

数理物質科学研究科 博士論文の要約

専攻名 ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻
学籍番号 201230112
学生氏名 張 遼
学位名 博士(理学)
指導教員 池沢 道男 印

博士論文題目 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)

本論文では、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等電子発光中心の光学的研究を行った。単一光子源を含む量子光源は半導体量子ドットを用いて盛んに研究されているが、量子ドットのサイズ揺らぎに起因する個々の発光エネルギーの不一致の問題があり、今後必要となる「区別のつかない光子」生成のための障害になっている。他方、半導体中の不純物による発光中心の中には極めて性質の揃ったものもあるため、新たな固体量子光源として期待が持たれる。

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温度 5K で測定した。その結果 NN_A の発光エネルギーは $100\mu\text{eV}$ 以下で良く揃っており、その偏光方向もすべて同じで[110]または[1-10]であることが分かった。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、単一光子が発生していることを確認することが出来た。発光寿命は 6ns 程度であり、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の、エネルギーの揃った単一光子源が実現できた。

次に、発光中心の位相緩和特性を詳しく調べた。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、一つの発光中心の発光のフーリエ分光を行って、位相緩和時間を測定した。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。位相緩和時間の低温度でのリミットは、380ps 程であることが分かった。これはフーリエ変換限界値の三分の一である。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暗示している。例えば、周囲の欠陥に捕獲されたキャリアの時間変化による周囲の電場の変動などがありえる。一方、温度を上げていっ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、温度上昇時の位相緩和時間の短縮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つの光子の間の干渉性を調べるために、2光子干渉実験を行った。発光中心としては、明るさで優る N_x 発光中心を用いた。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によっては、もっと高い2光子干渉効果も期待される。2ns 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。その結果、2光子干渉効果による明瞭な凹みが観測された。しかし、その明瞭度は0.25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。この結果から、我々の用いた系では電場揺らぎの影響は ns の時間スケールですでに顕著であり、より遅い時間でのゆっくりした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。