

2017年応用物理学会 秋季学術講演会シンポジウム

窒化物半導体特異構造の科学 ～先進GaN電子デバイスのための結晶成長・評価・応用～

世話人：橋詰 保(北大)、小出 康夫(物材機構)、藤岡 洋(東大)
三宅 秀人(三重大)、村上 尚(農工大)

シンポジウム開始当初は、会場のメインホールの前方のみを使用していたが、シンポジウムが開始されてまもなく会場後方の使用も余儀なくされたほど多数の方に参加いただき、ピーク時は約400名に達した。文部科学省科学研究費助成事業「新学術領域研究：特異構造の結晶科学」が母体として企画され、大分類15「結晶工学」のシンポジウムとして2017年9月6日に開催された。窒化物半導体および混晶系の特徴・特異性を巧みに利用したGaN電子デバイスの研究開発が急速に進展しており、本シンポジウムでは、先進GaN電子デバイスのための結晶成長・物性評価・素子応用に関する先駆的研究の6件の招待講演が行われた。

最初に藤岡洋先生（東大生研）より、シンポジウム企画の母体である「新学術領域研究：特異構造の結晶科学」に関して、プロジェクトの目的・研究組織・研究成果の一部の紹介があった。結晶中の構造の乱れ（特異領域）を排除するのみではなく、完全性を乱す領域を意図的に導入した結晶を積極的に利用して、特異構造の結晶科学という新しい学理を開拓し、新機能エレクトロニクス分野へ貢献することがプロジェクトの目的であり、その関連として本シンポジウムが企画されたことが紹介された。



藤岡 洋先生

シンポジウム本題は、秩父重英先生（東北大多元研）の「酸性鋳化剤を用いたアモノサーマル法による電子デバイス用GaN結晶合成の進展」からスタートした。超臨界NH₃を溶媒とするGaNアモノサーマル法は、高純度・低転位密度で反りも無く無歪の大口径GaN基板を安価に製造する手法として非常に有望であり、特に縦型GaNトランジスタへの応用に最適であることが示された。東北大Gを中心とした15年以上のGaNアモノサーマル成長の共同研究開発の経緯についても触れられ、この研究展開により1 mm/dayを超える高速成長と高品質結晶を実現した。さらに、NH₃圧力と鋳化剤濃度がGaN結晶成長速度に及ぼす影響を詳細に調べ、大口径化に適する比較的低压条件にてバルクGaN結晶が成長できることを示した。これらの成果を基盤として、現在、民間との共同研究によるプロジェクトを推進しており、低転位密度・大口径のGaNバルク結晶の実現を予見して講演が締めくくられた。



秩父重英先生

次に須田先生（名大院工）に「GaN縦型パワーデバイスにおける点欠陥制御の重要性」と題して、ご講演をいただいた。須田先生は内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「GaN縦型パワーデバイスの基盤技術開発」のリーダーを務めている。横型素子のHEMTとは異なり、縦型パワーデバイス実現のためには高電圧を支える低ドーブ



須田 淳先生

($<5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$)かつ厚膜($>10 \mu\text{m}$)の高純度n型ドリフト層が必要であり、このためには、残留不純物と真性点欠陥・プロセス誘起点欠陥の制御が必須である。須田先生は、この基礎的・本質的問題に真っ向から取り組み、例えば、高品質Siドーブn型GaNにおいて、Siドーブ量の増加に従いSiドーブ量の10~20%、残留C濃度よりも格段に多い未知の補償アクセプタが存在することを初めて示され、点欠陥を意識したエピ技術の開発が極めて重要であることを指摘された。また、イオン注入法はGaN縦型パワーデバイスのプロセスに不可欠であるが、その技術確立には、点欠陥の挙動を一つ一つ明らかにする取り組みが重要となることを強調された。

次のご講演は、藤倉序章氏（サイオクス）による「高純度GaNエピタキシャル膜のHVPE成長」である。現在GaN層の成長は有機金属気相成長法(MOVPE)が主流となっているが、厚いドリフト層の成長に長時間要する点や、有機金属原料からのカーボン(C)の混入など、工業化に際して解決すべき課題が存在する。これに対して、ハイドライド気相成長法(HVPE)は、100 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の高い成長速度や原料にCを含まない等の利点を有するが、一方、結晶平坦生・均一性がMOVPE法より劣るとされ、また装置内石英からのSiおよび酸素(O)の混入が避けられないため、デバイス構造の成長にHVPE法を用いた例は極めて少な



藤倉序章氏

かった。藤倉氏は、石英フリーの新HVPE装置を開発することにより、極めて高純度の結晶を得ることに成功した。特にC, Si, O濃度は、それぞれ、 $6 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 以下、 $5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 以下、 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 以下を達成した。このことにより、アンドープ結晶で初めて高抵抗を実現し、ワイドギャップ半導体の特性を引き出した極めて重要な成果である。さらに、 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ までのSiドーピング制御を達成し、改良HVPEはパワーデバイス構造のエピタキシャル成長法として非常に有望であることが示された。重要な結果を得たにも関わらず、淡々と語る口調は、エピ成長における藤倉氏の信念・自信を表しているように感じられた。

シンポジウム後半は、松岡隆志先生（東北大金研）による「N極性GaNの成長とそのトランジスタへの展開」から開始された。窒化物半導体は結晶内に分極を有することから、結晶極性はデバイス設計において重要な一つの要素と考えられる。松岡先生は早くからこの点に着目し、世界に先駆けてN極性GaNの成長を実現しており、最近では、N極性GaNを利用した「逆HEMTの成長とデバイス展開」に力を入れている。N極性HEMT(逆HEMT)では、キャリア供給層であるAlGaInの上にチャンネル層である(In)GaInが配置されるため、次のような利点を有する。i) 高温成長材料からなるバリア層上に低温成長材料からなるチャンネル層を成長するため両層間の界面が急峻となる、ii) 最上層に存在するキャリア走行層は薄くて良いためノーマリーオフ構造が作製しやすい、iii) 最上層が(In)GaInのためオーミックコンタクトがとりやすい。松岡先生は、オフ角の小さいサファイア基板を用いてAl組成30%程度のバリア層を有する逆HEMT構造を成長し、高移動度・高キャリア密度を達成した。さらに優れたDC特性を実証しており、高周波デバイス・電力変換デバイスへ有望であることが強く示唆された。



松岡隆志先生

次に石谷善博先生（千葉大院）より、「窒化物半導体における電子-フォノン相互作用と結晶性」のご講演をいただいた。最近のGaIn系結晶の特性向上により、深い準位を介した電子遷移・電子捕獲過程や励起子過程が明らかになりつつあるが、フォノンと電子系との相互作用に関しては理解されていない点が多い。また、トランジスタのチャンネルにおいては、キャリアの高速輸送過程に電子-フォノン系の相互作用が影響を与えると予想される。石谷先生は、まず、高周波誘電率と静的誘電率の逆数差が電子-フォノン相互作用強度を示し、主要半導体の中では窒化物半導体が非常に強い相互作用を有することを説明した。続いて、時間分解および E_g 以下の励起によるPL測定、赤外分光測定、ラマン散乱測定によるInInおよびGaInの深い準位の評価例を紹介し、配位座標モデルにおける電子・正孔励起状態から深い準位への遷移、深い準位から基底状態への遷移にかかる活性エネルギーと遷移速度に関して詳細に説明された。また、赤外反射分光スペクトルにおけるLOフォノンとプラズモンの結合モード（LOPC）を、数値計算を用いて厳密に解析することにより、GaInおよびヘテロ構造のキャリア密度分布の非接触評価が可能であることを示され、新しい評価法として注目される。



石谷善博先生

最後のご講演は、小谷淳二氏（富士通研）による「InAlIn HEMT構造のMOVPE成長と内部電界制御の必要性」であった。InAlIn-HEMTは強い分極効果より高密度の2次元電子層が得られ、InAlIn膜厚が10nm以下のHEMT構造が可能であるため高周波増幅用素子として大きな期待を集めている。しかし、金属ゲートHEMTの場合極めて大きなゲート漏れ電流が流れ、素子性能や信頼性を制限する要因となっている。小谷氏は、MOVPEによりGaIn基板上に低転位密度のInAlIn/GaIn構造を成長し、ショットキー接合特性の詳細解析に基づき、InAlInバリア層内の極めて強い内部電界によるポテンシャル変調が、ゲート漏れ電流の本質的要因であることを明らかにした。この結果に基づき、InAlInの表面に低温成長AlIn層を形成することでInAlIn層の内部電界を緩和し、ゲート漏れ電流を劇的に減少させることに成功した。InAlIn系HEMTにおける内部電界制御の重要性を初めて明らかにした研究であり、高周波帯での高効率電力素子の実現に貢献する成果が示された。



小谷淳二氏

様々な課題を抱えているGaIn系電子デバイスであるが、本シンポジウムを通じて本質的な物性が解明されつつあることが理解でき、また、改めてその特徴・特異性を認識できた。そして、結晶性の更なる向上と本質的な物性評価の蓄積が、GaIn系本来の特徴を反映する高性能電子デバイスの進展を推進するということを見させるシンポジウムであった。最後に、すばらしい講演を準備いただいた講師の方々と熱心に聴講いただいた多数の参加者の皆様に感謝いたします。