

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公 開 特 許 公 報(A)

(11) 特許出願公開番号
特開2010-26385
(P2010-26385A)

(43) 公開日 平成22年2月4日(2010.2.4)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO2B 6/122 (2006.01)	GO2B 6/12 A	2H147
GO2B 6/12 (2006.01)	GO2B 6/12 Z	
	GO2B 6/12 N	

審査請求 有 請求項の数 6 O L (全 26 頁)

(21) 出願番号 特願2008-189876 (P2008-189876)	(71) 出願人 000003078 株式会社東芝 東京都港区芝浦一丁目1番1号
(22) 出願日 平成20年7月23日 (2008.7.23)	(74) 代理人 100075812 弁理士 吉武 賢次
(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願 (平成18年度独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「低損失オプティカル新機能部材技術開発」産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願)	(74) 代理人 100082991 弁理士 佐藤 泰和
	(74) 代理人 100096921 弁理士 吉元 弘
	(74) 代理人 100103263 弁理士 川崎 康
	(72) 発明者 山 際 正 和 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

最終頁に続く

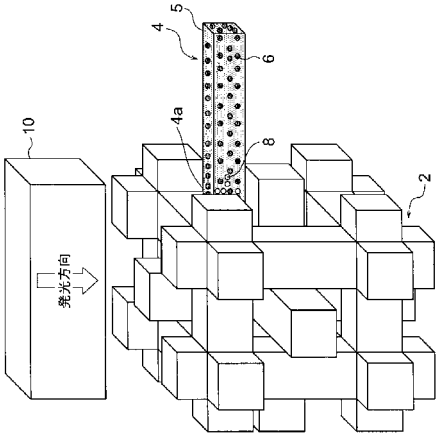
(54) 【発明の名称】 光導波路システム

(57) 【要約】

【課題】 波長の選択が可能でかつ変換効率が可及的に高いカップリング機構を有するとともに、光の伝搬方向に指向性を持たせることができる光導波路システムを提供することを可能にする。

【解決手段】 内部に中空構造を有する三次元フォトニック結晶構造2と、誘電体中5に複数の金属ナノ粒子6が分散された構造を有し、端部4aが三次元フォトニック結晶構造の結晶柱間に挿入され、かつ金属ナノ粒子に隣接して配置されて励起光を受光すると近接場光を発生する半導体量子ドット8を含む光導波路4と、半導体量子ドットを励起するための励起光を発生する励起用光源10と、を備え、金属ナノ粒子は前記近接場光を受光すると表面プラズモンが励起される。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

内部に中空構造を有する三次元フォトニック結晶構造と、
誘電体中に複数の金属ナノ粒子が分散された構造を有し、端部が前記三次元フォトニック結晶構造の結晶柱間に挿入され、かつ前記金属ナノ粒子に隣接して配置されて励起光を受光すると近接場光を発生する半導体量子ドットを含む光導波路と、
前記半導体量子ドットを励起するための励起光を発生する励起用光源と、
を備え、前記金属ナノ粒子は前記近接場光を受光すると表面プラズモンが励起されることを特徴とする光導波路システム。

【請求項 2】

前記励起用光源は、前記光導波路の延在する方向と略平行な、前記光導波路の前記端部の側面を前記励起光で照射するように配置されていることを特徴とする請求項 1 記載の光導波路システム。

【請求項 3】

前記励起用光源は、前記光導波路の延在する方向と略直交する、前記光導波路の前記端部の端面を前記励起光で照射するように配置されていることを特徴とする請求項 1 記載の光導波路システム。

【請求項 4】

前記半導体量子ドットの直径が 46 nm 以下であることを特徴とする光導波路システム。

【請求項 5】

前記半導体量子ドットは、 I-V 族半導体、 III-V 族半導体、および I-IV 族半導体から形成され、その発光波長が最短 400 nm から最長 5330 nm であることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の光導波路システム。

【請求項 6】

前記光導波路中に存在する前記半導体量子ドットの密度が $4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 以下であることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の光導波路システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光導波路システムに関する。

【背景技術】

【0002】

表面プラズモンは金属と誘電体あるいは空気の境界表面で発生する電磁波モードであり、電磁波が光の回折限界以下の領域に表面に沿って局在しかつ増強する特性を持つ。これらの特性を活かし、近年ナノフォトニクスやバイオテクノロジー等の分野において応用研究が展開されている。この研究の最先端に、プラズモン励起媒体として、体積に対する面積の比が大きいナノオーダーサイズの金属ナノ粒子の応用がある。その電磁波モードは局在表面プラズモンとして知られている。特にこの金属ナノ粒子を使ったプラズモン・ポラリトン光導波路内の電磁波信号として伝送する手法が積極的に追求されている。このような応用に向けて、金属ナノ粒子の製造方法の研究が進んでいるのと同時に、プラズモン・ポラリトンを発生する様々な手法が検討されている。

【0003】

また、光源の光をプラズモン・ポラリトンに変換する際の損失を軽減する為の、様々な形状・特性を持つ近接場光プローブの研究が行われている（非特許文献 1）。この非特許文献 1 には、例えば、プローブ根本付近の先鋭角に対し、先鋭部の断面直径が光波長以下となる部分で先鋭角を大きくし、先端部までの距離をできる限り小さくすることにより、高い分解能かつ高い光伝達効率の性能を有する 2 段階先鋭化型近接場光プローブが開示されている。

【0004】

この分野において、もっとも一般的に行われるプラズモン・ポラリトンの発生方法は、光源の伝搬光を近接場光に変換しそれでプラズモン・ポラリトンを励起する手法である。先鋭化近接場光プローブを用いたこの手法は、ナノメートル・オーダの位置制御装置および加工技術が必須となる。また近接場光プローブなどの近接場光発生装置は基本的にその変換効率が 10^{-4} のオーダと低いという問題がある。

【0005】

先鋭化した近接場光プローブに対し、金属薄膜の表面を同心円状に微細加工した表面プラズモンアンテナの検討も精力的に行われている。この手法は同心円の中心の局所領域（例えば、直径が 300 nm の領域）に表面プラズモンを集中させ近接場光を発生させる。表面プラズモンを集中した領域におかれた Si ナノフォトダイオードによる測定では、1桁の効率向上を報告されている（例えば、非特許文献2参照）。

10

【0006】

同様に、伝搬光から回折格子を介して発生させた表面プラズモンを、半円周状に配置された数個の金属微粒子から構成される表面プラズモン・ポラリトンコンデンサーで局所領域（この場合はナノドットカプラーの片端）に集光する手法も報告されている（非特許文献3）。伝搬光からプリズムの全反射面で発生する近接場光を介して、プリズム全反射面に塗布あるいは近接させた金属薄膜に表面プラズモンを発生させる全反射測定法（ATR (Attenuated Total Reflection) 法）により、膜状の構造に表面プラズモンを励起する手法も知られている（例えば、非特許文献4参照）。

20

【0007】

より直接的なカップリング手法として、レンズで集光した伝搬光を一次元に配列したナノ粒子の片端に直接照射し、このナノ粒子にプラズモンを励起する方法が提案されている（特許文献1参照）。

【0008】

また、高屈折率の埋め込み型テーパ状「ハイメサ」光導波路も提案されている（特許文献1参照）。

【0009】

しかしながら、このようなトップ・ダウン的な微細加工手法では、電子ビームリソグラフィなどの高価な微細加工装置の導入が必要であり、光導波路システムの大量生産時には、製造コストが高くなるという問題がある。さらに、その導波路に導入する光の波長制御性は、構造によって限定されてしまう。また、伝搬光と近接場光のカップリングには、位相整合が必要である。

30

【0010】

上述したトップ・ダウン的な手法に対し、金属ナノ粒子および無機複合体に量子ドットを、ゲイン材料として混在させることが提案されている（例えば、非特許文献5）。この非特許文献5に記載の技術は、三次元的に金属ナノ粒子分散組織中に量子ドットを混在し、導波路内での光の損失を量子ドット（ゲイン材料）により低減することが可能であり、導波距離が伸びる事を報告している。さらに、量子ドットのサイズや材料による発光波長選択性もゲインに寄与する点が述べられている。

【非特許文献1】T. Saiki, S. Mononobe, M. Ohtsu, N. Saito, and J. Kusano, Appl. Phys. Lett. 68, 2612 (1996).

40

【非特許文献2】T. Ishi, J. Fujikata, K. Makita, T. Baba, K. Ohashi, "Si Nano-Photodiode with a Surface Plasmon Antenna" Jpn. J. Appl. Phys. 44, L364-L366 (2005).

【非特許文献3】W. Nomura, M. Ohtsu, and T. Yatsui, Appl. Phys. Lett. 86, 181108 (2005).

【非特許文献4】H. Raether, Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg) 1988.

【特許文献1】特開2006-171479号公報

【特許文献2】特開2002-311262号公報

50

【非特許文献 5】D. Parekh, L. Thylen, C. J. Chang-Hasnain, “Metal nanoparticle and quantum dot metamaterials for near resonant surface plasmon waveguides” Nano-Optoelectronics Workshop, 2007, I-NOW '07. International July 29 2007 - August 11 2007 pp 150-151.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

以上説明したように、様々な波長の光源の伝搬光を近接場光に変換し、光導波路にカップリングするシステムは大がかりになるという問題があった。また、位相整合の必要性があり、変換効率が低いという問題があった。さらに、光源からの光が導波路の端から所望の伝搬方向に沿う指向性がないという問題があった。

10

【0012】

本発明は、上記事情を考慮してなされたものであって、波長の選択が可能でかつ変換効率が可及的に高いカップリング機構を有するとともに、光の伝搬方向に指向性を持つことの可能な光導波路システムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明の一態様による光導波路システムは、内部に中空構造を有する三次元フォトリック結晶構造と、誘電体中に複数の金属ナノ粒子が分散された構造を有し、端部が前記三次元フォトリック結晶構造の結晶柱間に挿入され、かつ前記金属ナノ粒子に隣接して配置されて励起光を受光すると近接場光を発生する半導体量子ドットを含む光導波路と、前記半導体量子ドットを励起するための励起光を発生する励起用光源と、を備え、前記金属ナノ粒子は前記近接場光を受光すると表面プラズモンが励起されることを特徴とする。

20

【発明の効果】

【0014】

本発明によれば、波長の選択が可能でかつ変換効率が可及的に高いカップリング機構を有するとともに、光の伝搬方向に指向性を持たせることが可能な光導波路システムを提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

30

本発明の実施形態を以下に図面を参照して詳細に説明する。

【0016】

(第1実施形態)

本発明の第1実施形態の光導波路システムを図1および図2に示す。図1は、本実施形態の光導波路システムを示す斜視図、図2は、図1に示す光導波路システムの光導波路の延在する方向に沿って切断した縦断面図である。

【0017】

本実施形態の光導波路システムは、内部に中空構造を有する三次元フォトリック結晶構造2と、この三次元フォトリック結晶構造2の上記中空構造の結晶間に端部4aが挿入された光導波路4と、励起用光源10とを備えている。光導波路4は、誘電体(例えばSiO₂)5中にナノメートルサイズの金属ナノ粒子(例えば銀ナノ粒子)6が均一に分散された構造を有し、フォトリック結晶構造2に挿入される端部4aには金属ナノ粒子ばかりでなく双極子光源となる半導体量子ドット8も分散されている。励起用光源10は、三次元フォトリック結晶構造2上に設けられ、三次元フォトリック結晶構造2に挿入された光導波路4の端部4a内の半導体量子ドット8に励起光を照射して半導体量子ドット8を励起し、近接場光を発生させる。すなわち、励起用光源10は、光導波路4の延在する方向と略平行な、光導波路4の端部4aの側面を励起光で照射するように配置されている。なお、半導体量子ドット8に励起光が照射されると、半導体量子ドット8から近接場光の他に、この近接場光と同じ波長の伝搬光も発生される。半導体量子ドット8から発生される近接場光および伝搬光は、フォトリック結晶構造4の外部に漏れ出ないが、励起光は入射

40

50

可能なようにフォトニック構造を構成しておく。すなわち、半導体量子ドットからの発光波長がフォトニックバンドギャップの中にあり、励起光の波長はバンド上にあるように設計しておく。そして、半導体量子ドット 8 から発生された近接場光はこの半導体量子ドット 8 に近接している金属ナノ粒子 6 に照射されてこの金属ナノ粒子 6 からプラズモンが発生され、光導波路 4 中に分散された金属ナノ粒子 6 を介して伝搬されていく。

【0018】

このように構成された本実施形態の光導波路システムにおいては、外部からの光が入射される光導波路 4 の端部 4 a には、双極子光源となる半導体量子ドット 8 が存在し、この半導体量子ドット 8 は、励起用光源 10 により励起される。そして、半導体量子ドット 8 はその材料、構造、サイズによって規定される波長の光を放出する。その発光はフォトニッ

10

【0019】

ここで、半導体量子ドット 8 は、溶媒中に混在できる材料であることが望ましい。また、半導体量子ドット 8 は、光導波路 4 内の全般に渡り混在しても良いが、光導波路 4 の主に光が入射される端部 4 a に量子ドットが混在し、その密度が制御できていることが望ましい。また、半導体量子ドット 8 は、ドット単体乃至コア・シェル構造でありその材料の組み合わせにより発光波長が制御可能であり、この発光波長がプラズモン・ポラリトンの共鳴波長と一致することが望ましい。また、半導体量子ドット 8 は金属ナノ粒子 6 と同じオーダのサイズであることが望ましい。

20

【0020】

励起用光源 10 は、既存の半導体微細加工技術乃至半導体微結晶成長技術で作製可能な波長選択性の高い光源であることが望ましい。また、励起用光源 10 は半導体量子ドット 8 の発光波長より短波で発振する光源であることが望ましい。また、励起用光源 10 はフォトニック結晶構造 2 が吸収または反射の少ない波長で発振する光源であることが望ましい。また、フォトニック結晶構造 2 の欠陥モード波長が半導体量子ドット 8 の発光波長と近いあるいは同じであることが望ましい。フォトニック結晶構造 2 を構成する部材としては、GaAs、GaNなどの半導体や、TiO₂などの誘電体等が挙げられる。フォトニッ

30

【0021】

次に、本実施形態の光導波路システムの製造方法を、図 3 を参照して説明する。図 3 に示すように、内部に中空構造を有する三次元フォトニック結晶構造 2 を作製し、この三次元フォトニック構造 2 の中空構造の結晶柱間隔（例えば 1 μm）と同じサイズの開口を有するマスク（図示せず）を、この開口が一つの結晶柱間に対応するように、図 3 では三次元フォトニック結晶構造 2 の側面に形成し、この開口を通して上記開口に対応する三次元結晶構造の結晶柱間に、金属ナノ粒子 6 および半導体量子ドット 8 が分散された SiO₂ 5 を埋め込み、光導波路 4 の端部 4 a を形成する。続いて、上記開口を金属ナノ粒子 6 が分散された SiO₂ 5 を埋め込み、端部 4 a 以外の光導波路 4 を形成する。なお、このように形成される光導波路 4 においては、例えば銀からなる直径 10 nm の金属ナノ粒子 6 は、SiO₂ 5 中に 5 nm の間隔で配置され、直径 10 nm の半導体量子ドット 8 は、約 5 nm の間隔を隔てて金属ナノ粒子 6 に隣接するように構成される。

40

【0022】

金属ナノ粒子としては、Ag の他、Au、Pb、Ti、Al、Cu、In、Ir、W

50

、Cr、Ni、Fe、Co、Zn、Ge、Sn、Mn、Mo、Bi等を用いてもよい。

【0023】

半導体量子ドット8としては、IⅤ族半導体(Si、Ge)、IⅢⅠⅠⅠ族化合物半導体(GaAs、AlAs、InAs、GaP、InP、GaSb、AlSb、InSb、 $Al_xGa_{1-x}As$ 、 $GaAs_{1-x}Sb_x$ 、 $In_{1-x}Ga_xP$ 、 $In_{1-x}Ga_xAs$ 、InN、 $In_xGa_{1-x}N$)またはIⅠⅠⅠ族化合物半導体(CdSe、CdS、ZnSe、ZnTe)のいずれかからなる結晶材料あるいは混晶材料であり、その発光波長は最短400nmから最長5330nmである。

【0024】

短波長の限界(400nm)の根拠としては、以下の通りである。金属ナノ粒子が分散された光導波路において、金属ナノ粒子(銀または金)の光学的応答が金属的である最も短い光の波長は、400nmである。これより短波長の光に対しては、光学的応答が金属的ではなく、プラズモンの発生が起きない。

【0025】

また、長波長の限界(5330nm)の根拠としては、以下の通りである。半導体量子ドットの量子準位間隔が室温(300K)での熱エネルギーより小さくなると半導体量子ドットの準位が離散的ではなくなり、半導体量子ドットが光源として機能しなくなる。量子準位間隔は発光波長が長くなるにつれ小さくなるので、半導体量子ドットの材料として選んだものの中からその限界となる発光波長が最長5330nmであり、この波長5330nmを長波長の限界に選んだ。

【0026】

本実施形態の光導波路システムにおいて、光導波路4の光導波方向(光導波路4が延在する方向)にのみ電磁場が導波した。

【0027】

また、本実施形態においては、半導体量子ドット8によって励起光は近接場光に変換され、この変換された近接場光は三次元フォトニック結晶構造2から外部に漏れでないので、変換効率を可及的に高くすることができる。

【0028】

また、半導体量子ドット8の材料を適宜選択することにより、光導波路4を導波する波長の選択が可能となる。

【0029】

以上説明したように、本実施形態によれば、波長の選択が可能でかつ変換効率が可及的に高いカップリング機構を有するとともに、光の伝搬方向に指向性を持たせることが可能な光導波路システムを提供することができる。また、本実施形態の光導波路システムは、基板面内の光配線に用いる場合に有用である。

【0030】

また、従来の場合は、伝搬光と近接場光のカップリングには、位相整合が必要であるが、本実施形態の光導波路システムにおいては、波長選択可能、かつ密度制御による高変換効率化可能な半導体量子ドットを光導波路カップリング用微小光源として用いて、励起された半導体量子ドットからの発光近接場成分が金属ナノ粒子とカップリングするため、伝搬光(励起光)とのカップリングにおいて位相整合する必要がない。

【0031】

(第2実施形態)

次に、本発明の第2実施形態による光導波路システムを図4乃至図5を参照して説明する。図4は、本実施形態の光導波路システムを示す斜視図、図5は、図4に示す光導波路システムの光導波路の延在する方向に沿って切断した縦断面図である。

【0032】

本実施形態の光導波路システムは、図1乃至図3に示す第1実施形態の光導波路システムにおいて、励起用光源10を三次元フォトニック結晶構造2の上面に配置する代わりに、励起用光源10の励起光を発光する面が、光導波路4の端部4aの端面(プラズモンが

10

20

30

40

50

導波する方向（光導波路 4 の延在する方向）に略直交する端面に対向するように、励起光源 10 を三次元フォトニック結晶構造 2 の側面に配置した構造となっている。すなわち、励起光源 10 は、光導波路 4 の延在する方向と略直交する、光導波路 4 の端部 4 a の端面を励起光で照射するように配置されている。

【0033】

なお、本実施形態においては、図 6 に示すように、光導波路 4 の端部 4 a の上記端面が三次元フォトニック結晶構造 2 の側面から露出するように、光導波路 4 の端部 4 a が三次元フォトニック結晶構造 2 を貫通するように構成してもよい。

【0034】

また、本実施形態においては、光導波路 4 内の金属ナノ粒子 6 および半導体量子ドット 8 は、第 1 実施形態と同様に、誘電体（例えば SiO_2 ）中に均一に分散されている。そして、金属ナノ粒子 6 および半導体量子ドット 8 は、第 1 実施形態と同じ材料を用いることができる。

【0035】

本実施形態の光導波路システムにおいて、光導波路 4 の光導波方向（光導波路 4 が延在する方向）にのみ電磁場が導波した。

【0036】

また、本実施形態においては、半導体量子ドット 8 によって励起光は近接場光に変換され、この変換された近接場光は三次元フォトニック結晶構造 2 から外部に漏れでないので、変換効率を可及的に高くすることができる。

【0037】

また、半導体量子ドット 8 の材料を適宜選択することにより、光導波路 4 を導波する波長の選択が可能となる。

【0038】

以上説明したように、本実施形態によれば、波長の選択が可能でかつ変換効率が可及的に高いカップリング機構を有するとともに、光の伝搬方向に指向性を持たせることが可能な光導波路システムを提供することができる。また、本実施形態の光導波路システムは、基板面内に垂直に貫通する光配線に用いる場合に有用である。

【実施例】

【0039】

次に、本発明の実施例を説明する。

【0040】

（第 1 実施例）

本発明の第 1 実施例による光導波路システムは、図 4 乃至図 6 に示す第 2 実施形態の光導波路システムであって、光導波路 4 の誘電体は SiO_2 、金属ナノ粒子 6 は直径が 10 nm の銀ナノ粒子で 5 nm の間隔で誘電体中に分散配置され、半導体量子ドット 8 は直径 10 nm の材料 Ge であって、銀ナノ粒子とは約 5 nm の間隔を隔て配置されている。なお、Ge 量子ドットは、量子サイズ効果によりそのバンドギャップが直接遷移型になる事が報告されている（例えば Journal of Chemical Physics, VOL. 101, p1607 等に掲載）。励起光源 10 の励起光の波長は、半導体量子ドット 8 の発光波長（ $1.57 \mu\text{m}$ ）より短い波長であり、三次元フォトニック結晶構造 2 を構成する部材による吸収が大きくなる波長よりも長い波長（870 nm）であった。

【0041】

半導体量子ドット 8 は、励起光を受けると、 $1.57 \mu\text{m}$ の波長の近接場光を発生し、この近接場光によって銀ナノ粒子 6 がプラズモンを発生し、このプラズモン（電磁場）が光導波路 4 内で約 $1 \mu\text{m}$ 導波したのを観測した。その観測結果を図 7 に示す。量子ドット 8 間の量子力学的カップリングを無くすため、その密度を、銀ナノ粒子 6 を必ず隣接する程度の密度を上限とした。さらに、双極子光源となる半導体量子ドット 8 の数を増やすと、光導波路 4 内を進む電磁場パワーの強度が増大することを確認した（図 8 参照）。図 8 は、半導体量子ドットの数と、この半導体量子ドットから $1 \mu\text{m}$ の距離における光導波路

4 内の電磁場エネルギー密度を示す。3 個の量子ドット 8 は 100 nm の間隔で並ぶように配置した。半導体量子ドット 8 の個数が増えるにつれ、光導波路 4 の電磁場エネルギー密度は線形に増大した。したがって、微小光源（半導体量子ドット 8）の個数を増やすことにより、光導波路 4 のカップリング効率が上昇した。光導波路 4 内において、半導体量子ドット 8 の間隔が近すぎると、量子力学的カップリングにより、その発光波長などの特性が変わった。そこで本実施例では、半導体量子ドット 8 の間に少なくとも 1 個の金属ナノ粒子を挟み、これを防いだ。これによって求めた最大許容密度は $4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ であった。半導体量子ドット 8 の密度が $4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ より大きい場合、半導体量子ドット 8 が少なくとも 2 個隣接し、隣接した半導体量子ドット 8 間の電子・正孔（電子が 1 個抜けている状態）相互作用により離散的なエネルギー準位が変わり、結果としてそれら半導体量子ドット 8 の集合体の励起・発光波長が変わり、金属ナノ粒子が分散された光導波路 4 の所望の光源として機能しなかった。ここで、半導体量子ドット 8 の全体としての発光スペクトルの幅が狭い方が望ましいが、隣接した半導体量子ドット 8 が混在した場合、全体としての発光スペクトルの幅が広がったので、光源として望ましくなかった。また、半導体量子ドット 8 の密度が $4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ より大きい場合、半導体量子ドット 8 が複数個隣接し、半導体量子ドット 8 の間の電子・正孔相互作用により、電子・正孔対の緩和過程が変わり、非発光緩和過程の出現により、半導体量子ドット 8 の発光効率が低下した。

【0042】

次に、光導波路 4 の端部 4 a を覆うようにフォトニック結晶構造 2 が設けられている場合と、フォトニック結晶構造がない場合に対して、銀ナノ粒子が分散された光導波路 4 内外での電磁場パワーの違いを確認した。フォトニック結晶構造 2 の構成材料の屈折率は 3 であり、まわりの媒質の屈折率は 1.43 であった。フォトニック結晶構造 2 の構成材料は、直径が $0.365\text{ }\mu\text{m}$ 、格子間隔が $0.96\text{ }\mu\text{m}$ であって、六方晶の形で配列していた。フォトニック結晶構造 2 は、並んだ 6 本のフォトニック結晶構造を構成する材料の柱を除き、そこに半導体量子ドット 8 を含む光導波路 4 の端部 4 a を配置した。半導体量子ドット 8 は、 $1.57\text{ }\mu\text{m}$ の波長で近接場光を発生した。この近接場光を光源とした時、光導波路 4 の端部 4 a にフォトニック結晶構造 2 がある場合は、フォトニック結晶構造 2 がない場合に比べ、光導波路 4 の外では電磁場パワーが弱くかつ光導波路 4 の中では電磁場パワーが強い事を確認した。このことは、フォトニック結晶構造 2 の効果により、銀ナノ粒子が分散された光導波路 4 の外への電磁場パワーの漏れが低減され、光導波路 4 の中を伝搬する電磁場パワーを増強していいと考えられる。

【0043】

（第 2 実施例）

次に、本発明の第 2 実施例による光導波路システムを説明する。

【0044】

本実施例の光導波路システムは、第 1 または第 2 実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 の離散的エネルギー準位を利用し、電子と正孔の離散的準位のエネルギー差を変えることにより発光波長を制御する構成を有している。この発光波長の制御は、半導体量子ドット 8 のサイズ（直径）で決定された。実際に電子と正孔の閉じ込めが確認できる半導体量子ドット 8 の直径は最大 46 nm であるが、この大きさ以下の半導体量子ドット 8 を用いた。この半導体量子ドット 8 に励起用の光源を照射すると、半導体量子ドット 8 は発光した。直径が 46 nm より大きいと、量子閉じ込め効果が弱くなり離散的エネルギー準位の間隔が離散的にならず電子・正孔の波動関数が半導体量子ドット 8 に局在しなくなった。結果として半導体量子ドット 8 での励起・発光過程が起きなくなり、光源としての特性が低下した。

【0045】

以上説明したことにより、半導体量子ドットの直径は 46 nm 以下であることが好ましい。

【0046】

(第3実施例)

次に、本発明の第3実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8のサイズあるいは材料を変えることにより、半導体量子ドット8から発生される近接場光の可視(400nm)から赤外(5330nm)まで発光波長を得ることができた。なお、光ディテクタとし、400nmから1000nmはSiディテクタ、1000nmから2000nmはInAsディテクタ、2000nmから5330nmはInSbディテクタを使用した。発光波長が400nmから5330nmに範囲にあることにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴波長(400nmから600nm程度)の励起から、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長(400nmから5330nm程度)までを十分網羅できた。400nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できず、また5330nmより長波の光では金属ナノ粒子が分散された光導波路4の損失が大きかった。このため、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモンの共鳴励起による連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

10

【0047】

400nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400nmから600nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。

20

【0048】

5330nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400nmから5330nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0049】

(第4実施例)

次に、本発明の第4実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、かつ量子ドット材料としてSiのIV族半導体を用い、サイズを半径1nmから7nmまでの半導体量子ドットを用いた。なお、光導波路4中の半導体量子ドットのサイズは同じものを用いている。すると、発光波長が557nmから1085nmとなる光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6を共鳴励起することが可能でかつ金属ナノ粒子が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子が分散された光導波路4の最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

30

40

【0050】

本実施例も第3実施例と同様に、400nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400nmから600nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400nmから533

50

0 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0051】

(比較例)

第4実施例の比較例として、第4実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドットとして、7 nmより大きな半径を持つSiの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300 K)における熱揺らぎ(kT) 4. 14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。ここで、kはボルツマン定数、Tは絶対温度を示す。

10

【0052】

(第5実施例)

次に、本発明の第5実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてGeのI V族半導体を用い、サイズが半径1 nmから8 nmまでの半導体量子ドットを用いた。なお、光導波路4中の半導体量子ドットのサイズは同じものを用いている。すると、発光波長が556 nmから1811 nmとなる光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴励起することが可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴の励起による連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

20

【0053】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400 nmから5330 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

30

【0054】

(比較例)

比較例として、第5実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、8 nmより大きな半径を持つGeの量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300 K)における熱揺らぎ(kT) 4. 14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

40

【0055】

(第6実施例)

次に、本発明の第6実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてGaAsのIII-V族化合物半導体を用い、サイズを半径2 nmから14 nmまでの半導体量子ドットを用いた。なお、光導波路4中の半導体量子ドットのサイズは同じものを用いた。すると、発光波長が412 nmから854 nmとなる光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6を共鳴励起することが可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における

50

最も損失の少ない波長を得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0056】

本実施例も第3実施例と同様に、400nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400nmから600nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400nmから5330nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0057】

(比較例)

比較例として、第6実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、14nmより大きな半径を持つGaAsの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300K)における熱揺らぎ(kT)4.14meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0058】

(第7実施例)

次に、本発明の第7実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてAlAsのIII-V族化合物半導体を用い、サイズを半径2nmから11nmまでの半導体量子ドットをとした。なお、光導波路4においては、同じサイズの半導体量子ドットを用いている。すると、発光波長が418nmから570nmまでの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴励起することが可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0059】

本実施例も第3実施例と同様に、400nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400nmから600nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400nmから5330nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0060】

(比較例)

比較例として、第7実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、11nmより大きな半径を持つAlAsの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導

波路システムにおいては、室温（300 K）における熱揺らぎ（ kT ）4.14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0061】

（第8実施例）

次に、本発明の第8実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてInAsのIII-V族化合物半導体を用い、サイズを半径3 nmから9 nmまでの半導体量子ドットを用いた。なお、光導波路4においては、同じサイズの半導体量子ドットを用いている。すると、発光波長が528 nmから2167 nmの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6を共鳴励起することが可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0062】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400 nmから5330 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0063】

（比較例）

比較例として、第8実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、9 nmより大きな半径を持つInAsの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温（300 K）における熱揺らぎ（ kT ）4.14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0064】

（第9実施例）

次に、本発明の第9実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料として、GaPのIII-V族化合物半導体を用い、サイズを半径1 nmから6 nmまでの半導体量子ドットを用いた。なお、光導波路4において半導体量子ドットのサイズは同じとする。すると、発光波長が426 nmから542 nmの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6を共鳴励起することが可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0065】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の

材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400 nmから5330 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0066】

(比較例)

比較例として、第9実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、6 nmより大きな半径を持つGaPの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300 K)における熱揺らぎ(kT) 4. 14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0067】

(第10実施例)

次に、本発明の第10実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてInPのIII-V族化合物半導体を用い、サイズを半径2 nmから13 nmまでの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が456 nmから903 nmの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0068】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400 nmから5330 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0069】

(比較例)

比較例として、第10実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、13 nmより大きな半径を持つInPの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300 K)における熱揺らぎ(kT) 4. 14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0070】

(第11実施例)

次に、本発明の第11実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてGaSbのIII-V族化合

10

20

30

40

50

物半導体を用い、サイズを半径 3 nm から 16 nm までの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長 638 nm から 1566 nm の光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子 6 の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路において、半導体量子ドット 8 に隣接した単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0071】

本実施例も第 3 実施例と同様に、400 nm より短波の光では、単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が 400 nm から約 600 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nm より長波の光では、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 の損失が大きかったが、光導波路 4 中の金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が 400 nm から 5330 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0072】

(比較例)

比較例として、第 11 実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 として、16 nm より大きな半径を持つ GaSb の半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温 (300 K) における熱揺らぎ (kT) 4.14 meV より半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0073】

(第 12 実施例)

次に、本発明の第 12 実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第 1 または第 2 実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料として AlSb の III-V 族化合物半導体を用い、サイズを半径 1 nm から 8 nm までの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が 422 nm から 756 nm までの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子 6 の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路において、半導体量子ドット 8 に隣接した単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0074】

本実施例も第 3 実施例と同様に、400 nm より短波の光では、単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が 400 nm から 600 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nm より長波の光では、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 の損失が大きかったが、光導波路 4 中の金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が 400 nm から 5330 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0075】

(比較例)

比較例として、第12実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、8 nmより大きな半径を持つAlSbの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300 K)における熱揺らぎ(kT) 4.14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0076】

(第13実施例)

次に、本発明の第13実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドット8の材料としてInSbのIII-V族化合物半導体を用い、サイズを半径4 nmから23 nmまでの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が647 nmから533.2 nmまでの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0077】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから約600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、533.0 nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400 nmから533.0 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0078】

(比較例)

比較例として、第13実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、23 nmより大きな半径を持つInSbの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300 K)における熱揺らぎ(kT) 4.14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0079】

(第14実施例)

次に、本発明の第14実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドット8の材料としてCdSeのIII-VI族化合物半導体を用い、サイズを半径2 nmから11 nmまでの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が464 nmから700 nmまでの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6を共鳴励起することが可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0080】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の

材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400 nmから5330 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0081】

(比較例)

比較例として、第14実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、11 nmより大きな半径を持つCdSeの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300 K)における熱揺らぎ(kT) 4.14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0082】

(第15実施例)

次に、本発明の第15実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてCdSのIⅢ-V族化合物半導体を用い、サイズを半径3 nmから9 nmまでの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が436 nmから475 nmまでの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0083】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400 nmから5330 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0084】

(比較例)

比較例として、第15実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、9 nmより大きな半径を持つCdSの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温(300 K)における熱揺らぎ(kT) 4.14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0085】

(第16実施例)

次に、本発明の第16実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料として $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (混晶

10

20

30

40

50

比 $x : 0 \leq x \leq 1$) の $III-V$ 族混晶半導体を用い混晶比 x を調整し、かつサイズを半径 2 nm から 14 nm までの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が 412 nm から 854 nm までの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子 6 の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路において、半導体量子ドット 8 に隣接した単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0086】

本実施例も第 3 実施例と同様に、 400 nm より短波の光では、単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が 400 nm から 600 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、 5330 nm より長波の光では、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 の損失が大きかったが、光導波路 4 中の金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が 400 nm から 5330 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0087】

(比較例)

比較例として、第 16 実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 として、 14 nm より大きな半径を持つ $Al_xGa_{1-x}As$ (混晶比 $x : 0 \leq x \leq 1$) の混晶半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温 (300 K) における熱揺らぎ (kT) 4.14 meV より半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0088】

(第 17 実施例)

次に、本発明の第 17 実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第 1 または第 2 実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料として $GaAs_{1-x}Sb_x$ (混晶比 $x : 0 \leq x \leq 1$) の $III-V$ 族混晶半導体を用い混晶比 x を調整しかつ、サイズを半径 2 nm から 16 nm まで半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が 412 nm から 1566 nm までの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子 6 の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 において、半導体量子ドット 8 に隣接した単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0089】

本実施例も第 3 実施例と同様に、 400 nm より短波の光では、単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が 400 nm から約 600 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、 5330 nm より長波の光では、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 の損失が大きかったが、光導波路 4 中の金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が 400 nm から 5330 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子

ドット 8 を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0090】

(比較例)

比較例として、第 17 実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 として、 16 nm より大きな半径を持つ $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ (混晶比 $x: 0 \leq x \leq 1$) の混晶半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温 (300 K) における熱揺らぎ (kT) 4.14 meV より半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0091】

(第 18 実施例)

次に、本発明の第 18 実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第 1 または第 2 実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料として $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ (混晶比 $x: 0 \leq x \leq 1$) の III-V 族混晶半導体を用い、混晶比 x を調整しつつサイズを半径 1 nm から 13 nm までの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が 426 nm から 903 nm までの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子 6 の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 において、半導体量子ドット 8 に隣接した単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0092】

本実施例も第 3 実施例と同様に、 400 nm より短波の光では、単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が 400 nm から 600 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、 5330 nm より長波の光では、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 の損失が大きかったが、光導波路 4 中の金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が 400 nm から 5330 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0093】

(比較例)

比較例として、第 18 実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 として、 13 nm より大きな半径を持つ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ (混晶比 $x: 0 \leq x \leq 1$) の混晶半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温 (300 K) における熱揺らぎ (kT) 4.14 meV より半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0094】

(第 19 実施例)

次に、本発明の第 19 実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第 1 または第 2 実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料として $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ (混晶比 $x: 0 \leq x \leq 1$) の III-V 族混晶半導体を用い、混晶比 x を調整しつつサイズを半径 2 nm から 9 nm までの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が 412 nm から 2167 nm までの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子 6 の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の少ない

波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0095】

本実施例も第3実施例と同様に、400nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400nmから600nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400nmから5330nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0096】

(比較例)

比較例として、第19実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、9nmより大きな半径を持つ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ (混晶比 $x: 0 \leq x \leq 1$) の混晶半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温 (300K) における熱揺らぎ (kT) 4.14meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0097】

(第20実施例)

次に、本発明の第20実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料として ZnSe の II-VI 族化合物半導体を用い、サイズを半径3nmから10nmまでの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が401nmから436nmまでの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0098】

本実施例も第3実施例と同様に、400nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400nmから600nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400nmから5330nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0099】

(比較例)

比較例として、第20実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、10nmより大きな半径を持つ ZnSe の半導体量子ドットを用いた。この比較例の光

導波路システムにおいては、室温（300 K）における熱揺らぎ（ kT ）4.14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0100】

（第21実施例）

次に、本発明の第21実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてZnTeのII-VI族化合物半導体を用い、サイズを半径3 nmから11 nmまでの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が441 nmから551 nmまでの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0101】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nmより長波の光では、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4の損失が大きかったが、光導波路4中の金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が400 nmから5330 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット8を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0102】

（比較例）

比較例として、第21実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8として、11 nmより大きな半径を持つZnTeの半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温（300 K）における熱揺らぎ（ kT ）4.14 meVより半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0103】

（第22実施例）

次に、本発明の第22実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第1または第2実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット8の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料としてInNのIII-V族化合物半導体を用い、サイズを半径2 nmから11 nmまでの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が430 nmから620 nmまでの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子6の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子6が分散された光導波路4における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子6が分散された光導波路4において、半導体量子ドット8に隣接した単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子6分散された光導波路4における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0104】

本実施例も第3実施例と同様に、400 nmより短波の光では、単一金属ナノ粒子6の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子6の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が400 nmから600 nmの間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体

量子ドット 8 を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nm より長波の光では、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 の損失が大きかったが、光導波路 4 中の金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が 400 nm から 5330 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0105】

(比較例)

比較例として、第 2 2 実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 として、11 nm より大きな半径を持つ In_xN の半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温 (300 K) における熱揺らぎ (kT) 4.14 meV より半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0106】

(第 2 3 実施例)

次に、本発明の第 2 3 実施例による光導波路システムを説明する。本実施例の光導波路システムは、第 1 または第 2 実施形態の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 の離散的エネルギー準位を利用し、量子ドットの材料として $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (混晶比 $x: 0 \leq x \leq 1$) の III-V 族化合物半導体を用い、サイズを半径 2 nm から 11 nm までの半導体量子ドットを用いた。すると、発光波長が 430 nm から 620 nm までの光導波路システムが得られた。これにより、単一金属ナノ粒子 6 の共鳴励起が可能でかつ金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の少ない波長が得られた。よって、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 において、半導体量子ドット 8 に隣接した単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起することによる連鎖的な近接場光の導波や、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 における最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0107】

本実施例も第 3 実施例と同様に、400 nm より短波の光では、単一金属ナノ粒子 6 の表面プラズモン共鳴を励起できなかったが、単一金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや形状を変えることにより、その表面プラズモン共鳴の波長が 400 nm から 600 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、単一金属ナノ粒子の表面プラズモン共鳴を励起できた。また、5330 nm より長波の光では、金属ナノ粒子 6 が分散された光導波路 4 の損失が大きかったが、光導波路 4 中の金属ナノ粒子 6 の材料、周りの誘電体の材料、サイズや間隔を変えることにより、光導波路での導波損失が最も低い波長が 400 nm から 5330 nm の間の値を取ることが可能となる。この場合、その波長で発光できる半導体量子ドット 8 を用いることにより、最も損失の低い波長の電磁場の導波を行うことができた。

【0108】

(比較例)

比較例として、第 2 3 実施例の光導波路システムにおいて、半導体量子ドット 8 として、11 nm より大きな半径を持つ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (混晶比 $x: 0 \leq x \leq 1$) の半導体量子ドットを用いた。この比較例の光導波路システムにおいては、室温 (300 K) における熱揺らぎ (kT) 4.14 meV より半導体量子ドットの離散的量子準位の間隔が小さくなったため、半導体量子ドットの離散的量子準位は、離散的準位として機能せず、所望の発光が得られなかった。

【0109】

上記第 4 実施例から第 2 3 実施例において用いられた半導体量子ドットの材料、最小半径 (nm)、最大半径 (nm)、最短発光波長 (nm)、および最長発光波長 (nm) を一覧表にしたものを図 9 に示す。

【0110】

また、第1乃至第23実施例では、光導波路4内に分散された金属ナノ粒子は、銀ナノ粒子であったが、金ナノ粒子を用いても同様の効果を得ることができた。

【0111】

なお、光導波路内に分散された金属ナノ粒子の材料として、Ag、Auの他に、Pb、Ti、Al、Cu、In、Ir、W、Cr、Ni、Fe、Co、Zn、Ge、Sn、Mn、Mo、Bi等を用いてもよい。

【0112】

次に、光導波路内に半導体量子ドットを分散させる分散材料について説明する。金属ナノ粒子が分散された光導波路の、マトリックスであるSiO₂への分散プロセスで決まる分散材料としては、Tri-n-octylphosphine oxide/ Tri-n-octylphosphine (TOPO/TOP)で包まれた半導体量子ドットの場合、hexane、pyridine、methanolや芳香族化合物等が挙げられる（具体的な合成は、Journal of the American Chemical Society, VOL. 115, p8706等に掲載されているような、公知の技術を用いる）。 10

【0113】

また、分散材料としては、Poly (acrylonitrile-styrene) polymer等が挙げられる。

【0114】

また、ドット分散材料としては、thiophenolで包まれた量子ドットの場合、acetonitrile等が挙げられる（具体的な合成は、Journal of Applied Physics, VOL. 73, p5237等に掲載されている様な、公知の技術を用いる）。 20

【0115】

また、分散材料としては、Tri-n-octylphosphine oxideで包まれた量子ドットの場合、chloroform、toluene、PMMA/toluene等が挙げられる（具体的な合成は、Journal of Physical Chemistry B, VOL. 108, p143、Journal of Physical Chemistry B, VOL. 101, p9463、等に掲載されている様な、公知の技術を用いる）。 20

【0116】

また、分散材料としては、S-phenyl基で包まれた量子ドットの場合、水等が挙げられる（具体的な合成は、Applied Physics A, VOL. 53, p465等に掲載されているような、公知の技術を用いる）。 20

【0117】

また、分散材料としては、poly vinyl pyrrolidone - sodium selenosulfateで包まれた量子ドットの場合、水、acetonitrile等が挙げられる（具体的な合成は、Materials Science and Engineering B, VOL. 52, p89等に掲載されているような、公知の技術を用いる）。 30

【0118】

また、分散材料としては、poly (aminoamine) dendrimersで包まれた量子ドットの場合、水、methanol等が挙げられる（具体的な合成は、Materials Science and Engineering B, VOL. 52, p89等に掲載されているような、公知の技術を用いる）。これらの分散材料を用いることにより、光導波路4のマトリックスであるSiO₂中に半導体量子ドットを分散させることができた。

【図面の簡単な説明】

【0119】

【図1】第1実施形態による光導波路システムの斜視図。

【図2】第1実施形態の光導波路システムの縦断面図。

【図3】第1実施形態に係る光導波路内の金属ナノ粒子と半導体量子ドットを説明する図。

【図4】第2実施形態による光導波路システムの斜視図。

【図5】第2実施形態の光導波路システムの縦断面図。

【図6】第2実施形態に係る光導波路内の金属ナノ粒子と半導体量子ドットを説明する図。

【図7】半導体量子ドット8から発生されるプラズモンの光導波路4内での導波を観測し 50

た結果を示す写真。

【図 8】光導波路内の半導体量子ドットの個数と電磁場パワーとの関係を示す図。

【図 9】第 4 乃至第 23 実施例において用いられた半導体量子ドットの材料、最小半径 (nm)、最大半径 (nm)、最短発光波長 (nm)、および最長発光波長 (nm) を示す図。

【符号の説明】

【0120】

2 フォトニック結晶構造

4 光導波路

4a 端部

5 誘電体 (SiO_2)

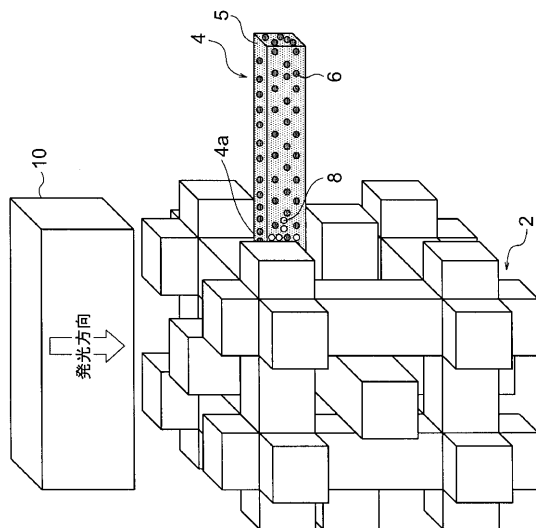
6 金属ナノ粒子

8 半導体量子ドット

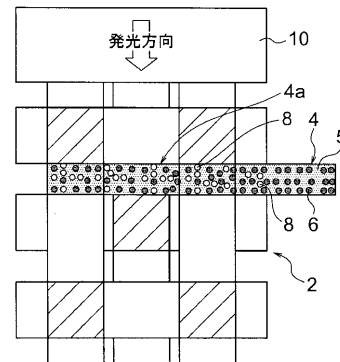
10 励起用光源

10

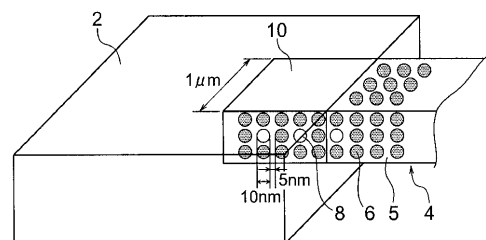
【図 1】



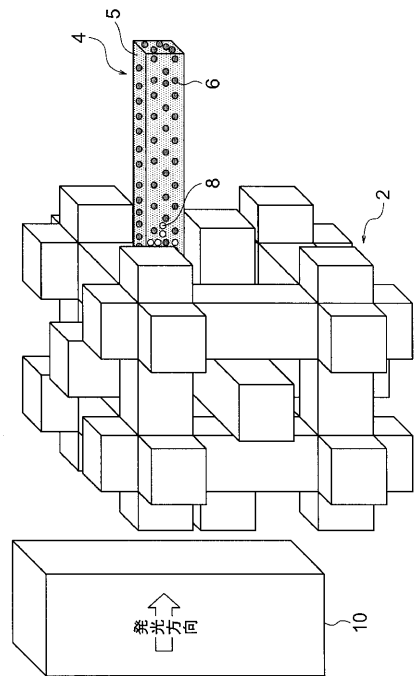
【図 2】



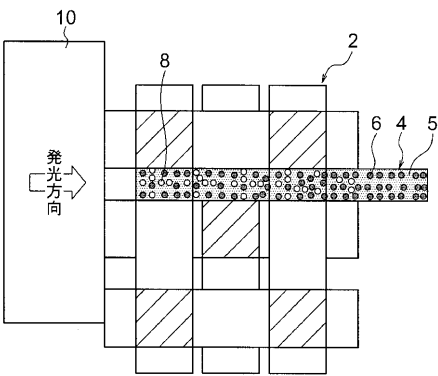
【図 3】



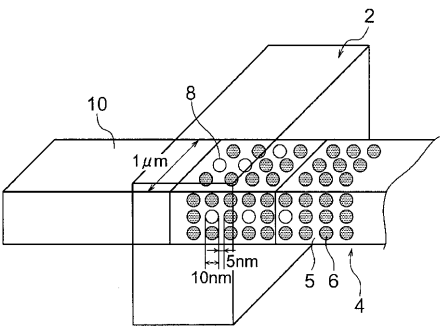
【図 4】



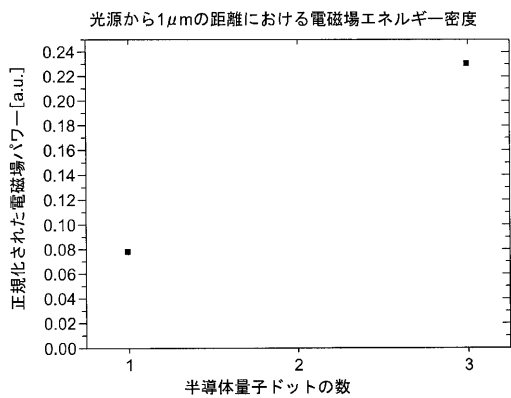
【図 5】



【図 6】



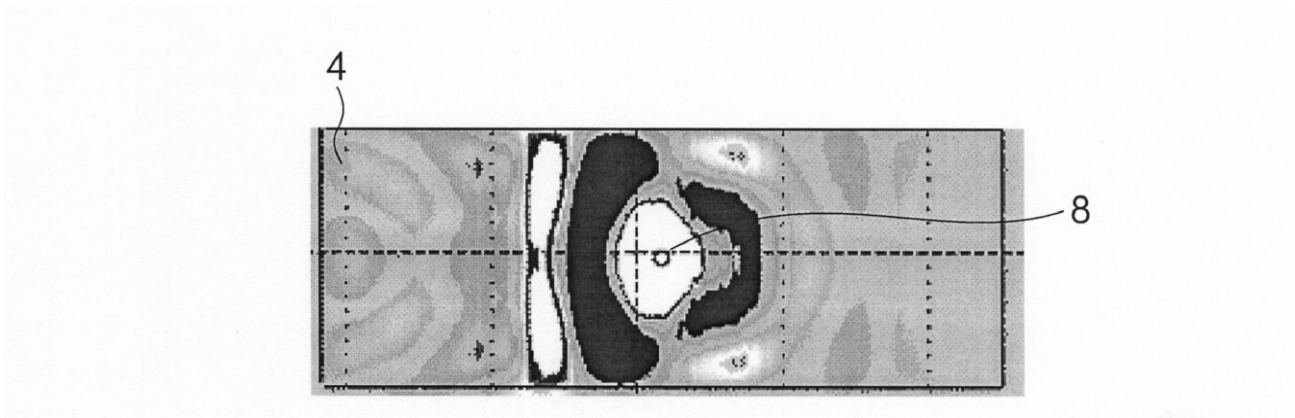
【図 8】



【図 9】

材料	最小半径 [nm]	最大半径 [nm]	最短発光波長 [nm]	最長発光波長 [nm]
Si	1	7	557	1085
Ge	1	8	556	1811
GaAs	2	14	412	854
AlAs	2	11	418	570
InAs	3	9	528	2167
GaP	1	6	426	542
InP	2	13	456	903
GaSb	3	16	638	1566
AlSb	1	8	422	756
InSb	4	23	647	5332
CdSe	2	11	464	700
CdS	3	9	436	475
Al _x Ga _{1-x} As	2	14	412	854
GaAs _{1-x} Sb _x	2	16	412	1566
In _{1-x} Ga _x P	1	13	426	903
In _{1-x} Ga _x As	2	9	412	2167
ZnSe	3	10	401	436
ZnTe	3	11	441	551
InN	2	11	430	620
In _x Ga _{1-x} N	2	11	430	620

【図 7】



フロントページの続き

- (72)発明者 都 鳥 顕 司
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 吉 村 玲 子
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 丸 山 美 保
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 山 田 紘
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 堀 田 康 之
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 多 田 宰
神奈川県川崎市幸区小向東芝町1 東芝リサーチコンサルティング株式会社内
- Fターム(参考) 2H147 AB03 AB04 AB36 AC12 BA15 BF04 BF06 BF13 CB03 CB09
EA02D EA12D EA14D EA39A EA42A EA45A FD20 GA19