

Title	Proposal and numerical analysis of the semiconductor nanogap microcavities
Author(s)	植本, 光治
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/34513
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (植 本 光 治)

論文題名

Proposal and numerical analysis of the semiconductor nanogap microcavities
(半導体によるナノギャップ光共振器の提案と数値解析)

論文内容の要旨

金属ナノ粒子に光を照射すると、自由電子の集団的振動である表面プラズモンが励起され、粒子の端面近傍に光電場の集中するナノサイズの点、「ホットスポット」が出現することが知られている。特に、金属ナノ粒子で形成されたギャップ構造は、ギャップの位置で光が非常に強く閉じ込められるため、光共振器としての役割が期待されている。しかし、表面プラズモンのスペクトル幅は低温でも比較的大きく、共振器としてのQ値は高くない。一方、半導体ナノ構造に閉じ込められた励起子の場合、スペクトル幅は低温で非常に小さくなり、高いQ値が期待できる。本研究では半導体ナノ構造の励起子共鳴を利用した新奇な光共振器のデザイン、およびそのための数値シミュレーションの開発を行った。

通常、ナノサイズの光共振器のデザインにはFDTD(Finite-Difference Time-Domain: 時間領域有限差分法)などの電磁界解析アルゴリズムが利用されている。しかしながら、励起子共の効果をふくむ半導体ナノ構造は、励起子の重心運動に由来する誘電応答の非局所性(およびそれによるマルチモードのポラリトン分散)があらわれるため、従来の解析手法は適用できない。そこで、励起子効果を含む電磁界解析のシミュレーション手法を有限要素法に基づいて新たに開発した。

本研究では、この新しい解析手法により、半導体ナノギャップ構造の励起子共鳴散乱および近接場光増強のシミュレーションを行った。ナノギャップ構造として、ナノサイズの半導体ブロックの対からなる「蝶ネクタイ型ギャップ構造」を考えた。配置・形状に関する幾何学的パラメータに対する依存性の評価を行い、半導体ナノギャップ系が高い近接場増強率($\sim 10^3$)と共振器Q値($\sim 10^5$)を持ち、高性能な光共振器としてはたらくことが明らかになった。同じ形状の金属ナノギャップ構造と比較すると、Q値は数桁上回っている。

さらに、半導体ナノギャップ光共振器中に分子系・量子ドットを配置したときのスペクトルを計算し、光と物質の強い相互作用による真空ラビ分裂が現れることを示した。ラビ分裂の大きさはスペクトル幅の数倍にもなり、金属ナノギャップ構造よりも明瞭なラビ分裂が観測されることを予言した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (植本光治)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教 授 吉田 博
	副 査	教 授 宮坂 博
	副 査	教 授 芦田昌明
	副 査	特任教授 安食博志

論文審査の結果の要旨

金属ナノ粒子に光を照射すると自由電子の集団振動である表面プラズモンが励起され、ナノ粒子の端面近傍に局在した強い光電場が生じる。金属ナノ粒子で形成されたナノ・ギャップ構造では、光が強く閉じ込められるために光共振器への応用が期待されている。しかしながら、表面プラズモンのスペクトル幅は低温でも大きいので、共振器としてのQ値を大きくすることは難しい。一方で、半導体ナノ構造に閉じ込められた励起子では、低温でのスペクトル幅が非常に小さくなり高いQ値が期待できる。植本光治さんはこの点に着目し、半導体ナノ構造の励起子共鳴を利用した新奇的な光共振器のデザイン、および、それを可能にするための汎用的な有限要素法による数値シミュレーション手法の開発をおこなった。この電磁解析手法では、任意形状に閉じ込められた励起子効果を取り扱うことができ、手法開発という点でも本分野における大きな貢献が得られたことになる。植本さんは開発した手法を用いて、半導体ナノギャップ構造が高い近接場増強率($\sim 10^3$)と共振器Q値($\sim 10^4$)を持つ高性能な光共振器として働くことを明らかにした。特に、Q値は金属ナノギャップ構造と比較して数桁大きくなる。また、これらの量の配置・形状・サイズ依存性などのナノ超構造における幾何学的パラメータ依存性を定量的に予測した。

さらに半導体ナノギャップ光共振器中に分子系・量子ドット系を配置したときのスペクトルを計算し、光と物質の強い相互作用による真空ラビ分裂が現れることを示した。真空ラビ分裂の大きさはスペクトル幅の数倍にもなり、金属ナノギャップ構造よりも明瞭なラビ分裂が観測されることを予言した。これらは将来に量子情報処理デバイス実現のための応用にも道を開いたことになる。

以上、述べてきたように、植本光治さんは自ら開発した有限要素法に立脚した新しい電磁解析手法とシミュレーションにより、そのパワフルな予測能力と応用可能性を示しており、博士(理学)の学位論文として価値のあるものと認める。