

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18035

研究課題名(和文) 微小共振器構造を有するEr原子層ドーブ半導体の作製および単一光子発生

研究課題名(英文) Single photon generation from Er atomic-layer doped semiconductors with micro-cavity structures

研究代表者

高宮 健吾 (TAKAMIYA, Kengo)

埼玉大学・総合技術支援センター・専門技術員

研究者番号：70739458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：量子情報技術の分野で重要な役割を担っている単一光子源の実現に向けて様々な試みで行われている。本研究ではEr発光の特長に着目し、長距離伝送、温度特性に優れた単一光子源の実現を目的として研究を行った。

Er原子層ドーブGaAsにおいてGaAsキャップ層の成長温度と成長時間を変えることでEr発光中心の数を制御できることを見出した。GaAs/AlAs多層膜ミラーを設計し、GaAs/AlAs分布ブラッグ反射鏡を有するEr原子層ドーブGaAsを作製し、Er発光の増強に成功した。

研究成果の概要(英文)：Various techniques have been studied for realizing single photon sources which play a key role in the field of quantum information technology. In this study, I focused my attention on the feature of Er emission and carried out an investigation to realize single photons with excellent characteristics in long distance transmission and temperature dependence.

It is found that the number of Er emission centers can be controlled by changing the growth temperature and time of the GaAs cap layer in Er atomic-layer doped GaAs. In addition, enhancement of Er emission intensity was achieved by fabricating Er atomic-layer doped GaAs with GaAs/AlAs distributed Bragg reflectors.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：単一光子 エルビウム 原子層ドーブ 微小共振器構造 非古典光源

1. 研究開始当初の背景

量子コンピューティングや量子暗号技術といった量子情報技術の分野において重要な役割を担っている非古典光(単一光子やもつれ光子対)の実現に向けて、単一量子ドット、ダイヤモンド中の単一NV中心や半導体中の単一等電子トラップなど様々な試みで研究が行われている[1-4]。

本研究で着目しているエルビウム(Er)発光の特長としては、発光波長が光ファイバの最低伝送損失帯である1.5 μm 帯であることや、4f内殻遷移による発光であることから温度特性に優れていること、発光エネルギーの再現性が良いことなどがあげられる。

2. 研究の目的

本研究では、上記したEr発光の特長と微小共振器構造を用いることで、これまででない高い光子発生効率、長距離伝送かつ、温度特性に優れた非古典光源の実現を目的として研究を行う。

3. 研究の方法

微小共振器構造を有するEr原子層ドーピングGaAsを用いた単一光子生成に関して以下に示す内容の研究を行った。試料作製装置には分子線エピタキシー装置を用いた。

(1)Erを原子層ドーピングするために低温GaAsキャップの導入が必要不可欠である。さらに、Er原子の発光中心の数を制御するために低温GaAsキャップ層厚を変えたEr原子層ドーピングGaAs試料を作製し、低温GaAsキャップ層厚とEr原子数の関係を検討した。

(2)Er原子による発光の発光遷移過程を調べるために母体結晶であるGaAsのバンドギャップより高エネルギー励起と低エネルギー励起でのフォトルミネッセンス(PL)スペクトル比較を行った。また、Er発光の成長温度依存性を調べた。

(3)Er発光の強度増加を目的として多層膜ミラーを設計し、分布ブラッグ反射鏡(DBR)を有するEr原子層ドーピングGaAsを作製し、DBR構造の有無による比較を行った。

4. 研究成果

(1)Er原子層ドーピングGaAs試料における低温GaAsキャップ層厚依存性

Erを単一光子源として応用するためにEr原子を測定範囲内(1 μm^2)に一つにする必要がある。そこで低温GaAsキャップ層厚を変えた試料を作製し、マッピング測定を行った。図1に低温GaAsキャップ層厚(a)3nmと(b)12nmの試料に対するマッピングを示す。低温GaAsキャップ層を厚くすると相対発光強度の揺らぎが大きくなっていることがわかる。相対発光強度と観測頻度の関係を示すヒストグラムを図2に示す。低温キャップ層を増やすことで相対発光強度分布が広がっていることがわかる。この分布の広がりからEr原子の個数を見積もった。図3に相対発光

強度分布の揺らぎから見積もったEr原子数と偏析長から見積もった高温キャップ層中のEr原子数[5]の関係を示す。これらの関係からPLの発光には、高温キャップ層中のEr原子が寄与していることがわかった。これらの結果より、Er原子を測定範囲内に一つ程度に抑える指針を示すことができた。

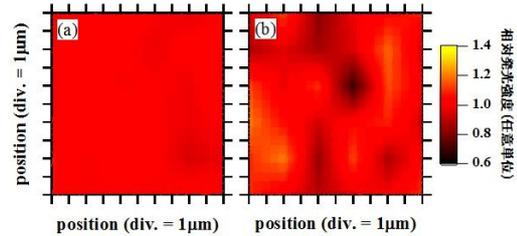


図1 低温GaAsキャップ層厚を変えたEr原子層ドーピングGaAs試料に対するマッピング測定(キャップ層厚(a)3nm、(b)12nm)

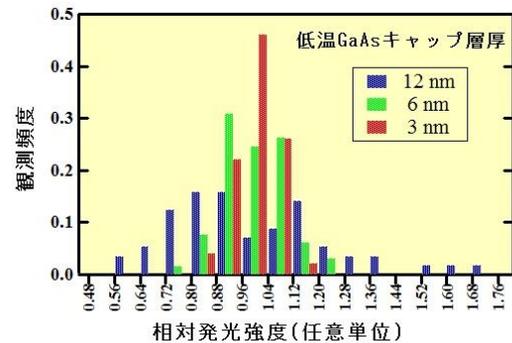


図2 低温GaAsキャップ層厚変化による相対発光強度と観測頻度の関係

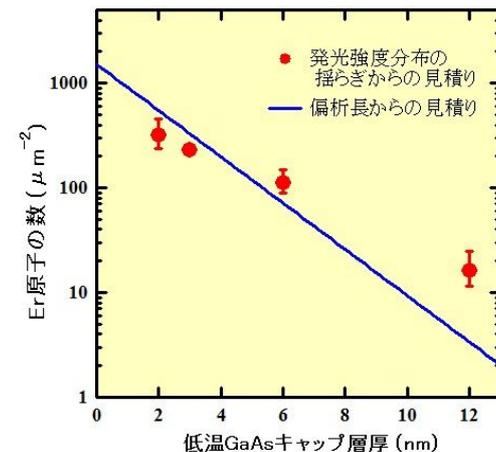


図3 低温GaAsキャップ層厚に対するEr原子の数の関係

(2)Er発光スペクトルの成長温度依存性と励起波長依存性

図4に成長温度を変えて作製したEr原子層ドーピングGaAs試料からのPLスペクトルを示す。成長温度に対する依存性からEr発光線が二つのタイプに分けられる。Aタイプの発光は成長温度520 ~ 580まで全ての試料で発光が得られる発光で、Bタイプの発光は

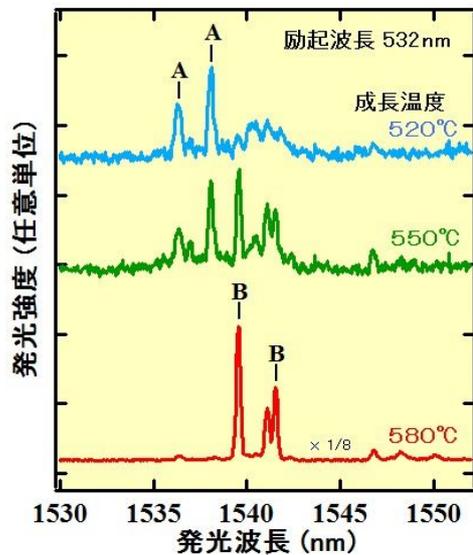


図4 Er 原子層ドーパ GaAs 発光の成長温度依存性スペクトル

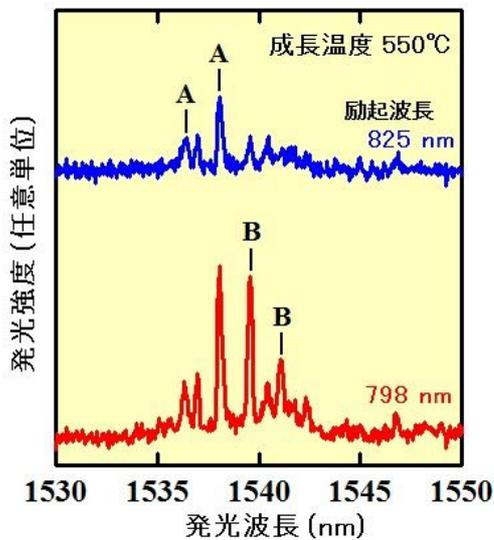


図5 Er 原子層ドーパ GaAs 発光の励起波長依存性スペクトル

成長温度が低くなると発光強度が減少する発光である。図5にAタイプ、Bタイプの発光が観測される成長温度550で作製したEr原子層ドーパ GaAsの励起波長依存性スペクトルを示す。母体結晶であるGaAsのバンドギャップエネルギーより高エネルギーである波長798nmでの励起ではAタイプ、Bタイプの発光が観測されるのに対し、バンドギャップエネルギーより低エネルギーである波長825nmでの励起ではBタイプの発光が著しく低下していることがわかる。これらの結果からEr発光のスペクトル形状は成長温度に依存し、大きく二つのタイプに分別できる。また、二つのタイプは励起波長依存性がことなることからEr 4f殻内の発光遷移に至る過程に違いがあることがわかる。図6に成長温度580のEr原子層ドーパ GaAs試料における測定温度依存性(5.5, 20, 40K)スペク

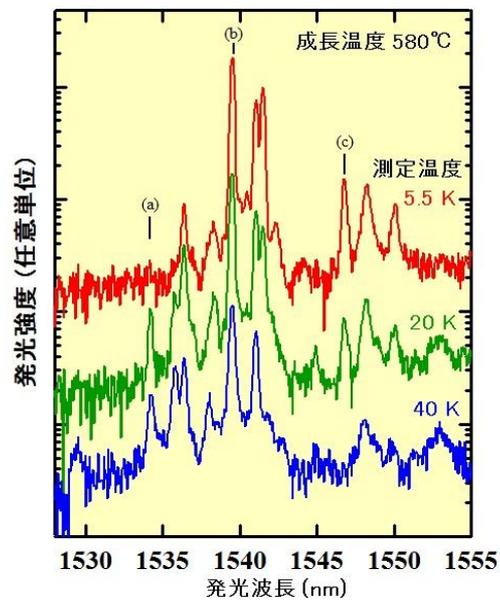


図6 Er 原子層ドーパ GaAs 発光の測定温度依存性スペクトル

トルを示す。Er発光は様々な発光エネルギーでピークを有していることがわかる。それぞれの発光ピークは以下に示すように様々な測定温度依存性を示す。(a)発光は測定温度の上昇とともに発光強度が上昇する発光。(b)発光は測定温度が40Kと上昇しても発光強度があまり変化しない発光。(c)発光は測定温度の上昇とともに発光が消えていく発光。以上の結果からより優れているEr発光線を選び、その発光線に適した成長温度、励起波長を選択することでより高純度、温度特性に優れた単一光子源が実現できることを示唆した。

(3) DBR構造を有するEr原子層ドーパ GaAsの作製と光学特性評価

Er発光(1.5μm帯)に対して高反射率を有しているDBR構造を設計し作製を行った。作製した試料に対してX線回折測定を行い設計値通りGaAs:114nm、AlAs:133nmであることを確認した。また、分光反射率測定によっても1.5μm帯が高反射率であることを確認した。そこでGaAs/AlAs DBR構造(10周期)を有するEr原子層ドーパ GaAsを作製し、DBR構造が無いEr原子層ドーパ GaAs試料との発光特性の比較を行った。図7にDBR構造の有、無しの試料に対する励起強度依存性プロットを示す。プロットよりGaAs/AlAs DBR構造がEr発光の増強に有効な手段であることが示されており、今回の試料ではEr発光強度を約一桁増強することに成功した。挿入図にDBR構造を有するEr発光スペクトルを示す。

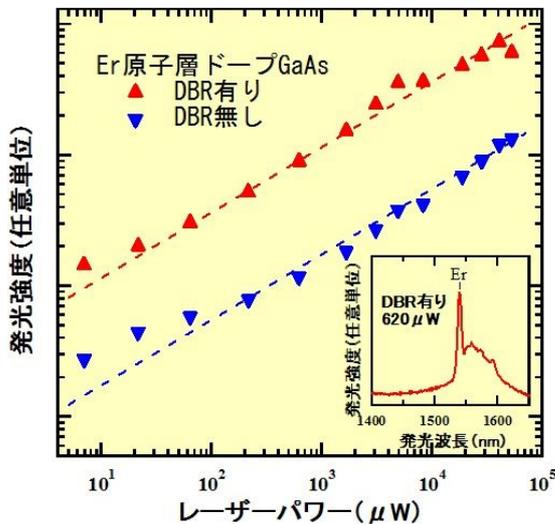


図7 GaAs/AlAs DBR構造を有するEr原子層ドーピングGaAsとDBR構造の無い試料の励起強度依存性プロット。挿入図は励起強度620μW時のDBR有り試料からのEr発光スペクトルを示す。

参考文献

- [1]C. Santori *et al.*, Nature **419**, 594 (2002).
- [2]K. Beha *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 097404 (2012).
- [3]K. Takamiya *et al.*, Appl. Phys. Express **5**, 111201 (2012).
- [4]M. Ikezawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, L871 (2007)
- [5]R. G. Jin *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 051201 (2015).

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)

[学会発表](計6件)

- 五十嵐 大輔、高宮 健吾、八木 修平、伊藤 隆、秋山 英文、矢口 裕之、ErドーピングGaAsからの発光のMBE成長温度依存性、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月17日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)
- 米倉 成一、高宮 健吾、八木 修平、上田 修、矢口 裕之、レーザ照射によるGaInNAs混晶半導体の発光効率への影響、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月15日、朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)
- K. Takamiya, M. Suto, K. Iimura, S. Yagi, H. Yaguchi、Effect of Low Temperature Growth and a Distributed Bragg Reflector on the emission from Molecular Beam Epitaxy-Grown Er δ-doped GaAs、the 19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy、2016年9月6日、Montpellier (France)

須藤 真樹、金 日国、高宮 健吾、八木 修平、矢口 裕之、AlAs/GaAs分布ブラッグ反射鏡を有するEr δドーピングGaAsの発光特性、第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月13日、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

金 日国、高宮 健吾、八木 修平、土方 泰斗、矢口 裕之、GaAs MBE成長におけるEr原子の表面偏析の温度依存性、第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月13日、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

飯村 啓泰、金 日国、高宮 健吾、八木 修平、矢口 裕之、ErドーピングGaAsからの発光に対する低温成長の影響、第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月13日、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

高宮 健吾 (TAKAMIYA, Kengo)

埼玉大学・総合技術支援センター・専門技術員

研究者番号：70739458