

氏名	張 遼
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博 甲 第 7597 号
学位授与年月日	平成 28 年 2 月 29 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	Optical study of individual nitrogen impurity centers in GaAs for single photon sources (単一光子源に向けた GaAs 中の単一窒素不純物中心の光学的研究)

主査	筑波大学教授	博士（学術）	都倉 康弘
副査	筑波大学教授	理学博士	大塚 洋一
副査	筑波大学准教授	博士（理学）	野村 晋太郎
副査	筑波大学准教授	博士（理学）	池沢 道男
副査	筑波大学アソシエイト 教育支援シニアプロフェッサー	博士（工学）	浅川 潔

論 文 の 要 旨

本論文は、量子情報技術の発展のために必要な高品質な単一光子源への応用を視野に入れ、ヒ化ガリウム(GaAs)中の窒素等電子不純物による発光中心の(量子)光学特性を、発光中心の個別観測の手法で研究した成果をまとめたものである。

まず、 NN_A と呼ばれるエネルギーの揃った等電子発光中心を窒素デルタドープ GaAs 中に形成し、共焦点顕微光学系を用いて個々の NN_A の偏光分解発光スペクトルを測定した。その結果 NN_A の発光エネルギー揺らぎは $100\mu\text{eV}$ 以下で良く揃っており、その偏光方向もすべて同じであることが示された。このエネルギー揺らぎの大きさは、典型的な量子ドットの不均一広がりより2桁程度小さい。一つの NN_A からの発光を Hanbury Brown and Twiss の強度干渉計で測定し、明瞭なアンチバンチングが観測されたことから、単一光子が発生していることを確認することが出来た。その発光寿命は 6ns 程度であり、応用上重要な III-V 族半導体では既に報告の有ったリン化ガリウム(GaP)中の窒素等電子中心よりも一桁程度高レート、エネルギーの揃った単一光子源が実現できた。

量子情報技術で必要とされる完全な2光子干渉(Hong-Ou-Mandel)効果が起こるような区別のつかない光子生成のためには、フーリエ変換限界の位相緩和時間に達している必要があるため、位相緩和時間の評価と、位相緩和メカニズムの理解が必要である。そのために、発光中心の発光のフーリエ分光を行って、位相緩和特性を詳しく調べた。発光中心としては、上記の NN_A 発光中心の他に、エネルギーの不均一がある N_x 発光中心を用いた。その結果、窒素不純物の位相緩和時間の低温度でのリミットは、 380ps 程度と比較的長いことが分かった。これはフーリエ変換限界値の約三分の一である。もう一つの重要な事

は、この低温リミットの位相緩和時間が個々の NN_A について大きくばらついていたという事である。 NN_A は発光エネルギーもエネルギー微細構造も良く揃っているにもかかわらず、このような大きな違いが見られたことは、低温リミットでの位相緩和時間を決定しているメカニズムは NN_A 発光中心自体というよりも周辺の欠陥の分布の違いなどのような環境に由来するものであることを示している。例えば、周囲の欠陥に捕獲されたキャリア数の時間変化による、発光中心が感じる電場の時間変動などが原因として考えられる。一方、温度を上げた時の振る舞いについては、 NN_A と N_x の間で違いが見られたことから、位相緩和には発光中心のエネルギー構造が重要であることが分かった。

最後に、同一の発光中心から引き続いて発生させた2つの光子の間の同一性を調べるために、非対称干渉計を用いた2光子干渉実験を行った。発光中心としては、発光レートで優る N_x 発光中心を用いた。2~4ns 離れた2つの非共鳴励起パルスで一つの N_x 発光中心を励起し、得られた2光子を非対称マイケルソン干渉計に通して、同じタイミングで一つのビームスプリッターの別々のポートから入射させた。位相緩和時間はフーリエ変換限界には達していないため、予想される2光子干渉効果は限定的であるが、位相緩和メカニズムの時間スケールがパルス間隔に比べて遅い場合には、高い2光子干渉効果も期待された。結果としては、2光子干渉効果による明瞭な凹みが観測されたものの、その明瞭度は0.25程度で、フーリエ分光から予想された明瞭度とほとんど同じであった。さらに、明瞭度が励起パルス間隔にはほとんど依存しないことも分かった。この結果から、この系では電場揺らぎの影響は2ns以下の時間スケールですでに顕著であり、一般に考えられているような遅い時間でのスペクトル揺らぎの影響はあまりないことが示唆された。このような高速の電場揺らぎは、自由キャリアによるものではないかと考えられるため、励起エネルギーを共鳴に近づけることによって、より高い明瞭度が得られることが予想された。

以上より、GaAs 中の窒素不純物による発光中心は、エネルギーの均一性が高く、コヒーレンス特性も優れていることから、今後、区別のつかない光子源の有力な候補として重要であることが結論付けられた。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

「区別のつかない光子源」を目指した研究は半導体量子ドットが先行するが、サイズ揺らぎに起因する発光エネルギーの不一致の問題が応用への大きな障害になっており、構造の単純な不純物を用いた本論文の手法は、これを回避する一つのアプローチとして意義がある。GaAs を用いて初めてエネルギーの揃った単一光子の発生を実現しただけではなく、エネルギーの揃った発光中心のコヒーレンス時間を詳しく検討する事で、低温での位相緩和過程において環境の影響が確かにあることを明確に示すことにも成功している。これらは、不均一を伴う量子ドットを用いては実現が難しかった事である。さらに、実際に一つの発光中心から引き続いて発生した2光子の干渉現象を観測して、環境の影響がこれまで考えられていたようなマイクロ秒、ミリ秒といった長時間の時間スケールではなく、数ナノ秒の時間領域ですでに顕著であるという興味深い結果を得たことも高く評価できる。このような高速の揺らぎの存在は、最近量子ドットでも議論されるようになってきたところであり、これを低減する事が、高い光子の同一性に到達するための課題であると分かった。以上のように、本論文の成果は、マクロな数の「区別のつかない光子源」を再現性良く得るといふ当該研究分野の重要課題に大きく寄与するものであり、博士(理学)の学位にふさわしい内

容を持つものと判断した。

〔最終試験結果〕

平成28年 1月20日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。