二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月17日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]

京都大学・工学研究科

[職・氏名]

助教・村井 俊介

[課題番号]

JPJSBP 120219920

1. 事業名 相手国: オランダ (振興会対応機関: OP)との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 発光制御ナノアンテナの科学の深化

(英文) Exploring the Science on Nanoantenna for Luminescence Control

3. 共同研究実施期間 2021年4月1日 ~ 2023年3月31日 (2年0ヶ月)【延長前】 年 月 日 ~ 年 月 日 (年 ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Technical University of Eindhoven・Full Professor・Jaime Gomez Rivas

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		3,800,000 円
内訳	1年度目執行経費	1,900,000 円
	2年度目執行経費	1,900,000 円
	3年度目執行経費	- 円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	10名
相手国側参加者等	7名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	0	0	0(0)
2年度目	0	0	0(0)
3年度目			()

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

「発光制御ナノアンテナ」の構築：本計画で提案する発光制御ナノアンテナとは、基板あるいは界面からの発光を特定の方向に高効率に取出すための界面の設計指針である。2次元構造でこのような機能が発現すると、3次元構造に比べ発光材料との組み合わせ難易度が格段に下がるため、関連材料開発分野を巻き込んだ多くの波及効果が期待できる。2年間の国際共同研究でこれまで研究を進めてきた金属ナノ粒子アレイ構造を中心に、誘電体フォトニック結晶技術をはじめとする光学技術、ナノインプリントをはじめとする微細加工技術、金属・半導体・セラミックス材料合成技術を統合・整理しナノ構造の設計原理から作製技術までを包括する「発光制御ナノアンテナの科学」へと昇華することを本研究の目的とした。光を損失なく特定方向へと伝える界面設計技術は、光源のみならず、光検出、太陽電池など、高効率なエネルギー変換のプラットフォームとして幅広く活用でき、学術的・産業的に有用である。

当初はオランダに渡航しての研究実施を計画していたが、新型コロナウイルスの状況を鑑みてとりやめ、リモートでの情報共有をベースに共同研究を進めた。これに伴い当初の予算配分を組み替えたが、相手国と十分に打ち合わせの上試料をやりとりし、相補的な強みを活かして試料作製、光学特性解析を行うことで、当初の目的を果たせると判断した。海外渡航費が減少した分、試料作製のための国内旅費、試料の郵送費に充てた。また当初謝金を計上していたが、共同研究参加者だけで試料を作製し、その分測定光学系や試料作製のための消耗品や試料加工施設の使用料に充てることで研究を進めた。特に以下の3つのトピックについて研究したが、それぞれで成果を論文にまとめることが出来、目標を達成できたと考えている。

面内対称性と BIC モード：申請者の研究を含め、これまで発光制御ナノアンテナの研究では面内に反転対称性を有する構造を用いて行われてきた。我々は予備検討によって、故意に面内対称性を崩すことで面内に Bound States in the Continuum (BIC) モードと関連する新しい局在状態ができることを見出した。2年間で対称性の低下の度合いと局在状態について系統的に測定した。BIC 波長を制御することで、特定の波長の光だけを必要な方向に取り出すナノアンテナを設計・作製することを試みた。得られた成果を論文2報にまとめ発表した。

面外対称性と非対称発光：もし界面の一方向のみに発光を放出することができれば、照明や光源の効率を大幅に向上させることができる。これまでの共同研究によって、シリコンナノ粒子の周期アレイからなるナノアンテナにおいて電気・磁気双極子の両者が励起可能であり、周期によりそれらの励起波長が制御できることを見出した。これを発展させ、電気および磁気双極子が干渉し面外対称性を持った異方性光散乱を引起すナノアンテナを設計・作製し、面外の片方向にのみ発光を放つナノアンテナを実現した。成果を論文として報告する(Liu et al., *Adv. Photon. Res.*, 2021, 2100235)と共に、国際学会で発表した。

ナノアンテナによる誘導放出(レーザー発振) 誘起：これまで自然放出のナノアンテナによる制御を試みてきたが、ナノアンテナの高い光閉じ込め能力(高いQ値)を利用すれば、誘導放出(レーザー発振)ができる可能性がある。特に励起子ポラリトン(EP)をナノアンテナ平面内に閉じ込めることでレーザー発振を実現した。EPは物質内の励起子と光共振器内の光子との間の強い結合によって形成されるボソン特性を備えた光と物質の混成準粒子であり、その高濃度励起は非平衡ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)を引き起こす。室温 BECは有機色素材料で可能であるが、有機EPのBECを形成するために必要なしきい値は、キャリアの電気注入による凝縮を可能にするためには依然として高い。この高いしきい値の背後にある要因の1つは、光閉じ込めキャビティの寿命が非常に短いことであり、急速なEP減衰

につながる。従って BEC を形成するため高い励起子密度を注入する必要がある。本研究では非常に低い損失を示す誘電体ナノアンテナを使用することにより、振動緩和と放射ポンピングを介して EP 状態の効率的な集団を可能にするのに十分な長さのキャビティ寿命を達成した。ポラリトンレーザー発振または非平衡 BEC がどのように達成されるかが示され、得られた閾値は BEC について報告されている最も低い値の 1 つであった。得られた成果を論文にまとめ報告した。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

1. ガラスなどの平面上に周期的にナノ粒子を並べると、その周期に応じた波長の光を平面内に閉込めることが可能です。本研究では、周期に加え構造の“対称性”を制御することで BIC と呼ばれる、さらに強い光閉込めを実現することを目的としました。
2. シリコンナノ粒子の周期アレイからなるナノアンテナにおいて電気・磁気双極子の両者の同時励起状態を利用すると、蛍光を面外の片方向に選択的に放出可能であることがわかった。本成果は効率的なディスプレイや照明の開発に重要である。
3. ナノアンテナがポラリトンレーザー発振にとって良いプラットフォームであることを示すことが出来た。今後ナノアンテナの設計により更なるレーザー閾値の低下が見込める。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学术交流することによって得られた成果)

共同研究先のアイントフォーヘン工科大学(TU/e)では光学特性の解析装置が充実しており、最先端の解析が可能である。これに対し日本側代表者はナノ加工の最新技術と様々な材料の知識を持つ。本事業で得られた成果の多くが、日本側代表者が京都大学の共用施設群を駆使して様々なナノ構造を作製し、相手国代表者が TU/e において光学特性を解析することで得られたものである。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

残念ながら本事業では特筆すべき社会的貢献は挙げられませんでした。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

日本側代表者の研究室に所属するポスドクと博士課程学生計 5 名を本事業に参加させ、国際交流と共同研究を進めた。特に学生 1 名は本事業で得られた成果を含めた博士論文をまとめ 2023 年 3 月に博士号を取得した。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どの様な発展の可能性が認められるか)

2023 年 4 月から 2 年間、同じ相手と 2 国間交流事業共同研究(非対称ナノアンテナの光学特性と発光制御)を採択していただき、本事業で得られた知見をもとに、更なる発展研究を行っている。BEC の更なる低閾値かなどが見込まれる。

(7)その他(上記(2)~(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など
特になし