

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成28年12月13日

評価委員：（敬称略、五十音順）

平山 司 （一財）ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所 副所長・主幹研究員
 水木純一郎 関西学院大学理工学部 先進エネルギーナノ工学科 教授
 山口浩一 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授

確定年月日：平成29年2月10日

プロジェクト名	革新的光材料技術の開発と応用
研究責任者の所属・役職・氏名	機能性材料研究拠点・上席研究員・迫田和彰
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>本研究プロジェクトが関わる情報・通信分野について、20世紀にはその主役がエレクトロニクスであったのに対して、21世紀の今日ではフォトニクスの重要性がますます大きくなっている。一つには電子素子の集積化が極限まで進み、発熱の除去といった高集積化が困難になったことがある。その一方で、情報・通信基盤の高速・大容量化に対する要求は以前にも増して大きくなっており、高速化と低消費エネルギー化が同時に達成可能なフォトニクスに対する期待が大きい。また、光通信における安全性（秘匿性）の確保も潜在的には重要な課題であり、量子暗号通信による究極的な解決が期待されている。さらに、量子コヒーレンストモグラフィ等の光の量子性を利用した計測技術にも注目が集まっており、そのための高輝度もつれ合い光子源の開発が必要となっている。これらの課題の解決は民生の利便性の改善に寄与するとともに、我が国の国際競争力を向上させて、将来の産業育成に貢献すると期待できる。</p> <p>本研究プロジェクトはこれらの分野の中心課題である、革新的な発光・受光・導波デバイスの実現に資するフォトニクス材料の開発を目的とする。特に、フォトニック結晶やメタマテリアル、擬似位相整合などの現代的な輻射場制御技術と、量子ドットや等電子トラップ、非線形光学結晶などの電子波制御を可能とする材料科学の融合により、革新的なフォトニクス材料の創製を目指す。本プロジェクトでは、NIMSがこれまでに開発・蓄積した高度なナノ成長、ナノ集積、ナノドメイン形成、リソグラフィ、ナノ光計測、および、ナノ材料設計・解析の各技術をいっそう高度化・融合して上記の技術開発を進める。</p>
研究内容	<p>6つのサブテーマを実施する。①大面積ソフトコロイド結晶の創製技術の開発と、波長可変レーザー・構造歪み可視化技術への応用展開。②フォトニック結晶共振器・プラズモン共振器・メタマテリアルの創製技術の高度化と、高感度センシング・高効率発光・ビーム走査の実証。③格子整合系量子ドット・窒素ペア等電子トラップの創製技術の高度化と、高効率・高忠実な非古典光源の開発。④反転分極作製用電極の微細構造化による、擬似位相整合波長変換を用いた広帯域コヒーレント光源の実現。⑤量子ドットを用いた高輝度・高忠実な量子相関コヒーレント光源の開発と光子相関測定による基礎物性の解明。⑥ポラリトンファイバー・光ディラックコーン・トポロジカル光波状態を利用した、新機構に基づく低曲げ損失導波構造の創製と特性解明。</p>
ミッションステートメント （具体的な達成目標）	<p>①ソフトコロイド結晶について、大面積（m²オーダー）での製造に拡張し得る材料プロセスの開発。②赤外ビーム走査素子・新概念のスイッチング素子の実現と、ナノインプリントによるメタ表面試料の供給体制の整備。③量子ドットの形状制御技術の高度化ともつれ合い光子対発生、等電子トラップによる単一光子発生の高温化と発光エネルギー制御。④定比組成タンタル酸リチウム結晶について、サブミクロンサイズの非周期極性反転構造による広帯域波長変換の実現。⑤波長可変精度が10 μeV、時間幅50 psの単一光子源の開発と、高忠</p>

	<p>実度光子対発生の実現。⑥ポラリトンナノファイバーについて、低曲げ損失の機構解明、マッハ・ツェンダー干渉計等のマイクロデバイスと励起子ポラリトンのポーズ凝縮の実現。光波領域における光ディラックコーンの実現。</p>
<p>平成23年度～平成27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> <p>【サブテーマ1】 波長可変コロイド結晶レーザーやマイクロパターンレーザーの開発、1000cm²級コロイド結晶シートを達成、ベンチャー企業を設立。</p> <p>【サブテーマ2 (サブテーマ4を含む)】 CO₂ 濃度センサー用メタ表面赤外光源の開発、Er の磁気双極子遷移のパーセル効果の実証、ナノインプリントによる cm² 級大面積素子の作製、波長よりも薄い偏光素子の実現。ナノ微細電極による分極反転を用いた3原色パラメトリック光発生、広帯域化による量子 OCT の空間分解能の向上。</p> <p>【サブテーマ3】 世界最高面密度の量子ドット形成、サイズ分布の縮小による不均一幅の低減、電流注入型 GaAs 量子ドットレーザーの開発、GaAs 液滴量子ドットの形状制御技術の開発、世界最高忠実度の量子もつれ合い光子源の開発、GaAs や AlAs 中の等電子準位の実現、フォトリソニック結晶共振器による等電子トラップのパーセル効果の実証、高対称 InAs 量子ドットの開発。</p> <p>【サブテーマ6】 ポラリトンファイバーの分散関係の解明、および、低曲げ損の機構解明、極微小マッハ・ツェンダー干渉計やリング共振器の実現、光ディラックコーンの生成原理の解明と電子波への拡張、トポロジカル光波を利用した一方通行モードの理論予測。</p> <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> <p>学術的には、NIMS の独自技術である液滴エピタキシーが大きく進展し、共同研究先へ技術指導を行って成果普及にも努めた。光ディラックコーンやトポロジカル光波の研究が近年たいへん盛んであるが、本プロジェクトはこれらの分野で本質的な寄与を与えた。応用面では、定比組成 SLT による3原色発生やソフトコロイド結晶による歪み可視化など、実用性の高い成果が得られ、レーザープロジェクターなどのディスプレイ装置やインフラストラクチャーの劣化診断などへの応用が期待できる。メタ表面を利用した熱放射光源や赤外線検出器、波長よりも薄い偏光板等、光計測や光通信分野で有望な新技術が育った。試料作製のために高度化した薄膜形成やナノ加工技術、とりわけ、ナノインプリントリソグラフィ技術は実用性が高く、今後、種々の試料作製に適用される。</p>
<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：当初計画を越えて大幅に進展した。</p> <p>自己点検・評価：</p> <p>当初の研究目標をすべて達成し、当初計画を越える成果も多数得られた。コロイド結晶で1m²級材料の目途が得られた。また、ベンチャー企業を設立してソフトコロイド結晶の有償でのサンプル供試を開始した。格子整合系量子ドットによる量子もつれ合い光子対発生では、世界最高のもつれ合い忠実度を達成した。メタ表面を利用することで実用性の高い熱放射光源を開発し、中赤外光検出器についても従来デバイスを超える性能が期待できる。期の途中で新たに設定した導波構造の研究では、ポラリトンナノファイバーの極めて小さな曲げ損の起源を解明するとともに、リング共振器やマッハ・ツェンダー共振器を製作して、微小光回路の基礎性能が実証できた。光ディラックコーンの生成条件の解明や電子波への拡張等、普遍性の高い新現象も発見された。</p>
<p>評価項目</p>	<p>コメント</p>

<p>①研究計画、実施体制、マネジメント、連携 (事前・中間評価の結果を受けて、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)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・目標達成のための適切かつ十分な研究体制と計画をもって進められている。 ・研究計画通りの成果が得られているようである。 ・一部サブテーマの統合による効率化および新たなサブテーマの設定による独自技術の展開を図るなど、実施体制の再編、マネジメントの工夫がなされ、ロードマップの策定も適切に行われている。 ・各サブテーマに共通した要素技術の必要性からサブテーマ間での協力連携による高度化、効率化が図られている。 ・先端解析技術の部隊、特に電子顕微鏡グループとの良好な協力体制がうかがえる。 ・国内外の多くの研究機関との連携も精力的に行われており、効果的な連携の成果が認められる。 ・産業界との連携も促進され、特に本プロジェクト研究で得られた成果の技術移転を目的としたソフトフォトニクス合同会社の設立には実用化への意欲が見られる。 ・運営費交付金の減少をカバーして、外部資金を豊富に獲得して研究の activity を維持しているようである。 ・スタッフの人数や年齢層のアップに問題はありそうだ。
<p>②プロジェクトの具体的な達成度 (目標は達成されたか、学術的価値、社会的価値、経済的価値の創造につながったか、技術レベルの向上につながったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・本プロジェクトでは、革新的な光デバイスの実現に資するナノフォトニクス材料の開発を目的とした当初計画を超える成果が達成されている。 ・プロジェクトの目標は達成されていると思われる。 ・素晴らしい成果が出ており、基礎的なフェーズの研究から実材料への応用が可能なものまで広く研究成果が出ている。 ・確実に技術レベルは向上しており、実用性の高いデバイスが研究開発のターゲットになっているので、成果は社会的・経済的価値につながりかけている。 ・液滴エピタキシー法による量子ドットの作製技術において、質の高い量子状態の制御が可能となりつつあり、学術的にも価値の高い成果が得られている。 ・光ディラックコーンの生成条件の解明や電子波への拡張などの成果は、学術的にも大きな意義がある。 ・ソフトコロイド結晶の面積化技術の開発は、構造物の老朽化対策向けの歪可視化の実用に期待されることから、社会インフラ整備への貢献も見込まれる。
<p>③研究開発の進捗状況 (研究により得られた成果は、世界レベルで比較して高いか、予算に見合った成果が得られたか、将来の新しい研究の芽が得られたか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・間違いなく世界レベルの研究成果が発信されている。 ・実用性の高い研究成果が得られ、NIMS のベンチャー企業をスタートさせたことは大変すばらしい。 ・成果がベンチャー企業設立まで発展していることに敬意を表する。 ・まさに新しい産業の芽であり今後が楽しみである。 ・NIMS のこれまでの研究実力が蓄積された成果であろう。 ・NIMS で開発された液滴エピタキシー法による量子ドットの作製技術は世界最高水準であり、本プロジェクト研究においても高対称性量子ドットの作製技術の開発など、世界的にも注目される成果が得られている。電流注入での実現に大きな期待が持たれる。 ・プロジェクト期間の途中からロードマップに追加された革新的導波路構造については、短期間に多くの成果が得られている。
<p>④見込まれる直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)や波及効果(インパクト) (質の高い論文・特許が多く出たか、新技術や実用材料につながるか、思いがけない)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・NIMS で得られたナノフォトニクス材料の新技术を基に、国内外の研究機関との精力的な共同研究により光計測や光通信分野への応用展開が期待される。 ・新規フォトニクス材料の発見やそれを利用した応用に今後の成果が期待される。 ・ベンチャー企業を設立するなどの幾つかの実用化促進に向けた成果が得られている。

成果があったか、他分野への波及効果はあるか	<ul style="list-style-type: none"> ベンチャー企業設立に代表されるように新産業への意欲的挑戦があり波及効果は大きいと思われる。 高度情報通信における高速・大容量化に加えた超低消費エネルギー化と高セキュリティ化に向けた革新的技術の開発への波及効果が期待される。 国際的レベルで評価される論文が publish されている。 本プロジェクトで得られた研究成果は、インパクトファクターの高い論文誌に多く掲載され、また特許も多数出されている。 研究成果が IF の高い論文に数多く発表されている。
総合評価点平均 (10点満点)	8.7 (小数第二位四捨五入)
その他 研究全体に対する総合的な所見、①～④に入らない所見、問題点、あるいはプロジェクトに対する印象など自由にご記入ください	<ul style="list-style-type: none"> 本プロジェクト研究により、NIMS の特徴を活かしたナノフォトニクス材料とデバイス技術を向上した研究成果が得られている。 光・電子の量子状態を精密に制御し、利用する革新的なナノフォトニクス技術のさらなる開発展開が期待される。 この分野は先端的解析技術をものづくりに生かしやすい分野と思うので、ぜひ連携して「学問を産業の道場」とした展開を引き続き見せてほしい。 NIMS の技術力をさらに維持・発展させるべく若手人材育成にも期待する。

第3期中長期計画プロジェクトの事後評価基準

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。 多くの点において模範的に優れていた。
9		
8	A	総合的に優れていた。 顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。 一部の計画の見直しが必要であった。
4		
3		
2	C	期待されたほどではなかった。 計画を大幅に見直して実施すべきであった。
1		