

機関番号：14701

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760034

研究課題名(和文) フォトニック結晶導波路モードと量子ドット内電子準位共鳴によるキャリア緩和促進

研究課題名(英文) Acceleration of carrier-relaxation time in QDs embedded in a photonic crystal waveguide due to the Purcell effect

研究代表者

尾崎 信彦 (OZAKI NOBUHIKO)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：30344873

研究成果の概要 (和文)：量子ドット(QD)を埋め込んだフォトニック結晶導波路(PC-WG)の最適設計により、QD 内励起キャリアの緩和時間制御を目指した。具体的には、PC-WG モードにおける低群速度領域(高フォトン状態密度)の波長を QD 内の電子準位間エネルギーに共鳴させ、パーセル効果によるキャリア緩和の促進を図った。QD を埋め込み、格子定数を系統的に変化させた PC-WG を作製し、パーセル効果による PL 発光増強と波長シフトを確認した。また、ポンプ・プローブ法によりキャリア緩和時間を測定した結果、PC-WG モードの低群速度領域波長と、QD の励起準位間エネルギーが共鳴した際に QD のキャリア緩和が速くなる傾向を見出した。

研究成果の概要 (英文)：We have proposed to control a carrier relaxation time in self-assembled quantum dots (QDs) embedded in a photonic crystal waveguide (PC-WG) by using the Purcell effect. Resonance of a high photon density-of-states region in the PC-WG mode with the electron transition energy in the QD will increase the spontaneous emission rate and the carrier relaxation time can be shortened. To verify the resonance effect, QDs embedded in PC-WGs with various lattice constants were fabricated and pump-probe measurements were performed. As a result, we found that the relaxation time was shortened when the high photon DOS region resonated with the ES emission wavelength of the QD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：フォトニック結晶、量子ドット

1. 研究開始当初の背景

近年、情報通信ネットワークのトラフィック量が急増し、ネットワークの高速、大容量化が求められているが、基幹ネットワークノードを構築する現在のデジタル信号処理装置は、光で伝送された信号を一旦電気信号に変換するため、処理速度の限界と消費電力の肥大化が問題となっている。我々は、この問題を解決するデバイスとして、フォトニック結晶導波路(PC-WG)と量子ドット(QD)の融合による、光-光(制御光で信号光を制御する)方式のスイッチ素子(PC-SMZ)(図1)の研究を行ってきた。これはQD特有の強い光非線形性と、PC-WGによる極微小光回路を組み合わせることにより、超小型、超低消費エネルギーを実現した全光スイッチング素子[H. Nakamura *et al.*, *Opt. Exp.* **12**, 6606(2004)]である。

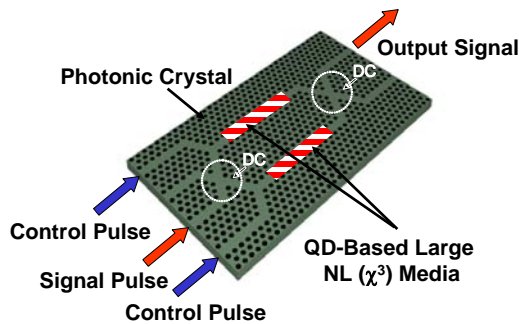


図1 PC-SMZ 模式図

PC-SMZの動作原理は、対称マッハ・ツェンダー型全光スイッチ[K. Tajima, *JJAP***32**, L1746(1993)]に立脚する。すなわち、信号光を二分岐し、片側の非線形アーム部に埋め込まれたQDを制御光により励起することで、両アームを透過する信号光間での相対位相差を誘起し、出力ポートを変換、その後、時間差(T)でもう片側の非線形アーム部も励起することにより、再び相対位相差を無くすことで出力ポートを戻す。このスイッチは、単発動作においては、非線形媒体(QD)の緩和時間によらず急峻な立ち上がり立ち下りを実現できるが、高速繰り返し動作においては、QD内で未緩和のキャリアの蓄積により、正常動作が維持されにくいという問題がある。

2. 研究の目的

本研究では、先述の問題を解決するため、従来報告例の無い最適PC設計による光のモード周波数とQD遷移エネルギーとの共鳴によるQD内のキャリアダイナミクス制御(図2)を提案、計算シミュレーションによるPC設計と、それに基づくサンプル作製およびキャ

リア緩和時間測定による実験実証を行った。

3. 研究の方法

シミュレーション計算

平面波展開法による2次元PC-WGのバンド計算を行った。PCの格子定数を系統的に変化させ、導波路モードのバンド端で得られる、群速度0に漸近する領域(低群速度領域)の周波数(波長)を求めた。これにより、低群速度領域波長と量子ドットの発光中心波長とを共鳴させるのに最適な格子定数が見積もられる。

PC-WGサンプル作製

InAs-QDを埋め込んだGaAs薄膜に、EBリソグラフィーとドライエッチングプロセスにより空孔を周期的に配列させてPCを作製した。周期的な空孔列のうち中央の一行を除去することにより、幅約600nmのPC-WGを作製した(図2)。格子定数が異なる7種類のPC-WGを作製し、それぞれ格子定数は $a=321, 330, 339, 348, 357, 366, 375\text{nm}$ である。また、導波路長は500、1000、1500 μm のものを作製した。

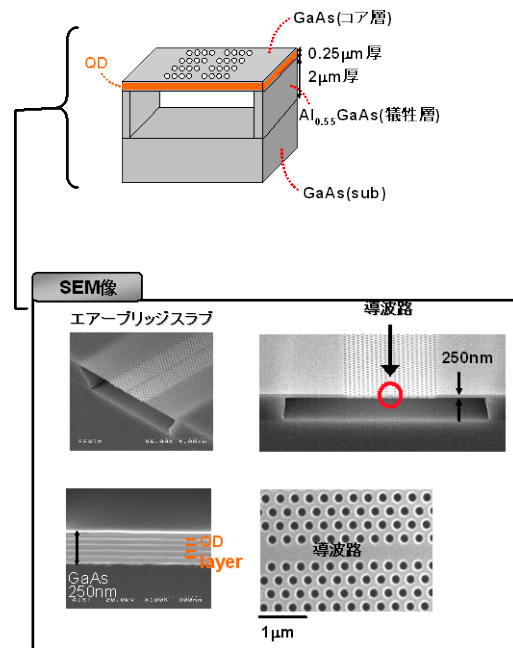


図2 作製したPC-WGの模式図とSEM像

光学測定

量子ドットを埋め込んだサンプルに導波路上から励起光(He-Neレーザー

・ $c=632.8\text{nm}$ 、励起密度: $100\text{W}/\text{cm}^2$)を入射し、同じく導波路上で量子ドットからの発光を測定した。さらに、QDのキャリア緩和時間の測定を二波長ヘテロダインプンプ・プローブ法を用いて行なった。

4. 研究成果

図3に、PC-WGにおけるフォトニックバンド構造計算結果の例を示す。青いプロットが導波路モードであり、赤破線で示した部分は、2つの導波路モード(odd, evenモード)における低群速度領域、すなわち光子の状態密度が高い領域を示しており、この周波数

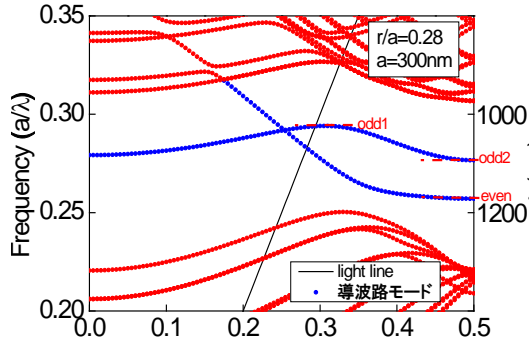


図3 PC-WGのフォトニックバンド構造例

(波長)とQDの発光中心波長を共鳴させれば、パーセル効果によりQD内光励起キャリアの高速緩和が実現すると予想される。

同様の計算をPCの格子定数を系統的に変化させた場合について行い、低群速度領域の波長変化をプロットしたものを図4の○で示す。格子定数の変化に対して、ほぼニアに推移している。これはoddモードの短波長側の低群速度領域(図3中のodd1)を例として示しているが、他の低群速度領域(odd2, even)についても同様の変化が見られた。

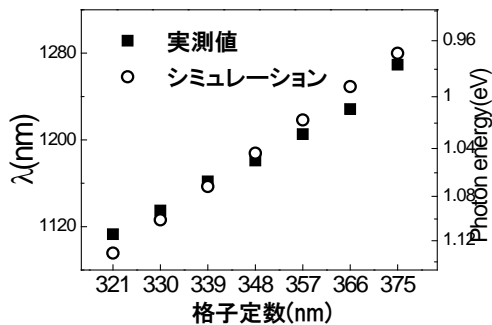


図4 格子定数に対する低群速度領域波長のPL実測値とシミュレーションとの比較

図5に、PCの格子定数aを321nmから375nmまで9nmずつ変化させて作製した、QDを内包するPC-WGからのPLスペクトルを示す。量子ドットからの広帯域発光スペクトル中に、図5に示すような鋭いピークが観測された。これは、PC-WGモードにおける低群速度領域でのパーセル効果による発光増強と考えられる。ピークのQ値はおよそ110~125であった。ピーク波長を格子定数に対してプロットすると(図4の■)、先のバンド計算

から求めたピーク波長推移(図4の○)とよく一致していることが分かる。これらの結果から、バンド計算によって求められた低群速度領域の波長において、実際に作製したサンプル内に埋め込まれたQDの発光が強められることが確かめられた。

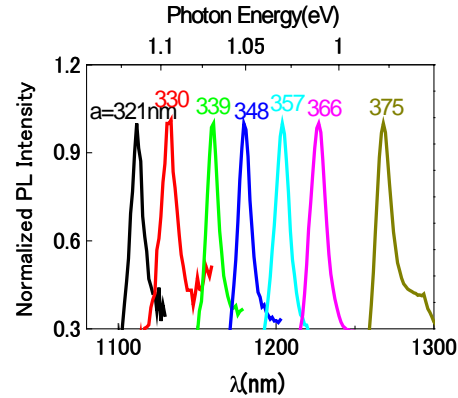


図5 PC-WGからのPLスペクトルにおける輝線ピークの変化

この発光増強は、導波路モードの低群速度領域において光子の状態密度が高くなることによる自然発光効率の増加(パーセル効果)を表していると考えられるが、これはQD内で励起されたキャリアの緩和を促進していることに相当する。そこで、二波長ヘテロダインプンプ・プローブ法によってQDの励起キャリア緩和時間の測定を試みた。具体的には、QDの中心波長で励起(ポンプ)を行い、非線形光学現象によって生じるプローブ光の位相変化を時間発展で観測した。図6はその一例を示しており、AのサンプルはPC導波路モードの低群速度領域波長がQDの電子準位間エネルギー、特に励起準位(ES)間エネルギーに共鳴しているもので、このサンプルにおいて高速の緩和(~50ps)が観測されたのに対し、低群速度領域波長がQDのバンド間準位から外れたBのサンプルでは遅い緩和(~400ps)が見られた。これは、PC導波路モードの低群速度領域波長が共鳴したことによるバンド間遷移(自然発光過程)の促進と、QDにおける励起準位(ES)のキャリアが緩和されたことにより、基底準位(GS)のキャリアが非発光過程によってより速く緩和されるという二つの効果によって、トータルのキャリア緩和速度が速くなったのではないかと考えている。今後もこの考察を裏付ける追試を行っていく予定である。

以上の結果から、PC最適設計によるQDの緩和速度制御の可能性が示された。この効果を利用すれば、我々が開発している、PC/QD融合型光・光スイッチの40GHz以上の超高速繰り返し動作の実現のみならず、QDを使った電子、光デバイス応用への大きな波及効果が期待される。

5. 主な発表論文等

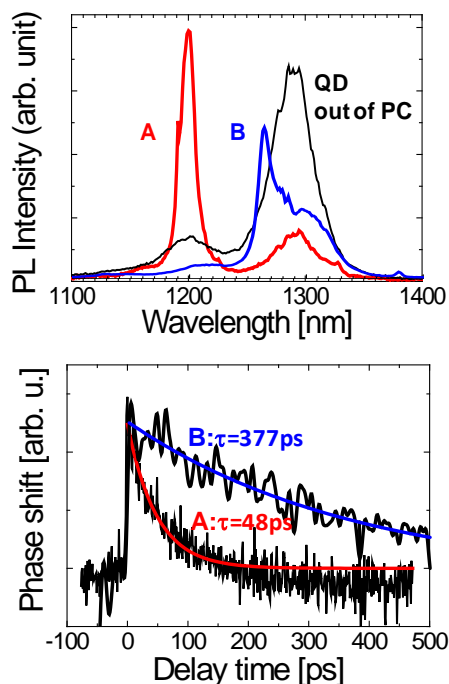


図6 QDを埋め込んだPC-WGサンプルにおけるQDのキャリア緩和速度の違いを示した例。サンプルAはPC導波路モードの低群速度波長領域がQDの励起準位(ES)発光($\lambda = 1200\text{nm}$)と共鳴しており、キャリア緩和定数が48psなのに対し、サンプルBは低群速度波長領域がQDの発光準位と共鳴しておらず、キャリア緩和定数が377psと長い。

[雑誌論文] (計6件)

- ① Yoshinori Watanabe, Naoki Ikeda, Yoshiaki Takata, Yoshinori Kitagawa, Nobuhiko Ozaki, Yoshimasa Sugimoto, and Kiyoshi Asakawa, "Wideband Operation of 2D Photonic Crystal Directional Coupler with Topology Optimized Waveguide Bends", *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 査読有, vol. 19, 2010, pp. 543-550.
- ② Yoshinori Kitagawa, Nobuhiko Ozaki, Yoshiaki Takata, Naoki Ikeda, Yoshinori Watanabe, Yoshimasa Sugimoto, and Kiyoshi Asakawa, "Sequential Operations of Quantum Dot/Photonic Crystal All-optical Switch with High Repetitive Frequency Pumping", *J. Lightwave Technol.*, 査読有, vol. 27, 2009, pp. 1241-1247.
- ③ Nobuhiko Ozaki, Shunsuke Ohkouchi, Yoshiaki Takata, Naoki Ikeda, Yoshinori

Watanabe, Yoshimasa Sugimoto, Kiyoshi Asakawa, "Monolithic Fabrication of Two-Color InAs QDs for Integrated Optical Devices by Using a Rotational Metal Mask", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 48, 2009, 065502 pp.1-4.

- ④ Y. Sugimoto, N. Ikeda, N. Ozaki, Y. Watanabe, S. Ohkouchi, T. Kuroda, T. Mano, T. Ochiai, K. Kuroda, N. Koguchi, K. Sakoda, K. Asakawa, "Advanced quantum dot and photonic crystal technologies for integrated nanophotonic circuits", *Microelectronics Journal*, 査読有, vol. 40, 2009, pp.736-740.

[学会発表] (計6件)

- ① 尾崎信彦, 宗石達矢, 北川嘉則, 池田直樹, 杉本喜正, 浅川 潔, 「フォトニック結晶導波路に埋込んだ量子ドットにおける光励起とキャリア緩和過程制御」、応用物理学学会励起ナノプロセス研究会第六回研究会、2010年11月2日、ビッグ・アイ国際障害者交流センター (堺市)
- ② K. Asakawa, Y. Sugimoto, Y. Watanabe, N. Ikeda, N. Ozaki, D. Kumar V, T. Nomura, D. Inoue, A. Miura, H. Fujikawa, K. Sato, "Evolution of Nanophotonics from Semiconductor Photonic Crystal Device to Metal/Semiconductor Plasmonic Device", 5th Int. Conf. Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2010), 2010年9月11日, Sevastopol, Crimea, Ukraine.
- ③ N. Ozaki, Y. Takata, Y. Kitagawa, N. Ikeda, S. Nakamura, S. Ohkouchi, A. Watanabe, Y. Watanabe, Y. Sugimoto and K. Asakawa, "Fabrication and characterization of an all-optical flip-flop based on photonic crystal waveguides and two-color quantum dots", OSA Int. Conf. Nanophotonics 2010, 2010年6月1日, Tsukuba, Japan.

[図書] (計1件)

- ① K. Asakawa, Y. Sugimoto, N. Ikeda, Y. Watanabe, N. Ozaki, Y. Takata, Y. Kitagawa, S. Ohkouchi, S. Nakamura, A. Watanabe, and X. Wang, Woodhead Publishing Limited, "Ch.9 Photonic crystal all-optical switches" of "Optical switches -Materials and design-", 2010, pp.241-275.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 信彦 (OZAKI NOBUHIKO)

和歌山大学・システム工学部・准教授
研究者番号：30344873

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：