

〈一般研究課題〉 多重積層量子ドットの量子力学結合効果を利用した革新的半導体レーザの実現
助成研究者 愛知工業大学 五島 敬史郎



多重積層量子ドットの量子力学結合効果を利用した革新的半導体レーザの実現

五島 敬史郎
(愛知工業大学)

Realization of semiconductor laser using quantum mechanical coupling effect with multi stacked quantum dots structure.

Keishiro Goshima
(Aichi Institute of Technology)

Abstract :

The quantum dot (QD) laser has three main characteristics: it demonstrates high optical amplification factor characteristics, facilitates high-speed modulation operation, and has a high operating temperature range. These features are far superior to those of conventional semiconductor lasers, and QD lasers have garnered significant research attention. In addition, from the standpoint of the strong quantum effect of QDs, the QD laser has been extensively studied for applications such as devices for quantum computers and cryptographic communication. However, these lasers have not yet achieved sufficiently significant performance; in particular, the light output performance is poor. Therefore, many studies have been carried out to improve semiconductor crystal growth technology. This study focused on the QD semiconductor structure; specifically, a close-proximity, low-distortion laminated structure was developed and verified. Quantum mechanical coupling was successfully exploited through the conventional thick structure being changed to a thin structure with a very small distance between the upper and lower QDs. As a result, the wavefunctions of adjacent QDs were coupled to each other. In addition, the strain accumulation effect of the QDs was reduced through alternate insertion of the close structure and the buffer layer. The optical gain factor was observed using the variable-stripe-length method. It was revealed that the optical gain was significantly increased when compared with that of the

conventional structure. It was also found that the crystal quality of the QDs was significantly improved.

1. はじめに

量子ドットレーザは、1982年に荒川、榊らによって理論提案され、1. 高い光増幅率特性、2. 高速変調動作が可能、3. 動作温度範囲の拡大 の3つの特徴を持つ[1,2]。この特性は既存の半導体レーザの性能を凌駕する理想的な半導体レーザとして、盛んに研究されている[3]。近年では民間ベンチャー企業から温度依存性の少ない量子ドットレーザが実用化されている[4]。

また、強い量子効果を利用して、量子コンピュータ向けの素子や暗号通信などの応用などにも幅広く研究されている[5]。

理想的な半導体レーザとして期待されているが、未だ量子井戸半導体レーザと比べて大きな利点を有するまでには至っていない。その最も大きな理由は、「光出力に対して消費電力が多い」ことである。光出力の向上には、量子ドットの総数と半導体結晶品質に比例する。そのため、主に半導体結晶成長技術の向上に主眼が置かれてきた[6,7]。半導体結晶欠陥を減らす成長方法や、高層ビルのような構造(多重積層構造)で光出力を増やす方法がとられてきたが、それでもまだ量子井戸レーザと比べて光出力は十分ではない。よって別の方法で光増幅率を引き上げる技術が必要である。

そこで結晶成長技術の向上に主眼を置かず、別の方法として多重積層構造に着目した。発光メカニズムに量子力学的結合効果を積極的に利用する近接多重積層構造にする。これにより、多重積層の総数を増やすことなく(1)光出力を高め、動作電流を低減する。(2)高速変調動作を向上させる。さらに、近接多重積層と低歪み効果の両方を狙った 近接低歪み積層構造を提案し、検証を行う。

図1(a)に示すのが既存の方法で作製された多重積層量子ドット構造である。量子ドットによる歪蓄積現象の影響を避けるために、各層の間にはバッファ層が設けられ、その層の厚みは約40nmに設計されている。これにより上下の量子ドットの間には歪が解放されて良質な結晶品質を保つことができる。しかしながら、上下の量子ドット間隔は、ボア半径に比べて大きいので量子力学結合効果を利用できない。

図1.(b)は、今回提案している近接低歪み積層構造である。従来の積層構造から上下の量子ドット間隔を短く設定する近接積層構造とすることで量子力学的結合を積極的に利用させる。これにより隣り合う量子ドットのお互いの波動関数が結合する。加えて、近接接合とバッファ層を交互に入れることにより量子ドットの歪蓄積効果を低減させている。この構造を採用することにより、量子力学的結合効果と低歪蓄積効果の両方を併せ持つ構造になると予想される。その結果、図1(a)の従来の構造に比べて発光再結合領域が大幅に増加する。領域が拡大するので発光効率が增加する。さらに発光に要する時間も短くなるので動作速度の向上の一石二鳥の効果が得られると予想した。

2. 試料および実験方法

図1は本研究で用いるサンプル資料の構造を図で表したものである。図1は従来構造である近接接合構造である。図1(b)は今回提案する2重近接低歪み接合構造である。すべてドット高さ5nm、ドット間を15[nm]とし、近接積層ではバリア間を3.5,7,15 [nm]で配置した10層の積層構造、面内密度($3 \times 10^{10}[\text{cm}^{-2}]$),2層近接積層ではバリア間を40[nm], 近接させた2層を3,7,10 [nm]で配置した8層の

積層構造，面内密度($3 \times 10^{10}[\text{cm}^{-2}]$)の3種類を用意した．サンプルには AS_2 分子線及び組成傾斜歪み緩和層を用いている．

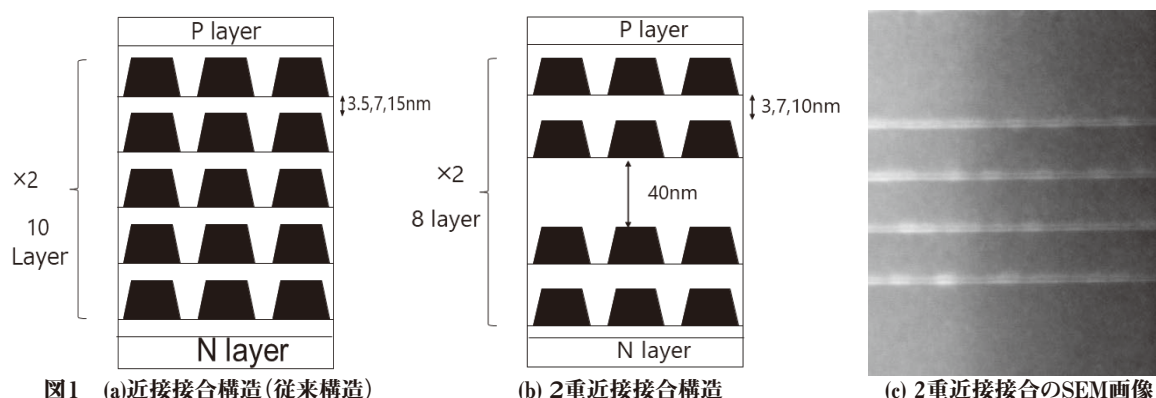


図1 (a)近接接合構造(従来構造)

(b) 2重近接接合構造

(c) 2重近接接合のSEM画像

VSL(Variable stripe Length)法

本研究ではVSL法という測定方法を用いて光強度の測定を行った．VSL法とはシリンドリカルレンズを通して平行光とした励起光をサンプル表面に照射することで，サンプル端面から自然放出増幅光(ASE)が出射される．可変調スリットにより励起光を任意に変化させ，波長に対応した光強度の測定を行う実験方法である．[8]

VSL法の測定方法には2種類あり，光励起型と電流注入型がある．本研究では光励起型を用いて測定を行った．光励起型の利点としては，電極構造をサンプルに組み込むことなく測定できるということである．しかし，欠点としては，評価サンプルの構造と実際に半導体レーザとして用いた場合のサンプル構造が異なるため，実際の素子構造を直接反映した正確なデバイスパラメータ見積もりができない点である．しかしながら，傾向を観測するには適している．

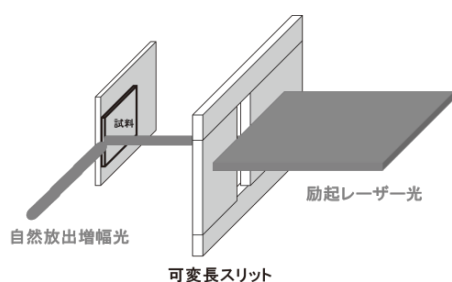
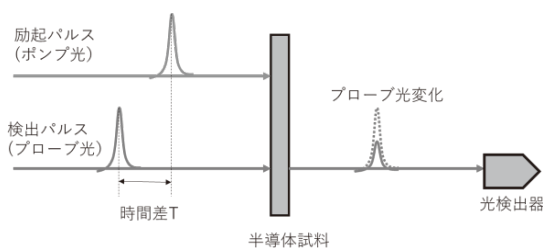


図2 (a) 光励起型VSL法の実験原理図



(b) ポンプ・プローブ法の概略図

図2(a)は光励起型VSL法の実験原理図である．このとき出射面から放出される自然光のことをASE(Amplified Spontaneous Emission:自然放射増幅光)と呼ぶ．ASEとはレーザ光によって励起を行った媒質からの自然放出光が誘導放出過程によって増幅された光のことである．

光強度測定結果から光増幅率を式(1)で求める．

$$I \propto \frac{A}{g} \{ \exp(gl) - 1 \} \quad (1)$$

ここで、I: 光強度ピーク値、A: 比例定数、g: 光増幅率、l: スリット幅 である．

キャリアの寿命計測(ポンプ・プローブ法)

図2(b)にポンプ・プローブ法の測定原理の模式図を示す。

ポンプ・プローブ法は、1つの光源から射出されたフェムト秒のパルス幅のパルス光のビームが2本のビームに分離される。分離された一方のパルス光は、ポンプ光として試料に照射され、それにより半導体試料の光反応を誘起する。他方のパルス光は、光学的遅延ステージにより時間を遅らせて、プローブ光として試料を通過する。それによりポンプ光とプローブ光とに、任意の時間差が作られ、かつこの時間差を変化させることにより、時間分解過渡吸収データが得られる。ポンプ・プローブ法では、プローブ光にパルス光が用いられるので、ポンプ光パルス照射後に試料が高速に変化していても繰り返し検出が可能なので、パルス幅に相当する時間幅の情報のみが切り出され、検出器に捉えられるため、検出器や記録装置が低速であっても、得られた情報はパルス幅を反映したものとなる。時間分解能もフェムト秒となる。[9,10]

3. 実験結果

3.1 結晶構造

ドット間距離によるエネルギーバンドのシミュレーション

ドット間距離に対する電子・正孔の結合状態についてシミュレーションを行い中間バンドの見積もりを行った。有効質量近似を用いたシュレディンガー方程式(12)を用いて電子・ホール結合準位・反結合準位を求めた。

$$\frac{\hbar^2}{8\pi^2} (\nabla(\frac{1}{m_e(r)} \nabla\psi(r)) + V(r)\psi(r)) = E\psi(r) \quad (2)$$

m_e は電子の有効質量である。量子ドットの形状は、TEM観察より得られた代表的な大きさを基に計算を行った。形状はピラミッド形状とし、量子ドットサイズは量子ドット間隔15nmで幅20nm, 高さ5nm, 量子ドット間隔が7nmと3.5nmでは幅20nm, 高さ3.5nmである。積層数は8層として適用し3次元形状にて有限要素(FEM)解析法を用いて解析した。解析にはCOMSOL Multi Physics を利用した。計算機リソースの関係上ひずみの効果およびドットの肥大化現象については考慮に入れていない。ドット間隔1~20 nmに対する電子・正孔の基底準位のエネルギーバンドをシミュレーションした結果をFig.3.に示す。Fig.3.より、電子・正孔の結合、反結合準位のエネルギー差が中間バンドの幅に相当する。これよりドット間隔(d)が10 nm以下では電子の準位が分裂し、d=4 nm以下では、電子・正孔ともに分裂することが予想される。図3は、2重近接接合における結合準位分布と反結合準位分布のシミュレーション結果を示したものである。

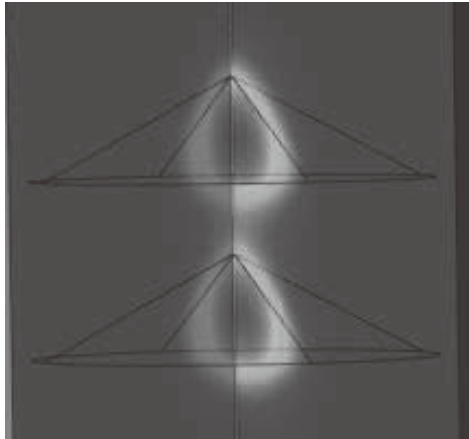
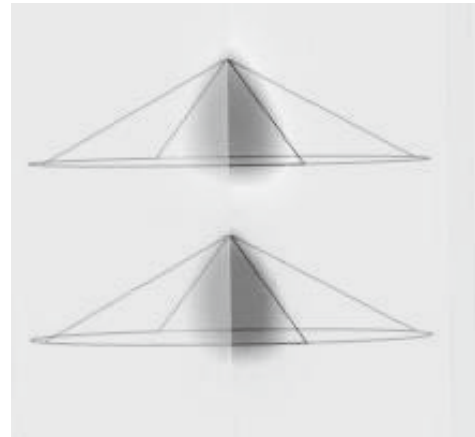


図3 (a) 結合準位分布シミュレーション



(b) 反結合準位分布シミュレーション

3.2 VSL法による光増幅率の測定

図4(a)に、VSL法で観測した自然発光の発光スペクトルの一例を示す。スリットの幅を広げるにつれて、発光スペクトルの強度が大きく変化していることが分かる。

我々は、各スリット幅における発光スペクトルのピーク値(点線の部分)を発光強度値として取り出した。図4(b)は、スリット幅に対する発光強度を示したものである。●点は実験結果から得られた値である。式(1)を利用してフィッティングした理論値から、光増幅率を算出することができる。

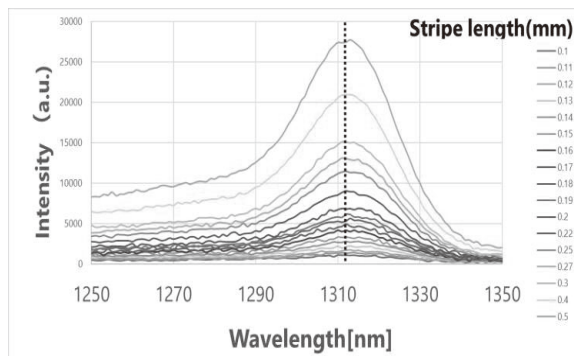
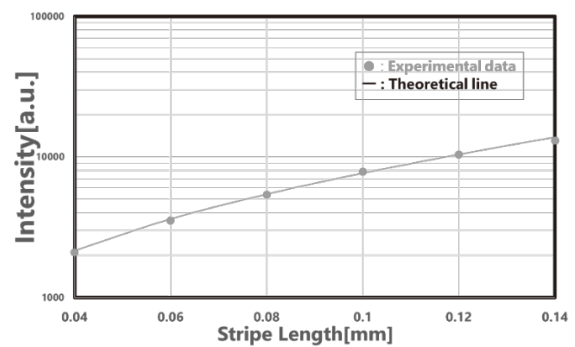


図4 (a) 自然光スペクトラム



(b) 発光強度依存性

図5.1は励起用レーザ出力を $66[mW/mm^2]$ と一定の条件における近接積層と2層近接積層のバリア層厚を変化させた時の光学利得を比較したものである。近接積層と2層近接積層を比較すると光学利得は2層近接積層の方が大きいことがわかる。上記のようになった要因として、内部損失の増加、結晶欠陥、構造的問題の3点があげられる。

(1)式の光学利得: G は

$$G = \Gamma g - \alpha_{in} \quad (3)$$

で表すことができる。ここで Γ は光学閉じ込め係数、 g は内部利得に関する係数、 α_{in} は損失に関する係数である。

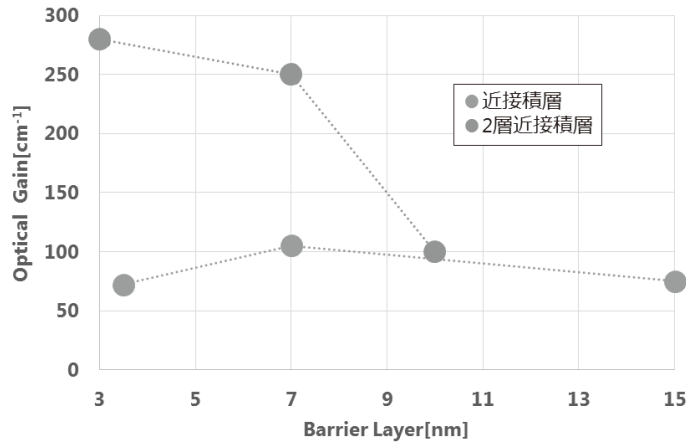


図5 光学利得特性

まず、近接接合構造に着目する。この構造の光利得は、バリア層が薄くなっても光利得は低調に推移する。これは上記の損失が大きくなるためと考えられる。結晶成長の観点からバリア層を薄くすると量子ドットの歪が蓄積されやすい。この歪の蓄積は結晶欠陥などの結晶品質の低下を招き、光利得を低減する要因となる。

次に、2層近接構造に着目する。この構造では、バリア層を薄くするほど光利得の増大が観測された。これは式(3)内部利得 g の係数が増大したと考えられる。この g には量子力学的結合効果による光反応場の増大が含まれている。加えて量子ドットの歪蓄積効果の低減も含まれているので損失の項が減少していると考えられる。

3.3 ポンプ・プローブ法による発光寿命の測定

発光寿命を測定することは、高変調レーザを開発する上で非常に重要なパラメータである。発光寿命が短いほど高い周波数変調に応答できる。本研究で用いている半導体材料は3-5族半導体であり、元来発光寿命が短い材料である。一般に発光寿命はナノ秒からピコ秒のオーダーであり、これらを正確に観測する装置の分解能としてはフェムト秒の精度が必要である。我々は、この発光寿命を計測するためにフェムト秒レーザを用いたポンプ・プローブ観測装置を構築した。

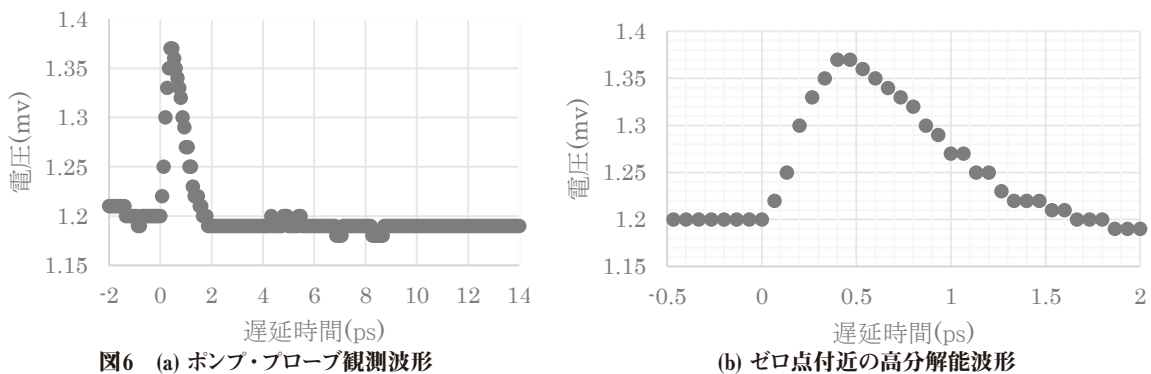


図6 (a) ポンプ・プローブ観測波形

(b) ゼロ点付近の高分解能波形

図6(a)(b)に取得できた波形を示す。縦軸は透過したプローブ光の光強度、横軸はポンプ光とプローブ光の遅延時間である。今回測定に用いた試料はGaAs、レーザ波形は800nm、測定温度は296Kである。プローブ光の光強度は透過量が急激に増加する手前の値をとる。また、ポンプ光は

物質を飽和させやすくするためにプローブ光よりも強い光強度とする。今回は透過光1.2mV, プローブ光25mV, ポンプ光55mVで測定を行った。図6(a)から遅延時間原点付近に変化が見られた。図6(b)は原点付近の高分解能測定を示す。

この減衰の傾きより、おおよそ2psの緩和時間と見積もられた。この結果より我々が構築したポンプ・プローブ観測装置は正常に作動していることが明らかとなった。今後はこの装置を用いて各サンプルの発光寿命を観測する予定である。

4. まとめ

本研究では量子ドットレーザの性能向上の方法について、結晶成長技術に主眼を置かずレーザ構造に着目した。さらに、近接多重積層と低歪み効果の両方を狙った近接低歪み積層構造を提案し、検証を行う。

理論計算から、上下の量子ドット間隔は10nm以下に設定することが重要であることが判明した。量子ドットか近接低歪み積層構造においては、近接接合は10nm以下、バッファ層は40nmが適当であることが分かった。

光利得係数の計測としてVSL測定を用いた。近接低歪み構造と従来構造の光学利得を測定した結果が近接低歪み構造の方が狭いほど光学利得が向上することが分かった。これは理論計算で予期した結果と一致した。この構造は量子力学的結合効果と低歪蓄積効果の両方を併せ持つ構造であることが予想される。

この結果を踏まえ、発行寿命測定を試みるべく超高速時間分解能を持つポンプ・プローブ測定装置の構築を行った。この装置の時間分解能はGaAs基板を用いた寿命測定では数ピコ秒の再結合時間が観測され、十分な性能を持つことが分かった。この装置を利用することにより近接低歪み積層の詳細な発光キャリアダイナミクスについて調べることができるようになった。これらの結果より高速変調動作の実験的評価を行う予定である。

参考文献

- [1] Y.Arakawa and H. Sakaki: Appl.Phys.Lett.40,939 (1982).
- [2] M. Asada, Y. Miyamoto, and Y. Suematsu: IEEE J. Quantum Electron. 22, 1915 (1986).
- [3] 荒川 泰彦, 塚本 史郎 応用物理 2005年 74 巻 3号 p.p 293-306
- [4] QD Laser www.qdlaser.com
- [5] 樽茶 清悟 応用物理 2018年 87 巻 2 号 p.p88-99
- [6] T. Amano, S. Yamauchi, T. Sugaya, and K. Komori; Appl. Phys. Lett. 88, 261110 (2006)
- [7] K. Akahane, N. Yamamoto, and T. Kawanishi: Physica Status Solidi A 208, 425 (2011).
- [8] K.L.Shaklee et al.;J. Luminescence 7 284-309 (1973)
- [9] C.Ling et al, Appl.Phys.Lett.76,3567 (2000).
- [10] 岩井伸一郎著, 超高速分光と光誘起相転移 朝倉書店