

1. 研究の目的

半導体量子ドット(QD)は量子閉じ込めによる特有の電子状態を持ち、低閾値レーザーなどの様々な光学・電子デバイスへの応用が研究されている。将来、QDを用いた光学・電子集積デバイスを実現するためには、QDを基板上の所望の位置に所望の発光(吸収)波長で作製する技術が重要となるが、自己組織化によって形成されるエピタキシャル QD に対してそのようなモノリシック成長技術はまだ十分に確立されていない。そこで本研究は、QDの領域および波長選択成長技術を確認し、基板の上にモノリシックに成長した多色の QD 群を用いて広帯域光源素子作製へ応用することを目指した。具体的には、図1に示すように、GaAs 基板の上に中心波長を制御した複数の InAs-QD 群をモノリシックに成長、集積化し、近赤外波長帯(1.3 μ m 帯)で帯域 100nm

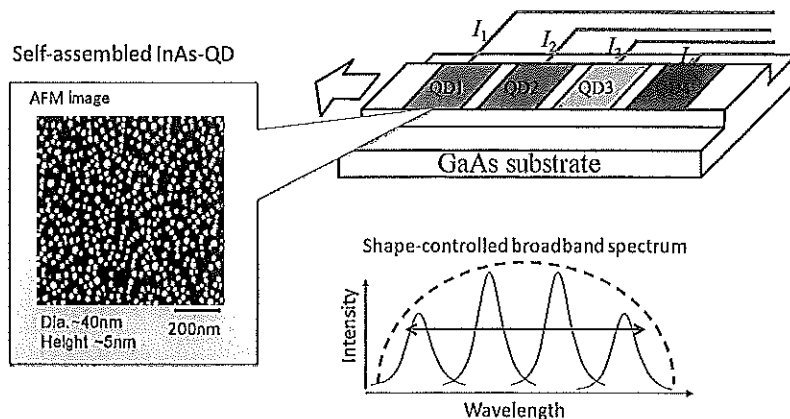


図1 多色 InAs-QD のモノリシック成長による広帯域光源の模式図。中心波長の異なる QD 群からの発光を導波路で結合し、広帯域化とスペクトル形状制御を可能とする。

以上の広帯域 SLD 光源への応用を目指した。個々の QD 群は一定のサイズ分布を持つため、中心波長を変えて合成すれば広帯域化が期待でき、また個別に電極を設け、各 QD への注入電流を制御すればスペクトル形状の制御も可能となる。このような光源は、医療・生体イメージング技術である OCT(光コヒーレンストモグラフィ)の光源として、その高性能化への寄与が期待される。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など。)

QD は MBE 法により、GaAs 基板の上に InAs を供給することで自己組織的に成長させた。これは、GaAs 基板の格子定数と InAs の格子定数の差による歪誘起で 3 次元の結晶成長が起きる現象 (Stranski-Krastanov モード成長) を利用しており、エピタキシャルな半導体 QD を作製する際によく利用される手法である。この方法では、基板上全面に一樣に QD が成長し、選択領域に所望の中心波長で QD を作製することができない。そこで我々は、メタルマスクによる選択領域成長と、歪緩和層導入による多波長 QD のモノリシック成長を行った。まず、図2に示す金属製のマスク(メタルマスク)を GaAs 基板に被覆し、マスク上に設けた開口部下のみに InAs を供給し、選択領域 QD 成長を行った。

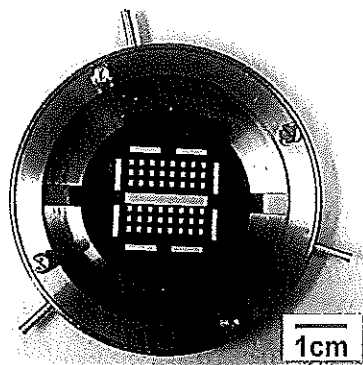


図2 多波長 QD の選択領域成長のための回転式メタルマスクの例

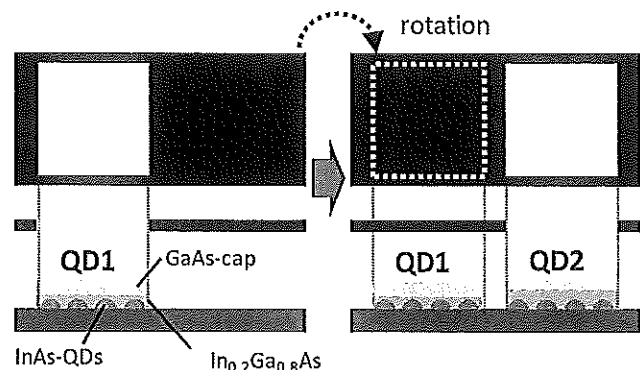


図3 回転式メタルマスクを用いた、多波長 QD の選択領域成長の模式図。QD 上に歪緩和層($In_{0.2}Ga_{0.8}As$)を異なる厚さで積層することにより、発光中心波長を制御する。

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

メタルマスクは超高真空チャンバー内で脱着可能で、かつ回転できるようになっている。開口部を回転非対称の位置に配置すれば、マスクを回転することによって図3に示すように隣接する選択領域に QD を成長できる。さらに、各 QD 上に、歪緩和層($\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$)を異なる厚さで積層することにより、発光中心波長を制御可能である。これは、InAs-QD 上に格子ミスマッチの大きな GaAs ではなく InGaAs を積むことにより、QD の歪みを緩和し実効的な QD サイズを大きくすることで、量子閉じ込め効果が弱まり発光が赤方偏移することを利用している。これらの手法を用いて、異なる位置に異なる中心波長を持った QD 群をモノリシックに作製した。

図4は、モノリシックに成長した QD 群から得られた PL 強度マップである。基板上に、マスク開口部パターンに従って 24 個の QD 群が選択領域に成長できていることが分かる。

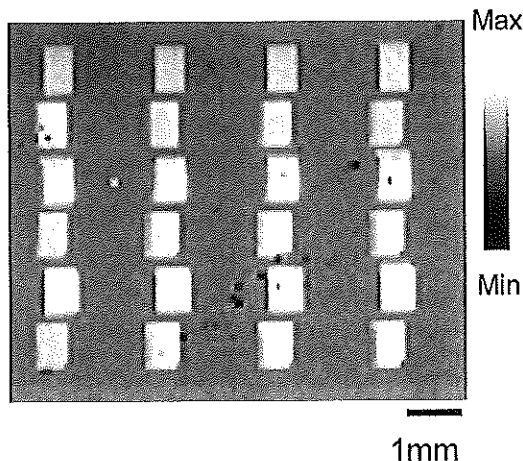


図4 選択領域に成長した QD 群の PL 強度マップ

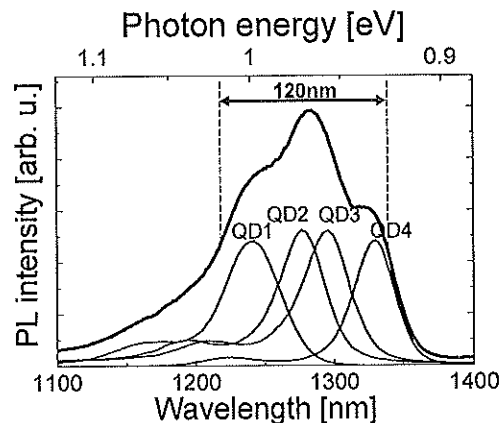


図5 多色 QD 群の個別 PL スペクトルと、合成 PL スペクトル

図5は、歪緩和層の厚さを 0~4nm まで変化させて得られた、4 種類の QD 群(QD1~QD4)の PL スペクトルとそれらの合成(足し合わせ)スペクトル(赤線)を示している。QD1に対する QD4 の発光中心波長シフト量はおよそ 90nm で、合成スペクトルの帯域はおよそ 120nm である。この帯域は主に QD の基底準位間での発光(GS 発光)によるものであり、電流注入によって励起すれば励起準位間での発光(ES 発光)が寄与するため、さらなる広帯域化が予想される。図6は、PL 測定で得られた QD1~QD4 の GS および ES 発光中心波長と半値幅をもとに、ES および GS 発光強度を変化させ、得られる最大帯域をシミュレーションしたものである。結果、帯域約 200nm が得られ、既存の半導体量子井戸ベースによる広帯域光源(SLD)素子の帯域(100nm 程度)を上回る広帯域化が期待される結果となった。

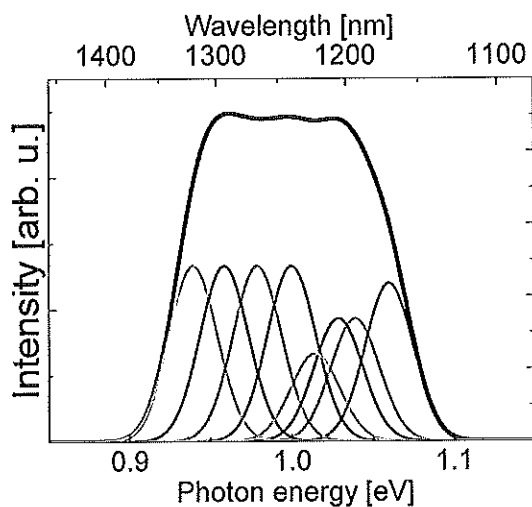


図6 4色 QD の GS 発光と ES 発光強度を変えて得られた合成スペクトルのシミュレーション結果

実際の素子作製は、図4に示すような隣接する多色の QD 群を貫くりつジ型光導波路を作製し、各 QD 群に対して個別電極を設ける(図1参)ことで、QD1~QD4 のスペクトル合成と、各 QD の GS と ES の発光強度比率の個別制御が可能となる。また、長波長 QD から短波長 QD の順に導波路内で結合させ、短波長 QD 側から出射することによって、異なる波長の QD による光再吸収の抑制が可能となり、高効率な発光が期待できる。

3. 研究の結論、今後の課題

回転式メタルマスク法により、選択領域に多色の QD 群をモノリシックに成長させることに成功した。QD の発光中心波長のシフト量が 90nm、合成したスペクトルの帯域が 120nm 得られ、ES 発光の寄与も含めれば 200nm 程度の広帯域化が可能であることが分かった。現在、この基板から SLD 素子作製を行っている。選択領域に成長した QD 群に個別に電極を設け(マルチコンタクト)、各波長の発光強度を個別に制御することで、帯域の最大化とスペクトル形状の成形を可能とする。また、長波長発光の QD から短波長発光の QD の順に導波路内で並べることで、再吸収による強度低下を防ぐなどの素子設計を行い、より実用的な広帯域 SLD 素子へと展開させる予定である。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

4. 1. 社会的価値

本研究によって、生体への浸透長の長い近赤外波長の広帯域光源を量子ドットによって開発できる可能性が示された。医療分野、とくに OCT 技術への貢献が期待でき、従来よりも浸透長が長く、高分解能を有する OCT が実現でき、「安心・安全な医療技術」への展開が期待できる。

4. 2. 学術的価値

本研究で得られた、量子ドットの多波長選択領域成長による広帯域光源素子開発の可能性についての知見は、自己組織化量子ドットによる新たな応用研究の可能性を示した。特に、これまで光通信分野において開発されていた技術が、生体・医療イメージングに展開可能であることが示され、医工連携の可能性を示した。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

【査読付き原著論文】

1. “Multi-color quantum dot ensembles grown in selective-areas for shape-controlled broadband light source”, N. Ozaki, K. Takeuchi, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Asakawa, R. A. Hogg
J. Crystal Growth 323, 191-193 (2011).
2. “Broadband light source based on four-color self-assembled InAs quantum dot ensembles monolithically grown in selective areas”, N. Ozaki, K. Takeuchi, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Asakawa, R. A. Hogg, submitted.

【国際会議論文】

1. N. Ozaki, K. Takeuchi, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, R. A. Hogg, “Multi-color quantum dots grown in selective-areas for broadband light source”, 16th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2010), Berlin, Germany, August 22-27, 2010.

【国内会議】

1. 「スペクトル形状制御可能な広帯域光源を目指した多色量子ドット成長」尾崎信彦, 竹内晃一, 大河内俊介, 池田直樹, 杉本喜正, 浅川 潔, Richard Hogg, 第 71 回 応用物理学会学術講演会 2010 年 9 月 15 日
2. 「スペクトル形状制御可能な広帯域光源を目指した多色量子ドット成長(II) ～90 度回転メタルマスクによる 4 色量子ドットのモノリシック成長～」竹内晃一, 尾崎信彦, 大河内俊介, 池田直樹, 杉本喜正, 浅川 潔, Richard Hogg, 第 58 回応用物理学関係連合講演会 2011 年 3 月 24 日