

博士論文（要約）

金属に挟まれた半導体リッジ構造中の
InAs 量子ドットの光学特性に関する研究

(Study on optical properties of InAs quantum dots in
semiconductor ridge structures sandwiched by metal)

山本 巧 (37-087086)

Takumi Yamamoto

指導教員

荒川泰彦 教授

Professor Yasuhiko Arakawa

近年、IoT(Internet of Things)という言葉に表わされるような、さまざまなものをインターネットを介して接続し相互作用させることで、多くの情報を自動収集・制御する生活スタイルへの期待が高まっている。また仮想現実(Virtual reality:VR)や拡張現実(Augmented Reality:AR)などの、現実と非現実を同居させる技術も徐々に普及してきている。このため、既存のデバイス以上に高速な大容量データの処理能力を有し、低消費電力であり、かつ人々の生活になじむような小型・軽量デバイスの開発が求められている。

これに応えるひとつの方法が、電子デバイスと光デバイスを高密度に集積化した、電子-光融合デバイスの開発である。既存のデバイスは多くの場合、電子デバイスと光デバイスに別れており、近距離の中での情報処理部分を電子デバイスで、長距離通信部分を光デバイスで処理するようになってきている。しかし、既存の電子デバイスの更なる小型化・そして高性能化が難しくなっている現在、光でデバイスの高性能化を後押し解決しようとする試みがなされてきている。そして、そのために電子デバイスと光デバイスを高密度に集積化したデバイスを実現に期待がかかっている。

しかし、光デバイスはその大きさが電子デバイスに比べて非常に大きく、これが高密度集積化を妨げている。このサイズの問題を解決するために、シリコンフォトニクスや、プラズモニクス、半導体量子構造を用いたデバイスの研究がなされている。このうちプラズモニクスは、光の回折限界に起因する光デバイスのサイズ問題を解決しようとして期待を集めている。プラズモニクスとは、正の誘電率をもつ物質と負の誘電率をもつ物質の界面に存在する表面波モードである表面プラズモンポラリトン状態を利用する技術である。この表面プラズモンポラリトンは、電子の集団運動と電磁界が結合した状態であり、その電磁界は界面に局在している。最大の特徴は、結合状態であり純粋な光の状態では無いために、光をその回折限界を超えた小さな空間領域に閉じ込めることができる点である。

この表面プラズモンポラリトンを利用して小さく平面的な光回路(プラズモニック回路)を作る試みが電子-光融合デバイスの高集積化を目指して行われており、これまで、表面プラズモンポラリトンモードを有しデバイスへの応用を期待した構造が様々に提案されてきた。

量子ドットとプラズモニック導波路の結合系の研究もそのひとつである。3次元的に小さな構造である量子ドットの発光によって、導波路の伝播型表面プラズモンポラリトン(伝播型 SPP)を3次元的に小さな領域で励起することが可能となるためである。そのため量子ドットは、平面内に波長より小さな光デバイスを組み込み光回路の実現を目指すプラズモニクスにとっては非常に有用な物質であり、この物質によって高効率に伝播型 SPP を励起する構造を探索することは重要な研究となっている。

これまで、銀ワイヤ構造と CdSe コロイド量子ドットとの結合系などの報告はあるものの、近赤外領域に有利で既存の光デバイスでも支配的な III-V 族物質の、量子ドットを使用した例は数少ない。さらに、リソグラフィによる作製が可能な構造の作成は報告

例がない状況である。しかし、III-V 物質の優れた光学特性と既存デバイスとの互換性を考えると、III-V 族物質による量子ドット-プラズモニック導波路結合系の研究は重要であると考えられる。また、リソグラフィによる作製が可能な構造による伝播型 SPP の高効率励起を追求することも将来の光デバイスへの組み込みを考えた場合、同様に重要である。これらのことから、III-V 族半導体量子ドットによってリソグラフィによる作製が可能なプラズモニック導波路の伝播型 SPP を高効率に励起する構造を追求することが、現在必要な研究であると考えられる。

リソグラフィによる作製が可能であり、導波路構造として有力な候補としては2次元的に波長より小さな金属-非金属-金属導波路構造(以下 2D-MSM と呼称)がある。しかしこれと量子ドットを結合した報告も数が少なく、3次元的に小さな III-V 族半導体を使用した報告については報告がない状況である。そのため導波路の伝播型 SPP モードへの結合の強さの評価などが未だ不十分な状況である。

そこで本研究では、「3次元的に微小な発光物質である III-V 族半導体量子ドットによるリソグラフィによる作製が可能なプラズモニック回路の伝播型 SPP の高効率励起構造の実現に向けて、2D-MSM 導波路構造中に埋め込まれた InAs 量子ドットの光学特性、特に緩和特性を明らかにする」ことを目的として研究を行った。

その結果、伝播型 SPP の励起効率が 30%程度と期待される、InAs 量子ドットの励起子緩和率の増大を観測することに成功した。本論文では実験的には InAs 量子ドットの励起子緩和率を観測しており、その高効率励起を目指している伝播型 SPP の励起の様子を実験的に観測できたものではない。しかし、見積もることは可能であり、観測された緩和率、作製された構造の断面顕微鏡像から、設計時のモデルよりも実験結果を反映する詳細な構造モデルが構築され、それによって伝播型 SPP の励起効率が見積もられている。また、この新しい構造モデルによって設計時と比較してどこの違いが、最も影響を与えるかが議論されており、それが金属と半導体の間にできた溝であることも明らかにしている。

本論文の構成と内容は次の通りである。

第1章では、研究の背景と目的、そして本論文の構成を記述している。

第2章では、本論文にとって重要な表面プラズモンポラリトンの基礎知識の紹介と計算手法の紹介をおこなっており。基礎知識として典型的ないくつかの表面プラズモンポラリトンの紹介を行っている。計算手法としては、3D-FDTD とそれによる発光体の緩和率の変化の見積もり方、そして、2次元周波数領域有限要素法(FDFD)の説明を行っている。

第3章では、本研究で用いる構造の設計を行っている。設計は量子ドットによって励起され得る全電磁界モードに対する伝搬型 SPP モードの励起効率の高さ(F_{norm})と単位時間当たりの伝播型 SPP の励起確率の高さ(F_{PSPP})で設計を行っている。その後の節で、

構造を作製する方法について、実際に作製された構造の電子顕微鏡像を交えながら説明を行っている。

第4章では、金属を蒸着する前の加工された半導体リッジ構造において、InAs量子ドットの加工による光学特性の変化を実験的に明らかにしている。実験的に、InAs量子ドットの励起子緩和率が未加工時と比較して0.7倍程度にまで抑制されることが観測される。この要因は、構造の光学モードの解析と自由空間の電磁界モードとの結合の観点から説明される。本章の結果から、半導体加工によって作製される可能性のある非発光サイトによる励起子緩和率への影響は少ないことが明らかとなる。これは次章の解析において重要な結果となる。

第5章では、4章の構造に金属をつけた場合の、埋め込まれたInAs量子ドットの発光特性を実験的に明らかにしている。実験の結果、励起子緩和率が未加工時と比較して1.4倍程度の増強率になることが明らかとなる。しかし、この増強度は設計時と比較して低い値であり、この差異は実際の構造で生じた構造欠陥を考慮することで説明される。構造欠陥と第4章で得られた非発光サイトの影響が少ないという結果も考慮することで、計算による比較的よい一致を示す結果を得ることになり、構造欠陥を考慮した新たな構造モデルが得られる。そして、それによって F_{PSPP} と F_{norm} を見積もっており、今回作製された構造においては、 F_{PSPP} と F_{norm} がそれぞれ0.38, 0.31であり、励起効率として30%程度であると見積もられる。また、第4章の結果との比較から、金属の効果が励起子緩和率の増大に支配的な役割を果たしていることを明らかにするとともに、設計時との差異を生じさせた支配的な要因が、金属-半導体間の溝あることも明らかにしている。

第6章で、結論と今後の展望を述べている。