更に短波長化が進み、波長400nm近辺の青紫色のレーザが用いられる。この波長域の光を発生するレーザを作製するためにはGaAs基板上の混晶半導体では不可能であり、活性層にはInGaNが用いられ、その基板としてはGaN基板が必須となる。

この波長域のLED(発光ダイオード)としては、日亜化

学の中村修二などの技術開発があり、サファイア基板上のInGaN/AlGaIn層を用いたデバイスが実用化され、白色LEDの光源として携帯電話のバックライトなどとして広く用いられている。異種基板への格子整合系を外れた薄膜半導体層を用いたものであり、これまでの常識を覆す製品である。しかし、高出力レーザとしてはより高品質な半導体層が要求されるため、信頼性の高いデバイスを作製するためには格子整合系のGaIn基板が必要となる。GaInは原子半径の小さいN（窒素）が主成分であり、結合力が強く安定な材料である反面、その結晶成長は難しく、高品質なGaIn結晶は長い間得られていなかった。当社では、これまで長年培ってきたⅢ－Ⅴ族化合物半導体結晶成長技術をベースに、異種半導体へGaIn結晶を成長させる独自の手法を確立させ^{(38)~(42)}、遂に青紫色レーザ用GaIn基板の実用化に世界で初めて成功した。今ではこの基板を用いた青紫レーザが次世代DVDプレーヤーや次世代ゲーム機用として広く用いられるようになってきている。

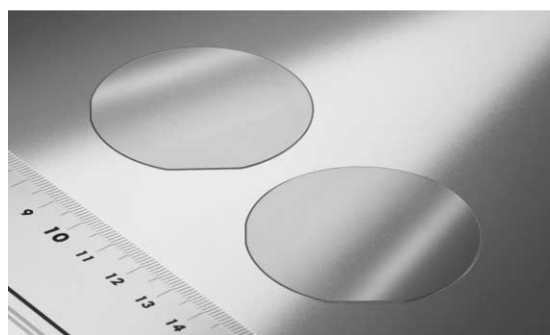


写真5 2インチ径GaIn単結晶基板

3-4 白色LED 白色LED用の光源としては、前述したように今やサファイア基板上のGaIn系LEDが市場をリードしているが、この種のLEDの開発が成功する前は、Ⅲ－Ⅴ族半導体ではなくⅡ－Ⅵ族半導体であるZnSe系の発光ダイオードやレーザの研究開発が長らく行われていた。ZnSe系半導体は、**図1**に示したようにそのエネルギーバンドギャップ E_g は大きく、いわゆるワイドバンドギャップ半導体であるが、結晶成長が難しく、大型の高品質基板を得るのが難しかった。当社では、気相成長法の一つである昇華法により直径2インチで転位密度が $1 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ 以下という高品質のZnSe結晶の成長に成功し^{(43)~(45)}、さらに光デバイス基板として必要な低抵抗化に関しては、ウェーハ加工したZnSeにAlを表面から拡散させることによって導電性ZnSe基板を実現させた⁽⁴⁶⁾。

当社は、上記ZnSe基板を用いた白色LEDを開発した⁽⁴⁷⁾。この白色LEDは、n型ZnSe基板にエピタキシャル成長さ

せたZnSe系LEDの480~490nmの青~青紫発光と、その発生で励起された基板の585nmをピークとする緑から赤に至る幅広い発光を合成することにより固体素子単体で白色光を得る全く新しいコンセプトのLEDであった(**図5**参照)。このZnSe系白色LEDの特長としては、(1) 蛍光体不要で取り出し電極を基板表面と裏面とでとるため工程が簡略、(2) GaIn系白色LEDに比べ2.5Vと低電圧で動作、(3) 波長制御が可能であり色調ばらつきが小さい、(4) 導電性基板を用い静電破壊に対し耐性がある、などが挙げられる。問題となっていた素子寿命に関しても、2層クラッド構造を採用することによりGaIn系LEDと同等になった⁽⁴⁸⁾。このような優れた特性からZnSe系白色LEDは特に携帯機器用白色光源として注目されたが、サファイアあるいはSiC基板上のGaIn系白色LEDの著しい技術進展により、実用化には至らなかった。ただこの開発を通して得られた数多くの知見や技術は波及性があり、他の材料、デバイスの開発へ応用されていった。

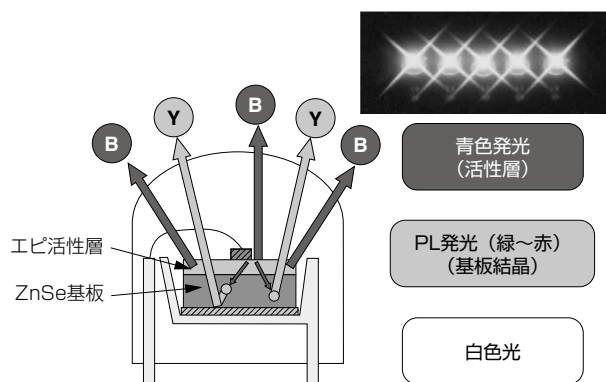


図5 ZnSe系白色LEDの原理図

4. 電子デバイス

前述した光デバイスは、化合物半導体でしか得られないものがほとんどであるが、トランジスタ等の電子デバイスは一般にSiを用いて作製される。しかし、Siではなく化合物半導体を用いるとその材料物性の違いから、Siデバイスより高性能なデバイスの実現が可能となる。GaAsやInPを用いると高速、高周波動作が可能となり、またSiCやGaInを用いると高耐圧で低損失なデバイスが可能となる。以下、様々な化合物半導体を用いた電子デバイスについて述べる。

4-1 GaAs電子デバイス GaAsはその電子移動度がSiに比べて数倍と大きいため高速動作のトランジスタやその集積回路への期待が大きく、1970年代後半から1990年代にかけて国内外で数多くの研究開発が行われた。SiのICでは、半導体と絶縁膜との界面に形成する導電チャンネルを活

用した MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor : MOS 型電界効果トランジスタ) が多く用いられる。これは Si とその表面を酸化した SiO_2 との界面状態を良好にできるためである。これに対し、GaAs では GaAs とその酸化物、あるいは GaAs と他の絶縁膜との界面には多くの準位 (界面準位) と呼ばれる欠陥が発生してしまい、良好な MOS 界面が得られず GaAs MOS 型トランジスタは遂に実現しなかった。筆者等も Al を陽極酸化する手法や、予め Ga を添加した SiO_2 膜を用いるなどして界面準位を大幅に下げることができたが、MOSFET の実用化には至らなかった^{(49)~(51)}。

このように GaAs では MOSFET が実現できなかったため、GaAs IC の要素トランジスタとしては金属と半導体との直接接合 (ショットキバリアー接合) をゲート電極に用いる MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) が用いられた。GaAs IC は、その高速性、低消費電力性が故に Si IC のかなりの部分を置き換えると期待されたが、Si IC の高性能化が進んだことと、GaAs MOSFET が実現できなかったことなどにより、大規模集積の IC に関しては市場参入は果たせなかった^{(52)~(54)}。ただし、小規模集積の IC としては、無線通信用のスイッチ IC やアンプ IC、光通信用のアンプ IC や光デバイス駆動用 IC として幅広く用いられている⁽⁵⁵⁾。

一方、単体の GaAs 系トランジスタはその高速性、高周波での性能の高さにより、無線通信を中心に多く用いられている。GaAs と AlGaAs とのヘテロ接合を用い、この界面に誘起された高移動度の二次元電子ガスをチャンネルとした電界効果トランジスタである HEMT (high electron mobility transistor : 高電子移動度トランジスタ) はよく知られている。GaAs 系 HEMT は、その後多くの材料への展開が図られ、InP 系、GaN 系、SiGe 系などが報告されている。この HEMT に対し、筆者等はヘテロ接合を用いず高性能が得られる独自のパルスドープトランジスタを開発した^{(56)、(57)} (図 6 参照)。このトランジスタは、MOVPE で形成した非常に薄い (数 nm) の高キャリア密度の GaAs 動作層を用いるものであり、その低雑音性、良好な歪み特性^{(58)~(61)}、耐放射線性⁽⁷⁹⁾ が示され衛星放送受信用ダウンコンバータ等の低雑音 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit : マイクロ波集積回路) への応用が示された^{(62)~(68)}。このパル

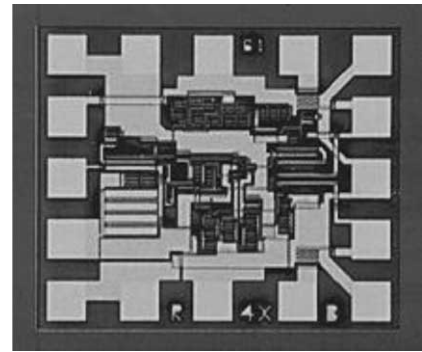


写真 6 GaAs プリアンプ IC の顕微鏡写真

スドープ FET は、無線基地局アンプ用として国内外の市場で数多く用いられた。

4-2 InP 系電子デバイス InP 系電子デバイスは、InP に格子整合した $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{As}$ 系か、少し結晶に歪みを持たせたものが主で、高周波特性に関してはすべてのデバイスの中で最も高性能を示している。当社では、前述したように受光素子と集積化した長波長帯の光通信用受信 OEIC の電子デバイスとして開発を行った。

4-3 SiC 電子デバイス 前述のように GaAs や InP の電子デバイスはその高速性、高周波特性の高さにより Si デバイスでは実現できない高速スイッチや低歪みデバイスとして無線通信や光通信の分野で広く用いられている。一方、SiC や GaN といったワイドバンドギャップ半導体は、そのエネルギーバンドギャップの大きさから Si デバイスに比べて高耐圧、低消費電力が実現できるため、電力機器、ハイブリッド自動車や、情報機器の電源といったパワーエレクトロニクスでの活用が期待されている。特に近年、地球温暖化防止の観点から省エネルギー指向がますます高まってきており、パワーエレクトロニクス機器に対する更なる低損失化、高効率化が望まれている。Si パワーデバイスの性能は Si の半導体としての物理的限界に近づきつつあり、上記要望に応えるためには SiC 等のワイドバンドギャップ半導体によるパワーデバイスの実現が不可欠になってきている。

SiC はワイドバンドギャップで高温耐性があるということで 1950 年代には世界的規模で精力的に研究開発が進められたが、高品質な単結晶製造が困難であるという問題があり、その後あまり研究されなくなった。ところが、1970 年代終わり頃に「種付け昇華法」と呼ばれる結晶成長手法がロシアで見出され、また 1980 年代後半には高品質エピタキシャル成長法である「ステップ制御エピタキシー技術」が日本で報告された。これら 2 つの大きな技術開発により、1990 年代に入って SiC デバイス開発への機運が一気に高まった。

SiC パワーデバイスとしては、まずショットキーバリアダイオードが開発され、2001 年から市販されるようになって

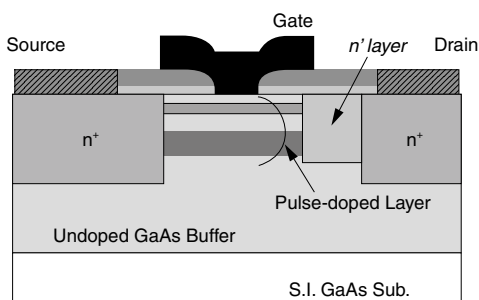


図 6 パルスドープ GaAs MESFET の模式断面構造図

ている。現在の研究開発の対象は、スイッチング用の各種トランジスタであり、国内外で盛んに研究開発が進められている。当社では、自動車向けのパワーエレクトロニクス機器や民生機器への搭載を目指し、SiCの特長を最大限に生かすパワースイッチングデバイスとしてRESURF (REduced SURface Field：表面電界緩和) 型接合型電界効果トランジスタ (JFET)^{(69)~(72)} と MOS 電界効果トランジスタの開発を進めている。

前者のJFETは、チャンネル部分の電流経路が半導体内部にあるので、MOSFETなどとは異なり、チャンネルでの電子移動度がバルクとほぼ同じであり、SiC材料物性を十分に生かすことができるデバイスであると言える。図7にRESURF型JFETの顕微鏡写真を示す。チップサイズ2mm×2mmのデバイスで、400V/2.5A、オン抵抗値0.86Ω、スイッチングの立ち上がり時間8ns、立下り時間10nsという値が得られている⁽⁷³⁾。このJFETによりSiの物理限界を超える低オン抵抗と高速スイッチング特性が確認でき、また数百V耐圧領域において高速スイッチングが可能であるという特性から、スイッチング電源への応用が期待できる。

一方、後者のMOSFETに関しては、ノーマリオフ動作が可能で、高耐圧が期待できるデバイスであるが、MOS界面の不完全さで未だ十分な電子移動度が得られていないのが実情である。当社では、特殊なプロセスを施すことにより、表面が原子層レベルで平坦なSiC表面を形成し、この表面に形成したMOS構造で高移動度が得られることを示した⁽⁷⁴⁾。このSiC MOSFETは高耐圧、大電流、高速動作といったSiデバイスでは得られない特性が得られるため自動車や電力機器用への応用が期待される。

4-4 GaN系電子デバイス GaN系デバイスとしては、白色LEDや青紫レーザー等の光デバイスがまず市場に出たが、GaNは電子デバイスとしての材料特性も優れており、無線通信分野における高周波、高出力デバイスとして活発に研究開発が進められている。パワー電子デバイス用の大口径GaN基板の入手が困難であったため、基板としては格子不整合系のSiCやSiが用いられた。SiC基板上のGaN電子デバイスとしては、ユーディナデバイス(株)がいち早くGaN HEMTの開発・製品化を実現させ、市場でリードしている。低コスト化を狙ったSi基板上のGaNデバイスに関しても多くの研究報告がなされている。

GaNとSiCとはともにワイドバンドギャップ半導体であり、その材料特性は似通っているが、GaN電子デバイスはSiC電子デバイスに比べて同一構造ではそのオン抵抗の値を数分の1に下げることができるため、省エネデバイスとして期待されている。当社では高品質GaN基板上のGaN系デバイスの研究開発を進めており、サファイア基板上のGaNデバイスに比べて、その漏れ電流値は小さく、また耐圧は大幅に向上することを報告している。このデバイスの特性オン抵抗値は、1.3mΩcm²と小さい値であった(図8参照)。

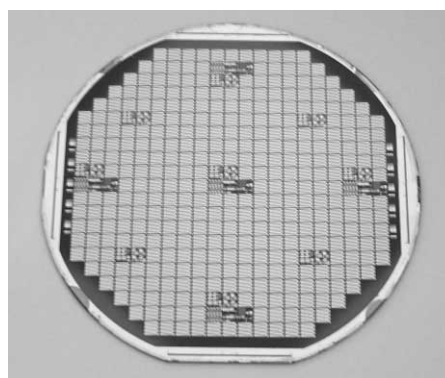


写真7 SiCトランジスタのウェハ写真

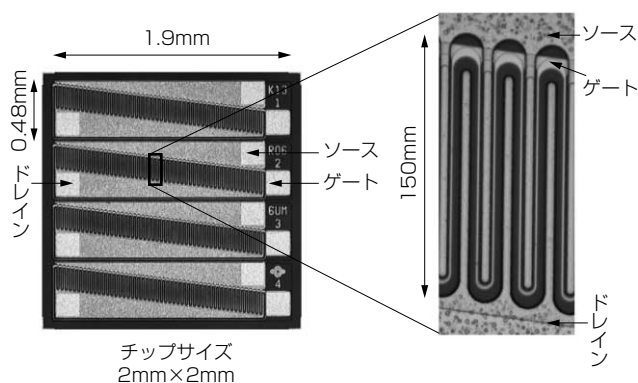


図7 RESURF-JFETの顕微鏡写真

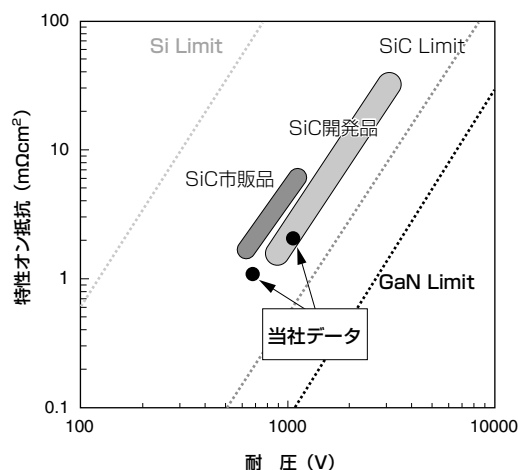


図8 GaNダイオードの耐圧と特性オン抵抗

5. その他の化合物半導体デバイス

これまで半導体レーザー等の光デバイス、トランジスタ等の電子デバイスについて述べてきたが、化合物半導体を用

いたデバイスとしては、この他に各種のセンサ（トランジューサ）がある。これはある種類のエネルギーを別のものに変えるデバイスであり、太陽電池、熱電素子（ペルチエ素子）や各種のセンサ（光センサ、温度センサ、磁気センサ、圧力センサ、ガスセンサ、放射線センサなど）がある。これからの省エネ社会でその重要性が増すと予想される太陽電池は、その製造コストの低さから一般にはSi半導体を用いられるが、高効率を要求される用途には化合物半導体を用いられる。当社では、1991～2000年度、ニューサンシャイン計画に参加し、化合物半導体を用いた超高効率太陽電池の開発を行った。5cm角と化合物半導体として大型サイズの太陽電池にて26.0%の変換効率達成し、また1cm角で機械的に積層したGaAs/GaInAsP-2接合太陽電池で31.1%の変換効率を達成した。これらの成果は、いずれも発表当時の世界最高効率であったが、製造コスト面で商用化困難と判断し、太陽電池開発は2000年度で終結した。この開発で得られた、エピ成長技術や結晶評価技術は、社内での各種エピやデバイス開発に生かされている^{(60)、(61)}。

6. 結 言

化合物半導体デバイスについて、半導体基板とその基板上へのエピタキシャル成長、そしてそれらをベースにした光デバイス、電子デバイスについて、ここ四半世紀の流れを当社の取り組みを中心に述べてきた。化合物半導体はSi半導体と異なり、複数の元素を混ぜ合わせることで望みに近い物性の半導体を形成でき、これらをデバイス設計に沿って三次元的に分布させることにより数限りない機能と特性を持ったデバイスが可能となる。その設計に沿った構造が実際に形成できるかどうかは課題であり、これはエンジニアリングの問題である。

化合物半導体デバイスの将来を考える時、先ずはこのエンジニアリングの向上が不可欠である。設計通りの構造が再現性よく形成できるようになれば、既存の半導体デバイスの性能向上（高周波、高出力、低消費電力 etc.）と製造コストの低減が期待できる。また、全く新しい機能を持ったデバイスの創出や既存デバイスの適用範囲の拡大も可能となる。例えば、これまで近赤外、赤色、青紫といった波長域でしか得られなかった半導体レーザーの発光波長を、緑色、紫外、テラヘルツ領域へと拡大できる、などである。

一旦でも化合物半導体デバイスの開発に携わった技術者は、その魅力に取り付かれ、寝ても覚めても新しいデバイスの実現に向けて行動することになる。筆者も化合物半導体材料メーカーに入社して以来この魔物に取り付かれ、一貫して化合物半導体デバイスの研究開発を行ってきた。今は、来るべき環境に優しい省エネルギーの社会の実現に向けて、ワイドバンドギャップ半導体を何とか手なずけようと奮闘している。

参 考 文 献

- (1) Y. Matsui, H. Hayashi, M. Takahashi, K. Kikuchi, and K. Yoshida, "(InAs)_m(GaAs)_n superlattices grown by molecular beam epitaxy," J. Crystal Growth, 71, p.280 (1985)
- (2) Y. Matsui, H. Hayashi, K. Kikuchi, and K. Yoshida, "(InAs)_m(GaAs)_n superlattices grown by Beam-separation MBE method," International Conference on Modulated Semiconductor Structures (1985)
- (3) Y. Matsui, H. Hayashi, and K. Yoshida, "Temperature dependence of electron mobility in (InAs)₃(GaAs)₁ superlattices," Appl. Phys. Lett., 48, p.21 (1986)
- (4) Y. Matsui, N. Nishiyama, H. Hayashi, K. Ono, and K. Yoshida, "InAs-GaAs superlattices as a new semiconductor grown by beam separation MBE method," International Symposium on GaAs and Related Compounds, Inst. Phys. Conf. Ser., 91, p.179 (1987)
- (5) N. Nishiyama, H. Yano, S. Nakajima, and H. Hayashi, "(InAs)₃(GaAs)₁ superlattice channel field-effect transistor grown by molecular beam epitaxy," Appl. Phys. Lett., 55, p.894 (1989)
- (6) N. Nishiyama, H. Yano, S. Nakajima, and H. Hayashi, "InAs-GaAs superlattice/N-Al_{0.48}In_{0.52}As modulation-doped field effect transistor grown by molecular beam epitaxy," International Symposium on GaAs and Related Compounds (1989)
- (7) N. Nishiyama, H. Yano, S. Nakajima, and H. Hayashi, "n-AlInAs/(InAs)₃(GaAs)₁ superlattice modulation-doped field effect transistor grown by molecular beam epitaxy," Electronics Letters, 26, p.885 (1990)
- (8) H. Kamei and H. Hayashi, "OMVPE growth of Ga_{1-x}In_xAs/InP (0.53x \leq 0.71) quantum wells with extremely narrow photoluminescence linewidths," Technical Digest of Indium Phosphide and Related Materials, p.389 (1991)
- (9) H. Kamei and H. Hayashi, "OMVPE growth of GaInAs/InP and GaInAs/GaInAsP quantum wells," J. Crystal Growth, p.567 (1991)
- (10) T. Katsuyama, I. Yoshida, and H. Hayashi, "Highly uniform GaInP and AlGaInP/GaInP QW structures grown by organometallic vapor phase epitaxy," International Symposium on GaAs and Related Compounds (1989)
- (11) H. Kamei, H. Hayashi, Y. Michitsuji, M. Takahashi, M. Maeda, and H. Okuda, "Uniform lasing characteristics of 1.3- μ m multiple quantum-well Fabri-Perot laser diodes over 2-in.-diameter wafer with excellent high temperature operation," Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference, p.127 (1991)
- (12) K. Yoshida, K. Matsumoto, J. Fukui, T. Nakabayashi, A. Miki, M. Yoshimura, T. Iwasaki, G. Sasaki, and H. Hayashi, "Development of an Uncooled Coaxial DFB-LD Module for Analog Transmission," SEI Technical Review, 48, P.76 (1998)
- (13) H. Kamei, M. Yoshimura, H. Kobayashi, N. Tatho, and H. Hayashi, "High-power operation of 1.48 μ m GaInAsP/GaInAsP strained-layer multiple quantum well lasers," 1991 Technical Digest Series, 13, Optical Amplifiers and Their Applications, p.30 (1991)
- (14) H. Kamei, N. Tatho, J. Shinkai, H. Hayashi, and M. Yoshimura, "Ultra-high output power of 1.48 μ m GaInAsP/GaInAsP strained-layer multiple quantum well laser diodes," International Conference on Optical Fiber Communication (1992)
- (15) N. Tatho, H. Kamei, K. Tanida, J. Shinkai, M. Shigematsu, M. Nishimura, H. Hayashi, and K. Nawata, "High power,

- high reliability 1.48 μ m strained-layer multiple quantum well laser and its application to high performance Erbium-doped fiber amplifier," International Conference on Optical Fiber Communication (1993)
- (16) I. Yoshida, T. Katsuyama, J. Hashimoto, and H. Hayashi, "AlGaInP/GaInAs strained quantum well lasers," *Electronics Letters*, 29, p.654 (1993)
- (17) J. Hashimoto, T. Katsuyama, I. Yoshida, M. Murata, and H. Hayashi, "Stable singlemode operation of 0.98 μ m GaInAs/GaInAsP/GaInP buried ridge stripe laser with AlGaInP current blocking layer," *Electronics Letters*, 30, p.1146 (1994)
- (18) J. Hashimoto, N. Ikoma, M. Murata, and T. Katsuyama, "A highly reliable GaInAs-GaInP 0.98- μ m window laser," *IEEE J. Quantum Electronics*, 36, p.971 (2000)
- (19) T. Katsuyama, I. Yoshida, J. Shinkai, J. Hashimoto, and H. Hayashi, "Very low threshold current AlGaInP/Ga_xIn_{1-x}P strained single quantum well visible laser diode," *Electronics Letters*, 26, p.1375 (1990)
- (20) J. Hashimoto, T. Katsuyama, J. Shinkai, I. Yoshida, and H. Hayashi, "Effects of strained-layer structures on the threshold current density of AlGaInP/GaInP visible lasers," *Appl. Phys. Lett.*, 58, p.879 (1991)
- (21) J. Hashimoto, T. Katsuyama, J. Shinkai, I. Yoshida, and H. Hayashi, "High performance of AlGaInP/GaInP visible lasers by strain induced effects," *Electronics Lett.*, 27, P.2028 (1991)
- (22) T. Katsuyama, I. Yoshida, J. Shinkai, J. Hashimoto, and H. Hayashi, "637nm operation of low threshold current AlGaInP strained single quantum well laser diodes," *International Conference on Solid State Devices and Materials* (1991)
- (23) T. Katsuyama, I. Yoshida, J. Shinkai, J. Hashimoto, and H. Hayashi, "High temperature (> 150°C) and low threshold current operation of AlGaInP/GaInP strained multiple quantum well visible laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, 59, p.3351 (1991)
- (24) I. Yoshida, T. Katsuyama, J. Hashimoto, Y. Taniguchi, and H. Hayashi, "Room temperature 632.7nm cw operation of AlGaInP strained multiple quantum well laser grown on (100) GaAs," *Electronics Letters*, 28, p.628 (1992)
- (25) T. Katsuyama, I. Yoshida, J. Hashimoto, Y. Taniguchi, and H. Hayashi, "OMVPE growth of AlGaInP/GaInP strained quantum well structures and their application to visible laser diode," *J. Crystal Growth*, 124, p.697 (1992)
- (26) T. Katsuyama, I. Yoshida, J. Hashimoto, J. Shinkai, and H. Hayashi, "AlGaInP strained quantum well visible lasers," *International Symposium on GaAs and Related Compounds*, 129, p.199 (1992)
- (27) J. Hashimoto, T. Katsuyama, J. Shinkai, I. Yoshida, and H. Hayashi, "Highly stable operation of AlGaInP/GaInP strained multiquantum well visible laser diodes," *Electronics Letters*, 28, p.1329 (1998)
- (28) J. Hashimoto, T. Katsuyama, I. Yoshida, and H. Hayashi, "Strain-induced effects on the performance of AlGaInP visible lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, 29, p.1863 (1993)
- (29) H. Hayashi, H. Yano, K. Aga, H. Kamei, and G. Sasaki, "Giga-bit rate receiver OEICs grown by OMVPE for long-wavelength optical communications," *IEE Proceedings-Optoelectronics*, p.164 (1991)
- (30) H. Hayashi, "Long-wavelength optoelectronic integrated circuits," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference*, p.233 (1992)
- (31) H. Hayashi, G. Sasaki, H. Yano, N. Nishiyama, H. Kamiyama, and K. Doguchi, "Longwavelength receiver OEICs," *Opto-Electronic Conference* (1992)
- (32) H. Yano, K. Aga, H. Kamei, G. Sasaki, and H. Hayashi, "Monolithic pin-HEMT receiver with internal equalizer for long-wavelength fiber optic communications," *Electronics Letters*, 26, p.305 (1990)
- (33) H. Yano, K. Aga, H. Kamei, G. Sasaki, and H. Hayashi, "Low-noise current optoelectronic integrated receiver with internal equalizer for gigabit-per-second long-wavelength communications," *IEEE J. Lightwave Technol.*, 8, p.1328 (1990)
- (34) K. Aga, H. Yano, M. Murata, H. Kamei, G. Sasaki, and H. Hayashi, "High-speed eight-channel optoelectronic integrated receiver arrays comprising GaInAs pin PDs and AlInAs/GaInAs HEMTs," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference*, p.3 (1991)
- (35) H. Yano, M. Murata, G. Sasaki, and H. Hayashi, "A high-speed eight-channel optoelectronic integrated receiver array comprising GaInAs pin PDs and AlInAs/GaInAs HEMTs," *IEEE J. Lightwave Technology*, 10, p.933 (1992)
- (36) H. Yano, G. Sasaki, M. Murata, and H. Hayashi, "An ultra-high-speed optoelectronic integrated receiver for fiber-optic communications," *IEEE Trans. Electron Devices*, 39, p.2254 (1992)
- (37) H. Yano, G. Sasaki, N. Nishiyama, M. Murata, H. Kamiyama, and H. Hayashi, "5 Gbit/s four-channel receiver optoelectronic integrated circuit array for long-wavelength lightwave systems," *Electronics Letters*, 28, p.503 (1992)
- (38) K. Motoki, T. Okahisa, N. Matsumoto, M. Matsushima, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, T. Hirano, M. Nakayama, S. Nakahata, M. Ueno, D. Hara, Y. Kumagai, A. Koukitu, and H. Seki, "Preparation of Large Freestanding GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy Using GaAs as a Starting Substrate," *Japanese Journal of Applied Physics*, 40, p.L140 (2001)
- (39) K. Motoki, T. Okahisa, S. Nakahata, N. Matsumoto, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, M. Ueno, Y. Kumagai, A. Koukitu, and H. Seki, "Preparation of Large GaN Substrates," *Materials Science and Engineering B*, B93, p.123 (2002)
- (40) K. Motoki, T. Okahisa, S. Nakahata, N. Matsumoto, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, M. Ueno, Y. Kumagai, A. Koukitu, and H. Seki, "Growth and Characterization of Freestanding GaN Substrates," *Journal of Crystal Growth*, 237, p.912 (2002)
- (41) K. Motoki, T. Okahisa, S. Nakahata, K. Uematsu, H. Kasai, N. Matsumoto, Y. Kumagai, A. Koukitu, and H. Seki, "Preparation of 2-inch GaN substrates," *Proc. 21st century COE Joint Workshop on Bulk Nitride, IPAP Conf. Series 4*, P.32 (2003)
- (42) K. Motoki, T. Okahisa, R. Hirota, S. Nakahata, K. Uematsu, and N. Matsumoto, "Dislocation reduction in GaN crystal by advanced-DEEP," *Journal of Crystal Growth*, 305, p.377 (2007)
- (43) S. Fujiwara, Y. Watanabe, Y. Namikawa, T. Keishi, K. Matsumoto, and T. Kotani, "Numerical simulation on dumping of convection by rotating a horizontal cylinder during crystal growth from vapor," *Journal of Crystal Growth*, 192, p.328 (1998)
- (44) S. Fujiwara, Y. Namikawa, and T. Kotani, "Growth of 1" diameter ZnSe single crystal by the rotational chemical vapor transport method," *Journal of Crystal Growth*, 205, p.43 (1999)

- (45) S. Fujiwara, Y. Namikawa, M. Irikura, K. Matsumoto, and T. Kotani, T. Nakamura, "Growth of dislocation-free ZnSe single crystal by CVT method," *Journal of Crystal Growth*, 219 (2000)
- (46) Y. Namikawa, S. Fujiwara, and T. Kotani, "Al diffused conductive ZnSe substrates grown by physical vapor transport method," *Journal of Crystal Growth*, 229 (2001)
- (47) K. Katayama, H. Matsubara, F. Nakanishi, T. Nakamura, H. Doi, A. Saegusa, T. Mitsui, T. Matsuoka, M. Irikura, T. Takebe, S. Nishine and T. Shirakawa, "ZnSe-based white LEDs," *J. Crystal. Growth*, vol 214/215, p.1064 (2000)
- (48) T. Nakamura, S. Fujiwara, H. Mori and K. Katayama, "Novel Cladding Structure for ZnSe-based White Light Emitting Diodes with Longer Lifetimes of over 10,000 hr," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol 43, p.1287 (2004)
- (49) H. Hayashi, K. Kikuchi, and T. Yamaguchi, "Capacitance-voltage characteristics of Al-Al₂O₃-pGaAs metal-oxide-semiconductor diodes," *Appl. Phys. Lett.*, 37, P.404 (1980)
- (50) H. Hayashi, K. Kikuchi, T. Yamaguchi, and T. Nakahara, "Study of the properties of spin-on SiO₂ GaAs interface," *International Symposium on GaAs and Related Compounds ; Inst. Phys. Conf. Ser.*, 56, P.275 (1980)
- (51) H. Hayashi, K. Kikuchi, S. Iguchi, K. Motoyoshi, T. Yamaguchi, and T. Nakahara, "GaAs metal-insulator-semiconductor technology," *IEEE Denshi Tokyo*, 66 (1981)
- (52) K. Kikuchi, H. Hayashi, T. Ebata, M. Iiyama, K. Motoyoshi, and T. Yamaguchi, "Normally-off GaAs MESFETs for ultrahigh-speed logic circuits," *International Symposium on GaAs and Related Compounds, and GaAs IC Symposium (1982)*
- (53) S. Shikata, J. Tsuchimoto, and H. Hayashi, "A novel self-aligned gate process for half-micrometer gate GaAs ICs using ECR-CVD," *IEEE Trans. Electron Devices*, 37 p.1800 (1990)
- (54) T. Sekiguchi, S. Sawada, T. Hirose, M. Nishiguchi, N. Shiga, and H. Hayashi, "A multi-chip packaged GaAs 16 × 16 bit parallel multiplier," *IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Technol.* 15, p.444 (1992)
- (55) N. Shiga, T. Sekiguchi, K. Aga, H. Hayashi, and K. Yoshida, "High-speed PIN-amplifier module," *IEEE Denshi Tokyo*, 27, p.60 (1988)
- (56) S. Nakajima, K. Otobe, T. Katsuyama, N. Shiga, and H. Hayashi, "OMVPE grown GaAs MESFETs with stepped channel for MMICs," *GaAs IC Symposium*, p.297 (1988)
- (57) S. Nakajima, N. Kuwata, N. Nishiyama, N. Shiga, and H. Hayashi, "Electronic properties of a pulse-doped GaAs structure grown by organometallic vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, 57, p.1316 (1990)
- (58) S. Nakajima, K. Otobe, N. Shiga, N. Kuwata, K. Matsuzaki, T. Sekiguchi, and H. Hayashi, "Low noise characteristics of pulse-doped GaAs MESFETs with planar self-aligned gate," *IEEE Trans. Electron Devices*, 39, p.771 (1992)
- (59) N. Shiga, S. Nakajima, K. Otobe, T. Sekiguchi, N. Kuwata, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "Modeling on statistical distribution of noise parameters in pulse-doped GaAs MESFETs," *IEEE International Microwave Symposium (1992)*
- (60) K. Otobe, N. Kuwata, N. Shiga, S. Nakajima, K. Matsuzaki, T. Sekiguchi, and H. Hayashi, "Low-distortion MESFET with advanced pulse-doped structure for power application," *International Symposium on GaAs and Related Compounds*, 129 (1992)
- (61) S. Nakajima, N. Kuwata, N. Shiga, K. Otobe, K. Matsuzaki, T. Sekiguchi, and H. Hayashi, "Characteristics of double pulse-doped channel GaAs MESFETs," *IEEE Electron Device Letters*, 14, p.146 (1993)
- (62) S. Nakajima, K. Otobe, N. Kuwata, N. Shiga, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "Pulse-doped GaAs MESFETs with planar self-aligned gate for MMIC," *IEEE Microwave Symposium, MTTTS*, p.1081 (1990)
- (63) N. Shiga, S. Nakajima, K. Otobe, T. Sekiguchi, N. Kuwata, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "X-band monolithic four-stage LNA with pulse-doped GaAs MESFETs," *GaAs IC Symposium (1990)*
- (64) N. Shiga, S. Nakajima, K. Otobe, T. Sekiguchi, N. Kuwata, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "X-band MMIC amplifier with pulse-doped GaAs MESFETs," *IEEE Trans. Microwave Theory and Technique*, 39, P.1987 (1991)
- (65) N. Shiga, S. Nakajima, K. Otobe, T. Sekiguchi, N. Kuwata, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "MMIC family for DBS downconverter with pulse-doped GaAs MESFETs," *IEEE J. Solid-State Circuits*, 27, p.1413 (1992)
- (66) N. Shiga, S. Nakajima, N. Kuwata, K. Otobe, T. Sekiguchi, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "Monolithic pulse-doped MESFET LNA for DBS downconverter," *GaAs IC Symposium (1992)*
- (67) N. Shiga, S. Nakajima, N. Kuwata, K. Otobe, T. Sekiguchi, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "Ultra low-noise MMIC amplifier with GaAs pulse-doped MESFETs," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques (1994)*
- (68) N. Shiga, S. Nakajima, N. Kuwata, K. Otobe, T. Sekiguchi, K. Matsuzaki, and H. Hayashi, "12GHz low-noise MMIC Amplifier with pulse-doped GaAs MESFETs," *IEICE Trans. Electron (1995)*
- (69) K. Fujikawa, S. Harada, A. Ito, T. Kimoto, and H. Matsunami, "600V 4H-SiC RESURF-type JFET," *Material Science Forum*, 457, p.1189 (2004)
- (70) T. Masuda, K. Fujikawa, K. Shibata, H. Tamaso, S. Hatsukawa, H. Tokuda, A. Saegusa, Y. Namikawa, and H. Hayashi, "Low On-Resistance in 4H-SiC RESURF JFETs Fabricated with Dry Process for Implantation Metal Mask," *Material Science Forum*, 527, p.1203 (2006)
- (71) K. Fujikawa, K. Shibata, T. Masuda, S. Shikata, and H. Hayashi, "800V 4H-SiC RESURF-Type Lateral JFETs," *IEEE Electron Device Letters*, 25, p.790 (2004)
- (72) H. Tamaso, J. Shinkai, T. Hoshino, H. Tokuda, K. Sawada, K. Fujikawa, T. Masuda, S. Hatsukawa, S. Harada, and Y. Namikawa, "Fabrication of a Multi-chip Module of 4H-SiC RESURF-type JFETs," *Materials Science Forum*, 556, P.983 (2007)
- (73) K. Fujikawa, K. Sawada, T. Tsuno, H. Tamaso, S. Harada, and Y. Namikawa, "Fast Switching Characteristics of 4H-SiC RESURF-type JFET," *International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (2007)*
- (74) T. Masuda, S. Harada, T. Tsuno, Y. Namikawa, and T. Kimoto, "High Channel Mobility of 4H-SiC MOSFET Fabricated on Macro-Stepped Surface," *International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) (2007)*
- (75) R. Yamabi, T. Kagiya, Y. Yoneda, S. Sawada, and H. Yano, "Mesa-type InGaAs pin PDs with InP-Passivation Structure Monolithically Integrated with Resistors and Capacitors with Large Capacitance," *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Conference Proceedings*, p.87 (2007)
- (76) T. Kita, R. Yamabi, Y. Yoneda, S. Sawada, and H. Yano, "Development of Integration Process of InGaAs/InP

- Heterojunction Bipolar Transistors with InP-Passivated InGaAs pin Photodiodes," International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, Conference Proceedings, p.299 (2007)
- (77) H. Yano, S. Sawada, T. Kato, G. Sasaki, K. Doguchi, and M. Murata, "Long wavelength pin/HBT optical receiver monolithically integrated with HBT comparator," Electronics Letters, 32, p.483 (1996)
- (78) H. Yano, S. Sawada, K. Doguchi, T. Kato, and G. Sasaki, "16 × 16 Two-Dimensional Optoelectronic Integrated Receiver Array for Highly Parallel Interprocessor Networks," IEICE Transactions on Electronics, E80-C, p.689 (1997)
- (79) M. Nishiguchi, T. Hashinaga, H. Nishizawa, H. Hayashi, N. Okazaki, M. Kitagawa, and T. Fujino, "Radiation tolerant GaAs MESFET with a highly-doped thin activelayer grown by OMVPE," IEEE Trans. Nuclear Science, 37, p.2071 (1990)
- (80) T. Yamada, A. Moto, Y. Iguchi, M. Takahashi, S. Tanaka, T. Tanabe, and S. Takagishi, "5 × 5cm² GaAs and GaInAs Solar Cells with High Conversion Efficiency," Japanese J. Appl. Phys., 44, p.L985 (2005)
- (81) T. Yamada, A. Moto, Y. Iguchi, M. Takahashi, S. Tanaka, T. Tanabe, and S. Takagishi, "Mechanically Stacked GaAs/GaInAsP Dual-Junction Solar Cell with High Conversion Efficiency of More than 31%," Japanese J. Appl. Phys., 44, p.L988 (2005)
-

執筆者

林 秀樹 :フェロー
材料技術研究開発本部 技師長
パワーデバイス開発室 室長

工学博士
IEEE フェロー Japan Council 理事
電子情報通信学会 評議員
応用物理学会 フェロー
ニューダイヤモンドフォーラム 理事
輻射科学研究会 理事
日本工学アカデミー 会員
