

2021

半導体量子ドットを用いた医療用 OCT 光源の出力向上に向けたデバイス構造最適化

[1] 組織

代表者：尾崎 信彦
(和歌山大学システム工学部)
対応者：小野 篤史
(静岡大学電子工学研究所)

[2] 研究経過

近赤外波長光は、生体への浸透長が長く、非侵襲性といった特長を持つため、生体・医療イメージング技術に広く利用されている。中でも医療用断層イメージング技術として近年発達著しい光コヒーレンストモグラフィー(OCT)において、画像の高分解能化に有効な広帯域の近赤外光源の開発が盛んに行われている。我々はこれまで、半導体ナノ結晶である自己組織化 InAs 量子ドット(QD)を用いた近赤外広帯域発光デバイスの開発を行ってきた。InAs-QD は、GaAs 基板上に異なる格子定数を持つ InAs をエピタキシャル成長させる際に自己組織的に形成されるナノサイズの 3 次元結晶構造である。自己組織的に成長するために一定のサイズ分布を持ち、量子サイズ効果によって様々な発光波長を有する集合体として広帯域な発光スペクトルを有する。また、発光波長が 1.2~1.3 μm の近赤外波長帯という利点も持ち合わせており、これらの特長は OCT 光源应用到している。

我々は、OCT 光源応用に向けて発光中心波長を制御した複数の InAs-QD 層を融合した近赤外光源(QD-SLD)開発に成功している。しかしながら、従来光源を凌駕する広帯域化と高出力化の両立には至っておらず、本研究ではその課題解決手段として、光源デバイス構造の設計を見直し、特に電極構造を最適化することで、従来光源を超える帯域 100nm 以上のスペクトル広帯域化を有し、かつ高出力な光源デバイスの実現を目指した。

[3] 成果

(3-1) 研究成果
光源デバイスの元となる半導体基板の作製を和歌

山大学にて現有する分子線エピタキシー(MBE)装置を用いて行った。図 1(a)に示すような、厚さ 240 nm の GaAs 層内に InAs-QD を 4 層 (QD1-4) 含む活性層と、その上下を厚さ 1.5 μm の p-/n-Al_{0.35}Ga_{0.65}As クラッド層で挟んだ p-i-n ヘテロ接合半導体基板をエピタキシャル成長により作製した。各 QD 層は異なる厚み(0,1,2,4nm)の歪緩和層(In_{0.2}Ga_{0.8}As)を積層することによって発光中心波長が制御され、基底準位(GS)間発光波長が約 1220~1300nm となるよう調整した。この成長基板に対し、半導体微細加工プロセスによりリッジ型光導波路を形成後、p 側および n 側に Au 電極を形成し、へき開により長さ 4 mm、幅 2 mm のチップ形状とした。p 側電極には、図 1(b)に示すような分割構造を設け、分割電極チップには、出射端に最も近い領域にのみ電流を注入し、単電極よりも電流密度を上げるとともに、電流を注入しない領域を光吸収領域としてチップ内のレーザー発振を抑制し、QD のより高次の励起準位(ES)間発光の増幅を誘起し広帯域化を図った。

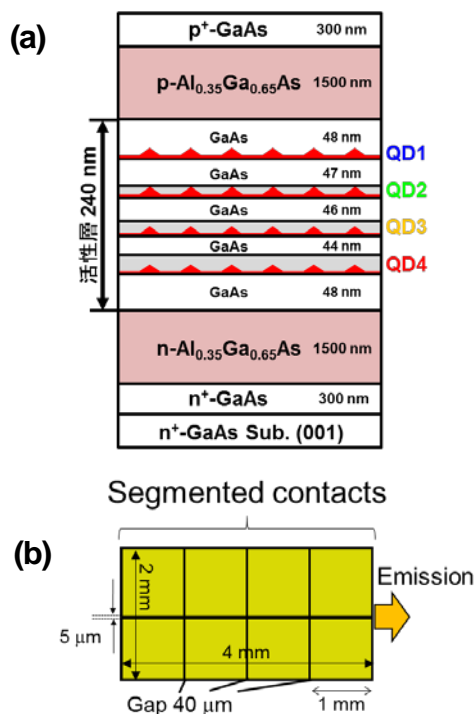


図 1 (a) InAs 量子ドットを含む GaAs/AlGaAs 成長基板の断面模式図 (b) 分割電極構造の模式図

このチップに対し、電流注入によって端面から出射されるエレクトロルミネッセンス(EL)を室温にて測定した。図2に、得られた EL スペクトルの例を示す。注入電流量を増加すると、発光中心波長は短波長にシフトしながら、スペクトル形状が徐々に変化した。これは、注入電流増加により state-filling 効果によって QD の GS 間発光が飽和し、ES 間発光強度が徐々に増加したためと考えられる。帯域は最大約 120nm が得られた。この結果から、分割電極構造を用いることで、より高次の準位 (ES2) 間の発光を引き出し、QD-SLD の広帯域特性が得られたと考えられる。また、スペクトルに大きなディップは見られず、多波長 QD 積層によるスペクトル成形効果も得られていることが分かった。

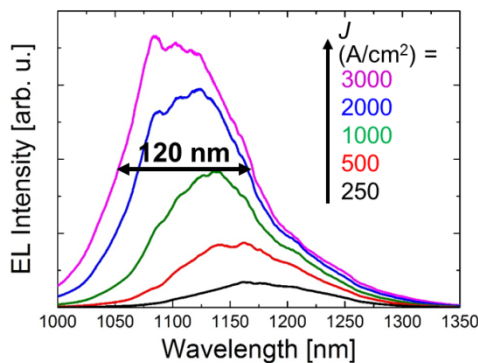


図2 分割電極をもつQD-SLDからの室温ELスペクトルの例

以上のように、電極構造を分割型にすることにより、スペクトルの広帯域化がなされた。次に、この発光特性を有する QD-SLD に対し、波長帯域、強度分布などを加味し、最適なプラズモン共鳴効果を発揮する電極構造の検討を行った。具体的な設計指針として、本デバイスの発光波長帯に共鳴するプラズモンを発生する周期構造を、Au 電極と半導体導波路との界面部分に設けることを検討している。QD 層から等方的に発光する光のうち、導波路に対し全反射条件から外れる光（例えば導波路に垂直な方向に進む光など）は導波モードに結合せず、出射端面からの取り出しに寄与しない損失光となる。しかし、Au 電極に周期構造を設けたグレーティング構造を導波路との界面に形成すれば、グレーティング構造においてプラズモン共鳴モードが発生する。導波路に結合しない損失光が、このプラズモン共鳴モードを発生させ、さらにそのモードと導波路モードが共鳴すれば、一度リークした損失光を導波路に再結合できるため、取り出し効率を向上できる。現在、この構造を実現すべく、当該半導体デバイス構造を用いたモデル計算を進めている段階であり、周期構造

パラメータの最適化を図っている。

(3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトは、QD ベースの近赤外広帯域光源に対する電極構造の最適化による広帯域化と出力向上を目指した研究であり、実現すれば OCT など医療イメージングにとって有用な光源開発が促進され、画像深さの拡大など現在の OCT の課題解決につながるといった波及効果が期待できる。また、OCT のみならず、光通信分野など近赤外光を用いた様々な分野における光デバイスの効率向上への応用も期待される。

[4] 成果資料

本プロジェクトに関する成果公表はまだない。

