

日本-V4 国際共同研究「先端材料」 平成 28 年度 年次報告書	
研究課題名（和文）	金属-IV 族半導体ナノ複合体のナノフォトニクス：単一ナノ粒子から機能性集合体まで
研究課題名（英文）	Nanophotonics with metal – group-IV-semiconductor nanocomposites: From single nanoobjects to functional ensembles
研究代表者氏名	藤井 稔
研究代表者所属・役職	神戸大学大学院工学研究科・教授
研究期間	平成 27 年 1 月 1 日～平成 31 年 3 月 31 日

1. 日本側の研究実施体制

ワークパッケージ②		ナノ複合材料形成・評価
氏名	所属機関・部局・役職	役割
藤井 稔	神戸大学・大学院工学研究科・教授	中心的な役割を果たす研究者
加納 伸也	神戸大学・工学研究科・助教	電気特性評価
青木 画奈	神戸大学・工学研究科・助教	金属ナノ構造形成
杉本 泰	日本学術振興会特別研究員 (PD)	ナノ複合体形成
管野 天	神戸大学・工学研究科・博士課程学生	表面修飾
井上 飛鳥	神戸大学・工学研究科・修士課程学生	ナノ複合体形成
堀 祐輔	神戸大学・工学研究科・修士課程学生	エネルギー準位構造解明
八嶋 志保	神戸大学・工学研究科・修士課程学生	ナノ複合体形成

2. 日本側研究チームの研究目標及び計画概要

本プロジェクトの中心材料であるホウ素とリンを同時ドーピングしたコロイド状シリコンナノ結晶と金属ナノ構造の複合構造を形成し、表面プラズモン共鳴による発光効率の改善と発光スペクトルのシェーピングを実現する。特に、高い発光増強が期待できる film-coupled nanoparticle 構造とシリコンナノ結晶の結合について研究を行う。また、シリコンナノ結晶表面の Si-H 結合と Si-O 結合を用いてシリコンナノ結晶に様々な官能基や生体分子を結合するプロセスを開発する。さらに、表面修飾シリコンナノ結晶の基板への固定やシリコンナノ結晶と金属ナノ粒子の複合ナノ構造の形成を行う。シリコンナノ結晶の単層膜の形成と層数を制御した積層膜の形成技術を開発する。

3. 日本側研究チームの実施概要

本プロジェクトの中心材料であるホウ素とリンを同時ドーピングしたシリコンナノ結晶について、昨年度に引き続き基礎物性の解明に関する研究を実施するとともに、それに様々な機能を付加するために必要な技術開発を行った。シリコンナノ結晶表面の Si-H 結合と Si-O 結合を用いてシリコンナノ結晶に様々な分子を結合するプロセスの開発を行った。それにより、発光特性を大きく損なうことなくシリコンナノ結晶を基板に固定することに成功した。また、同様の技術を用いて、金ナノ粒子（直径約 50nm）の表面をシリコンナノ結晶（直径約 3nm）が取り囲んだ形状の複合ナノ粒子の形成に成功した。さらに、一本鎖 DNA で修飾したシリコンナノ結晶と相補的な塩基配列を持つ一本鎖 DNA で修飾した金ナノ粒子を混合する方法で、DNA hybridization による複合ナノ粒子の形成を行った。この方法では、金ナノ粒子とシリコンナノ結晶の距離を DNA の長さにより精密に制御できるため、表面プラズモン共鳴による発光増強が最も高いと期待できる距離にシリコン量子ドットを正確に配置できる。設計通りの構造が形成できていることは透過型電子顕微鏡観察により評価した。さらに、シリコンナノ結晶の単層膜及び積層膜を層数や層間距離を精密に制御して形成する技術を開発した。これにより、シリコンナノ結晶間の相互作用（エネルギー移動）に関して重要な知見を得ることができた。また、シリコンナノ結晶単層膜を金薄膜と金ナノ粒子の間に挟み込んだ film-coupled nanoparticle 構造の形成を行った。この構造では、表面プラズモン共鳴波長がギャップ長に非常に敏感であり、共鳴波長を広い波長範囲で制御できる。表面プラズモン共鳴波長とシリコンナノ結晶の発光波長が一致するように精密に構造を制御することにより、シリコン量子ドットの発光強度を大幅に増強するとともに、スペクトルの線幅の狭帯域化に成功した。チェコグループと共同で、骨芽細胞を用いてシリコンナノ結晶の細胞毒性の評価と蛍光バイオイメージングの実証を行った。その結果、細胞毒性は小さく、我々の水分散性シリコン量子ドットは細胞中で水中と同様の明るい発光を示すことが明らかになった。