

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成24年1月13日

評価委員：（敬称略、五十音順）

日下幸則 福井大学 医学部医学科 教授

熊谷 寛 大阪市立大学大学院 工学研究科 教授

末宗幾夫 北海道大学 電子科学研究所附属ナノテクノロジー研究センター 教授

確定年月日：平成24年3月13日

プロジェクト名	高度ナノ構造制御・創製技術の開発
研究責任者の所属・役職・氏名	先端的共通技術部門 先端フォトニクス材料ユニット長（元量子ドットセンター長） 迫田和彰
実施期間	平成18年度～平成22年度
研究目的と意義	<p>本研究の第1の目的は、NIMS独自の自己成長技術である液滴エピタキシー法を格段に高度化して、ナノテクノロジーの基盤技術の1つとして確立することである。第2の目的は、液滴エピタキシーによる半導体ナノ構造と電子線リソグラフィによるフォトニック結晶作製技術との融合等による新規光機能の創出である。第3の目的は、ナノ構造の光学特性と量子光学特性の解明に資する精緻な顕微レーザー分光技術の開発、および、これを用いたGaAs系ナノ構造の電子状態の解明と発光性能の精密な評価である。第4の目的は、NIMSに設置された大型設備のもとで達成される極限環境下における新規量子現象の開拓である。第5の目的は、各種の表面分析や電子顕微鏡観察による構造解析と自己成長機構の解明、および、その知見にもとづいた周辺材料の開拓である。</p> <p>液滴エピタキシーによるGaAs量子ドットは内部応力やピエゾ電場が生じない、等方的なドットを形成しやすい等の優れた特長をもつ反面、3次元構造の保持と高温アニールの両立が難しく、結晶品質の低下や過剰なAs原子の含有の問題があった。本研究でこれらの基本課題を解決し、一層の高品質化を達成することにより、単一光子発生やもつれ合い光子対発生、量子ドットレーザー、量子ドット型太陽電池等への応用のための基盤技術が確立できる。また、自己成長、リソグラフィ、表面分析、および、ナノフォトニクス分野の研究者が結集して課題解決に取り組むことで効率的な技術開発と、周辺分野での新規材料の開発や新現象の発見が期待できる。</p>
研究内容	<ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ1「フォトニック結晶に関する研究」：フォトニック結晶の設計と製作、および、精緻な顕微分光法によるナノ構造の光学特性評価 ・サブテーマ2「量子ドットに関する研究」：液滴エピタキシー法の高度化によるGaAs量子ドットの高品質化と構造制御、電子顕微鏡観察等による構造解析 ・サブテーマ3「量子ドットの極限環境計測」：極低温・強磁場における2次元電子・量子ドット結合系の電子輸送特性の評価 ・サブテーマ4「量子ナノ構造のデバイス応用探索に関する研究」：液滴エピタキシーによる新規な量子ドット等の作製と素子応用の探索 ・サブテーマ5「プラズモニクスに関する研究」：トレンチ型プラズモン共振器の製作と特性解析
ミッションステートメント（具体的な達成目標）	<ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ1：フォトニック結晶共振器によるパーセル効果の実証、励起子アハラノフ・ボーム効果の検証、励起子ラビ振動の観測、単一フォトン発生の実証 ・サブテーマ2：GaAs量子ドットについて粒径・形状・密度制御技術の確立と高温キャップ層形成による高品質化、GaAs量子ドットレーザーの実現 ・サブテーマ3：2次元電子・GaAs量子ドット結合系について、将来の素子応用につながる可能性をもつ新規な量子現象の開拓 ・サブテーマ4：サブミクロン・トンネルダイオードの開発、および、液滴エピタキシーによる新規量子ドットの開発と電子状態の解明

	<ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ5：極微プラズモン共振器アレイの量産技術の開発とメタマテリアル分野への展開
<p>平成18年度～平成22年度までの主な研究成果（アウトプット）及び研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）</p>	<p>1) 主な研究成果（アウトプット）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ1：GaAs 量子ドットとフォトニック結晶共振器の複合体を作製して、蛍光発光の促進（パーセル効果）とフォトニックバンドギャップによる抑制を実証。磁場中顕微分光により、GaAs 量子ドットのランダウの g 因子を決定し、2 重量子リングについては励起子アハラノフ・ボーム効果を実証。精緻な顕微分光により、GaAs 量子ドット励起子発光のラビ振動とアンチバンチング、励起子分子発光のバンチング特性を実証するとともに、シュタルク効果による発光波長チューニングや微細構造分裂の精密測定を達成。 ・サブテーマ2：液滴エピタキシーによる GaAs 量子ドット形成技術を飛躍的に高度化。量子ドット結合体については、従来の分割量子ドットに加えて、稜線間の距離が 15～25nm の同心円状 GaAs 2 重量子リングの自己成長法を確立。400℃でのキャップ層形成により、構造欠陥密度の大幅な低減と励起子発光ピークの劇的な狭線幅化（$<35\mu\text{eV}$）を達成。基板面方位の最適化によりドット形状の円対称化を達成して、世界最小の微細構造分裂幅（全てのドットサイズで $30\mu\text{eV}$ 以下）を実現。 ・サブテーマ3：量子ドット・2次元電子結合系の極低温・強磁場での電子輸送特性評価から、ホール抵抗のゲート電圧依存性にヒステリシスを発見。 ・サブテーマ4：サブミクロン・トンネルダイオードを実現。液滴エピタキシーによる GaSb 量子ドットの作製と面方位の選択による高密度化に成功。 ・サブテーマ5：トレンチ型プラズモン共振器で世界最高レベルの電磁波閉じ込めを達成。プラズモン共振器アレイの量産技術を確立。 <p>2) 研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・メーカーと共同でコンパクトな磁場中顕微分光用クライオスタットを開発して商品化した。 ・フォトニック結晶のバンド端の小さな光の群速度による自然放出の2重増強を実証した。 ・チオシアニン色素会合体によるナノファイバーのポラリトン光伝播を発見した。 ・微小誘電体球による連結共振器型導波路について、偏光と波長の分波機能を発見した。 ・励起子複合体の結合エネルギーについて、ドットサイズ依存性の定量的観測に世界で初めて成功した。 ・低砒素圧での結晶成長と高温熱処理によりドットサイズを均一化し、GaAs 量子ドットの励起子発光帯の不均一広がりを劇的に低減した（$<20\text{meV}$）。これにより電流注入型レーザー発振を実現した。 ・電子線誘起蒸着法による酸化モリブデンナノワイヤについて光伝導性を発見した。 ・プラズモン共振器を利用した新型赤外光源を開発した。
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い： 大きな成果を挙げており目標を十分上回った。</p> <p>自己点検・評価： 所期の研究目標を達成できたことに加えて、励起子発光の狭線幅化（$<35\mu\text{eV}$）、世界最小の微細構造分裂幅（すべてのドットサイズで $30\mu\text{eV}$ 以下）、不均一広がりの改善（$<20\text{meV}$）など、液滴エピタキシーによるナノ構造創製技術の高度化が当初の期待以上のレベルで達成できた。これらの成果は今後、量子もつれ光子対発</p>

	生のような量子情報処理分野での応用、あるいは、交換相互作用の結合距離依存性の解明等、量子力学の基礎に関わる実験検証への発展も期待される。また、当初計画には無かったプラズモン共振器による電磁波閉じ込めと新型赤外光源の開発、有機ナノファイバーのポラリトン光伝播の発見など、ナノフォトンクス分野で大きな派生的成果も得られた。さらに、磁場中顕微分光用クライオスタットの商品化などの目に見える成果も得られた。
【評価項目】	コメント
①研究計画、実施体制、マネージメント、連携 (計画はきめ細かったか、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネージメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか、どこが問題なのか、ほか)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中間評価での指摘を受けて、研究期間の後半ではNIMSのオリジナル技術である液滴エピタキシーによる量子ナノ構造創製の高度化を中心に、発展が期待できる研究テーマに重点化されていて、マネージメントが正しく行われた。 ・ 連携の範囲も妥当で、有機的に連携が行われた。 ・ 量子ドットを中心としたナノ構造の高度制御、独自の液滴エピタキシーを中心とした研究計画に基づき、NIMS内部、国内の研究機関との共同研究、海外との国際連携が有効に機能している。
②研究開発の進捗状況及び具体的目標の達成度 (研究責任者の自己点検・評価を踏まえて、進み具合はどうだったか、目標は達成されたか、目標は具体的であったか、世界レベルで見て目標は高かったか・低かったか、問題点は何か、ほか)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 目標設定は具体的であり、世界レベルで見て十分に高かった。その上で、すべてのサブグループでプロジェクトは順調に進展し、当初の目標を達成したばかりか、フォトリック結晶共振器やプラズモン共振器などで世界レベルの顕著な成果を挙げた。 ・ 液滴エピタキシーの方法論が改善され、発光特性の大幅な向上が図られ、ひずみのない量子ドットとしての独自の長を生かしながら、光学特性も既存のひずみ系と遜色のないレベルに高度化されており、評価される。 ・ 液滴エピタキシー法により作製できた GaAs 量子ドットの経験を生かしてナノテクへの応用を拡げて欲しい。 ・ 量子情報応用の単一光子光源、光子対光源について、多面的な研究が活発に進められており、今後の展開が期待される。 ・ プラズモニクスによる新たなアイデアによる赤外光源も開発されており、今後の進展が期待される。 ・ 光場についてもフォトリック結晶の研究など成果が挙がっており、量子ドットから発生する光子の検出系への結合効率を上げる意味でも、このような光場との結合を考慮した今後のプロジェクトの展開が望まれる。
③論文・特許等の直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト) (世界レベルの質の成果が出たか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか(期待されるか)、研究タイプを考慮した費用対効果は、問題点は何か、ほか)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 世界レベルの学会誌等に152件の論文が掲載され、22件の特許が登録され、アウトプットの質と量は高い。 ・ 多くの査読論文発表、国際会議での招待講演発表などを通じて、成果の公表が十分なされている。また特許出願による知財権の取得も行われている。 ・ デバイスの実用化や関連技術の普及に向けての取り組みが見られ、波及効果が期待できる。

④総合評価 (研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイントがあれば追加してコメント)		<ul style="list-style-type: none"> ・総じて、計画通りの成果が挙げられていると評価される。 ・計画外の顕著な成果が多いのは、評価できる。 ・本プロジェクトは当初の目標以上を達成している。次期プロジェクトの光波メタマテリアルや量子もつれ光子対発生技術の研究は大いに期待できる。 ・NIMS独自の自己成長技術を生かした、一体的、一貫的なテーマであるが、今後の長期的な観点で新しいテーマも構想してゆく必要があるのではないか。
各委員の総合評価点 (10点満点)		9、9、9
総合評価点平均 (10点満点)		9.0
総合評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れていた。
9		多くの点において非常に優れていた。
8	A	総合的に優れていた。
7		優れたプロジェクトであった。
6		平均的なプロジェクトであった。
5	B	一部の計画の見直しが必要であった。
4		期待されたほどではなかった。
3		計画を見直して継続すべきであった。
2		プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要であった。
1	C	大きな問題があり、プロジェクトを中止すべきであった。