

ハイブリッド型ナノ光デバイスにおける単一ナノ発光体と電磁場の高効率結合

Efficient coupling of nanoemitters with optical fields in hybrid nanophotonic devices

所属・氏名 北海道大学電子科学研究所 藤原正澄  
Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University  
Masazumi FUJIWARA

派遣期間 2013年11月11日～2014年5月16日  
November 11, 2013 – May 16, 2014

研究機関 AG Nanooptik, Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin,  
Newtonstraße 15, 12489 Berlin, Germany

研究指導者 Prof. Dr. Oliver Benson

An efficient coupling of single quantum nanoemitters, such as diamond nitrogen-vacancy (NV) centers, with optical modes in nanophotonic devices is of fundamental importance in quantum information science. We use optical nanofibers where such an efficient coupling is possible with single NV centers in nanodiamonds. However, the coupling efficiency of NV fluorescence to the nanofibers has been limited to several percent. The objective of this project is to achieve a dramatic increase in coupling efficiency using specially designed nanorod-shaped nanodiamonds. In diamond nanorods, the NV dipolar emission couples to the nanorod's fundamental mode. This fundamental mode is nearly phase-matched to the nanofibers fundamental mode, yielding an efficient NV fluorescence extraction into optical nanofibers.

In the last half year, I have characterized the nanowire topography and distribution of single NV centers by utilizing AFM and confocal fluorescence microscopy, respectively. These data allow us to perform realistic estimation of the NV-nanofiber coupling efficiency in this device. I have therefore performed a detailed computational analysis that suggests an achievable coupling efficiency of 42 %, even using 580-nm-diameter nanofibers. The use of such thick nanofibers will provide us with opportunity to do cryogenic experiments that are indispensable for quantum information applications.

2013年11月より半年間、山田科学振興財団の長期間派遣援助のもと、ドイツ国ベルリ

ン・フンボルト大学物理学科 Benson 教授の研究室に博士研究員として在籍し、研究を行った。研究室には、博士研究員 3 名、博士課程学生 10 名が在籍しており、非常に活発な雰囲気の中で共同研究を行うことができた。Benson 教授の研究グループとは、過去数年間密接な共同研究を行っており、2011年、2013年に先方の博士課程学生を日本側に受け入れている。特に、本研究は2011年に先方の博士課程学生を受け入れた際の共同研究成果 [Shröder et al., *Opt. Express* 20, 10490 (2012).] の発展として位置づけられる。

この2011年の共同研究成果では、量子光学において有望な単一ナノ発光体である単一窒素欠陥 (NV) 中心を含んだナノダイヤモンド粒子とナノ光ファイバというナノ光デバイスの結合を行い、ナノ光ファイバ中の基本波モードと単一 NV 中心の高効率結合を実現した。このような電磁場 (特に光) と単一発光体の高効率結合は、発光体からの蛍光輻射モードの制御による高効率蛍光集光や単一発光体の光吸収増大に直結し、例えば量子情報科学における単一光子源や量子位相ゲートなどが実現可能となる。

しかしながら、この手法における最大の課題は、NV 中心をデバイス内の特定の位置に最適な配向で配置しなければならない点である。これを解決する最も有力な方法が、トップダウン的に形状を制御して作製したダイヤモンドナノ粒子の中から、ナノ光ファイバとの結合に最適なものを選び出し、ナノ光ファイバへ正確にマニピュレートするハイブリッド手法である。本研究では、ナノ光ファイバの上に NV 中心含有ダイヤモンドナノ結晶を、最適な位置・配向でマニピュレートして結合する事で、高い結合効率を実現する事を目的としている。

ドイツにおける研究開始後、派遣先が共同研究を行っている米国 MIT のグループが、ごく最近実現したナノロッド型ダイヤモンドナノ結晶を用いる事で、この位置・配向制御がより用意であるという結論に達した。そのため、ナノロッド型ダイヤモンドナノ結晶とナノ光ファイバの結合効率に関する電磁解析、および、提供されたナノロッド型ダイヤモンドナノ結晶の特性評価などを行った。

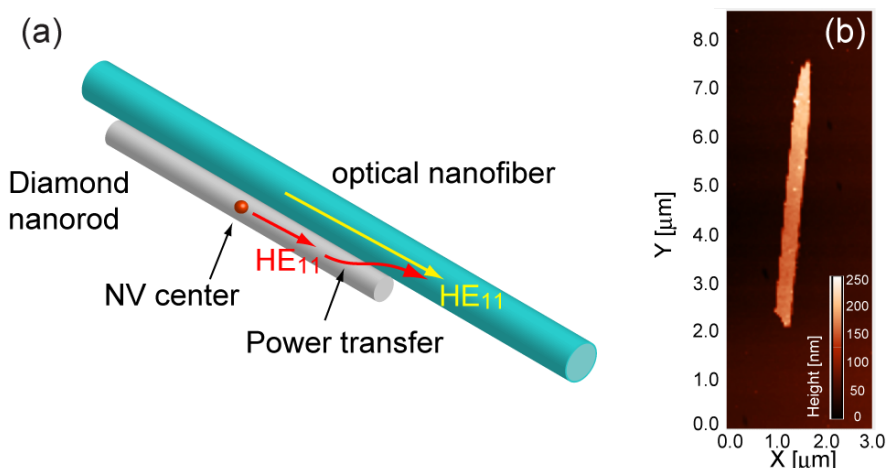


Fig. 1 (a) Concept of the nanorod-coupled optical nanofiber. (b) AFM topography of a diamond nanorod.

図 1 にデバイス全体の概念図とナノロッドの AFM 画像を示す。ナノロッド型のダイヤモ

ンドナノ結晶はそれ自体が光導波路として働く。そのため、NV 中心からの発光は高効率にダイヤモンドナノロッド導波路に結合し、それがナノ光ファイバに最終的に流れ込む。ナノロッドの長さを調整する事で、ナノ光ファイバへの光流入量が変わるため、長さを最適化する事で、NV 中心からの発光を高効率にナノ光ファイバへ（最終的に光ファイバへ）導く事が可能である。

提供されたナノロッド結晶の正確な形状評価を行うため、AFM を用いて形状測定を行った。バルクダイヤモンド薄膜に作成したナノロッド結晶を、マニピュレータによってカバーガラス上に移動させた。このカバーガラスには、グリッド構造が刻まれており、同一のナノロッドを追跡する事が可能である。その結果、ナノロッド構造は、幅 310 nm、高さ 150 nm、長さ 5.46  $\mu\text{m}$  の形状を有する事が分った。

次に、このナノロッド中に NV 中心がどのように配置されているかを知るために、共焦点蛍光顕微鏡による観察を行った。図 2 にその走査画像と図内に矢印で示した NV 中心からの発光のアンチバンチングを示した。ナノロッド中に 6 つの NV 中心が存在している事が分る。また、矢印で示した発光点は非常に美しいアンチバンチングを示した。これはこの NV 中心が単一欠陥である事を示すと共に、バルクダイヤモンド中の NV 中心と遜色ない光学特性を有する事を示している。

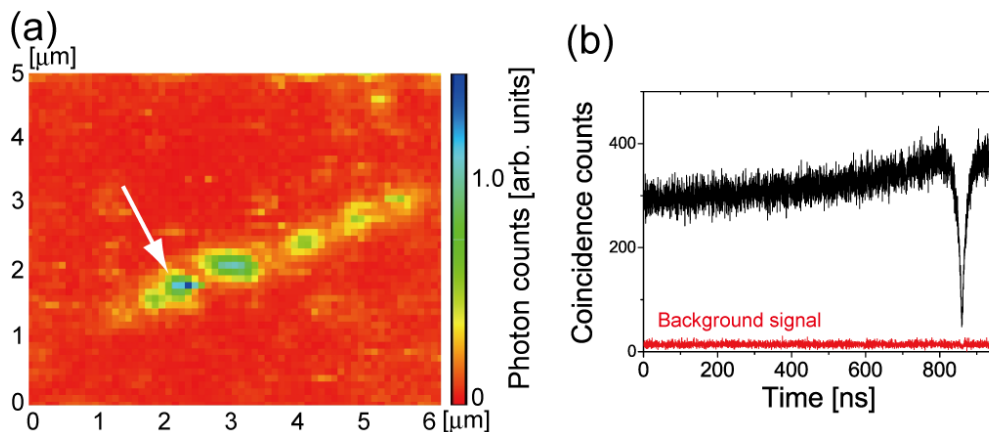


Fig. 2: (a) A confocal fluorescence microscope image of the nanorod. (b) A second-order photon correlation histogram of the fluorescence emitted from the single NV center indicated by the arrow in Fig. 2(a).

次に、このナノロッドがナノ光ファイバと結合した際の理論的結合効率を正確に知るために、FDTD 法（時間領域差分法）による電磁解析シミュレーションを行った。実際のナノ結晶は直方体構造を有しているが、ここでは対称性が高く計算が容易な直径 170 nm の円筒型として計算している。この結果、直径 580 nm のナノ光ファイバを用いた場合でも、ナノロッド型ナノ結晶の長さが約 6  $\mu\text{m}$  の時、42 %の結合効率を得られる事が明らかとなった。我々の用いるナノロッド型ナノ結晶の長さは約 5  $\mu\text{m}$  であるので、ほぼ最適な長さであると言える。

直径 580nm のナノ光ファイバが使用可能である事が明らかとなった事は、実験技術上

の大きな進展である。このサイズのナノ光ファイバはクリーンルームのような清浄環境でなくても、光学特性がかなりの時間保持される。また、ナノ光ファイバの作製そのものも非常に容易である。また、このような太いナノ光ファイバは容易に極低温下に冷却可能である。このような数値計算からのポジティブな結果を受けて、今後は、ナノロッド型ナノ結晶とナノ光ファイバへの結合を行っていくと同時に、極低温下での実験も視野に入れて、この共同研究を展開していく予定である。