

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760015

研究課題名(和文) アルミニウム砒素中の窒素不純物準位を用いた可視域量子光源に関する研究

研究課題名(英文) Nitrogen impurity states in AIAs for visible quantum light sources

研究代表者

定 昌史 (Jo, Masafumi)

独立行政法人理化学研究所・平山量子光素子研究室・研究員

研究者番号：20400020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、アルミニウム砒素中の窒素不純物準位を用いて単一光子の発生を実証した。これにより、ガリウム砒素基板をベースとする、成熟した半導体技術を用いた可視域の量子光源実用化の可能性が高まった。また、理論計算により発光起源を明らかにするとともに、アルミガリウム砒素を母材とすることで可視～近赤外にわたって高効率の発光を得た。

研究成果の概要(英文)：This work demonstrated the single photon emission from a single nitrogen impurity center in AIAs. The results allow for realizing visible quantum light sources on GaAs substrates. Theoretical calculation revealed the emission originating from nitrogen pairs in the nearest neighbor configuration. The nitrogen doped AlGaAs provided intense luminescence in the wavelength range from visible to near infrared.

研究分野：半導体量子構造

キーワード：量子光源 アルミニウム砒素 窒素 等電子中心

1. 研究開始当初の背景

オンデマンドの単一光子やもつれ合い光子対を発生する半導体量子光源は、次世代量子情報通信の基盤ユニットである。良質な量子ドットが得やすいことから、半導体量子光源に関するこれまでの原理検証は InAs/GaAs 系を用いた 900-950nm の波長帯が中心となって行われてきた。いっぽう実用化の観点からは、半導体プロセス技術が成熟している Si または GaAs 基板上で、可視域や通信波長帯をカバーする材料系が必要である。とりわけ可視域における量子光源は、大気吸収が少ない波長域での自由空間通信や、オンチップのシリコンフォトニクスへの応用の観点から重要性が高まっている。しかしながら、可視域における単一光子発生の報告は CdSe/ZnSSe (500nm) や InP/GaInP (682nm) と少なく、かつ既存テクノロジーとの親和性が低い材料に留まっていた。

2. 研究の目的

本研究では、GaAs 基板と整合した可視域量子光源の実現に向けて、AlAs 中の窒素不純物準位を用いた可視域における単一光子発生の実証を目的とする。この目的のために、まず窒素不純物をドーピングした AlAs を作製しその光学特性を明らかにする。つぎに、単一不純物準位からの発光について光子相関を測定し、単一光子発生を実証する。発展として、母材を AlGaAs とすることで発光波長を可視～近赤外にわたって制御する。

本研究は、GaAs と格子整合ながらも従来活用されなかった AlAs を光学活性材料として機能させることで、汎用性の高い GaAs 基板と整合する実用的な半導体量子光源の可能性を拓くものである。

3. 研究の方法

可視域の半導体量子光源の実現へは、既存

の半導体テクノロジーと整合しつつ、高品質な量子発光準位を形成する材料系の開拓が必要である。本研究では GaAs と格子整合する AlAs に注目し、AlAs 中の窒素不純物準位 (AlAs:N) を用いた可視域における単一光子発生の実現を目指した。

2-1. AlAs:N の作製と光学特性の解明

バンドギャップ内の不純物準位は、量子ドットと同じく局在した量子準位として量子光源への応用が可能である。AlAs は GaAs とほぼ格子整合でありながら、2.24eV (550nm) のバンドギャップを持ち、可視域量子光源に有望な半導体である。最近、AlAs と近いバンド構造を持つ GaP:N において 560nm での単一光子発生が確認されており、AlAs:N でも同様の量子準位の形成が期待される。

2-2. AlAs:N からの単一光子発生観測

単一不純物準位からの発光について光子相関を測定し、AlAs:N における単一光子発生を実証する。単一準位の発光を捉えるため窒素を局所ドーピングした試料を作製する。発光中心の密度は窒素濃度により制御する。顕微分光を用いて単一の不純物準位からの発光を測定し、励起子微細構造ならびに偏光特性を明らかにする。一度にただ一つの光子が発生していることを 2 経路同時観測におけるアンチバンチングによって確認する。

2-3. AlGaAs:N を用いた発光波長制御

母材を AlGaAs とすることで発光波長を制御する。AlAs と GaAs の混晶である AlGaAs は、GaAs と格子整合を保ちつつバンドギャップが 2.24eV (550nm) から 1.5eV (820nm) まで変化する。AlGaAs:N を用いることで可視～近赤外にわたる単一光子発生を狙う。

4. 研究成果

AlAs:N の作製と光学評価

窒素ラジカル源を備えた分子線エピタキシ装置を用いて窒素ドーパ AIAs を成長した。一様ドーパ、デルタドーパのいずれにおいても、窒素流量やプラズマパワーを制御することで、窒素ドーパ濃度の精密制御を実現した。

窒素ドーパ濃度が低い領域では、窒素等電子中心に由来すると考えられるシャープな発光線が AIAs の X 点バンドギャップ直下 2.2 eV 付近に確認された。ドーパ濃度を増やすにしたがい発光エネルギーは低エネルギー側にシフトするとともに発光線幅は広がり、最終的に AIAsN の混晶からの発光へと変化した。

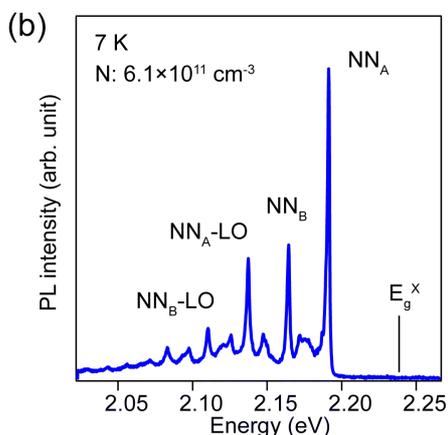


図 1. 窒素面密度 $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ のデルタドーパ試料からの蛍光スペクトル

輝線ピークの特性和単一光子発生を検証
窒素面密度 $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ のデルタドーパ試料を用いて輝線ピークの起源について考察し、単一光子発生を観測を試みた。

主たる発光線は 2.165 eV および 2.190 eV の 2 つのピークとそのフォノンレプリカからなる。2 つのピークの蛍光強度は窒素濃度の 2 乗に比例することから、窒素原子 2 つからなる NN ペアに束縛された励起子からの発光と考えられる。単一の発光サイトについて偏光特性を測定したところ、とくに 2.165 eV ピークは $\langle 110 \rangle$ 方向に強く偏

光しており、 $[110]$ あるいは $[220]$ 型のペア配置であることが示唆された。

つづいて、この 2.165 eV ピークを用いて同時計数計測を行った (図 2)。

時間差 0 における同時計数率 0.33 は 0.5 を下回る値を示し、古典光の限界を超えた量子的な単一光子が発生していることが確認された。

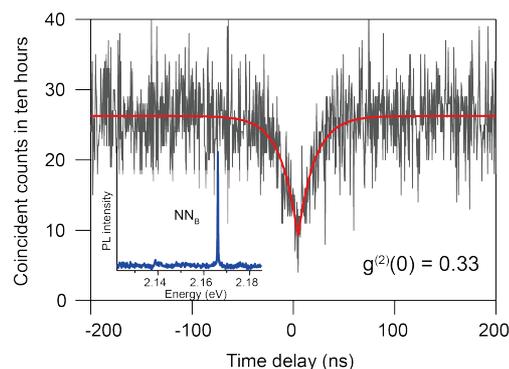


図 2. 2.165 eV 発光線の同時計数計測。

AIAs:N 電子状態計算

窒素不純物の電子状態について、強束縛近似を用いた原子レベルの電子状態計算を行った。その結果、AIAs 中の単一 N 不純物は伝導帯中に共鳴準位を形成することを見出した。これは、バンド構造の近い GaP 中の N 不純物がバンドギャップ内に束縛準位を形成することと対照的であり、その理由は伝導帯端のエネルギー位置の違いで説明できる。

いっぽう、NN ペアでは $[110]$ および $[220]$ ペアのみが束縛準位を形成することを見出した。これと蛍光測定の結果とを比較することにより、2.165 eV 発光が $[110]$ ペア、2.191 eV 発光が $[220]$ ペア由来であると結論付けた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

M. Jo, T. Mano, Y. Sakuma, K. Sakoda

“Tight-binding analysis of the electronic states in AlAs with N isoelectronic impurities”

J. Appl. Phys. 115[12] (2014) 123501-1
(査読有)

DOI:10.1063/1.4869261

M. Jo, T. Mano, T. Kuroda, Y. Sakuma, K. Sakoda

“Visible single-photon emission from a nitrogen impurity center in AlAs”

Appl. Phys. Lett. 102[06] (2013) 062107-1 (査読有)

DOI:10.1063/1.4792315

[学会発表](計 3 件)

"AlAs 中の N 等電子中心"

第 73 回応用物理学学会学術講演会 .
(20120911-0914). 愛媛大学

"Evolution from Isoelectronic Impurities to an Impurity Band in N Delta-Doped AlAs Grown by Molecular Beam Epitaxy"

The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy.
(20120923-20120928). 奈良新公会堂

Yellow single-photon emission from nitrogen impurity centers in AlAs”

SPIE2014 (20140817-0821) San Diego, California, USA

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

取得状況(計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]
ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

定 昌史 (JO, Masafumi)

独立行政法人理化学研究所・平山量子光素
子研究室・研究員

研究者番号 : 20400020

(2)研究分担者

()

研究者番号 :

(3)連携研究者

()

研究者番号 :