

## 論文内容の要旨

### 顕微透過分光による量子細線の吸収及び利得の研究

(Absorption and gain in quantum wires studied by microscopic transmission spectroscopy)

氏名 高橋 和

はじめに

半導体量子細線は結合状態密度のバンド端での増大から優れた光学特性が期待され [1, 2]、多くの研究がされてきた。特に量子細線の励起子吸収には特異性が現れることが 1959 年の理論研究から知られていた [3]。これは 1 次元的な狭い領域に電子・正孔が閉じ込められる為、クーロン相互作用がバルク、量子井戸に比べて増大するからである。量子井戸における励起子吸収の光非線型効果は、多くのデバイスに应用されていることもあり、量子細線における励起子効果の増強は広く興味を持たれ研究されてきた [4, 5, 6]。しかし量子細線の光物性研究は、そのほとんど全てが発光測定により行われており、光吸収測定が行われていない。量子細線の吸収スペクトルを測定し、励起子吸収の絶対値を特定することは非常に重要である。

光吸収という光物性において重要なパラメータが量子細線で測られていないのは、波長程度の拡がりを持つ光に対して、対象があまりに小さすぎる量子細線では、光吸収の大きさを定量的に測定することが困難だからである。そこで私は量子細線レーザの光導波路を用いた顕微透過測定を行った。この方法なら細線と光が相互作用する距離を増やせるからである [7]。しかしこの測定には導波路の長さ程度に渡って均一な量子細線が必要となる。量子細線レーザは、1989 年の初めての発振以来 [8]、精力的に研究されてきたが [9]、そこまで高品質なものは作製できていなかった。本研究で用いた T-型量子細線

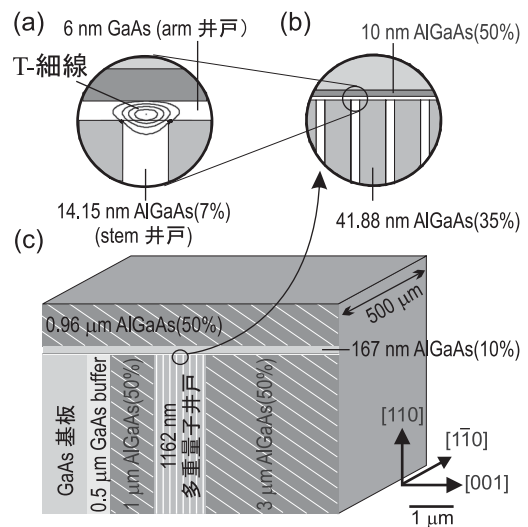


図 1: 共振器端面から見た 20 周期 T-細線レーザ構造。断面サイズ  $1162 \times 183 \text{ nm}^2$  の T-導波路に  $14 \times 6 \text{ nm}$  の T-細線が 20 本埋め込まれている。% は  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  の Al 含有量である。

(T-細線) は、これまでの量子細線に比べ飛躍的に優れた均一性を有することが確かめられており [10]、1 次元基底励起子、励起励起子、連続状態による吸収構造を発光励起 (PLE) スペクトルで明瞭に分離できている [11]。

図 1 は 20 周期 T-細線レーザの断面の層構造を示している。T-細線は従来の MBE 結晶成長にへき開再成長法と成長中断アニリング法という 2 つの特異な手法を加味して作製される [10, 12]。図 1(a) に示すように T-細

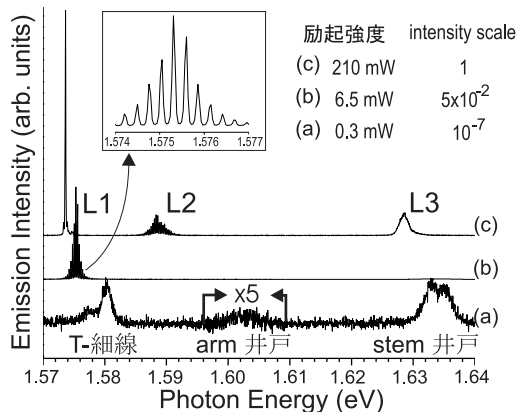


図 2: 5 K での発光・発振スペクトル。拡大図は T-細線からの発振の縦モードを表す。強励起 (c) では 3 つの発振が同時に起こっている。

線は 2 つの量子井戸、(001) stem 井戸と (110) arm 井戸が交差した部分に量子力学的に形成される。その断面サイズは  $14 \times 6 \text{ nm}^2$  と非常に小さい。等高線は T-細線中の電子の存在確率  $|\psi|^2 = 0.2 \sim 1.0$  を表している。導波光モードと T-細線の重なり割合、光閉じ込め率  $\Gamma$  を増やす為に 20 本の T-細線が周期的に形成され、光クラッド層  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  (図中白斜線) に囲まれた T-導波路の中心に埋め込まれている。レーザの導波路長は  $500 \mu\text{m}$  で反射面は裸のへき開面を用いている。

有限要素法による T-導波路の基底モード計算によると、その  $\Gamma$  は  $4.3 \times 10^{-3}$  と非常に小さい。これは量子細線の体積が小さい為で、デバイス応用において不利になる可能性も危惧される。量子細線の典型的な応用例である量子細線レーザ構造で得られる吸収の絶対値を特定することは、その利得の大きさを予想する上でも重要である。

顕微空間分解イメージ測定による発振起源の特定と近視野像の同定

T-細線レーザは光励起により、低温 5 K で T-細線中の基底状態から発振することが報告されていたが [9]、T-細線からの発振を空間イメージで直接観測したわけではなかった。また複合量子井戸構造の為に、複数の発振ピークが見られるが、それらの起源となる量子構造は不明であった [13]。以上の理由から、20T-細線レーザの発光・発振の顕微空間分解イメージを測定し、発光・発振の起源とその近視野像を調べた。これは T-導波路を用いた透過測定を行う上でも、導波路モードに関する情報が得られるので非常に重要である。

試料の励起には、cw-Titanium-Sapphire-laser (TiS レーザ) を用いた。作動距離 10 mm, N.A. : 0.4 の対物レンズとシリンドリカルレンズを用いて、ストライプ形に励起光を絞り、試料の [110] 方向から T-導波路部分を均一に励起した。励起レーザは T-細線, stem 井戸, arm

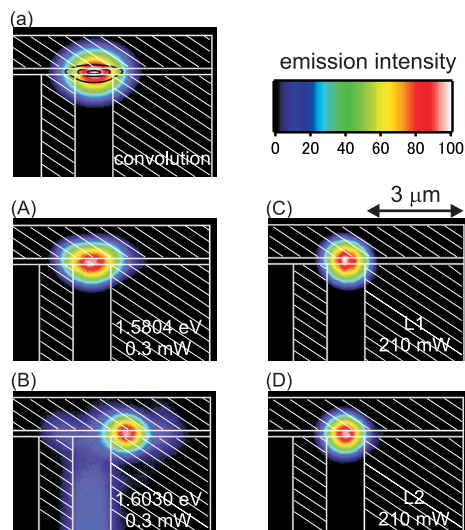


図 3: 各発光・発振ピークの空間イメージ。(A)T-細線、(B)arm 井戸、(C)L1、(D)L2。

井戸の 3 つの量子構造だけで吸収され、T-細線近くで励起されたキャリアは、エネルギーの最も低い T-細線に流れ込む。T-型導波路から  $[\bar{1}10]$  方向に放出される光を作動距離 10 mm, N.A. : 0.5 の対物レンズで集光してイメージ測定、スペクトル測定を行った。N.A. の大きなレンズを複数方向で使用する為にヘッド部分を改良したクライオスタットジャケットを用いている。

図 2 は温度 5 K、代表的な光励起強度 (a)0.3 mW, (b)6.5 mW, (c)210 mW での発光・発振スペクトルである。弱励起 (a) では図中に記したように 3 つの量子構造からの発光ピークが見られる。(b) では発振 L1 が低エネルギー側で起こっている。強励起 (c) では高エネルギー側でも発振が起こり、同時に 3 つの発振 L1, L2, L3 が確認されている。

図 3(A)~(D) にイメージ測定の結果を示す。各イメージの発光エネルギーと励起強度は、イメージに白字で書き込まれている。白斜線は図 1(c) の光クラッド層に対応している。イメージ (A) から弱励起での低エネルギーピークは T-型導波路からの発光であり、T-細線が起源と分かる。(B) から中間エネルギーピークはクラッド層上の arm 井戸が起源であるが、T-細線に挟まれた arm 井戸からは、キャリアが細線に流れ込む為に発光は見られない。イメージ (C) から発振 L1 が T-細線の基底状態が起源であることが初めて確認され、空間パターンが発振前のパターンから良好な円形パターンに変化することが明らかになった。(D) からは、発振 L2 が L1 と同位置から起こるので T-細線に挟まれた arm 井戸が起源であることが分かった。

イメージ (a) は、有限要素法による T-導波路の基底モードを示している。イメージ (A) は、非常に良く計算

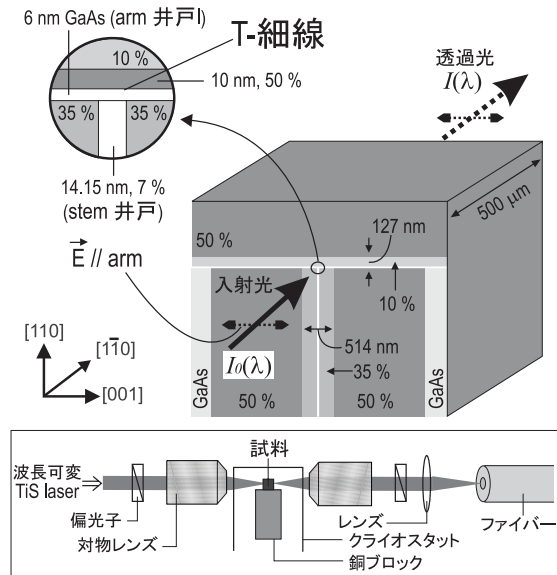


図 4: 単一 T-細線レーザを用いた顕微透過測定の様式図。500  $\mu\text{m}$  の T-細線 1 本の光吸収スペクトルを測ることが出来る。

のモードと一致しており、計算で求めた  $\Gamma$  に大きな誤差が無いことが分かる。

#### 顕微透過測定による単一量子細線の吸収スペクトル

図 4 は、単一 T-細線レーザを用いた顕微透過測定の様式図を示している。単一 T-細線レーザは、図 1 の 20 周期 T-細線レーザ構造とは T-導波路のサイズが  $514 \times 127 \text{ nm}^2$  に小さくなっている以外は全て同じ構造であるが、導波路内に量子細線 1 本しかない為に  $\Gamma$  が  $4.6 \times 10^{-4}$  と非常に小さい。透過光には波長可変 cw-Ti:S レーザを用いた。入射光を N.A.: 0.5 の対物レンズで T-導波路に直接結合し、逆側の端面から放出される透過光を検出した。導波路以外からの光をカットするために、直径 50  $\mu\text{m}$  の単芯光ファイバーを検出に用いている。入射光、透過光の偏光は arm 井戸に平行な arm 偏光と stem 井戸に平行な stem 偏光の 2 つを用いた。入射強度  $I_0(\lambda)$ 、透過強度  $I(\lambda)$  を波長を変えながら測定することで透過率スペクトル  $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$  が得られる。

図 5(a) は 5 K での arm 偏光に対する単一 T-細線レーザの透過率スペクトルである。吸収が弱い領域では、平坦なエタロン振動が明瞭に現れ、測定の安定性が伺える。このエタロン振動を解析することで、正確に吸収スペクトルを求めることが出来る。

図 5.(b) が透過率スペクトルから求めた単一 T-細線の吸収スペクトルである。吸収の形状が PLE スペクトルと同様な為 [11]、図中に記したように 3 つの構造を 1 次元基底状態励起子、励起状態励起子、連続状態による吸収構造と断定できる。1.6 eV からの吸収の増大は、図 2(a) から分かる通り arm 井戸の励起子吸収の裾によ

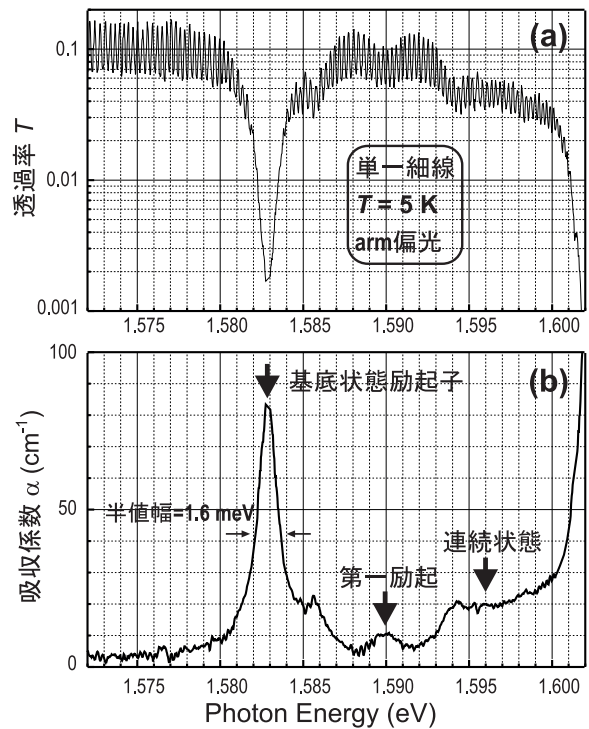


図 5: (a) 5 K における単一 T-細線の透過率スペクトル。(b) (a) から求めた単一 T-細線の吸収スペクトル。

るものである。つまり 1.6 eV より下に 1 次元の吸収構造が現れている。

基底励起子による吸収ピークの半値幅は 1.6 meV と小さい。arm 井戸に原子 1 層の変化があると、T-細線の量子化エネルギーは 2.5 meV とそれより大きく変化するので、導波路 500  $\mu\text{m}$  全体に渡って均一な T-細線が形成されている事が分かる。

この結果で最も大切な基底励起子吸収のピーク値は  $80 \text{ cm}^{-1}$ 、その積分強度は  $190 \text{ cm}^{-1}\text{meV}$  である。 $\alpha=80 \text{ cm}^{-1}$  という値は、 $L = 500 \mu\text{m}$  の導波路だと入射光の 98% ( $e^{-\alpha L}=0.018$ ) を吸収する大きさである。14 x 6 nm の量子細線 1 本 ( $\Gamma: 4.6 \times 10^{-4}$ ) だけでこれだけ大きな吸収が得られることが初めて明らかとなった。吸収係数  $\alpha$  を  $\Gamma$  で割った値は、単位体積当りの吸収係数として定義されるが、この値は  $17.4 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  となり、バルク GaAs の 15 倍程大きくなっている。また理論計算による励起子吸収積分強度は  $170 \text{ cm}^{-1}\text{meV}$  が報告されており良く一致していた [5]。強い励起子吸収の一方で、バンド端の連続状態に、1 次元結合状態密度に見られる吸収ピークは現れず、1 次元励起子吸収の特異性が理論で予測された通りに確認されている [4]。

#### 顕微透過測定による量子細線の室温励起子吸収

量子細線の吸収係数で応用上最も重要なのは、室温励起子吸収の絶対値である。その値は、量子細線デバイスを設計する時の基礎パラメータとなり得るからである。そこで  $\Gamma$  が単一細線レーザよりも 9.3 倍大きい図 1



の 20 T-細線レーザを用いて、室温で吸収スペクトルを測定した。測定は arm 偏光の他に、stem 偏光も用いて、吸収の偏光異方性も同時に調べた。

図 6(a) が 297 K における 20 T-細線の吸収スペクトルである。arm 偏光における 1.4884 eV の吸収ピークは、量子細線中の基底励起子による吸収ピークである。高エネルギー側は、連続状態と arm 井戸の吸収が重なっている為に単調増加な吸収となっている。励起子吸収の絶対値は  $160 \text{ cm}^{-1}$  であり、 $500 \mu\text{m}$  の導波路で透過率  $3.4 \times 10^{-4}$  である。このことは、量子細線レーザの光閉じ込め率は、多重量子井戸レーザに比べ 1 桁以上小さいが、十分デバイス応用可能な光との相互作用が室温でも得られることを表している。また励起子吸収の半値幅は 7.2 meV と見積もられ、量子井戸と同等かそれ以下である。更に、吸収の偏光異方性が大きいことが stem 偏光の吸収スペクトルから分かる。励起子吸収ピークでは  $145 \text{ cm}^{-1}$  の差がある。この偏光異方性は、T-細線が [110] 方向に強く量子閉じ込めを受けていることに起因している。

図 6(b) は 5 K における 20T-細線の吸収スペクトルである。arm 偏光では、励起子吸収が強すぎてピーク値が測れていないが、形状は図 5(b) の単一 T-細線と同じである。連続状態の吸収の値は、単一 T-細線の 9.4 倍になっており、光閉じ込め率の比と良く一致している。これは量子細線の単位体積あたりの吸収の強さが 2 つの試料で同じであるという自明の物理を表している。stem 偏光には室温では見られなかった構造が見られ、基底励起子と連続状態で偏光異方性が大きいことが分かる。一方で励起状態では偏光異方性が見られない。これは前者とは吸収に寄与する正孔サブバンドが異なっていることを示唆している。5 K~297 K の間の温度でも吸収スペクトルも測定し、5 K の励起子吸収ピークが連続的に室温励起子ピークに変化していく様子を確認している

まとめ

高品質 T-型量子細線レーザの光物性を、吸収・利得の理解に重点を置いて研究した。T-細線レーザの発光・発振スペクトル、及び空間分解イメージ測定を 5 K でを行い、発光・発振の起源、その空間パターンを調べた。その結果、T-細線の基底状態からの発振を初めて確認し、隣接する量子井戸からの発振も特定した。次に顕微透過測定系を構築し、単一 T-細線レーザの透過スペクトルを 5 K で S/N 比良く測定した。エタロン振動を解析することで正確に吸収スペクトルを求めた。T-細線 1 本による励起子吸収のピーク値は  $80 \text{ cm}^{-1}$  であり、 $500 \mu\text{m}$  の導波路で 98 % の光が吸収される程強いことが分かった。最後に 20 周期 T-細線レーザの吸収スペクトルの温度依存性を室温まで測定した。初めて量子細線の室温励起子吸収を観測し、強い励起子吸収、狭い半値幅、強い偏光異方性といった応用上有利な事実を特定した。

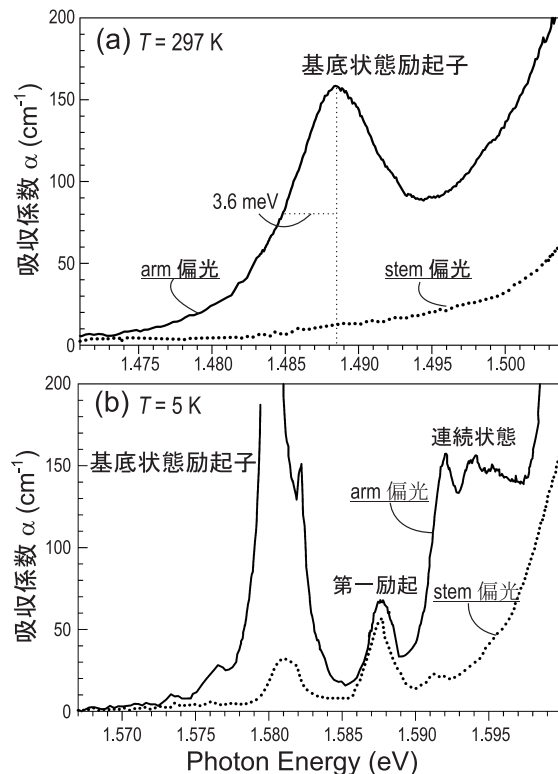


図 6: (a) 室温での 20T-細線の吸収スペクトル。実線は arm 偏光、点線は stem 偏光に対応している。(b) 5 K での 20T-細線の吸収スペクトル。

## 参考文献

- [1] Y. Arakawa and H. Sakaki, Appl. Phys. Lett. **40**, 939 (1982).
- [2] M. Asada *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. **24**, L95 (1985).
- [3] R. Loudon, Am. J. Phys. **27**, 649 (1959).
- [4] T. Ogawa and T. Takagahara, Phys. Rev. B **44**, 8138 (1991).
- [5] D. Wang and S. Das Sarma, Phys. Rev. B **64**, 195313 (2001).
- [6] H. Akiyama *et al.* Phys. Rev. B **53**, R16160 (1996).
- [7] J. Weiner, D. Chemla, D. Miller, H. Haus, A. Gosard, W. Wiegmann, and C. Burrus, Appl. Phys. Lett. **47**, 664 (1985).
- [8] E. Kapon, D. Hwang, and R. Bhat, Phys. Rev. Lett. **63**, 430 (1989).
- [9] W. Wegscheider *et al.* Phys. Rev. Lett. **71**, 4071 (1993).
- [10] M. Yoshita *et al.* Appl. Phys. Lett. **81**, 49 (2002).
- [11] H. Itoh *et al.* Appl. Phys. Lett. **83**, 2043 (2003).
- [12] L. Pfeiffer, K. West, H. Störmer, J. Eisenstein, K. Baldwin, D. Gershoni, and J. Spector, Appl. Phys. Lett. **56**, 1697 (1990).
- [13] J. Rubio *et al.* Solid State Commun. **120**, 423 (2001).