

# 局所ドーピング構造半導体による単一光子発生

プロジェクト代表者：矢口 裕之（理工学研究科・准教授）

## 1. 本研究の背景と目的

近年、情報通信の発展にともない情報セキュリティの重要性が高まっている。現在の情報通信における暗号化技術は基本的には計算に多くの時間を要することに依っており、量子コンピュータが実現した場合には、役に立たなくなってしまうと考えられている。そのため、量子情報技術の分野では量子コンピュータの研究とともに絶対的安全性が保証される量子暗号通信に関する研究も盛んに行われている。代表的な量子暗号通信方式としてはBB84 やB92 と呼ばれるプロトコルが提案されている。これらの量子暗号通信では、光子1個の量子的性質が通信の安全性を保証している。その実現には単一光子発生源が必要であるため、単一の分子や単一の半導体量子ドットを利用するなど様々な方法での開発が検討されている。

本研究では単一光子発生源への応用のためにGaAsやGaP中の窒素原子対によって形成される等電子トラップに着目した。この等電子トラップは、窒素の電気陰性度が、同じV族元素であるヒ素あるいはリンよりも大きいことに起因する束縛準位である。等電子トラップに着目した理由は、そこからの発光のエネルギー幅が狭く、また発光エネルギーが窒素原子対の配列に対応して再現性よく決まるという特徴を持つからである。そこで、GaAsおよびGaP中の窒素原子対による単一の等電子トラップを単一光子源へ応用することを目的として、その発光特性について研究した。単一の等電子トラップからの発光について調べるためには、GaAsあるいはGaP中に窒素を局所的にドーピングする必要がある。そのための手段として $\delta$ ドーピング法を用いることによって、局所ドーピング構造半導体を作製した。さらに測定方法として顕微フォトルミネッセンス分光法を用いた。これらの組み合わせによって、単一の等電子トラップからの発光の観測を実現した。ここでは紙面の都合上、GaAsに窒素を $\delta$ ドーピングすることによって作製した局所ドーピング構造半導体に関する結果について述べる。

## 2. 本研究の経過

試料の作製には有機金属気相エピタキシー法を用いた。ガリウム源、ヒ素源、窒素源にはそれぞれトリメチルガリウム、ターシャリブチルアルシン、ジメチルヒドラジンを用いた。GaAs(001)基板の上に膜厚300 nmのGaAsバッファ層を成長した後、窒素 $\delta$ ドーピングを行い、続いて膜厚40 nmのGaAsキャップ層を成長した。窒素 $\delta$ ドーピングはトリメチルガリウムの供給を止めてGaAsの成長を5秒間中断し、その間にジメチルヒドラジンを供給することで行った。参照のために、同様の成長条件で窒素を一様にドーピングしたGaAsを成長した結果、窒素濃度は0.05%であった。

顕微フォトルミネッセンス測定は温度4 Kで行った。励起光源にはDPSSレーザー（波長532 nm）を、発光の検出にはCCDを用いた。測定系の空間分解能は1  $\mu$ m、発光スペクトルのエネルギー分解能は30  $\mu$ eVであった。

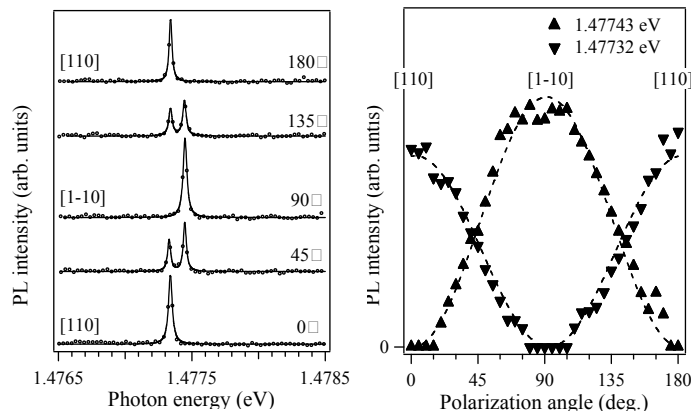


図1 単一の等電子トラップからの発光スペクトルの偏光特性

窒素を $\delta$ ドーピングしたGaAsからの発光スペクトルを測定した結果、単一の等電子トラップからの発光には微細構造があることがわかった。これ以外の試料についても測定を行った結果、分裂した二つの発光ピークの半値幅は20～50  $\mu$ eV、発光ピーク間のエネルギー差は120～370  $\mu$ eVであった。また、そのエネルギー差は窒

素原子対の配列とは無関係で、同じ配列の窒素原子対であっても測定位置が異なればエネルギー差は異なることがわかった。

発光の分裂する要因を調べるために、分裂した二つの発光ピークに対して偏光特性測定を行った。図1に単一の等電子トラップからの発光スペクトルの偏光特性を示す。図に示すように1.47732 eVの発光は[110]方向の直線偏光であり、1.47743 eVの発光は[1-10]方向の直線偏光であることがわかった。これ以外の発光に対しても偏光特性測定を行ったところ、同様に低エネルギー側の発光は[110]方向の直線偏光、高エネルギー側の発光は[1-10]方向の直線偏光であった。すなわち、この偏光特性は窒素原子対の配列とは無関係であった。

以上の結果は単一の等電子トラップに束縛された励起子の状態が互いに直交した関係をもつ二つの状態に分裂していることを示している。そのため、この分裂を交換相互作用で説明することはできない。また、窒素原子対の配列に関係なくすべての発光が同じ偏光特性をもっているという結果は窒素原子対の原子配列に起因する微細構造ではないことを示している。分裂の要因としては、母体結晶において[1-10]方向と[110]方向との間に何らかの異方性があると考えられ、例えば窒素の添加による歪の異方性である可能性がある。[1-10]方向と[110]方向との間の歪の大きさが $1\sim4\times10^{-5}$ であると仮定すると、価電子帯の固有状態はエネルギー差が130~360  $\mu\text{eV}$ である[1-10]方向と[110]方向の成分をもつ二つの状態に分裂する。窒素濃度が0.05%であるとして、格子定数差から歪の最大値を見積ると $5\times10^{-5}$ であり、仮定した歪の大きさは妥当な値である。さらに、[1-10]方向の格子面間隔が[110]方向の格子面間隔よりも小さいと仮定すると、低エネルギーの遷移は[110]方向の直線偏光、高エネルギーの遷移は[1-10]方向の直線偏光となり、その関係は実験結果と一致する。例えば、[1-10]方向の方が[110]方向よりも格子面間隔が小さくなる原因として、 $\delta$ ドーピング層が試料表面側に位置しているためということが考えられる。試料表面側のGa原子とAsまたはN原子との結合方向は[1-10]方向の成分を持ち、試料裏面側では[110]方向に成分を持っているからである。

#### 4. 今後の展開

単一光子発生源への応用を目的として、GaAs中の窒素原子対による単一の等電子トラップからの発光特性を評価した。単一の等電子トラップからの発光は二つのピークに分裂し、窒素原子対の種類によらず、低エネルギー側の発光は[110]方向の直線偏光、高エネルギー側の発光は[1-10]方向の直線偏光であることがわかった。この偏光特性は窒素の添加による歪の異方性のためであると考えられる。今後は歪制御による発光ピーク分裂の解消や光子相関測定による光子のアンチバンチング状態の検証などの展開を計画している。

#### 5. 本助成研究に関わる成果

##### 論文発表

Y. Endo, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, M. Yoshita, H. Akiyama, F. Nakajima, R. Katayama, K. Onabe, *Physica E* **40**, 2110 (2008).

##### 口頭発表

Y. Endo, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, M. Yoshita, H. Akiyama, F. Nakajima, R. Katayama and K. Onabe: 13th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (PM11) (Genova, Italy) 2007. 7. 17.

遠藤雄太, 伊藤正俊, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 吉田正裕, 秋山英文, 中島史博, 片山竜二, 尾鍋研太郎: 第 68 回応用物理学会学術講演会 (7a-E-6) (札幌) 2007. 9. 7.

伊藤正俊, 遠藤雄太, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 吉田正裕, 秋山英文, 中島史博, 片山竜二, 尾鍋研太郎: 第 68 回応用物理学会学術講演会 (7a-E-7) (札幌) 2007. 9. 7.

福島俊之, 遠藤雄太, 伊藤正俊, 土方泰斗, 矢口裕之, 吉田貞史, 吉田正裕, 秋山英文, 窪谷茂幸, 片山竜二, 尾鍋研太郎: 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (29p-ZT-13) (船橋) 2008. 3. 29.