

高専研究室紹介

松江高専における半導体分野の取り組み

松江工業高等専門学校
電気情報工学科 教授 北田 貴弘きた たかひろ

1. はじめに

「ちょっと困ったなあ」。原稿執筆を引き受けた後に、依頼書に参考として添付されていた他高専で取り組まれている大変立派な教育プログラムの記事を拝見した際の感想です。筆者は松江高専に着任してちょうど2年になります。これまでに国立大学等で半導体デバイスの教育研究に長く携わっていましたが、本校着任の当初に率直に感じたのは、「こりゃあ今までの実験的な研究は相当厳しいなあ」でした。所属する電気情報工学科の学生さんにヒアリングすると、近隣に原子力発電所や風力発電設備があることからかエネルギー分野に興味を持っていますという声をよく聞きます。また、高専ロボコンの影響でロボット技術やその制御技術に関心を持つものも多く、いまや生活必需品となったスマホで多種多様なアプリを日常的に操作することから人工知能(AI)を駆使する情報処理分野にも興味を惹かれるようです。これらを支える先端半導体技術は重要な国家戦略の一つですが、直接的に触れる機会がないためかあまりピンと来ていないように感じます。

本稿では、少しでも半導体デバイスを体感してもらおうと本科3年生に対して試行的に開催したLED基礎セミナーを紹介します。発光ダイオード(LED)は光半導体デバイスではありますが、半導体が機能する様子を視覚的に感じられるように工夫することで、半導体分野に興味をもつきっかけになってくれればと思っています。もう一つ、本科5年生が行った卒業研究を紹介します。筆者らが開発したユニークな結晶成長技術を活用する全く新しい光非線形デバイスをデザインし、その特性を数値計算により評価しました。量子情報技術のキーとなる量子もつれ光子対を高効率に生成するデバイスで、実現できれば関連分野にそれなりのインパクトを与えられると考えています。

2. 光半導体を体感するLED基礎セミナー

「光るものは人を魅了する」という安直な発想で、光半導体を体感するLED基礎セミナーを試行的に開催しました(図1)。対象は、電気情報工学科の3年生としました。この学年になると、電子回路の実習で様々な電子部品に触れる

ようになり、計測機器の取り扱いにも習熟してきます。LEDに関していいますと、半導体のpn接合で構成されるLEDには極性があり、アノード電極とカソード電極を考慮して配線すること、LEDに流す電流値とその電圧降下を考慮して適切な値の保護抵抗を挿入することなどの知識を低学年から実践的に学んでいます。しかし、実際のLEDのデバイス構造や、使われる半導体材料の種類、その物性といった詳細なことについては学んでいません。デバイス構造は、模式図を示すことで比較的容易に理解してくれますが、その現実的なスケール感と発光する半導体をイメージしづらいように感じます。

そこで、半導体チップがむき出しとなるように研磨した5mm砲弾型LEDを実体顕微鏡で観察させました。LEDは、赤、緑、青と色の異なる3種類を用意しました。それぞれのLEDについて時折ルーペで観察しながらプラスチック用やすりで粗研磨し、最後に2000番の耐水ペーパーで研磨表面を図2aの写真のように仕上げています。緑色LED断面の実体顕微鏡像を図2bと2cに示します。カソード電極と反射鏡を兼ねるすり鉢状の金属中央に半導体チップが配置され、アノード電極と半導体チップがボンディングワイヤによって接続されている構造がよくわかります。LEDの駆動には、乾電池と可変抵抗を含むトランジスタ増幅回路で構



図1 光半導体を体感するLED基礎セミナーの様子

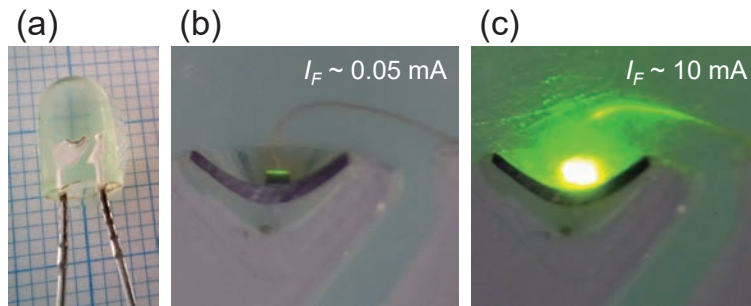


図2 (a) 断面研磨した緑色 LED (b), (c) 発光中の LED 断面の実体顕微鏡像
駆動電流値はそれぞれ ~ 0.05 mA と ~ 10 mA

成する簡易な可変直流電源を使いました。LED に加わる電圧と流れる電流値をデジタルマルチメータでモニタしながら発光の様子を観察させました。図2c に示すように電流値を高めると半導体チップが極めて明るく光ることを体感し、電流値と明るさの関係も直感的に理解してもらいました。図2b の微弱な電流値での発光の様子を観察すると、半導体チップは一様に光るわけではなく、その表面のみが光っていることがみてとれます。

また、LED を明るく光らせるために、半導体表面に工夫を凝らした薄膜を形成していることを説明し、いかに半導体結晶の薄膜形成技術が重要であるかを感じてもらいました。赤色と緑色の LED は、ともに半導体チップが黒くて半導体材料の違いがわかりにくいですが、青色 LED は透明であるので材料が随分と異なるものだとわかります。また、アノード電極に加えて、カソード電極もボンディングワイヤで半導体チップと接続されていることから、青色 LED の半導体薄膜の土台となる基板に導電性がないということも知ってもらいました。さらに、デジタルマルチメータの出力を PC に取り込んで、3種類の LED の電流-電圧曲線を描いてもらい、電流が立ち上がる電圧値(順電圧)と色を決定づける発光波長との関係を実験的に示してもらいました。そのほか、赤外線リモコンの信号パターンをオシロスコープで観測してもらい、赤外線通信という LED の応用例も体感してもらいました。

参加してくれた学生さん達からは、「小さな LED の中に、さらに小さな半導体が入っていて、その半導体の上の部分だけが明るく光っていることにとても驚きました。普段当たり前に使っている LED にも多くの技術が詰まっていることが分かり、とても良い学びになりました」、「普段みる機会のない LED の内部を見ることができ、新鮮で面白かったです」、「LED の中を顕微鏡で覗いたら、想像以上に小さい半導体があったので驚きました。リモコンが出す赤外線の信号波形がオシロスコープではっきりと見れたのが面白くて、普段使っている家電の中身にあるハイテクが知れて感動しました」、「発光している部分がとても小さいことに驚

き、半導体の仕組みで光がでていると知って技術のすごさを感じました。身近な機器に高度な技術が使われていると分かり、電子回路や半導体についてもっと学びたいと思いました」といった感想をくれました。概ね興味・関心をもって楽しんでくれていたようで、技術や機能を学ぶ上で可視化することはとても大切と改めて思わせられました。

3. 卒業研究から：量子もつれ光子対を生成する非線形光デバイス

卒業研究を紹介したいと思いますが、まず初めに背景となるユニークなエピタキシャル結晶成長技術【北田他, 材料 68 (10), 739-744 (2019)】について述べます。光半導体であるガリウムヒ素 (GaAs) は、III-V 族化合物半導体の代表格で、その結晶構造は立方晶の閃亜鉛鉱型です。Ga 原子と As 原子が互いに共有結合をしています。結晶格子の対角方向である [111] に沿って原子の結合をみると、Ga 原子は上向きに結合を1本、下斜め向きに3本の結合をもちます。その反対方向に沿ってみると、今度は As 原子が全く同じ結合の配置関係をもちます。[111] 方向に裏表があることを示していて、前者で上向きを法線ベクトルする面を (111)A 面、後者を (111)B 面と呼んでいます。高指数 (113)A 面は、(001)面を (111)A 面に向かって傾けた面で、(001)面と (111)A 面による微細なステップ構造で形成されます。同様に (113)B 面は、(001)面と (111)B 面によるステップ構造となります。図3に示すように、(113)B GaAs 基板上でのエピタキシャル成長の途中で IV 族元素であるゲルマニウム (Ge) の極薄層を挿入することで、Ga と As の配置を入れ替えて成長させることが原理的には可能です。この手法を高指数面上の副格子交換エピタキシー成長技術と呼んでいます。極薄 Ge 層の上下で Ga 原子と As 原子の配置が入れ替わることは、結晶方位が180度反転する、すなわち、エピタキシャル成長の途中で裏面から表面にひっくり返ることに相当します。

実際にエピタキシャル成長の実験を行った結果を図4に示します。方位反転の確認は、成長後に硫酸系の異方性エッ

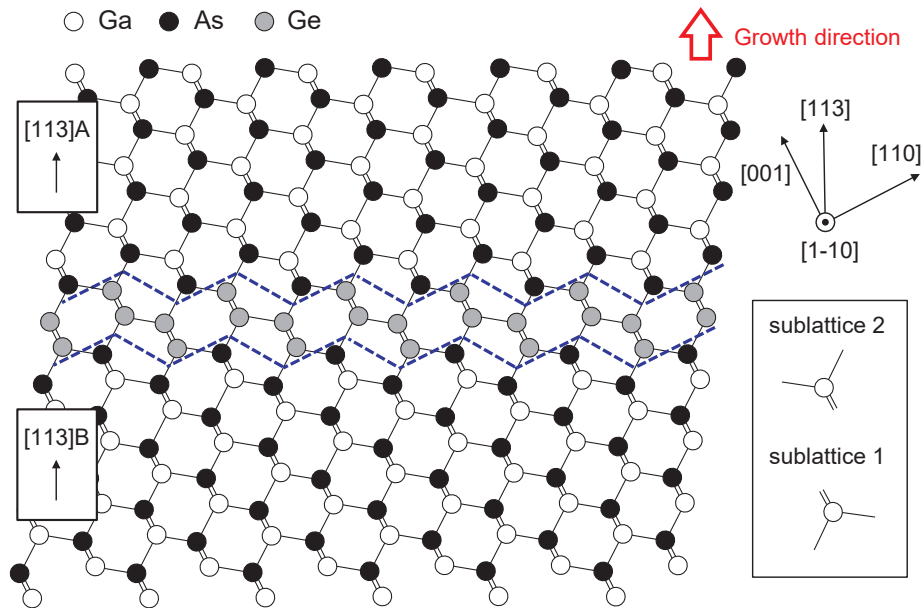


図3 原子配列で示す (113)B 基板上の GaAs/Ge/GaAs 構造による副格子交換エピタキシー (Ge 層の上下で Ga と As の配置が入れ替わる) 成長の概念図

チャントでメサ形状に加工し、その断面を電子顕微鏡 (SEM) で観察することで行いました。参照としてエピ膜のない (113)A および (113)B 基板をメサ加工した断面を図4aに示します。(113)A 基板は逆テーパ型の断面形状 (逆メサ) を示すのに対し、(113)B 基板は順テーパ (順メサ) となります。(113)B および (113)A 基板上での GaAs のエピタキシャル成長の途中で厚さ 3 nm の Ge を挿入した試料 (GaAs/Ge/GaAs) の結果を図4bに示します。(113)B 基板上に成長した場合、Ge 層より下では参照の (113)B 基板の結果と同じ順メサの形状がみられるのに対して、Ge 層より上では (113)A 基板と同じ逆メサの形状がみられます。Ge の挿入によって副格子の配列交換が行われ、結晶方位が反転していることを示しています。

一方、(113)A 基板上では Ge 層の上下でともに逆メサの形状であることから、副格子の配列交換が生じていません。厚さ 3 nm の Ge 層の両側に 5 nm のアルミニウムヒ素 (AlAs) を挿入した試料 (GaAs/AlAs/Ge/AlAs/GaAs) の結果を図4cに示します。図4bの GaAs/Ge/GaAs の結果とは反対に、(113)B 面では Ge 層上下で順メサの形状を示すことから副格子の配列交換が生じておらず、(113)A 面では、Ge 層より上では順メサ、下では逆メサの形状であるので副格子の配列交換が生じて結晶方位が反転していることがわかります。Ge 層堆積後の GaAs あるいは AlAs の成長初期には、(113)B 面と (113)A が混在していますが、成長が進むにつれ一方のドメインはその境界構造によって自己消滅するとモデル化できます。GaAs と AlAs では境界構造が違って消滅するドメインが異なると考えられますが、解明には

更なる検証が必要と考えています。

上述した結晶成長技術は、二次的非線形光学効果を利用する面型の非線形光学デバイスに活用できます。第二高調波発生 (SHG) や差周波発生 (DFG) は、波長変換によく利用されますが、面直入射とするには結晶薄膜の反転対称性が破れている必要があります。(001)面と (111)A あるいは (111)B 面で構成される高指数 GaAs 基板上のエピタキシャル薄膜はこの条件を満たします。一般に、結晶に入射する

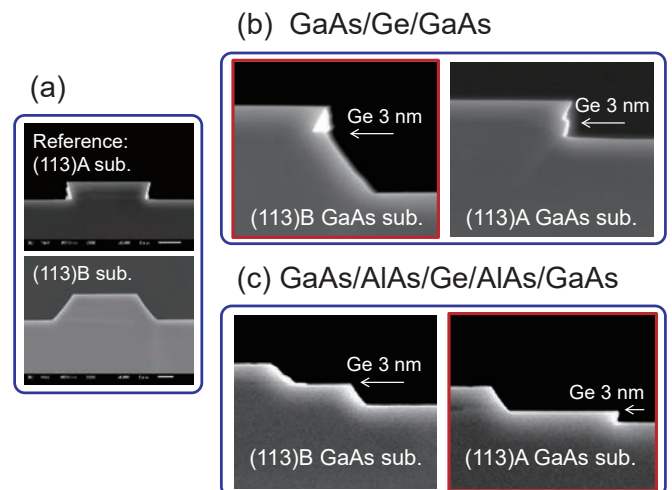


図4 (113)B および (113)A 基板上にエピタキシャル成長した試料の異方性ウエットエッチングによるメサ形状の断面 SEM 像 (a) エピ膜のない参照基板 (b) GaAs/Ge/GaAs 構造 (c) GaAs/AlAs/Ge/AlAs/GaAs 構造



基本波光と生成される信号光の位相速度は、屈折率の波長分散のために異なります。このため基本波光が結晶内を伝播して発生する信号光の位相は徐々にずれていき、一定距離を伝播する毎に増加と減少を繰り返します。強度を高める手法の一つに、周期分極反転構造を用いた疑似位相整合法があります。本来ならば伝播してきた信号光とその地点で発生する信号光とが位相のずれによって互いに打ち消しあう領域を、非線形分極の向きを反転することで強め合う領域に変えてしまう手法です。この非線形分極の反転は、結晶を180度反転させることで実現できますので、高指数面基板上の副格子交換エピタキシー成長技術が結晶薄膜の作製で威力を発揮します。

そこで筆者らは、その応用として分極反転構造をもつ結合光共振器中でのDFGによる面発光テラヘルツデバイスの研究【北田他, 光学 48 (7), 274-280 (2019)】に取り組んできました。2つのブラッグ反射多層膜 (DBR 膜) で光共振器層を挟んだ微小光共振器は、3D センシングの光源として注目される垂直共振器面発光レーザ (VCSEL) の基本構成としてよく知られています。2つの微小光共振器を DBR 膜で結合した結合光共振器 (3つ DBR 膜と2つの光学的厚さの等しい共振器層で構成する) では、結合により共振モード (縦モード) の縮退が解け、周波数差がテラヘルツ領域ある2つの共振モードが形成されます。結合光共振器への電流注入による赤外二波長レーザ発振とそのDFGによるテラヘルツ光の生成を単一素子で行えることから、LEDのような取り扱いができる簡便なテラヘルツ光源として期待しています。副格子交換エピタキシー成長技術は、テラヘルツDFGに対する分極制御に活用できます。

卒業研究では、全く新しいタイプの非線形光デバイスへの応用を目指して、周期分極反転構造をもつ結合光共振器

を利用した量子もつれ光子対生成デバイスの検討を進めてくれました。量子情報の分野では、量的にもつれた光子対をオンデマンドで生成する光源が望まれていて、その代表的な手段としてパラメトリック下方変換 (PDC) があります。PDCは、ポンプ光とする一つの光子から、結晶中の二次非線形光学過程を介してシグナル光とアイドラ光と呼ぶ量的にもつれた光子対を生成します。ここで、PDCで生成されるシグナル光とアイドラ光の周波数を、結合光共振器に形成される2つの共振モードのそれぞれに一致させることで、PDCのプロセスが顕著になると予測されます。ただし、結合光共振器中でのポンプ光とシグナル光、アイドラ光の位相不整を解消するために、図5に示すような周期的な分極反転構造を導入して疑似位相整合条件を満たすようにしておく必要があります。卒業研究では、波長1.5 μm 近傍に2つの共振モードが生じる結合光共振器に対して適切な周期分極反転構造を見出す手法を確立してくれました。

具体的には、ポンプ光、シグナル光、アイドラ光それぞれの電場分布を伝達マトリックス法により計算し、その電場積の低周波成分から分極反転する位置を決定しています。設計した薄膜構造に対してPDCの生成効率を数値計算により評価してくれました。PDCのプロセスは、ポンプ光とシグナル光によるDFGとポンプ光とアイドラ光によるDFGとみなすことができます。それぞれのDFGに対する波動方程式を4次のルンゲ・クッタ法で数値的に解き、その変換効率を求めることでPDCが生じるしきい値ポンプ光強度を見積もっています。図6は、設計した結合光共振器でのポンプ光とアイドラ光のDFGで生成されるシグナル光の電場分布です。結合光共振器内部では巨大な振幅の定在波が生じていて、その両端から外部へ放射される様子がうかがえます。図6の構造におけるしきい値ポンプ光強度は、周期分極反転

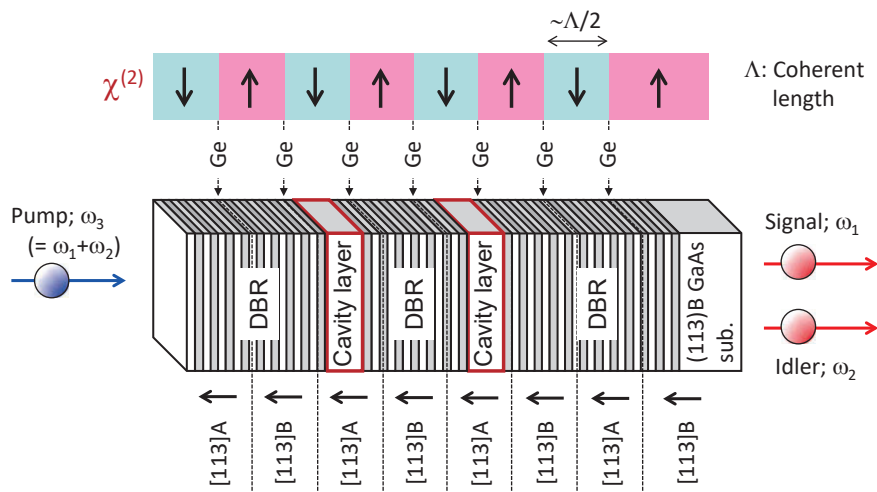


図5 量子もつれ光子対の高効率な生成に適した周期分極反転構造をもつ結合光共振器の模式図

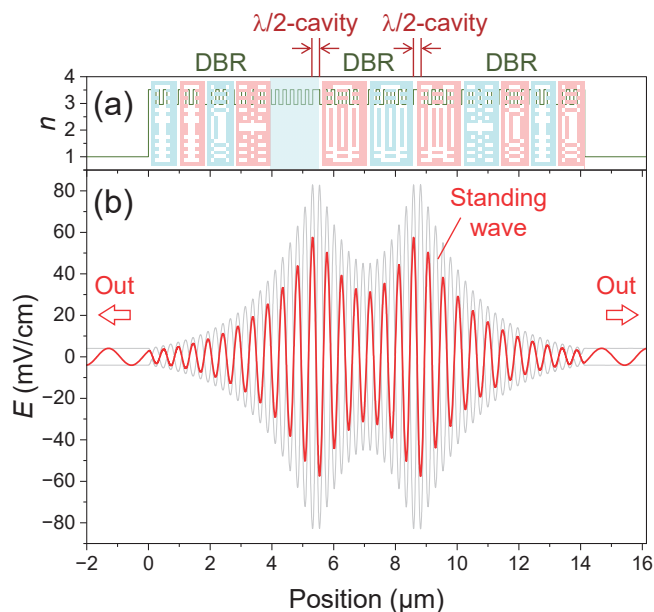


図6 (a) 結合光共振器の屈折率分布 背景色（空色と淡紅色）は分極反転構造を示す (b) ポンプ光とアイドラ光のDFGで生成されるシグナル光の電場分布

構造のない場合に比較しておおよそ2桁も低減することを明らかにしました。

卒業研究では、量子もつれ光子対を生成する有用で面白い薄膜構造をデザインしてくれました。実際にエピタキシャル成長で形成するには、ガリウムヒ素系ヘテロ薄膜の成長表面を適切な箇所から (113)B 面から (113)A 面に、(113)A

面から (113)B 面にと繰り返し反転させることがキーポイントになります。初めに述べました副格子交換エピタキシー成長技術で、Ge を挿入する前後の材料を適切に選択することで繰り返しの反転は現実的に可能です。現状の設備環境では、残念ながら実験的な検証を進めることができません。他機関との共同研究による実験的評価を模索したいと思っています。

4. 結びに

本校における半導体分野の取り組みとして、LED 基礎セミナーと卒業研究を紹介しました。高専の低学年から工作機械や計測機器に触れさせて、学年が上がる毎に習熟度を高め、さらに創意工夫を必要とするものづくりの課題に取り組ませる教育プログラムは大変良くできていると感じます。本校に寄せられる求人数を見ても、人材育成に対する社会的ニーズに十分応えていると思います。5年間の学びの集大成となるべき卒業研究の一つを紹介しましたが、本校の教育理念を鑑みますと、もう少し直接的なものづくりに関与する課題に工夫すべきと反省しています。半導体分野のスペシャリスト育成という観点に立ちますと、もはや一つの教育機関で充実した育成環境を整えることは難しいのではないのでしょうか。産官学の複数の機関が連携して人材育成を支えることが望ましいと感じます。ともかく、現場に立つ教員として学生さんに願うことは、日々を健やかに、楽しく学んで、自分の道を歩む術を身につけてくれることです。