OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	表面プラズモンアンテナを有する横型量子ドットにおける単一光生成電子検出
Author(s)	深井, 利央
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/87741
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　深　井　利　央　）	
論文題名	表面プラズモンアンテナを有する横型量子ドットにおける単一光生成電子検出

論文内容の要旨

本論文は，表面プラズモンアンテナを有する横型量子ドットにおける単一光生成電子検出についての研究成果をまとめたものであり，以下の全6章で構成される．各章の内容を以下に示す．

第１章では，本研究の背景と目的について述べた後，本論文の構成を示した．はじめに，本研究の背景として量子通信とその長距離化に必要な量子中継器に触れ，これを実現する系の候補である横型量子ドットについて述べた．続いて，現状の課題である横型量子ドットにおける光子―電子変換効率について述べたのち，これを改善する方法として表面プラズモンアンテナを紹介し，本研究の目的を明確にした．その後，本論文の構成を示した．

第２章では，本研究の基礎となる原理についてまとめた．光子偏光から半導体中の電子スピンへの量子状態転写と これを単一粒子間で実現するための横型量子ドット，そして表面プラズモンアンテナについて，理論的背景および先行研究の結果を交えて説明した．

第３章では，電磁界シミュレーションによる横型量子ドット上の表面プラズモンアンテナの設計について述べた．はじめに入射光が平面波の場合について表面プラズモンアンテナを設計し，表面プラズモンアンテナにより横型量子ドットへの光透過の向上が見込めることを示した．加えて，表面プラズモンアンテナがこれを透過する光子の偏光をほとんど乱さないことを確認した．また，希釈冷凍機中で横型量子ドットに光を照射することを考慮したガウシアンビームの場合についても表面プラズモンアンテナの設計を行い，実験に近い条件の下でも光透過の増幅が見込めることを示すとともに，入射ビームの違いによる表面プラズモンアンテナの光透過特性の変化について考察した．

第４章では，横型量子ドットに第３章で設計した表面プラズモンアンテナを組み合わせた試料を作製し，室温で行った光電流測定について述べた．得られた光電流スペクトルから，作製した構造が表面プラズモンアンテナとして動作し，シミュレーションでの光透過スペクトルを再現していることを確認した．また，表面プラズモンアンテナの有無による光電流の比較から，シミュレーションから期待される透過増幅と同程度の光電流の増幅を実証した．以上の結果は，実験時の入射ビームを考慮したシミュレーションにより表面プラズモンアンテナの光透過スペクトルが設計可能なことを示すものである．一方，表面プラズモンアンテナを組み合わせた試料では光電流が偏光に大きく依存しうることが明らかになり，その原因として入射ビームのアライメント，試料作製の際の残留物を挙げ，それぞれの影響について考察した．

第５章では，横型量子ドットに第３章で設計した表面プラズモンアンテナを組み合わせた試料を冷却し，量子ドットを形成して行った単一光生成電子検出について述べた．実験で得られた単一光生成電子検出確率と先行研究との比較から，表面プラズモンアンテナによる検出確率の向上を実証した．一方，検出確率の向上はシミュレーションから期待される値よりも低かったため，この原因として入射ビームの位置ずれと入射角，作製されたアンテナの位置ずれえお考え，それぞれの影響について検討した．また，これまで集計されてこなかった単一光生成電子以外の光に対する応答も集計し，応答振幅および応答確率の波長依存性からその起源について検討し，光照射下の横型量子ドットの動作について新たな知見を得た．

第6章では，本研究で得られた成果についてまとめ，今後の展望について述べた．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　深井　利央　）	
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	大岩　顕
	副 査　教授	片山　竜二
	副 査　教授	森　伸也
	副 査　教授	森　勇介
	副 査　教授	片山　光浩
	副 査　教授	尾崎　雅則
	副 査　教授	近藤　正彦
	副 査　教授	廣瀬　哲也

論文審査の結果の要旨

近年，量子情報処理と量子技術は，今後，社会で求められる大規模シミュレーションや組み合わせ最適化問題など特殊な情報処理を可能にする次世代情報処理の技術として，注目を集め，学術・産業が一体となって研究開発が進められている．その中でも量子情報通信は安全な情報通信法として実用化が進む一方で，既存光ファイバー網を使った長距離化には，量子もつれを遠隔地点に配信する量子中継の技術が必要で，まだその技術はまだまだ開発途上である．半導体量子ドットは，量子ビットとして，高い操作性，長いコヒーレンスなど基本性能に優れ，かつ通信波長帯の光素子としても特徴を有する．これまで量子ドットを使い，量子中継の構成機能として単一光子から単一電子スピンへの量子状態変換の実証がされつつあるが，通信性能を決める変換効率の向上が強く要求されている．本論文は，表面プラズモンアンテナを有する横型量子ドットを使うことで，光子から電子への変換効率の向上の実現を目指すものであり，以下の全6章で構成される．各章の内容を以下に示す．

第１章では，本研究の背景と目的について述べた後，本論文の構成を示している．はじめに，本研究の背景として量子通信とその長距離化に必要な量子中継器に触れ，これを実現する系の候補である横型量子ドットについて述べている．続いて，現状の課題である横型量子ドットにおける光子―電子変換効率について述べたのち，これを改善する方法として表面プラズモンアンテナを紹介し，本研究の目的を明確にしている．その後，本論文の構成を示している．

第２章では，本研究の基礎となる原理についてまとめている．光子偏光から半導体中の電子スピンへの量子状態転写と これを単一粒子間で実現するための横型量子ドット，そして表面プラズモンアンテナについて，理論的背景および先行研究の結果を交えて説明している．

第３章では，電磁界シミュレーションによる横型量子ドット上の表面プラズモンアンテナの設計について述べている．はじめに入射光が平面波の場合について表面プラズモンアンテナを設計し，表面プラズモンアンテナにより横型量子ドットへの光透過の向上が見込めることを示している．加えて，表面プラズモンアンテナがこれを透過する光子の偏光をほとんど乱さないことを確認している．また，希釈冷凍機中で横型量子ドットに光を照射することを考慮したガウシアンビームの場合についても表面プラズモンアンテナの設計を行い，実験に近い条件の下でも光透過の増幅が見込めることを示すとともに，入射ビームの違いによる表面プラズモンアンテナの光透過特性の変化について考察している．

第４章では，横型量子ドットに第３章で設計した表面プラズモンアンテナを組み合わせた試料を作製し，室温で行った光電流測定について述べている．得られた光電流スペクトルから，作製した構造が表面プラズモンアンテナとして動

作し，シミュレーションでの光透過スペクトルを再現していることを確認している．また，表面プラズモンアンテナの有無による光電流の比較から，シミュレーションから期待される透過増幅と同程度の光電流の増幅を実証している．以上の結果は，実験時の入射ビームを考慮したシミュレーションにより表面プラズモンアンテナの光透過スペクトルが設計可能なことを示すものである．一方，表面プラズモンアンテナを組み合わせた試料では光電流が偏光に大きく依存しうることが明らかになり，その原因として入射ビームのアライメント，試料作製の際の残留物を挙げ，それぞれの影響について考察している．

第５章では，横型量子ドットに第３章で設計した表面プラズモンアンテナを組み合わせた試料を冷却し，量子ドットを形成して行った単一光生成電子検出について述べている．実験で得られた単一光生成電子検出確率と先行研究との比較から，表面プラズモンアンテナによる検出確率の向上を実証している．一方，検出確率の向上はシミュレーションから期待される値よりも低かったため，この原因として入射ビームの位置ずれと入射角，作製されたアンテナの位置ずれえお考え，それぞれの影響について検討している．また，これまで集計されてこなかった単一光生成電子以外の光に対する応答も集計し，応答振幅および応答確率の波長依存性からその起源について検討し，光照射下の横型量子ドットの動作について新たな知見を得ている．

第６章では，本研究で得られた成果についてまとめ，今後の展望について述べている．

以上のように，本論文は，量子中継器の実現を背景に，GaAs 横型量子ドットを使った単一光子から単一電子スピンへの量子状態変換の変換効率を向上せるため，表面プラズモンアンテナを横型量子ドットと組み合わせた新しい素子の提案と実証実験を行っている．その結果，電磁界シミュレーションで約 25 倍，極低温での量子ドットを使った単一光生成電子検出実験により 5 倍強の変換効率の増大を実証している．シミュレーションとの変換効率の差の原因を明らかにし，今後の改善の方針を明確にするとともに，共振器構造など他の変換効率向上技術との組み合わせが可能で，量子中継の基本動作実証が実現可能であることを示している．また単一光生成電子検出実験の詳細な解析から，プラズモンアンテナを通過した光子が量子ドットへ吸収される割合と変換過程に関する重要な知見を明らかにしている．以上の成果は表面プラズモンアンテナが量子中継器開発に有効な方法であることを示すとともに，今後さらなる変換効率改善の指針を与えている．よって本論文は博士論文として価値あるものと認める．