

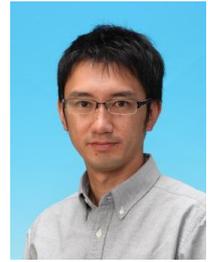
## 多色量子ドットによる近赤外広帯域光源開発と医療 OCT への応用

研究代表者

尾崎 信彦 和歌山大学システム工学部

共同研究者

日野 雄司 和歌山大学大学院システム工学研究科



### 1. 研究の背景と達成目標

OCT は、低コヒーレンス光干渉を利用して非侵襲に生体内部の断層像を得るイメージング技術であり、その性能向上には光源開発が重要となる。発光帯域が広く、かつスペクトル中にディップを含まない光源を用いることで、高分解能、低ノイズな OCT 画像を取得できる。また、生体透過性の高い 1 $\mu\text{m}$  や 1.3 $\mu\text{m}$  帯の光を用いることでより長い浸透長が得られる。これらの要求を満たす光源材料として、我々は GaAs 基板上 InAs 量子ドット(QD)に着目した。InAs-QD は基板上に自己組織的に成長するため、一定のサイズ分布を有し、発光が広帯域になりやすい。発光中心波長を制御した複数の InAs-QD 群(多色量子ドット)をモノシリックに成長し、導波路によって発光を結合することでより広帯域な発光が得られ、さらに個々の QD の励起強度を変化させてスペクトル形状の制御が可能となる。このような光源を提案、開発し、OCT 光源としての有用性を示すことを本研究の目標とした。

### 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- 異なる発光波長を有する複数の InAs 量子ドット(多色量子ドット)群を GaAs 基板上にモノシリックに成長し、それらの光励起発光を導波路で結合して帯域 160nm の近赤外広帯域発光を得た。
- 導波路内の各量子ドットに対する励起光強度を変え、広帯域発光スペクトルの形状制御を実証した。
- GaAs 基板上 InAs 量子ドットのサイズ制御技術の確立により、生体透過性のよい波長 1 $\mu\text{m}$  および 1.3 $\mu\text{m}$  帯での広帯域発光を得た。
- 多色量子ドットを用いた電流注入型発光素子を作製し、最大帯域 170nm の EL 発光を得た。
- 以上の成果により、医療用断層イメージング技術である光コヒーレンストモグラフィー(OCT)の性能向上(光軸方向分解能約 4 $\mu\text{m}$ )に寄与する多色量子ドットベース近赤外広帯域光源の有効性を示した。

### 3. 研究成果

我々が開発した回転式メタルマスク法により、発光中心波長をシフトさせた 4 種類の InAs-QD のモノシリック成長に成功した。これらの多色 QD を含む基板に光導波路を形成し、各 QD からの光励起発光を結合して帯域 160nm の広帯域発光を得た。さらに、導波路内の各 QD への励起強度を変え、発光スペクトル形状の制御に成功した。また、生体透過性の高い 1 $\mu\text{m}$  や 1.3 $\mu\text{m}$  帯の光源へ応用するため、InAs-QD の発光波長制御技術を確認した。1 $\mu\text{m}$  帯には In-flush 法、1.3 $\mu\text{m}$  帯には Bi-layer 法と呼ばれる QD サイズ制御法を用いて、0.9-1.4 $\mu\text{m}$  という非常に広範囲な発光中心波長制御に成功した。これらの発光波長制御技術と、先のモノシリック成長技術を組み合わせることで、1 $\mu\text{m}$  や 1.3 $\mu\text{m}$  帯において帯域 200nm 程度の広帯域発光が期待できる。さらに、実用デバイスに向け、多色 QD を含む基板から電流注入型発光素子の作製も行った。図1(a)はその EL スペクトルの例であり、最大帯域 170nm が得られた。この素子を OCT 光源として用いた場合、図1(b)に示すように光軸方向分解能が約 4 $\mu\text{m}$  と見積もられ、市販 OCT に比べ 2 倍以上の分解能向上が期待される。以上の成果から、多色 QD による広帯域光源の実現と OCT 光源としての有用性が示された。

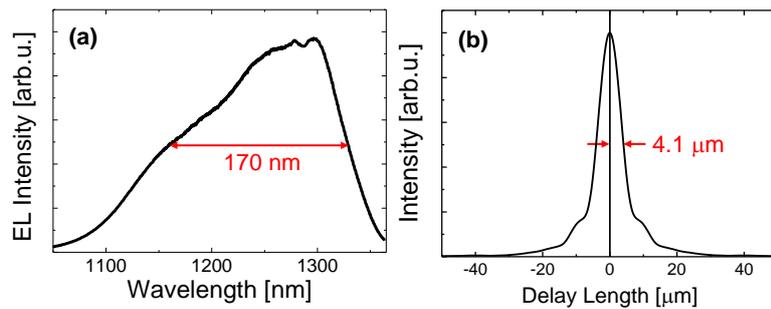


図1(a) 多色 QD からの EL スペクトル  
(b) (a)の EL スペクトルをフーリエ変換して求めたコヒーレンス関数。この半値幅(4.1μm)が OCT 画像の光軸方向分解能に相当する。

#### 4. 今後の展開

今後は、医療用 OCT 光源としてより実用的なデバイスへ展開し、実際に OCT システムに導入して臨床応用へ繋げることを目指す。現在進めている和歌山県立医科大学との連携をさらに推進し、和歌山県や関西圏での医工連携、産学連携の活性化という形で地域貢献できればと考えている。

#### 5. 発表実績

##### 【査読付き原著論文】(全 6 件中)

1. “Near-Infrared Superluminescent Diode Using Stacked Self-Assembled InAs Quantum Dots with Controlled Emission Wavelengths”, Nobuhiko Ozaki, Takuma Yasuda, Shunsuke Ohkouchi, Eiichiro Watanabe, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, and Richard Hogg, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 04EG10 (2014).
2. “Monolithically grown multi-color InAs quantum dots as a spectral-shape-controllable near infrared broadband light source”, Nobuhiko Ozaki, Koichi Takeuchi, Shunsuke Ohkouchi, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, Hisaya Oda, Kiyoshi Asakawa, and Richard A. Hogg, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 051121 (2013).
3. “Extending emission wavelength of InAs/GaAs quantum dots beyond 1.3 μm by using quantum dot bi-layer for broadband light source”, N. Ozaki, Y. Nakatani, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, K. Asakawa, E. Clarke, R. A. Hogg, *J. Crystal Growth* **378**, 553–557 (2013).
4. “Growth of InAs/GaAs quantum dots with central emission wavelength of 1.05 μm using In-flush technique for broadband near-infrared light source”, Yuji Hino, Nobuhiko Ozaki, Shunsuke Ohkouchi, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, *J. Crystal Growth* **378**, 501–505 (2013).

##### 【査読付き国際会議発表】(全 7 件中)

1. Nobuhiko Ozaki, Yuji Hino, Yohei Nakatani, Shunsuke Ohkouchi, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto, Edmund Clarke, Richard A. Hogg, “Wide-range control of emission wavelengths of InAs/GaAs QDs grown by MBE towards ultra-broadband NIR light source for biomedical imaging”, Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG 2013), June 10–13, 2013. **(invited)**
2. Y. Nakatani, N. Ozaki, S. Ohkouchi, N. Ikeda, Y. Sugimoto, E. Clarke, R. Hogg, “Emission Wavelength Extension of Bi-layer InAs/GaAs-QDs by Controlling the Growth Rate of QD Layers”, 12th Int. Conf. Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-12), 7PN-27, Nov. 4–8, 2013.
3. Nobuhiko Ozaki, Takuma Yasuda, Shunsuke Ohkouchi, Eiichiro Watanabe, Naoki Ikeda, Yoshimasa Sugimoto and Richard A. Hogg, “Broadband near-infrared superluminescent diode based on stacked multi-color InAs/GaAs quantum dots”, Int. Conf. Solid State Devices and Materials (SSDM2013), K-2-3, Sep. 24–27, 2013.
4. Y. Hino, N. Ozaki, S. Ohkouchi, N. Ikeda and Y. Sugimoto, “Controlling emission wavelength of InAs quantum dots using the In-flush technique for broadband 1.05-μm light source”, the 17th Int. Conf. Molecular Beam Epitaxy (MBE2012), ThP-59, September 23–28, 2012.