

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名: バイオテンプレート極限加工による3次元量子構造の制御と新機能発現

2. 研究代表者: 寒川 誠二 (東北大学流体科学研究所 教授)

3. 研究概要

本研究では、ボトムアッププロセスのバイオテンプレート技術とトップダウンプロセスの中性子粒子ビームエッチングを組み合わせたバイオテンプレート極限加工を用いて、無欠陥、均一、高密度で、間隔の制御されたシリコン及び化合物半導体の量子ナノディスク構造の形成を目指す。さらにこの量子ナノディスク構造を用いて、高効率量子ドット太陽電池および量子ドットレーザの実現を目指す。

これまでに、障壁層として SiC を用いた3次元シリコンナノディスクアレー構造を形成し、電気的・光学的特性からミニバンドの形成を実証した。シリコンナノディスクの応用として、直径を変化させ、バンド構造を変調したシリコンナノディスクを3次元に積層構造した高効率太陽電池の実現を目指す。実際に、2次元シリコンナノディスク太陽電池を試作し、量子ドット系シリコン太陽電池としては世界最高のエネルギー変換効率 12.6%を実現した。更に3次元シリコンナノディスク太陽電池の試作へと進んでいる。

GaAs/AlGaAs 上に、相互に間隔の制御されたフェリチンの2次元結晶作製法を確立した。これにより間隔の制御された GaAs ナノディスク2次元アレー構造を AlGaAs で埋め込んだ量子構造を作製、トップダウンのビーム加工により形成された量子構造としては世界で始めて明瞭なPLを観察すると共に、測定された光学モード利得値からレーザ発振の可能性を得た。

4. 中間評価結果

4-1. 研究の進捗状況及び研究成果の現状

バイオテンプレート極限加工により、 $1.4 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ と世界最高密度のシリコンナノディスク 2次元アレー構造を実現、ミニバンドの形成を電気的、光学的に実証した事、また SiC で埋め込む事により、2次元シリコンナノディスク太陽電池を試作し、シリコン量子ドット太陽電池としては世界最高のエネルギー変換効率 12.6%を達成した事は、本 CREST 課題の目標に向かって大きな前進である。効率に関しては、バルク Si の太陽電池の効率を大きく上回ることが要請されるが、本構造はバイオテンプレートを用いているためサイズが均一であり、また中性ビームにより欠陥が著しく抑えられているので設計性に優れている事が特徴と考える。最終的な3次元シリコンナノディスク構造でどれだけの性能が得られるか、実験を進めると共に、理論的にも詰めていって欲しい。

GaAs/AlGaAs ヘテロ構造にバイオテンプレート極限加工と AlGaAs 再エピタキシャル成長を施し、GaAs ナノディスク 2次元アレー構造を実現、トップダウンのビーム加工により形成された量子構造としては世界で始めて明瞭なPLを観測、測定された光学モード利得値からレーザ発振の可能性が示唆された事は、低損傷中性ビーム加工の高いポテンシャルを示すものであり、特筆すべき成果と考える。

4-2. 今後の研究に向けて

シリコン 2次元ナノディスク構造を積層化することで3次元量子構造を形成、量子ドット太陽電池に応用することで、エネルギー変換効率をさらに増大させることを期待する。本 CREST 期間中にバルクのシリコン太陽電池の効率を上回り、30%に迫る変換効率、あるいはその可能性を示唆するデータが取得できることを望む。これまでの結果に対し、既に複数の企業が興味を示しており、デバイスの高性能化は企業との共同研究で加速されることを望む。化合物半導体のナノディスク 2次元アレー構造については、グループの力を結集して、共振器を設けたデバイス構造でレーザ発振を実現することを期待する。さらに3次元化を図り、最終目標である従来技術を大きく上回る高効率量子ドットレーザの実現を期待する。

今後はデバイス応用に直結した活動が主となるが、その分、特許取得に十分留意した活動をお願いしたい。本 CREST 期間の前半では特許出願が一件と、デバイス応用を指向した研究としては少ない。後半に期待した

い。

4-3. 総合的評価

シリコンナノディスクアレーの実現と太陽電池構造への実装、シリコン量子ドット太陽電池としては世界最高の変換効率を達した点、GaAs 系の光学デバイス応用でも、従来手法を大きく上回る超高密度の量子ドット構造を実現、高輝度の PL 発光を観測した点を高く評価する。特にトップダウンのビーム加工技術でありながら、欠陥に敏感な化合物半導体で強い PL 発光が見られた点は驚きであり、同プロセス技術のナノ構造体形成における広い応用可能性を示すものである。太陽電池応用では、まだどこまでの高効率化が可能か、予断を許さないが、理論解析を進めることで、全体像を明らかにすることが強く求められる。

本手法により、生体材料持つナノスケール性、均一性、自己組織化能力を活用して実現される量子ドット構造は、従来の自己組織化成長法により形成される量子構造体に比べ、半導体材料選択の自由度、デバイス設計の自由度、さらには形成される量子ドット構造の均一性、高密度性において明らかに優位であり、今後の応用のひろがりに期待したい。