

極微小半導体レーザの開発
Semiconductor micro-laser diodes
 研究代表者 東京大学 生産技術研究所 講師 染谷 隆夫
 Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Takao Someya

The main objective of this proposal is to establish the fabrication procedure of novel nano-semiconductor lasers, in which electrons and photons interact strongly. The new epitaxial growth techniques with molecular beam epitaxy and metal organic chemical vapor deposition have been developed, which enable us to demonstrate the following three achievements: (1) The 5-nm-scale T-shaped quantum wires were investigated by magneto-photoluminescence and the effect of lateral confinement on wave-functions of one-dimensional excitons has been evaluated quantitatively. (2) The self-formation method of InGaN quantum dot was developed and the lasing emission from InGaN quantum dot laser was observed at room temperature. (3) The room temperature oscillation from blue vertical cavity surface emitting lasers has been demonstrated for the first time.

1. 研究目的

本研究では、新しい結晶成長法を活用して、ナノ構造に閉じ込められた電子が光と有効に相互作用する新しい微細構造を開発し、ナノ半導体レーザへの道を拓くことを目的として研究を進めてきた。その結果、次のような成果をあげることができた。(1) 5nm 寸法の T 型量子細線(T-QWR)の磁気フォトルミネセンスを測定し、1 次元電子の波動関数の広がりに対する横方向閉じ込め効果を明らかにした。(2) InGaN 量子ドット構造を活性層に有する青色レーザを開発し、室温においてレーザ発振の観測に成功した。(3) 青色 InGaN 量子井戸面発光レーザを試作し、光励起の条件下で室温レーザ発振動作を確認した。

2. 研究経過

(1) T 型量子細線の磁気フォトルミネセンス

均一なナノメートル寸法の量子細線を高密度に作製する技術は、低閾値の量子細線レーザを実現するためにも、1 次元電子の物性を調べるためにも重要である。我々は、これまでに高品質なナノメートル寸法の量子細線の作製法として有望視されるへき開再成長法を最適化し、5nm 寸法の T 型量子細線(T-QWR)を作製してきた。本研究では、T-QWR の磁気フォトルミネセンスを測

定し、T-QWR に閉じ込められた電子の波動関数の形状を解析することによって、1 次元電子の波動関数の広がりに対する横方向閉じ込め効果を明らかにすることを目的とした研究を進めてきた。

5nm 寸法の T-QWR に3方向に磁場(～12.5T)を印可して、4.2K で T-QWR の磁気フォトルミネセンスを測定した。ここで、T-QWR は2つの量子井戸(QW1 と QW2)の T 型の交点にできるが、QW1 の厚み a は一定(5.4nm)で、QW2 の厚み b を変化させた。

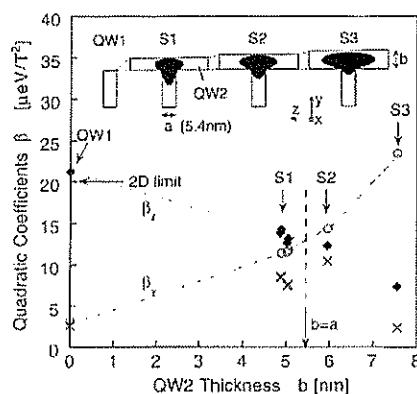


図1 β の値を QW2 の厚み b の関数として示した。ここで、 β_i は i 方向へ磁場を印可したときの β の値である。

量子細線のフォトルミネセンス・スペクトルにおけるピークエネルギーは、磁場の強さを増加させると高エネルギー側にシフトした。このエネルギーシフト量 ΔE を、通常の弱磁場近似における2次の摂動論($\Delta E = \beta E^2$)に基づいて解析した。ここで、 β はゼーマンの2次の摂動項を無視すると、 $\langle e^2(x^2+y^2)/8\mu \rangle$ となり、磁場方向に垂直な面における励起子の波動関数の実効面積を表している。図に、 β の値を厚み b の関数としてプロットした。厚み b を増加させると、 β_1 は増加し、 β_2 は減少している。この変化は、1次元電子の波動関数の広がりに対する横方向閉じ込め効果を表しており、T-QWRに閉じ込められた電子の波動関数の形状を評価することができた。

(2) 青色 InGaN 量子ドットレーザ

InGaN 量子ドットを活性層に有するレーザは現状の InGaN 量子井戸レーザよりもさらに特性が向上することが期待されている。

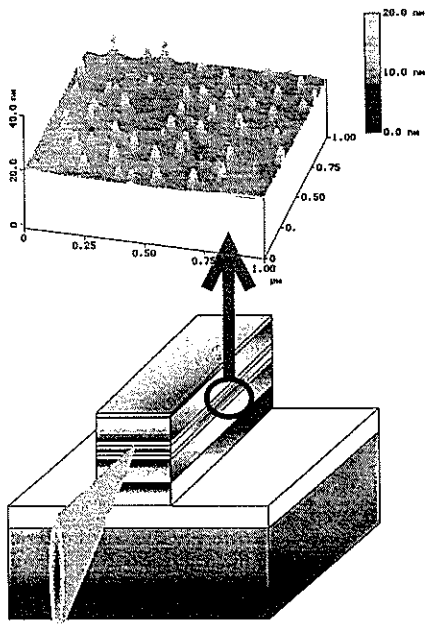


図2 InGaN 量子ドットの AFM 像と InGaN 量子ドットを活性層に含む青色レーザの構造模式図。

本研究では、InGaN の自己組織化現象を利用した独自の InGaN 量子ドットの作成法を開発し、青色レーザに応用した。その結果、InGaN 量子ドットを活性層に有するレーザ構造を試作し、光励起によってレーザ発振を初めて実現した。活性層として $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子ドットと $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ バリア層 5nm の周期構造を 10 周期成長した。ここで量子ドットの直径・高さの平均は 19.5nm、4.5nm であり、1 層あたりのドット密度は $6 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ である。端面ミラーを含むリッジ型共振器は RIE によって作製した。図は発振後の室温におけるスペクトルである。スペクトル線幅が分解能限界である 0.1nm 以下まで細くなった。また入出力特性を調べた結果、明確なきい値が観測された。

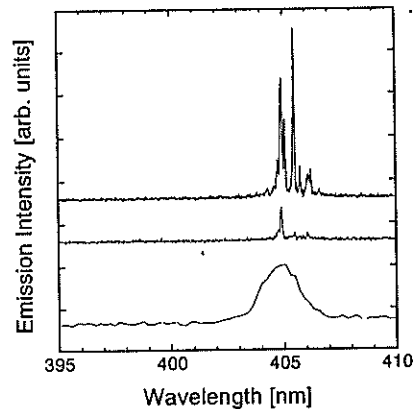


図3 青色 InGaN 量子ドットレーザの発振前後のスペクトル。

(3) 青色 InGaN 量子井戸面発光レーザ

窒化ガリウム (GaN) を用いた青色の半導体レーザが国内外で開発され、デジタル・ビデオ・ディスク (DVD) などの高密度光記録用の光源として利用されつつある。この高密度光記録の読み出し速度を高速にするためには、平面状に多数の青色レーザを配する方法が有効であるため、青色面発光レーザへの期待が高まっている。InGaN を活性層に用いた青色面発光レーザは東工大の研究グループによって提案・

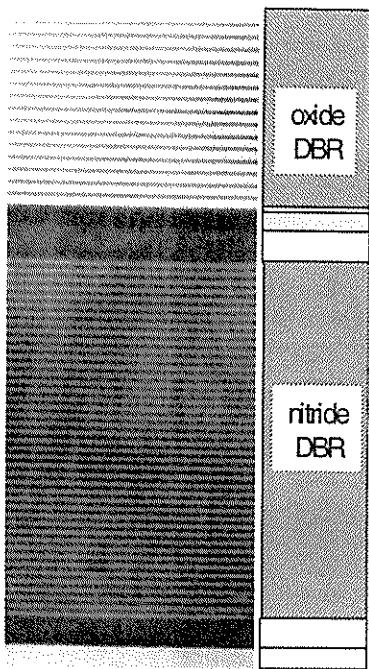


図4 InGaN 面発光レーザーの断面 TEM 写真と構造模式図。

理論的検討がなされて以来、国内外の多数の研究機関によって作製が試みられてきた。しかし、水平の通常構造の青色レーザーは実用化まで秒読み段階にあるにもかかわらず、青色面発光レーザーはこれまでに全く成功例がない。この主な理由は、青色波長帯における半導体ミラーの作製が非常に困難で、90%程度の反射率しか得られなかったことにある。

筆者はこれまでに、有機金属気層成長(MOCVD)法に改良を加え、反射率 97%の半導体ミラーを作製するなど、青色面発光レーザーの主要な作製技術を確認してきた。本研究では、InGaN を活性層とした面発光型レーザーを試作した。その結果、光励起発振の段階ではあるが、室温レーザー発振を確認した。

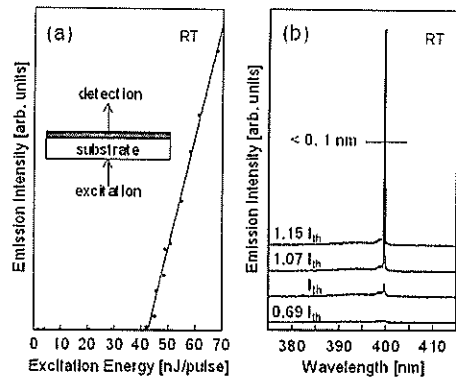


図5 青色面発光レーザーの入出力特性と発振前後の発光スペクトル。

3. 研究成果

本研究によって、新しい結晶成長技術を利用すると、ナノメートル寸法の構造が制御性よく作製でき、ナノ構造に閉じ込められた電子が設計したとおりに作成されていることがわかった。このようによく制御されたナノ構造をレーザーの発光層に用いると、室温でも発振させることができ、良好な特性を示すことが明らかにされた。特に、世界に先駆けて InGaN 量子ドット青色レーザーや青色 InGaN 量子井戸面発光レーザーの室温レーザー発振動作を確認するなど、応用上も極めて重要な成果をあげることができた。

4. 今後の課題と展開

本研究で開発されたナノ半導体レーザーは、まだ、光励起発振の段階である。そこで、今後は、ナノ半導体レーザーを素子化するための要素技術を確認することによって、新型ナノレーザーの実用化を目指す。このためには、窒化物半導体の電気伝導特性の制御、特に、p 型窒化ガリウムや p 型窒化アルミニウムガリウムの伝導制御などが重要となる。継続した努力によって、本研究による成果を実用化レベルのデバイスまで発展させていきたい。

本研究に関連する発表論文

- 1) 橋 浩一、染谷隆夫、荒川泰彦、"GaN 上への InGaN 量子ドットの自然形成"、電子情報通信学会論文誌 C-I Vol. J81-C-I、p. 474 (1998).
- 2) T. Someya and Y. Arakawa, "Highly reflective GaN/AlGa_N quarter-wave reflector grown by MOVPE", Technical Digests of 15th Semiconductor Laser International Symposium, p. 13 (1998).
- 3) T. Someya, Y. Arakawa, J. Lee, and T. Kamiya, "MOCVD growth of InGa_N quantum wells on GaN/AlGa_N quarter-wave reflectors", Proceedings of the 2nd International Symposium on Blue Lasers and Light emitting Diodes, Chiba, Japan, pp.460-463, (1998).
- 4) T. Someya and Y. Arakawa, "Highly reflective GaN/AlGa_N quarter-wave reflectors grown by metal organic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett. 73, pp.3653-3655 (1998).
- 5) T. Someya, K. Tachibana, Y. Arakawa, J. Lee, and T. Kamiya, "Lasing Emission from an In_{0.1}Ga_{0.9}N Vertical Cavity Surface Emitting Laser", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.37, pp.L1424-L1426 Part 2, No. 12A (1998).
- 6) H. Akiyama, T. Someya, M. Yoshita, T. Sasaki, and H. Sakaki, "Photoluminescence study of lateral confinement energy in T-shaped InGaAs quantum wires", Phys. Rev. B57, pp. 3765-3768 (1998).
- 7) T. Someya, H. Akiyama, and H. Sakaki, "Shape analysis of wave functions in T-shaped quantum wires by means of magneto-photoluminescence spectroscopy", Solid State Communications 108, pp. 923-927, (1998).
- 8) K. Tachibana, T. Someya, and Y. Arakawa, "Nanometer-scale InGa_N self-assembled quantum dots grown by metalorganic chemical vapor deposition", Applied Physics Letters, Volume 74, Issue 3, pp. 383-385 (January 18, 1999).
- 9) K. Tachibana, T. Someya, and Y. Arakawa, "MOCVD Growth of Nanometer-scale InGa_N Self-assembling Quantum Dots", IOP Conference Series Vol. 162, 735 (1999).
- 10) K. Tachibana, T. Someya, Y. Arakawa, R. Werner, and A. Forchel, "Room-temperature lasing oscillation in an InGa_N self-assembled quantum dot laser", Applied Physics Letters, (the 10/25/99 issue).
- 11) K. Tachibana, T. Someya, and Y. Arakawa, "MOCVD Growth and Optical Characterization of Stacked InGa_N Quantum Dots for Laser Applications", Physica Status Solidi (to be published).
- 12) K. Tachibana, T. Someya, R. Werner, A. Forchel, and Y. Arakawa, "MOCVD Growth of a Stacked InGa_N Quantum Dot Structure and its Lasing Oscillation at Room Temperature", Physica E (to be published).
- 13) K. Tachibana, T. Someya, and Y. Arakawa, "Growth and Optical Properties of InGa_N Self-Assembled Quantum Dots for Laser Applications", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (submitted).
- 14) T. Someya and Y. Arakawa, "Microphotoluminescence Intensity Images of InGa_N Single Quantum Wells", Japanese Journal of Applied Physics (to be published).
- 15) T. Someya, R. Werner, A. Forchel, M. Catalano, R. Cingolani, Y. Arakawa, "Room Temperature Lasing at Blue Wavelengths in Gallium Nitride Microcavities", Science (the issue of September 17, 1999).
- 16) J. C. Harris, S. Kako, T. Someya and Y. Arakawa, "Screening of the Polarization Field in InGa_N Single Quantum Wells", Physica Status Solidi (to be published).
- 17) T. Someya, Y. Arakawa, R. Werner, and A. Forchel, "Growth and structural characterization of InGa_N vertical cavity surface emitting lasers operating at room temperature", Physica Status Solidi (to be published).