

半導体量子デバイスの多様な展開

勝 山 造

Development of Various Semiconductor Quantum Devices — by Tsukuru Katsuyama — Semiconductor quantum devices, composed of semiconductor quantum wells and superlattices, are widely used in our daily lives as key devices for opto-electronic equipment. The quantum well structure consists of alternating ultra-thin semiconductor films, in which electrons and holes are confined. This structure gives rise to discrete energy levels and minibands in their potential wells, and thus induces new properties of materials. With these properties applied to devices, tremendous improvements have been made in their performance and new functional devices have been created. This paper describes various semiconductor quantum photonic devices developed in Sumitomo Electric for applications in a wide spectrum range of 1 to 10 μm . These devices include semiconductor quantum well lasers and modulators for high speed optical communication, as well as quantum cascade lasers for environmental gas analysis and near-infrared imaging sensors for life science applications.

Keywords: quantum well, superlattice, semiconductor laser, quantum cascade laser, infrared sensor

1. 緒 言

化合物半導体分野における最大の発明は何であろうか。筆者は半導体量子井戸構造の発明をあげたい。半導体量子井戸、あるいは超格子とは、2種類の半導体超薄膜が交互に積み重なった構造をいう。このような構造では、電子、正孔が非常に狭い領域に閉じ込められ、2次元的なふるまいをするため、通常の3次元の自由度を持つバルク材料とは異なった、新しい物性を発現する。この超薄膜構造は、江崎、Tsuによって最初に提案され⁽¹⁾、以後今日に至る40年以上に渡って、優れた半導体デバイスを生み出す革新的な基盤技術となった。当初は、負性抵抗などの準二次元系の電子伝導の研究が盛んに行われ、変調ドーピング^{(2)*1}とそれを応用した高電子移動度トランジスタ (HEMT: High Electron Mobility Transistor)^{(3)*2}、電子の波動性を応用した共鳴トンネルトランジスタ^{(4)*3}など、種々のデバイスが波動関数工学を駆使して発明された。一方、光物性の探究からは、量子井戸レーザ⁽⁵⁾の発明とその高性能化の実証と共に、さらに量子細線、量子箱⁽⁶⁾などの低次元構造の探究が進んだ。また、電界効果の応用による変調器、サブバンド間遷移を利用した光スイッチ、量子カスケードレーザの発明⁽⁷⁾へと繋がった。本タイトルの量子デバイスとは、このような量子井戸構造を応用したデバイスを意味するが、今後もこの奥深い技術からは、様々な量子デバイスが生み出されていくことが期待される。

当社は、1960年代より、化合物半導体材料の開発を開始し、1980年代より、それらの材料技術を活用し、光通信デバイスの開発、事業化に取り組んできた^{(8)、(9)}。その

中で、量子井戸技術をデバイス開発における重要な基盤技術と位置付け、積極的に応用することで多くの高性能デバイスを開発、製品化してきた。

本稿では、特に半導体光デバイスに焦点を絞り、1 μm から10 μm にわたる広い波長領域において、情報通信、ライフサイエンス、環境・安心安全分野で用いられるキーデバイスに本技術がどのように応用されているかを述べる。

2. 量子井戸構造と材料

まず、量子井戸構造は、通常のバルク材料と何が異なり特異な物性を発現するのかを説明する。図1に量子井戸構造のエネルギー状態を示す。2種類の半導体薄膜で形成される積層構造において、バンドギャップの狭い層が電子の平均自由工程度(数10ナノメートル)の厚さになると、電子の取りうるエネルギーが量子化され、伝導帯に電子準位が形成される。正孔についても、同様に価電子帯に正孔準位が形成され、さらに有効質量の重い正孔、軽い正孔の2つの準位に分裂する。この現象を量子サイズ効果と呼んでいる。これに伴い、伝導帯、価電子帯の状態密度^{*4}は、図に示すようにバルク結晶の放物線とは大きく異なり階段状になる。このため、最小エネルギーギャップ付近における状態密度が著しく増加する。これを反映して、光学利得スペクトル幅は非常に狭くなり、光学利得が大幅に改善される。半導体レーザに量子井戸構造を応用した場合の性能向上は、この現象に起因している。これらの特徴に加えて、後

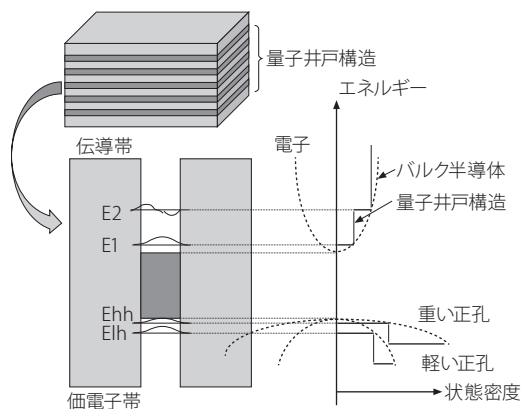


図1 量子井戸のバンド構造

述する電界効果や、電子、正孔の波動性に起因するトンネル効果^{※5}などを応用して様々なデバイスが開発されている。

量子井戸構造が創出する多様性の一端を、光デバイスがカバーする波長領域の視点から表1にまとめた。波長領域別に記載した応用分野は、必ずしもこの領域に限定されるものではないが、情報通信では、光ファイバの低損失帯域に、ライフサイエンス分野では、生体の構成要素の吸収領域に、また環境・安心安全分野では、分子の基準振動、常温近傍の黒体放射^{※6}の領域に対応している。

量子井戸構造によって実現できる波長帯域は、量子井戸を構成する材料の組み合わせ、組成、及び膜厚によって決まる。これらの要素を制御することによって、実効的なバンドギャップあるいは光学遷移のエネルギー差を変化させることができる。ここでは、InP基板上に形成することができる材料をベースとした量子井戸構造について述べる。

光ファイバ通信で用いられる波長領域（1.2～1.7μm）では、GaInAsP、AlGaInAs系材料を用いて、表1中に示すように、大きいバンドギャップ材料が小さいバンドギャップ材料を挟むタイプIと呼ばれる量子井戸構造が用いられている。この構造では、キャリアが低いバンドギャップに落ち込むため、光学遷移は小さいバンドギャップ材料の伝導帯、価電子帯の量子準位間で生じ、吸収、発光の効率は高い。

光通信領域より長い波長領域では、InP基板上にタイプI構造で構成できる材料系がない。このため、隣接する材料間でのバンド間遷移を利用したタイプIIと呼ばれる量子井戸構造によって、大きなバンドギャップ同士で実効的に小さいバンドギャップを形成する工夫がなされている。この構造では電子と正孔が空間的に分離しているため、タイプI構造に比して吸収、発光の効率は低い、InGaAs/GaAsSb系量子井戸構造で、3μm程度までの波長領域に対応できる。

また、さらに長波長領域では、伝導帯側のバンドギャップ差の大きいAllnAs/InGaAs系材料を用いて、伝導帯の上準位と下準位での遷移（サブバンド間遷移）を応用する

表1 量子井戸構造、光学遷移と応用波長領域

波長 (μm)	1	1.5	2	2.5	3	5	8	10
	近赤外 (NIR: Near Infrared)				中赤外 (MIR: Mid-infrared)			
応用分野	情報通信 ・光ファイバ通信 ・光配線		ライフサイエンス ・組成イメージング		環境・安心安全 ・サーモグラフィ ・高感度ガスセンシング			
デバイス	レーザ・変調器		イメージセンサ		(カスケード)レーザ			
量子井戸構造								
タイプ	タイプI構造		タイプII構造		タイプI構造			
光学遷移	バンド間遷移		隣接層間バンド間遷移		サブバンド間遷移			
材料	GaInAsP/InP Al(Ga)InAs/InGaAs		InGaAs/GaAsSb		AllnAs/InGaAs			

ことで、3～10μmの長波長領域をカバーすることが可能となる。

これらの化合物半導体量子井戸構造を成長する方法としては、分子線エピタキシー（MBE: Molecular Beam Epitaxy）や有機金属気相成長法（OMVPE: Organometallic Vapor Phase Epitaxy）が用いられる。MBEは、超高真空中で分子をビーム状に照射することで物理吸着を利用して結晶成長を行う方法で、極めて急峻なヘテロ界面が形成でき、高真空を生かして、リアルタイムで結晶成長状態の観測ができるという特長がある。一方、OMVPEは、有機金属を熱分解して堆積させる方法で、蒸気圧の高いリン系化合物の成長に適し、均一性や柔軟性、量産性に優れ、基板面内で選択的な成長が可能といった特長がある。

我々は、OMVPE技術を半導体レーザ開発のコア要素技術と位置付け、リアクター構造やガス供給系に独自の工夫を凝らし、均一性に優れ、原子層レベルの制御ができる結晶成長技術を80年代後半には確立し^{(10),(11)}、通信用レーザを始めとする種々の量子デバイスの開発に用いてきた。

3. デバイスへの応用展開

3-1 通信用半導体レーザ 量子井戸構造の応用が、半導体レーザの性能改善に与えたインパクトは非常に大きい。この技術なしには半導体レーザの本格的な実用化は不可能であったといっても過言ではないだろう。量子井戸レーザの最初の報告は、1975年Van der Zielらによるが⁽⁹⁾、当社は、1980年後半より、通信用半導体レーザに量子井戸構造を応用し高性能化を進めると共に、全OMVPEプロセスをいち早く導入し、高均一でスループットの高い生産技術を確認することで、1.3μm ファブリパローレーザ、1.48μm 高出力ファイバアンプ励起レーザ、無温調DFBレーザなどを製品化してきた⁽⁹⁾。

近年、通信ネットワークを流れる情報量の爆発的な増加に伴い、通信容量の増大が強く求められており波長多重に

加えて多値変調技術^{※7}の導入などが急ピッチで進められている。一方で、基本となるデバイスの変調速度の高速化も40Gbit/s、100Gbit/s関連の技術開発が本格化する中で、デバイスの物性限界に迫る取り組みが続いている。ここでは、半導体レーザの高速化技術について述べる。

半導体レーザの変調周波数の上限を決める要因は、キャリア数の変化に誘導放出が追従できなくなる緩和振動周波数と寄生インピーダンスによる活性領域への電流注入効率の低下である。我々は、緩和振動周波数を増大させるために、量子井戸構造の導入に加え、格子不整による活性層への圧縮応力の印加、従来のGaInAsP系材料に比して伝導体バンドギャップ差が大きいAlGaInAs系材料の適用を行なった。量子井戸の適用による状態密度の増加とそれに伴う利得の増大に加えて、活性層への圧縮応力の印加で、正孔の有効質量が低減し、更なる利得の増大が見込める。また、AlGaInAs系材料を用いることで、高温でのキャリアの漏れを抑制し温度特性の改善が期待される。このような工夫に加えて、寄生インピーダンス低減のための低容量構造として、**図2**に示すようなBCB (Benzocyclobutene)で平坦化し低容量化を図ったリッジ構造AlGaInAs系DFBレーザを試作した。リッジの形成はドライエッチングで行い、Al系化合物特有の酸化し易い性質が、結晶欠陥を誘発し信頼性に影響を及ぼすことがないように、リッジは活性層まで達せず直上で留めた構造としている。

図3に共振器長250 μ mデバイスの室温における緩和振動周波数のバイアス電流依存性を示す。緩和振動周波数は、15GHz程度まで伸びており、変調効率（注入電流に対する緩和振動周波数の変化量）は室温で3.1GHz/mA^{1/2}と良好な値が得られた。電気帯域は、20GHzを超え、図中に示すように26Gbit/sで良好なアイ開口が確認され、10Gbit/sを超える直接変調レーザとして応用が期待されている^{(12)、(13)}。

3-2 変調器集積レーザ 直接変調レーザは、大電流での変調が必要であり、波長揺らぎ（チャープ）が大きくなるため、長距離伝送には適さない。これを克服し、更なる高速、長距離伝送を可能とするデバイスが電界吸収型（EA: Electro Absorption）の変調器と、DFBレーザとを集積した電界吸収型変調器集積DFBレーザ（EML: Electro-absorption Modulator integrated with DFB Laser）である。このデバイスは、量子井戸構造の電界効果を応用して、電界により変調器の吸収端を変化させ、DFBレーザから発した光を吸収することによって変調を行う。吸収の原理は、**図4**に示すように、電界による量子井戸内のバンドギャップの変形によって、量子井戸内に形成される量子準位が変化する量子閉じ込めシュタルク効果（QCSE: Quantum Confined Stark Effect）を応用している。量子井戸構造がタイプI構造の場合、電界の印加によって、量子準位は低下する。すなわち長波長側に吸収端が移動する。従って、これまで透明で損失のなかった導波路が電界の印加によって、

大きな吸収損失を生じ、光を吸収消光する。直接変調レーザのようにキャリアの注入を伴わないために、変調速度が速く、変調時の屈折率変化が小さい。このため、波長揺らぎ（チャープ）が小さく、消光比も大きく取れることから、中長距離の高速伝送に適したデバイスとして、40Gbit/s、100Gbit/s伝送への応用が進んでいる。

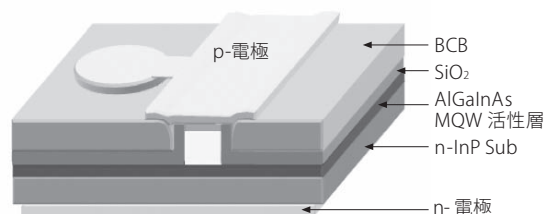


図2 BCB平坦化リッジ型DFBレーザ

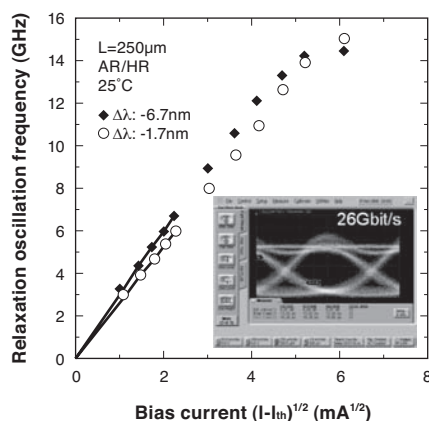


図3 緩和振動周波数のバイアス電流依存性

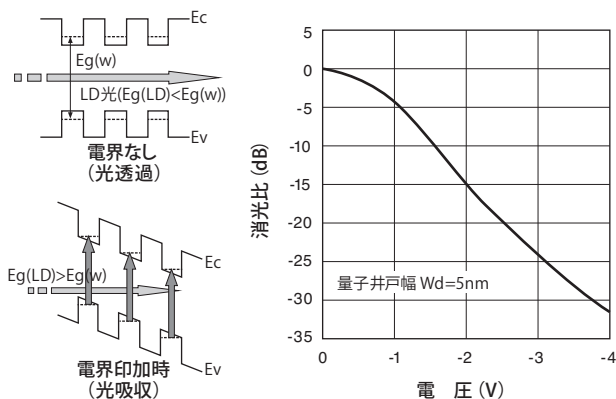


図4 電界吸収型変調器の原理と消光特性

EMLは、GaInAsP系の量子井戸構造を有する1.3 μm DFBレーザとEA変調器を、選択成長技術を用いて、導波路を付き合わせ接合することで作製した。この方法は、双方のデバイスを独立に最適化し、低損失の接続が出来るという利点がある。電流狭窄と素子容量の低減は、ドライエッチングによる導波路メサ構造を、半絶縁性のFe-InPで埋め込むことによって行っている。デバイスは図5に示すように、室温において100ギガビットイーサ用光源としての25Gbit/s動作だけでなく、40Gbit/sにおいても良好な特性を示し、将来の320Gbit/s (40Gbit/s \times 8波) レベルの伝送にも適用が期待される⁽¹⁴⁾。

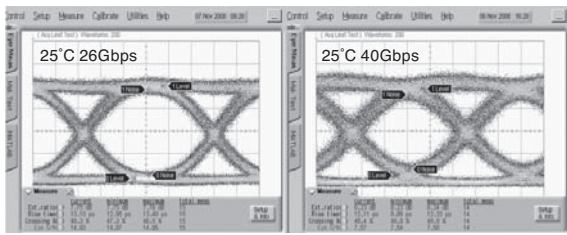


図5 EA-DFBレーザのアイパターン

3-3 量子カスケードレーザ (環境、安全安心分野への応用) 中赤外領域 (3~10 μm) では、多くの分子の基準振動が存在し、これらは近赤外領域に存在する倍音に比べて3~4桁高い吸収率をもつため、高感度のガスセンシングが可能となる。このため、環境モニタ、半導体プロセス管理、エンジンの燃焼診断、医療診断 (呼吸診断) などへの応用が期待されている。さらに、高分子材料の加工や、大気窓を利用したライダー、リモートセンシングなども考えられている。

中赤外領域の半導体レーザを実現するためには、その波長に応じたバンドギャップを有する材料とキャリアを閉じ込めるための、高いバンドギャップを有する材料、及びそれらを成長する基板とが格子整合条件を満たす必要がある。このような組み合わせは、IV-VI族化合物半導体 (PdSnTe) など、いくつか存在するものの、良質な結晶を作成することが難しく、材料物性上不可避のオージェ再結合^{*8}による損失も大きいことから、室温、高出力動作は困難であり、信頼性にも課題があった。この問題点を解決したのが、1994年に発明された量子カスケードレーザ (QCL: Quantum Cascade Laser) である⁽⁵⁾。

QCLは、サブバンド間の光学遷移とトンネル効果によるキャリア輸送という、量子井戸構造の特徴を巧みに応用することで、フォトンエネルギーの小さい長波長領域でのレーザ発振を可能としたデバイスである。

基本的な動作原理を説明するために、図6にQCL活性層のバンド構造模式図を示す。活性層は、サブバンド間の遷

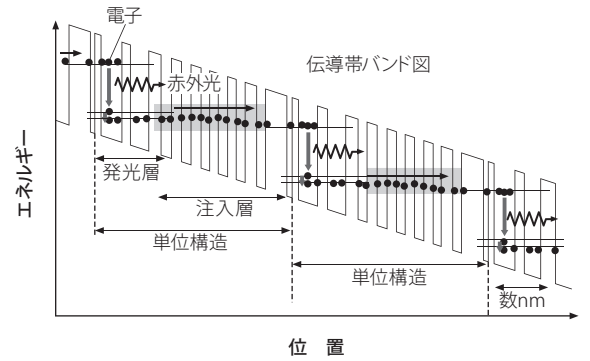


図6 量子カスケードレーザ活性層のバンド構造模式図

移によって光子を放出する発光層と、トンネル効果によりキャリアを輸送する注入層の二つの領域が一つの単位構造を形成し、これが多段に連なっている。まさしく、階段状に連続した滝 (カスケード) のように、キャリアが各段を流れ落ちる際に、光学的な利得が生じることにより、レーザ発振する。この構造は、n型 (p型) だけで構成されるユニポーラ型レーザであり、従来のpn接合で電子・正孔の注入を行うバイポーラ型レーザとは根本的に動作原理が異なる。また、発振波長は材料でなく構造で決まり、これまでに3~20 μm 、及びテラヘルツ領域でのレーザ発振が報告されている。

レーザの特性を向上させるためには、サブバンド間の遷移確率を向上させると共に、非発光遷移による損失を低減する構造設計が重要である。主要な非発光成分は縦光学フォノン (LOフォノン) 散乱^{*9}である。このLOフォノン散乱を抑制するため、活性層における発光層の構造は、隣接する井戸間で遷移が生じる対角遷移型の設計が多く用いられている⁽¹⁵⁾。しかし、この構造は発光遷移確率が小さくなる欠点がある。一方、同一の井戸内で遷移が生じる垂直遷移型では、発光遷移確率は高くなるが、同時にLOフォノン散乱の確率も高くなり、後者が支配的な場合は、レーザ利得の低下を招くというトレードオフがある。

我々は、LOフォノン散乱の増大を抑制しつつ、発光遷移確率の有意な増大による利得向上の効果が期待できる垂直遷移型活性層構造を設計し、デバイスに適用した^{(16)、(17)}。活性層は、AlInAs/GaInAsの超格子列で形成され、発光層は、3つのGaInAs量子井戸層と2つのAlInAsバリア層で構成される。このうち電子が注入される側に近い2つの量子井戸層と、その間のバリア層で、サブバンド間の垂直遷移による発光が生じ、LOフォノン散乱に比べて、発光遷移確率を有意に増大できる構造となっている。素子は、n-InP基板上にOMVPEを用いて成長している。電流狭窄構造は、コンタクト層からコア層までをメサ状にエッチングし、その両側面に電流狭窄のための絶縁膜を形成したダブルチャンネル型構造としている。

図7は、波長7 μm 帯で動作するストライプ幅10 μm 、共振器長2mmの対角遷移型と垂直遷移型素子の閾値電流密度の温度依存性を示したものである。対角型に比べ垂直遷移型素子では、低い閾値電流密度が得られ、特に高温域では有意な差が見られている。閾値電流の温度依存性を表す指標である特性温度は、77K \sim 150K、及び150K \sim 300Kの温度範囲で各々560K、及び127Kという高い値が得られている。

DFBレーザは、コンタクト層、及びクラッド層上部に、発振波長に対応する周期の凹凸をドライエッチングにより

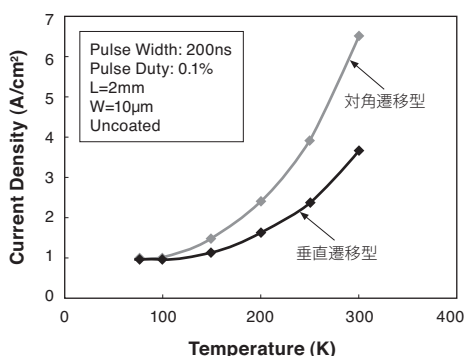


図7 閾値電流密度の温度依存性

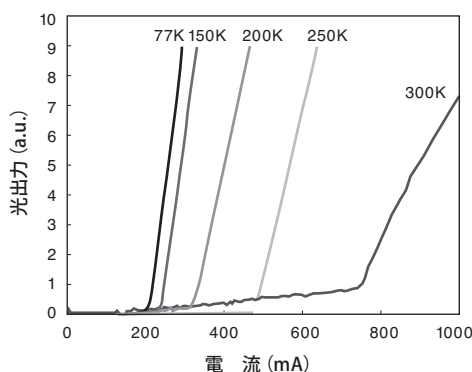


図8 電流-光出力特性

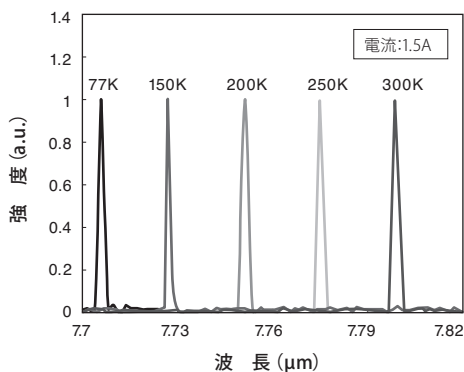


図9 発振スペクトル

形成し、更に凹部を上部電極で埋め込んだ複素屈折率結合型回折格子を形成し、作製した。図8に、DFB-QCL（共振器長2mm、メサ幅10 μm 、端面アンコート）の電流-光出力特性、図9に発振スペクトルを示す。室温（300K）での単一モード発振が得られ、発振波長の温度依存性は、0.4nm/Kであった⁽¹⁷⁾。ガスセンシング用光源として急峻な吸収スペクトラムの同定を行うために必要な波長可変動作が温度調整、あるいは注入電流の制御によって可能であることが確認された。

3-4 量子井戸型近赤外センサ（ライフサイエンス分野への応用） これまで、量子井戸構造を適用した発光素子の開発を中心に述べてきたが、ここでは、受光層に量子井戸構造を応用した2.5 μm まで感度を有する近赤外受光素子、イメージセンサの開発について述べる。

半導体受光素子は、光強度の時間変化を光の吸収によって生成した電子・正孔による電流変化、あるいは抵抗変化として検知する素子である。受光素子内では、光の吸収によって生成したキャリアの輸送が迅速かつ、損失なく行えることが必要である。このような観点からは、キャリアの障壁となるヘテロ接合が多く存在する量子井戸構造を適用する利点はなく、一般にはヘテロ障壁のないバルク材料が用いられてきた。たとえば、1.5 μm 帯の受光素子としては、InGaAsバルク結晶を吸収層としたシンプルな構造のpinフォトダイオード^{*10}が用いられている。しかしながら、これより長い波長領域では、適した高純度バルク材料がなく、また長波長化に伴うオージェ再結合や熱励起に起因するノイズ電流の増加などの問題がある。

1.5 \sim 3 μm の波長領域には、分子の基準振動の倍音や結合音が多く存在する。これらは中赤外領域に多くが存在する基準振動と比較して吸収が弱い半面、物質の内部にまで光が侵入することから、物質の内部を非破壊で計測する応用に適している。近年、製薬業界や食品業界を始めとする多くの製造現場で安全管理や品質管理の観点から近赤外分光法への関心が高まりを見せており、非破壊・非侵襲でリアルタイムに組成の違いや濃度の分布をイメージングできる検査装置の実現が期待されている。しかしながら、このような倍音や結合音に伴う吸収は微弱であるため、高感度で低ノイズなセンサが必要とされるが、これまでその要求を満たせるセンサはなかった。

表2にこの波長領域のセンサを構成する材料系の比較を示す。光通信で用いるInP基板に格子整合したInGaAsは、高感度、低ノイズであるが、カットオフ波長が1.7 μm 程度であるため、分析できる物質が限られる。InGaAsのIn組成を増やすことでカットオフ波長を2.6 μm 程度まで長くすることができるが、InPに対して格子を整合せることができず、結晶欠陥に起因した暗電流が大きくなる。また、均一で高品質なエピタキシャル成長が難しく、チップサイズの大きな2次元アレイセンサへの適用は困難と考えられる。現在近赤外領域の2次元アレイセンサとして用いられ

表2 近赤外領域材料系の比較

	InGaAs	Extended-InGaAs	InGaAs/GaAsSb
波長帯	0.9 ~ 1.7μm	0.9 ~ 2.6μm	0.9 ~ 3.0μm
基板	InP	InP	InP
格子不整	整合	不整合	整合
暗電流	低	高	低
エピ構造	InP InGaAs InP InPsub.	InAsP InGaAs InAs _x P _(1-x) InPsub.	InP InGaAs/GaAsSb InP InPsub.
備考	・光通信用PD	・格子不整緩和のInAsPステップバッファ	・タイプII量子井戸構造

ているものにHgCdTeがあるが、暗電流が高いために大掛かりな冷却機構を必要とし、高価であり、構成材料の環境面への影響も勘案すると汎用分析器への適用は難しい。

一方、InP基板に格子整合し、カットオフ波長が3μm近傍まで長波長化可能な新しい材料系として、InGaAs/GaAsSbタイプII量子井戸構造がある^{(18)~(20)}。図10に、バンド構造を示すが、InGaAsの伝導帯とGaAsSbの価電子帯でそれぞれの量子井戸に閉じ込められた電子と正孔の波動関数が重なり、この間で起こる吸収が波長2~3μmに対応する。この材料系では、InGaAs、GaAsSb共にInP基板に格子整合するため、格子不整による結晶欠陥の発生を抑制することができ、低暗電流が期待できる。さらにこのタイプII構造では、大きなバンドギャップを有する材料同士の組み合わせで実効的に小さいバンドギャップを実現することからオージェ再結合や熱励起によるノイズ電流の低減も期待できる。

InGaAs/GaAsSb量子井戸構造は、OMVPE法でInP基板上に成長した。量子井戸構造評価は、X線回折によって行っている。図11にInGaAs/GaAsSb量子井戸構造（層厚：5nm/5nm、量子井戸ペア数：50）のX線回折パターンを示す。回折パターンは、高次のサテライトピークまで

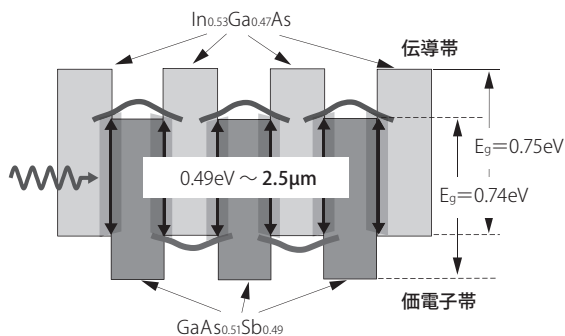


図10 InGaAs/GaAsSb量子井戸バンド構造

シミュレーション結果と良く一致し、良好な量子井戸構造が形成されていることが確認できた。また、光学特性評価はフォトルミネッセンス (PL) により行ったが、図12に示すように、室温で波長2.43μmにピークを持つタイプII遷移による明瞭なPL発光が観察され、良好な光学品質の結晶が得られていることが確認できた。

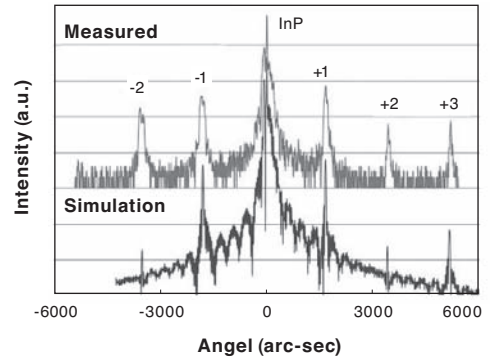


図11 InGaAs/GaAsSb量子井戸(400) X線回折パターン

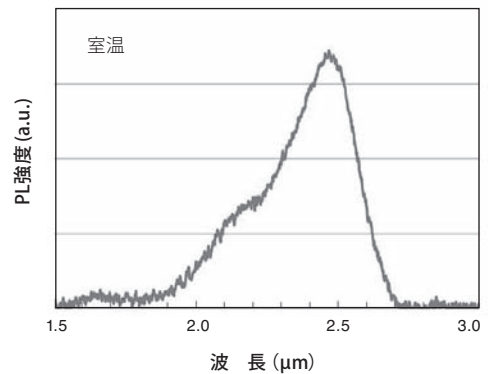


図12 InGaAs/GaAsSb量子井戸の室温PL

このタイプII量子井戸構造を吸収層に用いた図13に示すpin構造のセンサを作製した^{(21)~(24)}。面方位(100)のSドープInP基板上にSiドープInGaAsバッファ層、InGaAs/GaAsSb量子井戸受光層（層厚：5nm/5nm、量子井戸ペア数：250）、アンドープInGaAs層、SiドープInP層をOMVPE法で成長した。次に、SiNをマスクにしてZnの選択拡散により量子井戸受光層内にpn接合を形成した。p電極およびn電極には、それぞれAuZn、AuGeNiを用い、反射防止膜にはSiONを用いた。

受光サイズ15μmφデバイスの-40℃、VR = 60mVにおける暗電流は、5.3pA、暗電流密度として3μA/cm²が得られた。この暗電流は、受光面積に比例して変化し、暗電流の起源がデバイスの側面からの漏れ電流でなく、量子井戸吸

取層を含む、デバイス内部の生成再結合電流によるものであることが確認された。

受光サイズ $15\mu\text{m}\phi$ の InGaAs/GaAsSb 量子井戸型センサと HgCdTe センサの暗電流の温度依存性を図 14 に示す。開発したセンサの暗電流は、同一温度で比較した場合、HgCdTe センサの暗電流より約一桁小さく、タイプ II 量子井戸構造が低ノイズのセンサ材料として有望であることを示している。また、センサの波長感度特性も図 15 に示すように、タイプ II 構造の実効的なバンドギャップに対応する、 $2.5\mu\text{m}$ 程度まで検出可能であることが確認された。

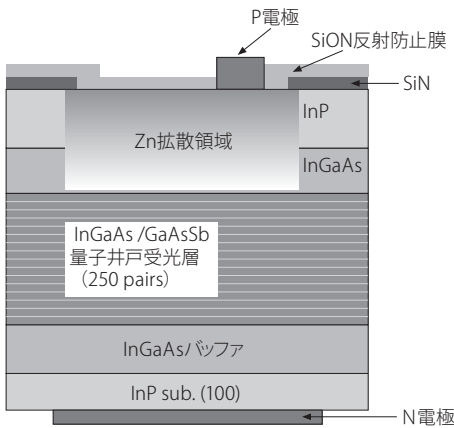


図 13 量子井戸受光素子の断面構造

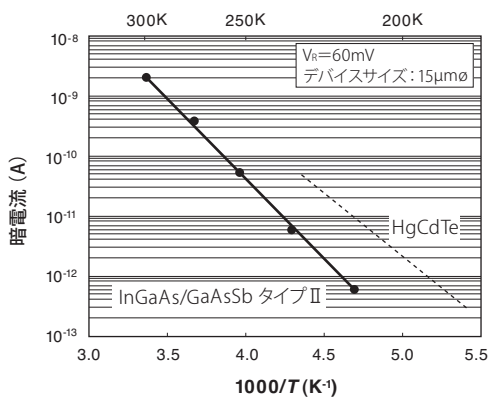


図 14 暗電流の温度依存性

上述の単素子センサを 320×256 素子集積した 2 次元アレイセンサを作製した。受光サイズは $15\mu\text{m}\phi$ 、画素は $30\mu\text{m}$ ピッチで読み出し回路 (ROIC) チップと In マイクロポンプによりフリップチップ接続している。センサは、ペルチェ素子と共にセラミックパッケージに実装した (写真 1)。暗電流は、 -40°C で $4 \sim 8\text{pA}$ とばらつきが小さく、光強度に対する出力のリニアリティに優れた低ノイズセンサが得

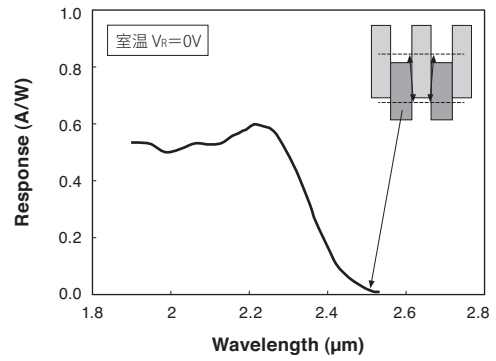


図 15 量子井戸センサの波長感度特性

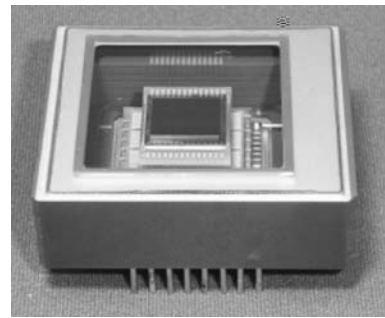


写真 1 近赤外イメージセンサ

られた。このセンサはカメラに組み込まれ、組成イメージングシステム「Compovision[®]」⁽²⁵⁾ という商品名で赤外領域イメージング分析機として販売を開始している。

4. 結 言

半導体量子井戸構造、超格子構造は、20 世紀最大の発明と言われる量子力学の原理を半導体結晶の中に応用したもので、通常のパルク材料では得られない特異な物性を持つ。この物性を応用することでデバイスの飛躍的な性能向上や新たな機能が創出され、我々の生活に大きな変革をもたらした多くの光エレクトロニクスデバイスが生まれ出されてきた。

本稿では、この量子井戸技術の光デバイスへの多様な展開として、高速動作を目指した光通信用半導体レーザ、変調器、環境や安心安全分野への応用が期待される高感度ガスセンシング用中赤外量子カスケードレーザ、ライフサイエンス分野への様々な応用が進む低ノイズ近赤外センサについて述べた。いずれのデバイスも量子井戸構造が発現する特長を応用することで、それぞれの波長領域でこれまでにない優れた性能や新しい機能を持つことが示された。このように、半導体の性質を自在に制御できる量子井戸技術は、今後も化合物半導体デバイスの可能性を大きく飛躍させる原動力になると考えられ、その魅力は尽きない。

用語集

※1 変調ドーピング

半導体ヘテロ構造において、特定の半導体層にのみ不純物を添加（ドーピング）すること。

※2 高電子移動度トランジスタ (HEMT)

半導体ヘテロ界面に2次的に生成される電子をチャンネルに用いる電界効果トランジスタ。

※3 共鳴トンネルトランジスタ

二重障壁構造を有し、入射する電子のエネルギーが障壁の内側の共鳴準位と一致した場合に障壁を通り抜けることが出来る現象を利用した高速トランジスタ。

※4 状態密度

あるエネルギーレベルの中で電子（正孔）が取ることできる状態の数。

※5 トンネル効果

粒子がポテンシャル障壁を一定の確立で通り抜ける現象。

※6 黒体輻射

外部からのあらゆる波長の光を吸収し、また発光する物体からの放射。

※7 多値変調

振幅、位相等を使い一回の変調（1シンボル）で複数のbitを伝送するデジタル変調技術。

※8 オージェ再結合

電子-正孔が再結合する際に、電子、または正孔がたたき出される三体衝突による非発光再結合の過程。

※9 縦光学フォノン (LOフォノン) 散乱

結晶の格子振動で電気分極が振動し（光学フォノン）外部の電磁波（赤外光）と相互作用すること。

※10 pin フォトダイオード

pn接合の間にノンドープ層（i層）を挿入した受光素子で低容量で高速動作する。

参考文献

- (1) L. Esaki et al. "Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors", IBM Journal of Research and Development, vol. 14 No1 p61 (1970)
- (2) R. Dingle et al. "Electron Mobilities in Modulation-Doped Semiconductor Heterojunction Superlattices", Appl. Phys. Lett. 33 p665 (1987)
- (3) T. Mimura et al. "A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/n-AlxGa1-xAs Heterojunctions", Jpn. J. Appl. Phys. 19, L225 (1980)

- (4) L. L. Chang et al. "Resonant tunneling in semiconductor double barriers", Appl. Phys. Lett. 24, p593 (1974)
- (5) J. P. van der Ziel, et al., "Laser oscillation from quantum states in very thin GaAs - Al_{0.2}Ga_{0.8}As multilayer structures", Appl. Phys. Lett. 26, 463 (1975)
- (6) Y. Arakawa et al. "Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current", Appl. Phys. Lett. 40 (11), p939 (1982)
- (7) J. Faist, et al. "Quantum Cascade Laser", Science Vol.264, 22, p553 (1994)
- (8) 林秀樹、「化合物半導体デバイス - 限りなき可能性を求めて -」、SEIテクニカルレビュー第173号、p14 (2008)
- (9) 勝山造、「光通信用半導体レーザーの開発」、SEIテクニカルレビュー第175号、p19 (2009)
- (10) H. Kamei et al., "OMVPE growth of GaInAs/InP and GaInAs/GaInAsP quantum well.", J. Crystal Growth, p567 (1991)
- (11) T. Katsuyama et al., "Highly uniform GaInP and AlGaInP/GaInP QW structures grown by organometallic vapor phase epitaxy.", Pro. of the 16th GaAs Related, Institute of Physics Conference Series, No 106, p.12 (1989)
- (12) 八木英樹 他、「BCB平坦化プロセスによるAlGaInAs/InPリッジ導波路型レーザーの26 Gbit/s 直接変調動作」、応用物理学会 (2009)
- (13) H. Yagi et al., "26 Gbit/s Direct Modulation of AlGaInAs/InP Lasers with Ridge-Waveguide Structure Buried by Benzocyclobutene Polymer", IPRM (2009)
- (14) 田和克久 他、「40Gbps EMLを用いた1.3μm帯LAN-WDMの伝送方式の検討」、電子情報通信学会 (2009)
- (15) J. Faist, et al. "Quantum Cascade Laser: Temperature dependence of the performance characteristics and high T₀ operation", Appl. Phys. Lett., 65, p2901 (1994)
- (16) 橋本順一 他、「中赤外 (7~8μm) 垂直遷移型量子カスケードレーザーの検討」、応用物理学会連合講演会、28a-p8-5 (2011)
- (17) 橋本順一 他、「中赤外垂直遷移型DFB量子カスケードレーザーの試作」、電子情報通信学会ソサエティ大会 (2011)
- (18) G. A. Sai-Halasz et al., "A new semiconductor superlattices", Appl. Phys. Lett., Vol 30, p651 (1977)
- (19) A. Yamamoto et al., "Optical properties of GaAs_{0.5}Sb_{0.5} and In_{0.53}Ga_{0.47}As/GaAs_{0.5}Sb_{0.5} type II single hetero-structures lattice-matched to InP substrates grown by molecular beam epitaxy", J. Cryst. Growth 201, p872 (1999)
- (20) R. Sidhu et al., "A long-wavelength photodiode on InP using lattice-matched GaInAs-GaAsSb type-II quantum wells", IEEE Photon. Technol. Lett. 17, p2715 (2005)
- (21) 稲田博史 他、「量子井戸型近赤外フォトダイオード開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、p129 (2010)
- (22) 猪口康博、「InGaAs/GaAsSbタイプII量子井戸型赤外センサの開発」、応用電子物性分科会研究会 (2011)
- (23) H.Inada et al., "MOVPE grown InGaAs/GaAsSb Type II Quantum Well Photodiode for SWIR Focal Plane Array", SPIE DSS (2011)
- (24) H.Inada et al. "Uncooled SWIR InGaAs/GaAsSb type II quantum wells focal plane array", SPIE DSS (2010)
- (25) 小林勇仁 他、「リアルタイム組成イメージングシステム」、オプトニュース、p63、Vol.5、No.2 (2011)

執筆者

勝山 造 : シニアスペシャリスト
伝送デバイス研究所 部長 工学博士
光通信用半導体光デバイス、及び新規応用分野開拓に向けた近赤外デバイス開発に従事

