

機能材料技術

パラダイムを変換するデバイス創出に向けて 異種材料融合や異種材料集積化などを研究

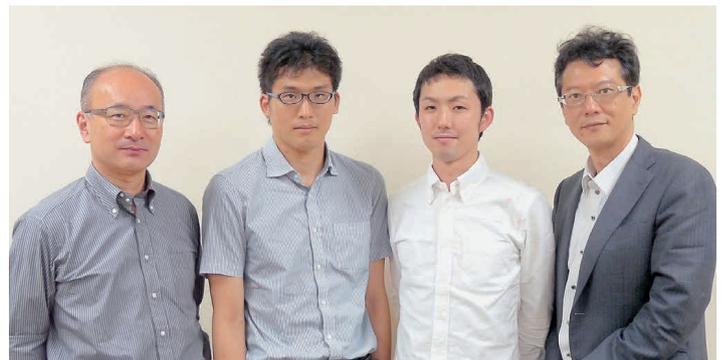
NTT先端集積デバイス研究所では、パラダイムシフトを誘発するデバイス創出に向けた異種材料融合や結晶・プロセス技術の研究開発を進めている。ここでは、「ヘテロジニアス集積型石英系PLC（平面光波回路）」「シリコン基板上集積レーザ」「リン化インジウム（InP）系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ（HBT）の高速化」の3つの事例を通じて、同研究所の機能材料開発の取り組みを紹介する。

異種材料の組み合わせで 飛躍的な特性向上が可能になる

NTT 研究所は、1980 年代初頭から石英系ガラス導波路を用いた「石英系 PLC（平面光波回路）」の研究やデバイス開発に取り組んできた。光通信システムが高度化するにつれて光デバイスの高機能化や多機能化も進んでおり、石英系 PLC にも様々な機能が集積されるようになってきている。当初は、外部からエネルギーを供給しなくても通過する光に対して何らかの作用を及ぼせる「パッシブ機能」が主に集約されてきたが、最近

では送受信機能なども集約され始めている。

石英系の素材は、低損失性や偏波・位相制御性に優れている。そのため、パッシブ機能を提供するパッシブ回路や、フォトダイオード（PD）などの光素子を集約する光電子集積プラットフォームに適している。しかし表 1 に示したように、



NTT 先端集積デバイス研究所 機能材料研究部
[左から] 上席特別研究員 松尾 慎治氏、研究員 星 拓也氏
研究員 倉田 優生氏、部長 児玉 聡氏

とする機能や性能に合わせて複数の材料や光デバイスを組み合わせるのが基本である。

従来は、レーザダイオード（LD）や PD、レンズ、ミラーなどの光素子を個別作製し、それを石英系 PLC に実装する方式が主に使われていた。これは歩留まりの観点で有利な方法だが、光素子を高精度に実装する必要があるほか、光の結合距離が長くなることで、小型化や高密度化が難しい問題があった。

そこで NTT 先端集積デバイス研究所（以下、先デ研）を含む NTT 研究所では、図 1 に挙げたような「ヘテロジニアス集積技術」を使った石英系 PLC 作製について研究してい

材料	光源	受信器	変調器	パッシブ回路	電子回路との親和性
InP	◎	◎	○	△	-
GaAs	◎	◎	○	△	-
LN	-	-	◎	-	-
SiO ₂	-	-	-	◎	-
Si	-	○	○	○	○
ポリマー	-	-	-	○	-

表 1 主な光デバイス材料の特徴

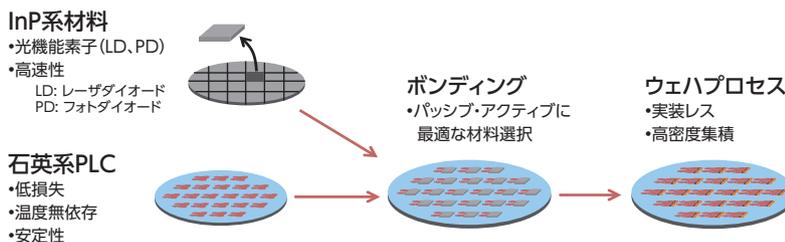


図 1 ヘテロジニアス集積技術による石英系 PLC の作製の流れ

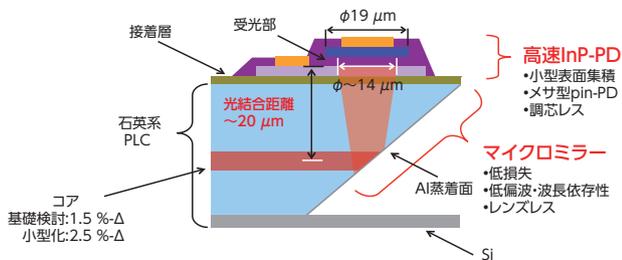
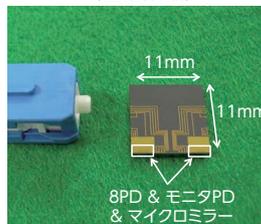


図2 高速フォトダイオード (PD) 集積部の構成

集積型PLCのチップ写真
(波長板挿入前)



PD集積部の電子顕微鏡写真

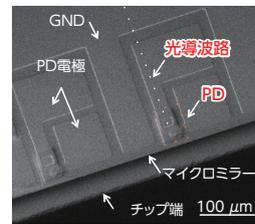


図3 集積型PLCのチップ写真と電子顕微鏡写真

る。「ヘテロジニアス集積技術は、プラットフォームとなる基板に異種材料をボンディングで載せてからプロセス加工技術で光素子を作製していく方法です。これまで主にシリコンをプラットフォームにする研究が進められてきましたが、これを石英系プラットフォームにも適用できれば、石英系 PLC の高機能化や高密度集積化に道が拓けます。」(機能材料研究部 研究員 倉田 優生氏)

2012 年には、同集積技術を利用して石英系 PLC とリン化インジウム (InP) を用いた高速 PD を同一チップに集積した高速受信デバイスを作製した。PD 部分の構成は図 2 のようになっている。PLC のチップ写真と PD 集積部の電子顕微鏡写真を図 3 に挙げた。PD などの光素子を高集積できており、チップも小さくできていることが分かる。

「InP 系の材料は特性を重視して選択しました。受光や発光においては InP 系が現時点で最も優れています。それと幅広く使われている石英系 PLC を組み合わせることで良い特性のデバイスを作製できると考えました。作製済みの光素子を貼り付けるハイブリッド型での実現例はあ

りますが、石英系 PLC 基板へ異種材料を付与してから光素子を作製する、モノリシック型に近い方法でこうした光デバイスを作製したのは、我々が世界初です。」(倉田氏)

作製した InP PD は、結合損失が 1dB 以下、光電応答特性が 25GHz 以上と狙い通り高い性能を示した。さらに集積した 8 つの PD で均一な受光特性を確認したという。

シリコン上にレーザ活性層作製鍵となるのは活性層の厚さ

CMOS LSI の高集積化に伴って、シリコンのプロセス加工技術は驚異的な進歩を遂げた。一方、光集積回路の集積度はまだ非常に低い。そこで、シリコンのプロセス加工技術を活用してシリコンに光導波路構造を作り、そこに様々な光素子を集積する「シリコンフォトニクス」の研究が進められている。

シリコンは低価格で丈夫な優れた材料だが、光素子作製の観点で見ただけの場合の欠点として、ほとんど発光しない材料であることが挙げられる。そこで、LD などの光素子を作製する場合には、InP などの材料で別途作製した光素子を実装するか、シリ

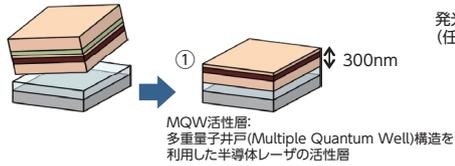
コンウエーハに InP などの材料を貼り付けて、それを加工して光素子を作製する必要がある。前者は高集積化が難しい問題があるため、基本的には後者を選択したい。

しかしここで問題がある。MQW 活性層 (レーザ発振の元となる層) の主な材料である InP は脆く、さらにシリコンとは熱膨張係数が違うため、シリコンと貼り付けると、貼り付け時の温度 (600 ~ 1000℃) が冷める際に割れてしまうのである。

先デ研では同問題の解決に向けた研究を開始し、InP の層を 300nm 程度と薄くすれば割れにくくなることを突き止めた。「とにかく薄くすることが大事ということで、MQW 活性層の作り方を根本的に変えました。普通は縦方向に 3 つの層を積み上げてダイオードを作りますが、これを横方向に並べる構造にして厚みを減らしました。」(同研究部 上席特別研究員 松尾 慎治氏)

この発見と工夫によって MQW 活性層をシリコン基板上に作製できるようになった。当初は MQW 活性層を接合する方法で作製していたが、これは生産性が悪い。そこで先デ研では、シリコン基板上に薄い

MQW活性層を接合する従来手法



InPテンプレート上でMQW活性層を成長させる新手法

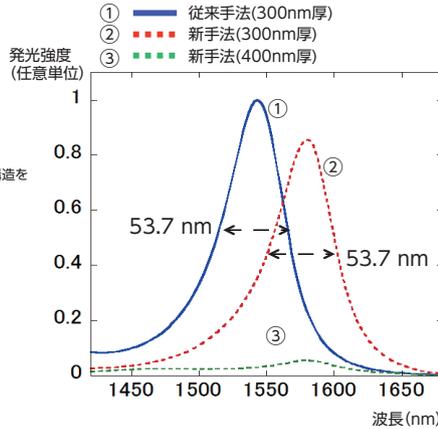
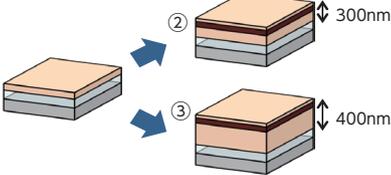


図4 半導体レーザ活性層をシリコンプラットフォーム上に作製する手法

InP テンプレートを置き、その上で結晶を再成長させて MQW 活性層を作ってからデバイスを作製する手法の開発に取り組んでいる。

活性層の作製方法と厚さによって、発光強度がどのように変わるかを調べた結果が図4である。新手法で従来手法と同等の発光強度を得られていることや、厚さが増すと発光強度が下がることなどが分かる。

ベースの組成を傾斜させて InP系HBTの高速化を実現

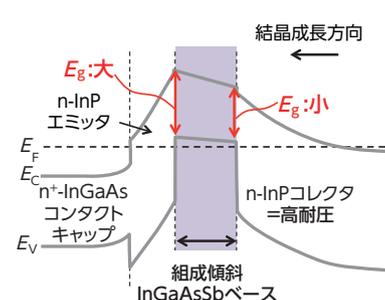
通信システムの高速化などに伴って、高耐圧と高速性を兼ね備える

InP系のヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)の需要が高まっている。通信のさらなる高速化に対応できるように、InP系HBTをもっと高速化させたいというニーズも出てくるようになった。

先デ研では、インジウム、ガリウム、ヒ素、アンチモンの4つの原料で構成されるベース層を持つInP系HBTの高速化技術を2014年に開発した(図5)。

同技術の基本コンセプトは、ベースの組成を徐々に変化させることでエミッタ側からコレクタ側に向けてバンドギャップが徐々に小さくなる

InP系HBTの構成例とエネルギーバンド図



高耐圧と高速性を兼ね備えるInP系のヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)をさらに高速化する方法としてベースの組成を徐々に変化させた「組成傾斜ベース」の利用がある

エミッタ側からコレクタ側に向けてバンドギャップ(EcとEvの差)が徐々に小さくなるようにベースの組成を変化させると、疑似電界が生じることで電子が加速されてHBTを高速化できる

ベース材料選択のポイント
①大きなバンドギャップ変化が効果的に得られる
②変化させる原料種は少ない方がよい
⇒結晶成長時の制御が簡単になるため

図5 ヘテロ接合バイポーラトランジスタの高速化手法

ようにすることである。こうした組成傾斜ベースでは疑似電界が生じることで電子が加速されるため、HBTの動作が高速化される。

「組成傾斜ベースによるHBTの高速化手法そのものは、半導体の教科書に載っているほどの定番手法です。しかし、これを4つの原料で構成されるベースで実現するのは簡単ではありませんでした。」(同研究部 研究員 星 拓也氏)

単純に考えると、結晶成長時に供給する各材料のガスの量を制御することで目的とする組成傾斜ベースを作製できるように思える。しかし実際にはこう簡単にはいかないという。「そもそも4つのガスの供給量を厳密に制御すること自体が困難です。さらに各ガスの濃度が変わると、それによって反応が複雑に変化してしまいます。また、微量添加(ドーピング)原料である CBr_4 (四臭化炭素)は、他の材料を削り取るエッチング効果を持っています。安定した品質の組成傾斜ベースを作製するには、これらをすべて考慮してガス供給量を厳密に制御しなければなりません。これは現在の技術では難し

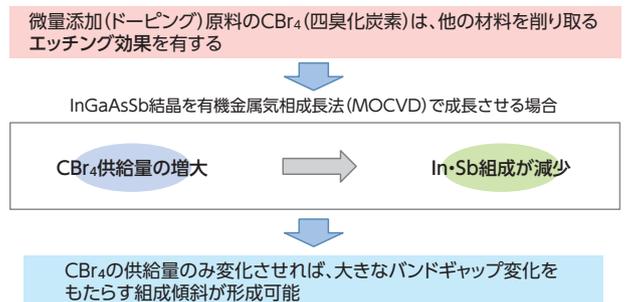


図6 微量添加材料のエッチング効果を活用

いですし、大量生産にも向きません。」(星氏)

しかし研究を進めるうちに興味深い現象が見つかった。ドーピング原料である CBr_4 の供給量が増えると、結晶内のインジウムとアンチモンの組成が主に減少することが分かったのである。これは前述のエッチング効果によるものだが、その効果が原料ごとに異なるために生じる。

都合が良いことに目的とする組成傾斜ベースは、結晶内のインジウムとアンチモンの量をコレクタ側からエミッタ側に向けて徐々に減らすことで作製できる。つまり、他の原料ガスの供給量は一定にしたまま、 CBr_4 の供給量だけを変化させれば組成傾斜ベースを作製できると分かったのである (図6)。

これは製造面で非常にアドバンテージがある画期的な発見である。先デ研は、同研究所が確立している最先端のプロセス加工技術を適用し、同手法で実際に HBT を作製した上で性能を検証した。その結果、組成傾斜ベースを持つ HBT の方が、電流利得遮断周波数と最大発振周波数のいずれも高い値を示すことが分かった (図7)。「個々の性能だけを見ると負けているところもありますが、製造のしやすさと耐圧、高速性をトータルで評価すると、この材料系を選択した我々に優位性があると考えています。」(星氏)

メタルサブコレクタの採用で InP 系 HBT の放熱性を向上

先デ研では、InP 系 HBT の高速

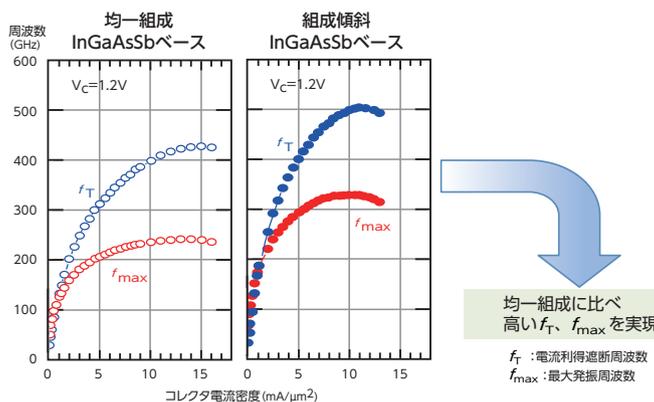


図7 組成傾斜ベースによる高速化を実現

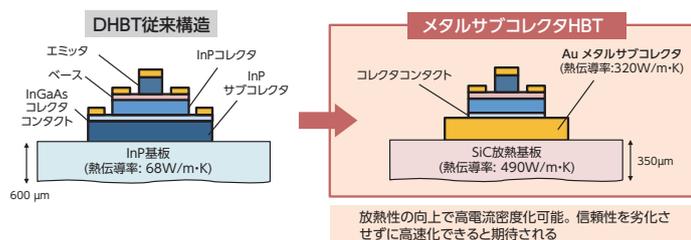


図8 メタルサブコレクタによる放熱性の向上

化につながる別の技術も開発した。

InP 系 HBT を高速に動作させると多量の熱が発生する。しかし HBT の従来構造は放熱性が悪く、発生した熱をあまり逃がせなかった。熱によって信頼性が低下するなどの問題が生じる恐れがあるため、結果的にあまり高速には動作させられなかったのである。

開発した新構造では、熱伝導率の高いシリコンカーバイド (SiC) を放熱基板に採用する。HBT 本体と放熱基板は、同様に熱伝導率が高い金 (Au) を使ったメタルサブコレクタで接合する (図8)。「サブコレクタを金属にしたことで電気抵抗を小さくできました。これによる性能向上も期待できます。また、この新構造では、サブコレクタの金属 (ここでは金) を

HBT 本体と放熱基板の接合層として使うこともポイントです。」(星氏)

メタルサブコレクタを使った新構造を実現できた背景には、貼り合わせ技術の進展があるという。「当研究所では今後も、こうした結晶成長技術や貼り合わせ技術、プロセス加工技術などを磨き、それによって異種材料融合デバイスや異種材料デバイス集積化についての研究を進めていく考えです。これまで組み合わせられなかった材料を組み合わせられるようになれば、従来にない高機能・高性能なデバイスを生み出せる可能性があります。パラダイムシフトを誘発するような画期的なデバイスを生み出すことを目標に、様々な材料の組み合わせにチャレンジしていきます。」(同研究部 部長 児玉 聡氏)