

論文内容の要旨

論文題目 伝搬光・近接場光変換素子の開発

氏名 野村 航

(本文)

本研究の目的は、ナノフォトニック集積回路の入力端子となる伝搬光・近接場光変換素子の開発である。ナノフォトニック集積回路は回折限界以下の領域で近接場光によって論理動作する光集積回路であり、回折限界以下の光交換機への適用や、原理的にエネルギー損が極めて少ないことを活かした高集積化により、発熱問題を持たない光 CPU 等への応用の期待が持たれている。これを動作させるのに必要なものが伝搬光・近接場光変換素子である。本論文ではこれを表面プラズモンポラリトン(Surface Plasmon Polariton : SPP)を利用する金属型の伝搬光・近接場光変換素子と、半導体ナノドットカップラーの 2 部に分けて研究を行った。

第 2 章では、金属を用いたプラズモン型の伝搬光・近接場光変換素子の開発について述べた。これは、金属膜状の突起であるプラズモン集光器と、金属微粒子を直線的に連ね、それらに発生する局在表面プラズモン(Localized Surface Plasmon : LSP)のカップリングにより回折限界以下の幅で光エネルギーを伝送するナノドットカップラーから構成される。Au 膜上に直径 $10\mu\text{m}$ のプラズモン集光器を作製し、波長 $\lambda=785\text{nm}$ のレーザー光を集光する実験を行い、 400nm 幅への SPP の集中に成功した。また、設計時に行なった有限差分時間領域法(Finite Difference Time Domain method : FDTD 法)の計算が SPP の振る舞いを良く表わし、プラズモン集光器の設計に有用であることを確かめた。

その後、このプラズモン集光器の焦点を基点としてナノドットカップラーを作製し、伝送特性を評価した。材料はプラズモン集光器と同じ Au であり、幅 230nm の微粒子を 300nm ピッチで連ねた。近接場光学顕微鏡による測定の結果、 $4\mu\text{m}$ の長さの光エネルギー伝送を達成し、同じ条件で評価した幅 230nm の金属細線 SPP 導波路と比較し、3 倍以上低損失であることを確認した。またこのナノドットカップラーを 90° 折り曲げて伝送特性を評価したところ、曲げ損失がほとんどなく電場の振動方向に依存しない伝送特性を持つことを確かめた。以上の成果で、プラズモン集光器とナノドットカップラーからなる金属型の伝搬光・近接場光変換素子の試作が成功し、機能することが示された。

さらに、Au 微粒子が特定の波長の入射光に対して LSP 及び散乱光が増強される共鳴光散乱の効果がナノドットカップラーにどう影響するかを調べた。互いに独立し、寸法

の異なる Au 微粒子群中の各微粒子に発生する LSP を近接場光学顕微鏡(Near-field Optical Microscope : NOM)で測定することで $\lambda=785\text{nm}$ に対して最も応答する光強度が高くなる共鳴寸法を確かめ、その後に微粒子寸法を変化させたナノドットカップラーの伝送特性を比較した。その結果、共鳴寸法の幅 200nm 高さ 50nm の微粒子を連ねたナノドットカップラーが最も良い伝送特性を示し、LSP が共鳴効果によって増強される波長ではナノドットカップラーがより高効率な光伝送路として機能することが確かめられた。

またこの結果から予想される、ある一定の寸法のナノドットカップラーが波長選択性を持つということも、波長 $\lambda=785\text{nm}$ と $\lambda=633\text{nm}$ の入射光を用いることで実験的に確認した。それぞれ、共鳴寸法の微粒子を連ねたナノドットカップラーが最も良い光の伝送を果たしていた。このことから、ナノドットカップラーが単なる光伝送路ではなく、周波数選択等の機能を持たせることが可能であることを実証した。

第 3 章では、共鳴準位を持つ半導体量子ドットを直線的に連ねた半導体ナノドットカップラーの開発について述べた。半導体ナノドットカップラーはナノフォトニックデバイスと同様の原理で動作するため、金属のそれよりも小さく低損失で、デバイスとの結合性が良いものと考えられる。

開発のための材料として、CdSe/ZnS コアシェル量子ドットを用いた。これは化学合成手法により得られる量子ドットであり、均一な寸法のドットを用意することができるが、トルエン溶液中に分散した状態であるので、これを 1 次元的に配列する必要がある。

まず始めに、機能の確認実験として同一のドットを大量に分散させた基板上でエネルギー移動の観測を行なった。光ファイバの断面上に大量に付着した量子ドットを部分的に除去し、ファイバを通して励起光を導入した際に NOM で励起光と発光の分布を比較した。その結果、ドットが堆積している箇所において発光の分布が励起光のそれよりも空間的に $1\mu\text{m}$ 程度広がる様子が確認できた。この結果から、CdSe/ZnS コアシェル量子ドットによって室温動作するナノドットカップラー及びナノフォトニックデバイスが作製可能であると考えられる。

また直線的な配列を目指し、DPPC(L- α -ホスファチジルコリン)単分子膜による自己組織的なライン&スペースのパターンを用いた。Langmuir-Blodgett 法(LB 法)により簡単に得られるこのパターンは、濡れ性の差により幅約 100nm・ピッチ約 $1\mu\text{m}$ の基板むき出し部分に選択的に堆積物を配置することが可能である。溶媒の置換を行なうことで、この基板に CdSe/ZnS 量子ドットを配列させることに成功した。

この手法で CdSe/ZnS 量子ドットを直線的に配列させた基板を用いて、共鳴準位を持つ量子ドット間のエネルギー移動を確認する実験を行なった。単一寸法 L の量子ドットのみが存在する領域と、それに加えて共鳴する準位を持つ寸法 $\sqrt{2}L$ のドットも同時に配列する領域において、それぞれ L のドットからの発光の時間発展をとることで、

共鳴寸法のドットへのエネルギー移動の有無を調べた。その結果、 $\sqrt{2}L$ のドットと混在する領域で、同一寸法の場合よりも早い緩和の発光成分が見られたことから、エネルギー移動の確認が取れた。以上、室温での発光の広がり、直線的配列、共鳴準位への移動と緩和を確かめたこれらの結果から、半導体ナノドットカップラーの開発を果たした。

以上の内容から、金属・半導体の両材料において伝搬光・近接場光変換素子の開発は達成された。

補遺として、伝搬光・近接場光変換素子の開発に関連して並行して進められた研究について触れる。補遺 A は InAs 量子ドットを用いた半導体ナノドットカップラーの作製である。半導体結晶のエピタキシャル成長の際に SK モードで成長できる InAs 量子ドットを用いることで、ナノドットカップラー及びナノフォトニックデバイスを位置制御性良く結合させることが可能であると見込まれるため、将来有望であると期待される材料である。

SiO₂ マスクを用いたバッファ層の選択成長を利用し、ウェッジ構造の峰に沿って一次元的に InAs 量子ドットを配列する構造を提案し、マスクのパターニングを行なった。将来、この試料で半導体ナノドットカップラーの動作を行い、ナノフォトニックデバイスと結合させる未踏氏を得た。

また、CdSe/ZnS コアシェル量子ドットの配列の際に用いた DPPC 単分子膜の自己組織的パターンの制御に関する研究を行なったので、これを補遺 B に記す。LB 法を行なう際の製膜条件を詳細に制御することにより、1 次元的なライン&スペースのパターンを 2 次元的に変化させることと、スペース幅を 15nm までの微細化することに成功した。また、位置の制御法としてフォトレジストを利用し、ライン&スペースが形成される方向を制御し、曲げることに成功した。これにより、フォトリソグラフィとの併用することでパターン位置や方向を制御できる可能性を示した。

続いて、近接場光を利用した汎用のナノ加工方法として近接場光インプリントについて補遺 C で述べた。モールドに Al を 20nm コーティングすることでエッジ部に近接場光を誘起し、エッジ部のみを盛り上げることに成功した。この効果により、モールドよりも小さい構造を樹脂に形成させた。さらにこれにパルスレーザーを用いることで、幅 300nm のライン上に 100nm, 160nm のラインを作製し、さらにアスペクト比低下の問題を解消した。この手法により作製できるナノ寸法の凹凸は半導体量子ドットの配列や次章の近接場光を励起する必要のある加工プロセス等に应用可能であると考えられる。

最後に、金属ナノドットカップラーのような金属微粒子列の自己組織的一括作製手法として、レーザー照射スパッタリングの手法を提案・開発した。SiO₂ 基板に傷をつけ

ることでナノ構造を作成した基板に波長 $\lambda=532\text{nm}$ のレーザー光を照射しながら Al をスパッタリングしたところ、幅 100nm の Al 微粒子が 125nm 間隔で $300\mu\text{m}$ 程度の長さにつながる様子が確認できた。その他、レーザーを $\lambda=473\text{nm}$ に、金属を Pt にそれぞれ変えるなどして同様の実験を行い、それぞれ微粒子列の自己組織的形成を果たした。これより、入射する波長や金属の種類によって寸法が微粒子の寸法が異なるという結果が得られた。また AFM による微粒子列及び下地の基板の観察から、凹凸が連続する箇所には微粒子列の形成が起こっていたことを確かめ、FDTD 計算により金属膜の堆積により光強度の強くなる箇所であることが確かめられた。