

# 量子細線レーザーの作製とデバイス特性の解明 Quantum wire lasers with novel device performances

秋山英文  
Hidefumi AKIYAMA

東京大学物性研究所  
Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo

**概要**：MBE とへき開再成長法による構造均一性の極めて高い半導体量子細線を用いて、量子細線レーザーを作製し、低発振閾値や高微分利得などの超高速・超省電力に直接結びつく高性能化の実証を行うことを目指している。これまで、光励起をもちいて詳細なレーザー発振特性の評価計測を行うとともに、試料の高品質化、電流注入レーザーの作製にむけて実験を進めてきた。特に、量子細線の擬1次元系に特徴的な物性・デバイス特性を解明するための物理計測を行い、量子細線レーザー発振の起源・特性および擬1次元系高密度電子・正孔状態での多体電子相関とそれが引き起こす光学過程の新効果・新現象を、実験と理論の両面から研究している。

**【背景】**本プロジェクトでは「高品質の量子細線レーザーを作製し、低次元半導体レーザーが本当に優れた性能を示すのか？その物理は如何なるものか？」を解明しようとしている。半導体ナノ構造の光物性研究は世界的なブームとなっていて、「半導体を低次元構造にしてゆくと状態密度が先鋭化し、レーザーなどのデバイス特性が向上する」という予想・期待がしばしば唱えられる。このナノ構造光物性研究の主要命題を、実験的に直接検証したいと考えている。

電子状態が3次元であるダブルヘテロ構造レーザーに比べて、電子状態が2次元である量子井戸レーザーが優れた性質を示すことは確かに事実である。産業的にも、半導体レーザーに高性能が要求される場合には量子井戸レーザーが用いられている。そこで、さらに電子状態が低次元化した、1次元量子細線レーザーや0次元量子ドットレーザーへの期待が高まるわけだが、実際

には、構造均一性の高い高品質の試料を作ることがとても難しく、構造ゆらぎのために電子状態は先鋭化するどころかむしろブロードになってしまい、低次元化のご利益を引き出し検証することは容易ではない。

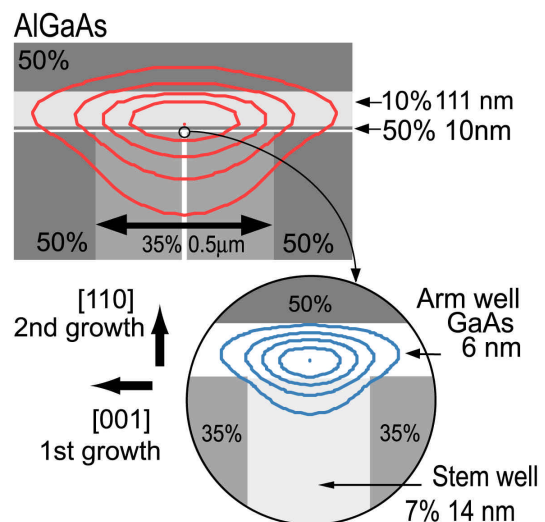


図1 単一T型量子細線レーザー構造

そこで、私たちは、品質の高い均一性の良いT型量子細線およびT型量子細線レーザー試料を作りだすことをまず最優先し、その上で量子細線レーザーの性質を調べ、理論と比較して物理を検討するという方針をたてた。

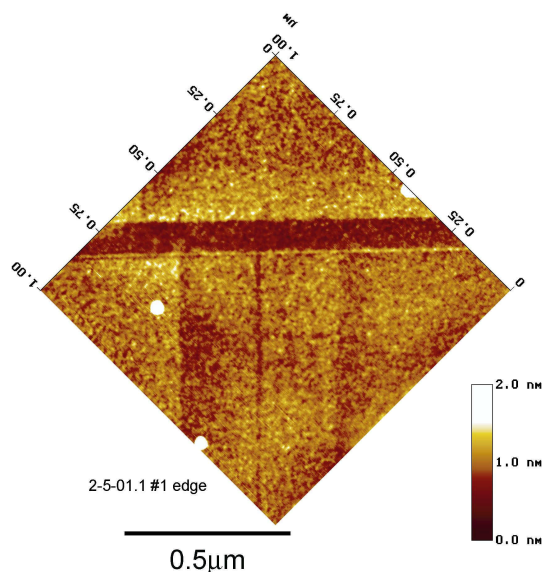


図2 単一T型細線レーザーの断面AFM像

**【研究方法】**T型量子細線とは、図1に示したように、直交してつながった二つの量子井戸アーム井戸とステム井戸（T字の腕：アームと幹：ステムに因んでこう呼ばれる）からなっている。T字交点のところで量子力学的な閉じ込めが弱くなり量子化エネルギーが下がるので、そこに1次元閉じ込めを受けた量子細線状態が形成される。実際、図1の青の等高線は、14nm厚の7% AlGaAs-ステム井戸と6nm厚のGaAs-アーム井戸からなるT型量子細線に形成される1次元電子の波動関数である。この構造を更にT型の屈折率分布を持つ光導波路構造と組み合わせて、図1の赤の等高線で示すような光モードと相互作用する様にしや

ることで、T型量子細線レーザーを形成する。図2は実際の試料の断面AFM像である。

T型GaAs量子細線レーザー試料の作製は、米国ルーセント・ベル研究所ファイバー博士のところで、MBEとへき開再成長法という方法を用いて進めている。へき開再成長法とは、MBE装置の成長ポジションでのへき開を介して行う2段階のMBE成長法のことである。まず、通常のMBE成長法により、ステム井戸をGaAs(001)基板上に成長温度約600で成長する。これを一度MBE装置から取りだし、へき開再成長の準備のための、切りだし、研磨、傷いれなどを行い、基板ホルダーに立てた状態でセットして、MBE装置に再び入れる。結晶成長条件を整えた後に、成長ポジションにおいて基板のへき開を行い、露出したへき開面に直ちにアーム井戸の成長をおこなう。

ここで問題なのは、GaAsではへき開面はつねに(110)面であり、(110)面上のMBE成長はとても難しく、約500程度の低い成長温度と高いAsフラックス圧が必要となることである。低いMBE成長温度はGaの表面拡散を不活発にするため、アーム井戸の表面は大きなラフネスを持ってしまい、このままでは細線が不均一なものになってしまう。我々は成長中断アニール法を開発してもちいることにより、この問題を解決して研究を進めた。

#### 【現在までの研究成果】

我々は、単一量子細線レーザー、3本、20本および100本の細線からなる量子細線レーザーを作製し、光励起により発振特性を調べてきた。図3は、20本の細線からな

る量子細線レーザーのしきい値よりも(a)下、(b)わずかに上、(c)十分に上の励起を行った際の出力光スペクトルである。図4に示すとおり、これらの各発光および発振ピークの近視野像を測定し、計算により得られた導波路モードとの比較を行い、量子細線の単一モード発振を確認した。

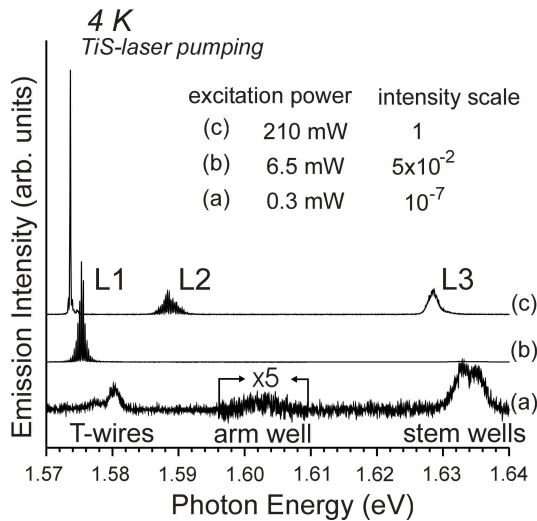


図3 T型細線レーザーのしきい値以下、近傍、上での出力光スペクトル

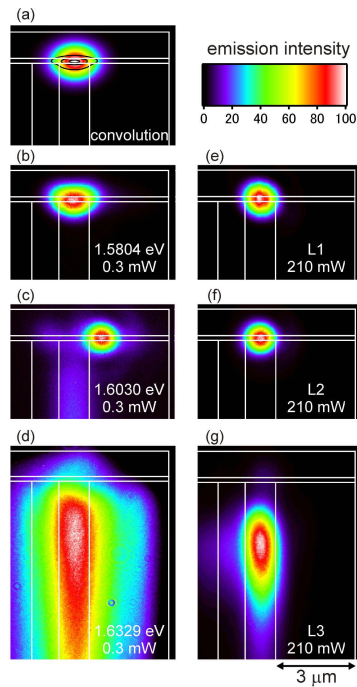


図4 T型細線レーザーの発光近視野像

レーザーの動作温度は、単一細線レーザーで最高 60K まで、20 本の細線レーザーで 120K までとなっている。動作温度の上限を決めている要因の一つは、細線以外のアーム井戸やステム井戸などの領域に分布するキャリアによる損失の増加であることが最近分かってきた。

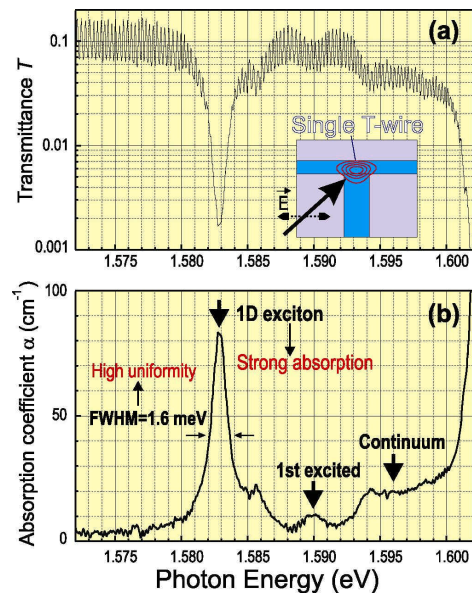


図5 単一量子細線の透過吸収スペクトル

量子細線の中の1次元電子状態は、PLEスペクトル測定および透過吸収スペクトル測定により明らかになった。図5は、上記の単一量子細線レーザーに外部から光を入射して測定した単一量子細線の低温での透過吸収スペクトルである。励起子吸収ピークでは入射光の98%を吸収するほどの強い吸収が観測されたほか、連続状態のスペクトル形状が1991年に小川らによって予言された1次元特有のゾンマーフェルト因子をよく反映したものであることが確かめられた。

レーザー発振の利得メカニズムは、この分野で10年以上の論争になっている課題

である。我々は、ハッキ・パオリ・キャシディの方法にしたがって、各キャリア濃度での吸収利得スペクトルを測定し、図6の実線で示す結果を得た。小川チームの理論計算との比較などにより、1次元系における位相空間フィリング効果や多体クーロン相互作用の効果などの分析・比較が行われ、物理機構が明らかになりつつある。

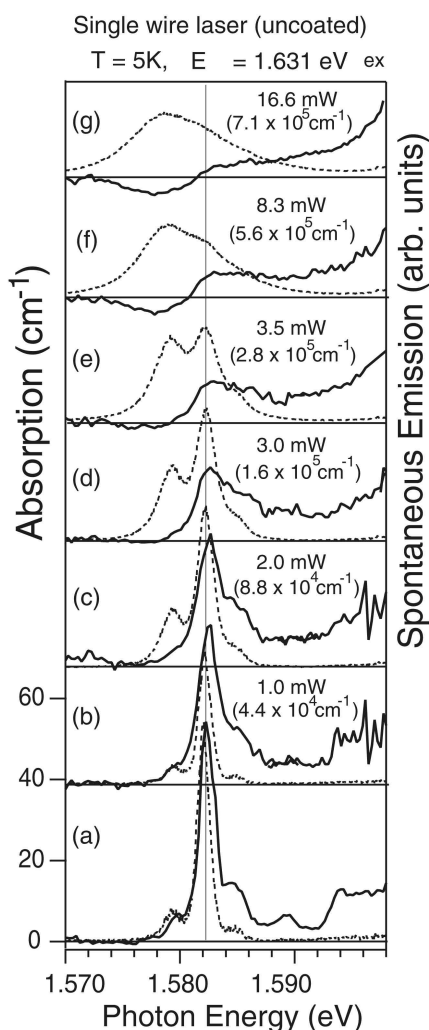


図6 量子細線の発光吸収利得スペクトル

ドーピングした1次元系の光学応答は、レーザーデバイスの特性理解のみならず、基礎科学の観点からもとても重要である。我々はn型にドーピングしてゲート電極を設けた

FET型の単一量子細線素子を作製し、発光と発光励起スペクトルを測定することに成功した。これも小川チームの理論と比較しながら研究が進めている。

さて、試料の高品質化は本研究の生命線である。成長中断アニールの開発と表面・界面モフォロジーや発光線幅の評価・改善には現在も特に力をいれており、試料作製とAFM、PL、PLスキャンおよびイメージ測定、さらに第一原理計算を用いたモデル化などにより精力的に研究を行った。

理論では、上記の実験結果を解釈する研究ばかりではなく、多数の電子と正孔が存在した場合にいかなる状態(相)が形成され、それがレーザーにどう影響してくるかという問題について、実験に先んじた研究も進めている。

#### 【今後の展開】

上記の研究を一層進めるとともに、量子細線レーザーの優れた性能を明確な数値で検証するための電流注入型量子細線レーザーの作製・評価を進める。試料の更なる高品質化や、動作温度の高温化、理論実験の協力にもさらに力を入れたい。

#### 【結言】

量子細線および量子細線レーザーの基礎物性評価と理論との比較により、1次元特有の性質が徐々に見えてきた。1次元系の新しい物理も目指し、研究を展開したい。

#### 参考文献

- 1) H. Akiyama, et al., Phys. Rev. B 67, 41302 (2003).
- 2) H. Akiyama, et al., Solid State Commun. 127, 63 (2003).
- 3) H. Akiyama, et al., J. Phys. Cond. Matt. 16, S3549 (2004).