

論文内容の要旨

論文題目 Study on Masstransported InAsP Quantum Wire for the Active Grating of the Distributed Feedback Laser Diodes
(分布帰還形レーザーダイオードの活性回折格子に向けたマストランスポート InAsP 量子細線に関する研究)

氏名 大塚節文

分布帰還形 (DFB) レーザーダイオードは、その動的単一モード動作のために、光通信用の光源として重要である。DFB 構造には 2 つの極がある[1]。すなわち、屈折率結合と利得結合である。利得結合 DFB レーザーが本質的に単一モードで動作するのに対し、屈折率結合 DFB レーザーは本質的に二重モードで動作する。したがって、屈折率結合 DFB レーザーダイオードに対し、利得結合 DFB レーザーは、本質的な単一モード動作の結果として、いくつかの利点を有する。例えば、利得結合 DFB レーザーは端面反射の影響を受けることがほとんどなく、外部雑音に対しても非常に安定である[2]。一方、量子細線や量子ドットヘテロ構造における電荷キャリアの 1 次元より高い量子閉じ込めは、半導体レーザーにおいて、擬 2 次元の量子井戸素子に比べ、静的および動的な性能の向上が予想させている[3]。量子細線構造は DFB 構造との集積化に適しているので、量子細線を活性回折格子とする利得結合 DFB レーザーが実現すれば、優れた性能を期待することができる。

ナノ構造は一般的に格子不整合な材料で構成されるので、量子細線あるいは量子ドットの内部だけでなく、外部にもひずみを生じる。ひずみ場はバンド構造を変化し、素子性能に影響をあたえる。ナノ構造におけるひずみの分布は、その微細なサイズのために透過型電子顕微鏡 (TEM) のような顕微鏡による測定を行わなければならないので、実験による方法で得ることが困難である。一方で、ひずみ分布は対象の良い場合でのみ解析的に計算できるので、一般には有限要素法のような数値計算法で計算されてきた[4-6]。

マストランスポートは InGaAsP/InP の V 溝基板上に寄生構造のない高品質な InAsP 量子細線列を形成するのに用いられた。本研究に先行する研究では、マストランスポート InAsP 量子細線を活性回折格子とするレーザーダイオードの室温レーザー発振がパルス電流過において実現されたが[7]、再現は確認されなかった。これは高品質な量子細線の形成と V 溝基板上への結晶成長の困難による。加えて、マストランスポート InAsP 量子細線の特性を説明する理論的な根拠も存在しなかった。

本研究では、V 溝基板上への結晶成長と高品質な量子細線の形成の方法を確立した。結果、室温で光励起発光する量子細線を常に得ることができるようになった。TEM 分析によれば、典型的な量子細線は、高さが 8-10nm、幅が 16-20nm、As 組成が 80%超で均一、かつ急峻な界面を有する。これらのサイズはキャリアの十分な 2 次元量子閉じ込めを得ることができるサイズである。フォトルミネッセンス (PL) 分光法では、0.4-0.5 という大きな偏光異方性を得た。これらはキャリアのよい横方向閉じ込めを示唆する。また、正の偏光異方性は量子細線の発光が電子と重い正孔の間の光学遷移であることを示す。さらに、光学特性のマストランスポートにおけるプロセ

スパラメーター依存性を見出した。例えば、PL のピーク波長はマストランスポート継続時間と線形の関係があり、放射スペクトルは障壁材料の InP に対する格子不整合や V 溝埋め込み材料の成長速度に敏感である。後で示す計算結果に基づいて、量子細線の光学特性の改善が試みられ、強く発光する量子細線を得ることができた。ちなみにいくつかのレーザーダイオードが試作されたが利得が足りないために発振には至らなかった。

上記のマストランスポート InAsP 量子細線の光学特性を理論計算なしで説明するのは困難である。マストランスポート InAsP 量子細線構造におけるひずみの分布は、等方性弾性近似の下で境界要素法で計算した。平面応力問題に対する計算結果は TEM 分析の結果とよく一致した。ここで、作製したままの量子細線は平面ひずみ問題で記述されるひずみ状態にあるが、TEM 観察用に薄片化したサンプルでは平面応力問題で記述されるひずみ状態にあることを注意しておく。ひずみ分布の計算結果に基づいてバンド端エネルギーと有効質量の分布の計算を行い、包絡線近似の下で直交周期関数展開法 [8, 9] により量子エネルギー準位と波動関数の計算を行った。InAsP/InGaAsP 界面は伝導帯不連続量が大きい、マストランスポート InAsP 量子細線構造では、細線内の InAsP の非常に大きな体積縮小の効果のために、伝導帯不連続量が非常に小さくなっていることや重い正孔バンドでは応力集中のためにポテンシャルが非常に深くなる領域が存在することが計算により示された。さらに、波動関数の計算により量子細線中には電子の量子準位は 1 つだけしか存在しないこと、重い正孔バンドでは応力集中による深いポテンシャルのために量子準位と波動関数は複雑になる場合があること、また、軽い正孔では材料の組み合わせによっては量子閉じ込め効果がないことが示された。このことは量子細線の発光が電子と正孔の間の遷移によるという実験結果をよく説明する。波動関数の計算から見積もられる 2 次元の量子閉じ込めの縦横比は 0.7-0.8 であり、PL スペクトルの偏光異方性から見積もられる値と非常によく一致する。

まとめとして、理論計算に基づく改良により、強く光るマストランスポート InAsP 量子細線が実現された。本研究における計算結果に基づいて、量子細線の特性改善を行っていけば、レーザー発振に至るであろう。

参考文献

- [1] H. Kogelnik and C. V. Shank, *J. Appl. Phys.* **43** (1972) 2327-2335.
- [2] Y. Nakano, Y. Luo and K. Tada, *Appl. Phys. Lett.* **55**, (1989) 1606-1608.
- [3] Y. Arakawa and H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **40**, (1982) 939-941.
- [4] K. Nishi, A. A. Yamaguchi, J. Ahopelto, A. Usui and H. Sakaki, *J. Appl. Phys.* **76**, (1994) 7437-7445.
- [5] M. Grundmann, O. Stier and D. Bimberg: *Phys. Rev. B* **50**, (1994) 14187-14192.
- [6] M. Grundmann, O. Stier and D. Bimberg: *Phys. Rev. B* **52**, (1995) 11969-11981.
- [7] T. Toda and Y. Nakano: *Conf. Proc. IPRM'99*, 17-20.
- [8] D. Gershoni et al, *Appl. Phys. Lett.* **53**, (1988) 995-997.
- [9] S. Gangopadhyay et al, *J. Appl. Phys.* **81**, (1997) 7885-7889.