

# 新しい窒化物半導体デバイス

NTT物性科学基礎研究所では、窒化物半導体を利用した新しいデバイスの開発を行っています。ここでは、高記録密度DVDや高精細レーザープリンタの大幅な高速化や光・電子集積回路の作製が可能な窒化物面発光型レーザーダイオード、および出力が極めて大きな窒化物半導体ヘテロ接合バイポーラトランジスタを紹介します。

まきもと としき  
牧本 俊樹

NTT物性科学基礎研究所

## 窒化物半導体の研究

現在、シリコン(Si)やガリウム砒素(GaAs)などの半導体の研究開発が盛んに行われ、さまざまなデバイス用の材料として使われています。これらの従来の半導体に比べ、窒化ガリウム(GaN)に代表される窒化物半導体には、バンドギャップが大きい、結晶が硬い、高い電圧をかけても壊れない、電子の(飽和)速度が速い、などの特徴があります。NTT物性科学基礎研究所では、これらの窒化物半導体に関する基本的な物性を研究するとともに、その物性を生かした新しいデバイスを開発しています。

## 窒化物半導体を用いた短波長面発光レーザーダイオード

まず初めに、窒化物半導体を用いて面発光型レーザーダイオードを作製した例について紹介します。

窒化物半導体のバンドギャップは大きいので、従来の半導体よりも短波長のレーザー光を出すレーザーダイオードを作製することができます。これらの短波長レーザーダイオードを用いれば、高

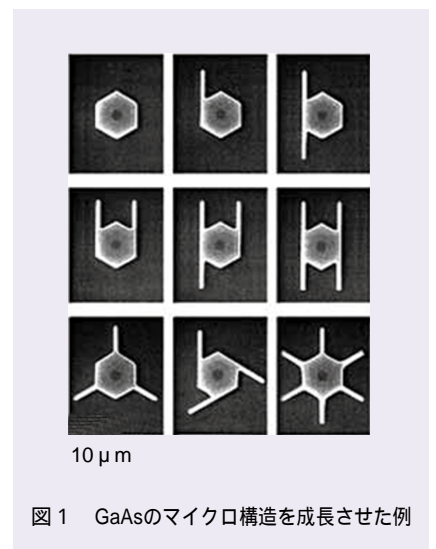
記録密度のDVD(Digital Versatile Disk)や高精細な印刷が可能なレーザープリンタを作製することができます。

一方、通常の半導体レーザーダイオードでは、基板に対して平行にレーザー光を出します。これに対して、面発光レーザーダイオードは基板に対して垂直にレーザー光を出します。したがって、1つの基板上に多数のレーザーダイオードを並べたレーザーレイの作製やレーザーダイオード特性の検査を同一基板上で簡単に行うことができます。以上のことから、窒化物半導体を用いて短波長用の面発光レーザーダイオードを作製することができれば、レーザーレイを作製することにより、多数のレーザーによる並列処理が可能になり高記録密度DVDや高精細レーザープリンタの大幅な高速化が期待できます。

通常的面発光レーザーダイオードには、反射率の高い多重反射膜が必要であると同時に、この膜の抵抗が低くなければなりません。現在のところ、残念ながら、窒化物半導体においてはこのような反射膜がないため、窒化物半導体面発光レーザーダイオードを作製することができませんでした。

## 半結晶成長面と半導体マイクロ構造

NTT物性科学基礎研究所では、GaAsなどの化合物半導体の結晶成長に関する基礎研究を行ってきました。そして、これらの半導体結晶には成長しやすい方向があることを見つけました。成長しやすい方向は結晶成長条件に大きく依存しますので、成長する際の温度や圧力などで人為的に制御することができます。GaAsの結晶を用いてさまざまなマイクロ構造を成長させた例を図1に示します。半導体の





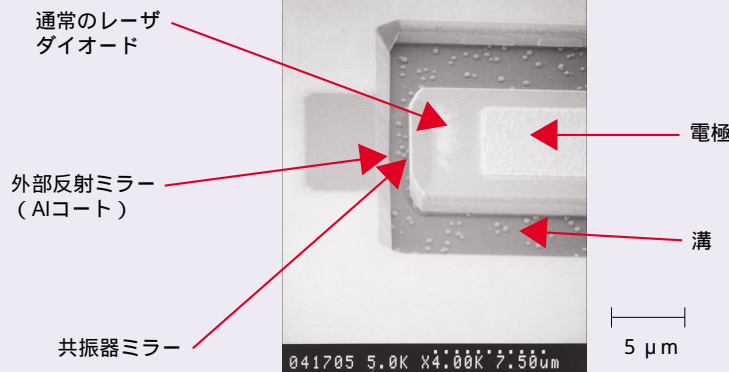


図4 作製した窒化物半導体の面発光型レーザダイオードの電子顕微鏡写真

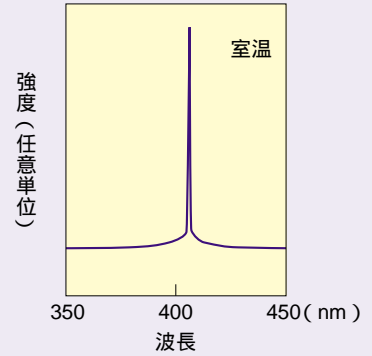


図5 窒化物半導体を用いて作製した面発光型レーザダイオード(室温)発光スペクトル

ドを初めて作製することができました。

今回の研究結果から、窒化物半導体のレーザダイオードを同一基板上に並べたレーザアレイを簡単に作製することが可能となります。並べたレーザの数だけ並列処理が可能であるとなれば、高記録密度DVDや高精細レーザプリンタの大幅な高速化が期待できます。

### 窒化物半導体ヘテロ接合バイポーラトランジスタ

次に、窒化物半導体を利用した電子デバイスの例として、高出力トランジスタについて紹介します。

今後の無線通信の発展には、高周波領域において高出力を持つトランジスタがますます重要となります。高い出力を得るためには、高い電圧で大きな電流を流すことが必要です。しかしながら、SiやGaAsなどの従来の半導体で作製したトランジスタでは、高い電圧を加えると壊れてしまうために、大きな出力を得ることはできませんでした。したがって、高い電圧を加えても壊れない窒化物半導体がトランジスタの材料として注目されています。一方、トランジスタにはさまざまな種類があります。その中でも、ヘテロ接合

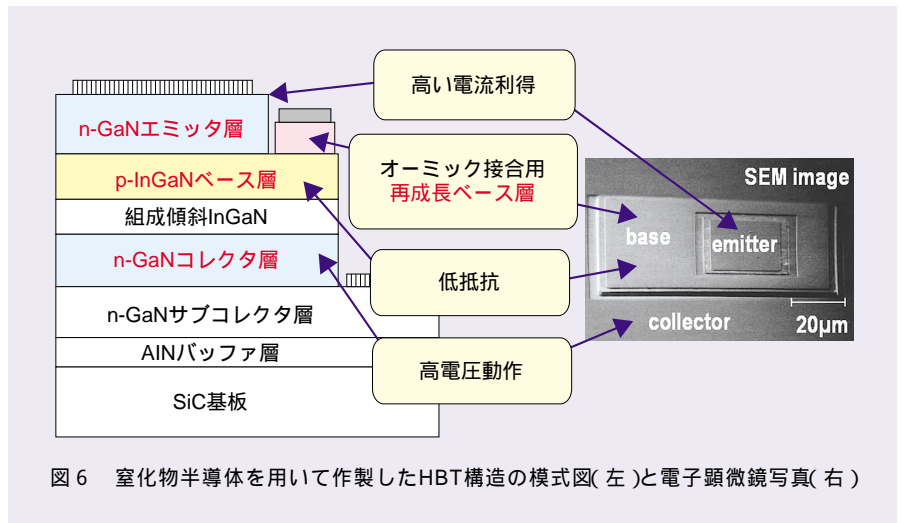


図6 窒化物半導体を用いて作製したHBT構造の模式図(左)と電子顕微鏡写真(右)

バイポーラトランジスタ(HBT)には、トランジスタの大きさが小さくても大きな電流を流すことができるという特徴があります。これらのことから、窒化物半導体を材料としてHBTを作製することができれば、高い電圧を加えられるとともに、大きな電流を流すことができるため、極めて高い出力を期待することができます。

このように、窒化物半導体HBTは高出力トランジスタとして期待されていますが、従来の研究では良好な特性を示すHBTを作製することができませんでした。良好なHBTを作製するためには、高品質の結晶成長、HBT構造中の不純物プロファイルの制御、

高度なHBT作製プロセスが必要だからです。従来の研究で作製されたHBTでは、ベース層の抵抗が高いこと、および、作製プロセスで発生する欠陥が問題となっていました。そこで、NTT物性科学基礎研究所では、従来の研究で使われていたp型GaNに比べて、10分の1の抵抗を持つp型InGaNをベース層に用いました。さらに、作製プロセス中で発生する欠陥の影響を防ぐために、ベース層を再成長しました。

本研究で作製したHBTの構造を図6に示します。低抵抗のp型InGaNベース層および再成長ベース層を用いています。さらに、エミッタ層には電流利得(電流増幅率)を高くするた

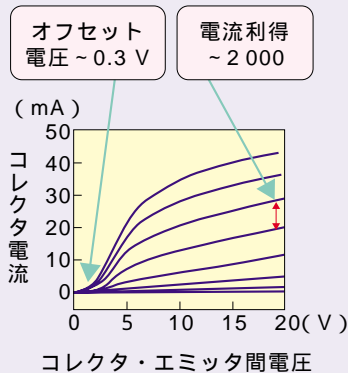


図7 窒化物半導体HBTの電流-電圧特性

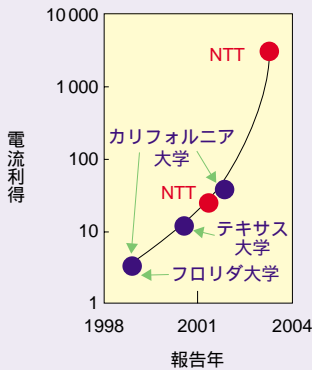


図8 窒化物半導体HBTの電流利得の変遷

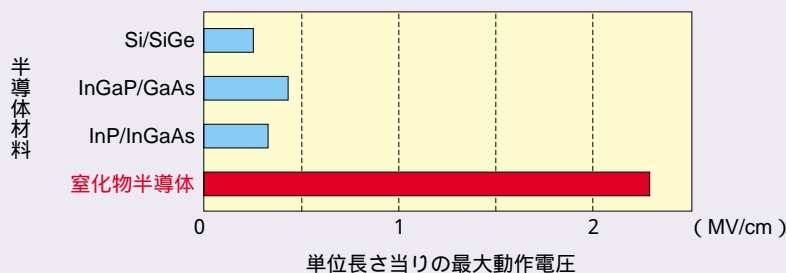


図9 さまざまな半導体材料で作製したHBTにおける単位長さ当りの最大動作電圧

で0.37 Aの直流電流を流すことができました。この実験結果は1 cm<sup>2</sup>当り23万Wもの高出力動作が可能であることを示しており、窒化物半導体HBTに期待される高出力特性が初めて確認されました。このような高出力特性は、通信用トランジスタばかりでなく、動作周波数が低いパワーエレクトロニクス用トランジスタとしても有望だと思われま

す。図6に示したように、窒化物半導体HBTの構造は比較的複雑です。今後は、結晶成長条件や作製プロセスを最適化するとともに、高周波特性に関して調べる予定です。

めのGaNを用いており、コレクタ層には高電圧動作が可能なGaNを用いています。窒化物半導体HBTの電流電圧特性を図7に示します。コレクタ電流が立ち上がる電圧は0.3 Vであり、従来の10分の1以下まで減少させるとともに、電流利得を2000まで増加させることができました。窒化物半導体HBTの電流利得の変遷を図8に示します。1998年には、カリフォルニア大学とフロリダ大学が初めての窒化物半導体HBTに関する報告を行いましたが、電流利得は3でした。その後、年ごとに電流利得が増加しましたが、2003年には従来よりも100倍以上も高い電流利得をNTT物性科学基礎研究所が報告し、窒化物半導体HBTの飛躍的な特性向上を達成しました。

### 窒化物半導体HBTの高出力動作

次に、窒化物半導体HBTに期待される高い電圧動作および大きな電流動作に関して調べました。さまざまな半導体材料で作製したHBTに関して、コレクタ層の単位長さで規格化した最大動作電圧（最大コレクタ・エミッタ間電圧）を比較した結果を図9に示します。従来の半導体材料で作製したHBTに比べて、窒化物半導体で作製したHBTは10倍以上の電圧での動作が可能であることが分かりました。一方、HBTの動作電流（コレクタ電流）はエミッタ層の面積に比例し、その大きさが1 cm<sup>2</sup>当り7000 Aにも達することが分かりました。そして、エミッタ層の面積が90 μm × 50 μmの窒化物半導体HBTでは、動作電圧28 V



牧本 俊樹

今回紹介した2つのデバイスは、窒化物半導体の結晶成長の研究あるいは物性研究を行っている過程で生まれたものです。将来、これらのデバイスが世の中でお役に立てばと思っています。

問い合わせ先  
NTT物性科学基礎研究所  
機能物質科学研究部  
薄膜材料研究グループ  
TEL 046-240-3421  
FAX 046-240-4729  
E-mail makimoto@nttbl.jp