

9. 優れた成果があがった点

研究プロジェクトにより特に優れた成果があがった点は以下のとおりである。

(a) GaN ナノコラム光デバイス: ナノコラムで波長 633nm の赤色 LED を実現し、InGaN 系赤色 LED 高性能化の道筋を拓き、ナノコラム規則配列によって二次元分布光帰還機能を発現させ、光励起緑色域レーザ発振を得て、面発光型ナノコラムレーザの基礎技術を確認し、高い放射ビーム指向性を有するナノコラム LED を開拓し、集積型ナノコラム LED を実現させ、Si 基板上の大面積ナノコラム LED 作製法を確認し、フリップチップ型ナノコラム LED を実現し、グラフェン上の自己形成ナノコラム成長にも成功して、世界をリードする研究成果を得た。

(b) GaN ナノウォール光・電子デバイス: 世界初の AlGaIn/GaN ナノウォール FET 作製および動作実証を行った。GaN を低損傷でナノ加工できる水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法を開発し、直径 50nm 以下の InGaIn 量子構造の形成を実証した。無機/有機ハイブリッド LED (IO-HyLED) に、MgZnO や自己配列双極子分子、Cs₂CO₃ を組合せた多重中間層を導入することによって発光特性が顕著に向上することを見出した。Al ドープ Ag 層を用いる MgZnO/Ag(Al)/MgZnO-DMD を作製し、紫外 (UVA) から可視 (315~780nm) 全域における平均透過率 88.2%、シート抵抗 7.6 Ω/sq. という最高水準の優れた特性を有する透明導電性を得た。

(d) InAs 量子ドット・ナノワイヤ: 有機金属気相成長法による選択成長を用いてアレイ導波路型 InAs 量子ドット広帯域 LED において、導波路の制御および量子ドット高さの制御を用いることによって、単一光源として 250nm の波長範囲において出力強度が平坦なフラットトップのスペクトル形状を有したスペクトル半値幅 500nm の LED を実現した。

(e) ナノワイヤ/CMOS 融合型 LSI: 従来からアンプなどの簡単な CMOS 回路と CNT を組み合わせた例はあったが、低消費電力 A/D 変換器 (ΔΣ変調器) と InAs ナノワイヤを同一 Si 基板上に集積化し、各種液体を局所的に流し、その応答を 1mV 以上の精度でデジタル的に評価したことはこれまでに例がない。

(f) 単電子・単一光子 電子光融合デバイス: 可視領域全域にわたる規則的な高集積を同一基板上で実現できるナノコラムにおいて、単一光子発生を示唆する結果を得た。単一光子アレイ素子の基盤技術を達成したといえる。

(g) ナノ光物性・非線形光学: 誘電体が規則配列したフォトニック結晶の研究は非常に多いが、規則配列にゆらぎが入った場合、または完全にランダムに配列したときの光のアンダーソン局在の研究は極めて少ない。本研究では、ナノコラム集団による光のアンダーソン局在とランダムレーザーに関して、理論と実験の両面から詳細な研究を行い、光

局在とランダムレーザの関係を明らかにした。また、太陽電池材料として注目を集めている有機無機ハイブリッドペロブスカイト構造に関しても、光励起キャリアが励起子を形成することを明らかにした。

10. 課題となった点

研究プロジェクトにより課題となった点は以下のとおりである。

(a) GaN ナノコラム光デバイス: ナノウォールレーザの実現には組成揺らぎの少ない InGaN 量子井戸の形成が重要となる。現状では1本のウォール内で多色発光が観察される場合があることから、ストライプ方向やウォール幅、ウォール上部形状等と In 組成揺らぎの関係を系統的に評価し、In 組成揺らぎの抑制条件を把握する。

(b) GaN ナノウォール光・電子デバイス: 大気中で作製したハイブリッドデバイスは優れた初期特性を示すが、劣化の問題があるため、酸素や水分を抑制したグローブボックス中での作製環境を整備し、寿命や信頼性の観点からも特性評価を行うことが課題である。

(c) II-VI族ナノ構造: ZnCdSe/BeZnTe 超格子の PL 発光特性や光起電力測定による光吸収特性について調べられたが、PL 発光ピークと光吸収端との違いや理論解析結果との比較等、未知な点が残されている。今後も理論解析と特性評価を並行して行い物性解明を進める。また、サブバンド間遷移については実験的な検証が得られておらず、今後の課題である。

(d) InAs 量子ドット・ナノワイヤ: これまでに試作、測定したアレイ導波路型 LED はアレイ導波路に垂直に劈開し、その端面発光を観測している。そのため出射光パターンは横方向に大きく広がっている。光ファイバとの結合を想定した場合には、アレイ導波路からの出射光を単一導波路に集光する構造が必要である。現在、アレイ導波路とローランド円構造を有したスラブ導波路を集積化した集光構造の設計および試作が今後の課題である。

(e) ナノワイヤ/CMOS 融合型 LSI: ナノワイヤ/CMOS 融合化を進めるに当たり、低コストかつ汎用性の観点から、設計した CMOS 回路の試作は外部ファウンドリを利用することとした。そのため、CMOS 回路作製後のチップに合わせた FASA 技術および配線技術を確立する必要があった。リフトオフを用いて注意深く Au 配線を作製し、融合回路動作に不可欠な良好な InAs ナノワイヤ/CMOS 相互接続を可能とした。また、ラボオンチップの分野で使われているマイクロ流路チップに着目し、本検討用に新たな流路チップを試作した。Si 基板上のナノワイヤ堆積部分だけに局所的に液体を流すことで、測定精度・安定性を高めた。

11. 研究期間終了後の展望

本プロジェクト終了後も各研究課題は継続するので、今後の研究方針について示す。

(a) GaN ナノコラム光デバイス：三原色集積型ナノコラム LED を基礎に微小領域 ($20 \times 20 \mu\text{m}^2$) 内に RGB 集積された新次元 LED の基盤技術が開拓され、赤色ナノコラム LED 高輝度化が進み、三原色 LED の全窒化物化への突破口が拓かれ、さらにナノコラムフォトリソ結晶効果によって通常の LED では得られない鋭放射ビーム(角度: $15 \times 20^\circ$)と狭スペクトル(半値幅 $10 \times 20 \text{nm}$)の面発光型ナノコラム LED が得られよう。また Si 基板上ナノコラム成長とフリップチップボンディングによって、革新的な可視面発光型ナノコラムレーザが期待される。これらは映像機器の画期的な低消費電力化に寄与して、低炭素化社会の構築に寄与しよう。

(b) GaN ナノウォール光・電子デバイス：ナノウォールにおいては、InGaN/GaN ナノウォールによる光励起誘導放出を実証する。蛍光系、燐光系有機活性層に加え、熱励起遅延蛍光有機活性層を利用したハイブリッド LED を作製し、デバイス効率の更なる向上を目指す。UVA 領域から可視全域にわたる高透過率 DMD の技術を窒化物半導体 LED や有機 EL にも適用して応用可能性を実証する。ナノミスト堆積法の成膜条件や装置改良を継続し、オールウェットプロセスによる LED やデバイス作製を目指す。

(c) II-VI 族ナノ構造：本プロジェクト終了後も研究を継続する。ZnCdSe/BeZnTe ナノ超格子については、発光特性や光吸収特性等の物性解明を進める。発光ピークと光吸収端との関係や理論値との比較検討により、当該超格子の特性について詳細に調べる。また、サブバンド間遷移については、光吸収特性評価等による実験的な検証を行い、理論解析と合わせてデバイス応用の可能性を探求する。

(d) InAs 量子ドット・ナノワイヤ：InAs 量子ドットの結晶成長では、選択成長とダブルキャップ法を併用したアレイ導波路型量子ドット LED を試作し、フラットトップ型スペクトル特性を持つ発光半値幅 500nm 以上の LED を実現した。今後はこの LED の通信、センサーへの応用、また量子ドットデバイスの新たな可能性を見出す研究を行っていく予定である。ナノワイヤに関しては、Au 微粒子を用いた InAs ナノワイヤの成長条件を把握し、このナノワイヤは CMOS 回路集積デバイスへ応用されており、今後さらにナノワイヤ集積デバイスを追及する。また自己触媒 InP ナノワイヤの成長に関する研究が進展し、成長条件を把握し、さらにコアシェルナノワイヤの成長と光学特性の観測まで得られた。今後はこれらのナノワイヤをデバイス応用する研究フェーズへと発展させる予定である。

(e) ナノワイヤ/CMOS 融合型 LSI: InAs ナノワイヤのコンダクタンス変化のメカニズムを明らかにするとともに、ナノワイヤ表面に受容体を形成して、吸着分子に対する選択性を付加したバイオセンサ実現を目指す。今回実現したナノワイヤ/CMOS 融合回路は、ナノワイヤの抵抗値を同じ基板上に搭載した CMOS 回路でデジタル値に変換して出力できるラボオンチップである。3 桁以上の A/D 変換精度が見込めるため、微細なナノワイヤ抵抗変化の直接測定が可能である。今回、細胞培養液などの各種液体に対するナノワイヤの応答実験に成功したことで、ナノ構造の物性解明への応用だけでなく、神経伝達物質の高精度モニタなどのバイオセンサへの応用が期待できる。

(f) 単電子・単一光子 電子光融合デバイス: 継続して研究を進め、量子情報転送を実現する荷電状態制御単一光子光源へ展開する。(a) ナノコラム、ナノウォール研究において実現しているコラム径と配列を自由に制御しうる優位性を活かし、波長多重単一光子発生を目指す。これにより飛躍的な通信レート向上を達成すれば、量子暗号通信の実用化による情報漏洩のない安全安心な通信インフラ実現に貢献できる。

(g) ナノ光物性・非線形光学: ナノコラムの配列効果の基礎光学特性に関しては大きな進展が得られたので、これを生かした応用研究(フォトニックレーザー、ランダムレーザーなど)に発展する予定である。また、InGaN/GaN ナノコラムの光励起キャリアダイナミクスの解明を行う予定である。無機有機ハイブリッド物質に関しては、マイクロキャビティの製作を完成させ、室温におけるポラリトンレーザーの実現を目指す。

12. 研究成果の副次的効果

(a) GaN ナノコラム光デバイス: Si 基板上のナノコラム技術の開拓を進め、超微細 LED 画素からなるプロジェクター映像エンジンの検討を進め、新方式 LED プロジェクター実用化のための基礎技術を開拓する。

水素雰囲気異方性熱エッチング(HEATE)法が極めて低損傷なナノ加工技術であることが確認されたことから、簡便かつ低コストなシステムを用いた窒化物極限ナノ構造デバイスの研究展開が期待される。

(b) GaN ナノウォール光・電子デバイス: ハイブリッドデバイス用透明導電膜として研究に着手した MgZnO/Ag(Al)MgZnO-DMD において、紫外(UVA)から可視全域において最高水準の高透過率と低シート抵抗が得られたことから、耐環境性や信頼性などを検討することで ITO に替わる透明導電材料への応用が期待される。

(d) InAs 量子ドット・ナノワイヤ: 近赤外域における広帯域光源は光コヒーレントモグラフィーなどの断層形状観察に使用できることを考えていたが、さらにセンシング光源として

有用であることを確認し、現在この広帯域光源を石油探索として使用可能か外部との共同研究を検討している。

(e) ナノワイヤ/CMOS 融合型 LSI: この研究によりマイクロ流路チップと CMOS 基板の結合が可能であることが分かった。これを更に発展させれば、CMOS 回路を組み込んだ超高機能ラボオンチップの実現が期待できる。また、従来のアナログ回路でオペアンプを用いていた部分を、今回提案したダイナミック回路で置き換えることで、新しいアナログ回路設計パラダイムを開拓できる可能性がある。

13. 研究成果の公開状況

本研究プロジェクトと韓国・西江(ソガン)大学のナノサイエンス、テクノロジー研究者のワークショップとして“Sophia-Sogang Workshop on Frontiers of Nanoscience and Nanotechnology”を2013年11月15日に開催し、学内、学外へ公開した。その際の開催案内およびプログラムを示す。