

論文の内容の要旨

論文題目 「半導体量子井戸および量子細線構造の界面ラフネス制御と顕微分光計測」
(Interface roughness control and microscopic spectroscopy of semiconductor quantum wells and wires)

氏名 吉田正裕

結晶成長技術の進歩により様々な形状の半導体量子細線構造が実現されるようになってきた。しかし、その構造には依然として界面ラフネスによる大きな構造不均一が存在しており、電子状態の局在化や発光線幅のブロードニングが引き起こされ、1次元系特有の物理現象が消失してしまう。1次元系における新奇な物性を解明し、またその特性を電子デバイスに利用していくためには、構造不均一（界面ラフネス）を低減した高品質量子細線構造を実現する必要がある。

本論文では、分子線エピタキシー（MBE）法を用いてへき開再成長（CEO）法により作製するT型量子細線構造を対象とし、その高品質量子細線の実現を試みている。まず、評価・物性計測の主力となる高分解顕微分光画像計測手法の開発を行い、それを用いて量子細線構造中での構造不均一の原因となる界面ラフネスの様子を解明した。そこで得られた知見を結晶成長へフィードバックし、界面ラフネスを制御・低減化するための新しいCEO成長法（成長中断アニール法）の開発を行った。この新しい方法を用いて高品質かつ均一な量子井戸・量子細線構造を作製した。その光物性を顕微計測により調べたところ、量子細線には1次元特有の物性現象を観測することができ、また、量子細線レーザー構造からの光励起レーザー発振が得られた。本論文で開発・構築した顕微発光分光画像計測系は、半導体ナノ構造の構造評価、物性計測を高分解能、高精度で行う利便性の高いものである。特に、光の回折限界を超えた高空間分解能を有するソリッドイマージョン顕微蛍光計測系を開発し、半導体ナノ構造の物性計測への適用の道を開いた。

本論文は、前半部（第2、3章）の顕微計測技術に関する部分と、後半部（第4章から第7章）のCEO法における結晶成長表面の制御と高品質な量子井戸・量子細線構造作製に関する部分から構成されている。

顕微計測技術に関して、第2章では、本研究で構築した顕微分光画像計測系とその具体的な計測方法についてまとめている。顕微計測系は開口数 $NA=0.5$ の対物レンズを用いて

いるため、分解能は波長程度であるが、点励起と一様励起、スペクトル測定と画像測定を組み合わせた測定により、試料の均一性やキャリアの拡散・ドリフトなどの情報を効率よく得ることができる。実際に半導体ナノ構造の物性計測に適用し、種々の測定モードでの計測結果から顕微計測法の有効性について議論した。

第3章では、光の回折限界を超える高空間分解能顕微計測法としてソリッドイメージジョンレンズ(SIL)と呼ばれる固体レンズを用いた顕微分光計測法を開発した。

まず、SILを顕微計測系に用いる際に重要なSIL加工誤差・収差や集光効率について検討し、顕微分光計測に用いた場合約一桁も集光効率が向上することを発見・証明した。次に、SILを顕微分光計測と組み合わせて温度可変ソリッドイメージジョン顕微分光画像計測系を開発した。図1にワイエルストラス球型SILを用いたソリッドイメージジョン顕微分光画像計測系の空間分解能を金属マスクエッジ法で評価した結果を示す。SILと開口数NA=0.5対物レンズを用い、有効NA=1.0と光の回折限界かそれ以上の高い空間分解能を実現することができた。また、低温(5K)と室温とで分解能の変化がほとんどないことが示された。また、実際に半導体ナノ構造の高分解顕微分光画像計測に適用し、サブ μm 分解能でのキャリア分布、キャリアマイグレーションを観察することに成功し、SIL顕微計測法の有効性を実証した。

続いて、上記の高分解顕微分光画像計測を使用し、CEO法における界面ラフネスの解明、さらに成長表面の改善・制御と高品質なT型量子細線・量子井戸構造の作製を試みた。

T型量子細線構造の模式図を図2に示す。(001)基板上にMBE成長した量子井戸(stem well)のへき開(110)面上にCEO法により第2量子井戸(arm well)を成長すると、2つの量子井戸の交線にT型量子細線が形成されることになる。(001)面上のMBE成長は良く知られているが、(110)面上のMBE成長には不

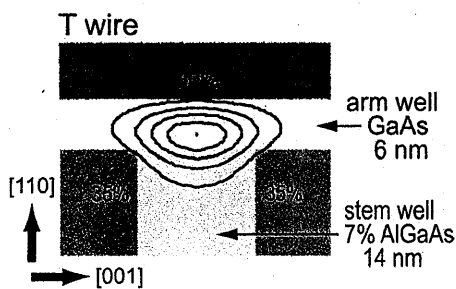


図2：T型量子細線構造の模式図

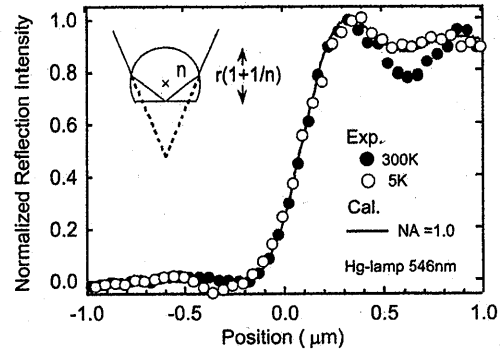


図1：SIL分解能評価

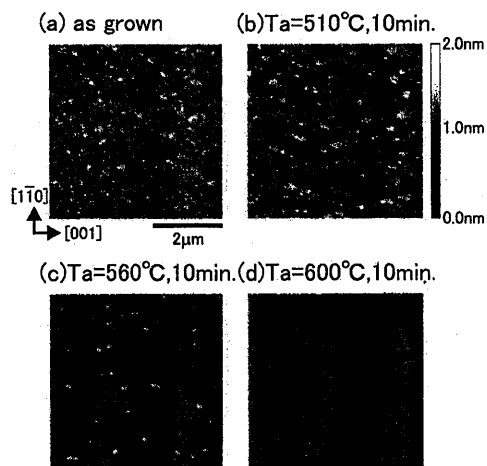


図3：CEO成長GaAs表面の成長中断アニール後AFM像

明な点が多く、T型量子細線における構造不均一もその(110)成長に起因するものと考えられる。第4章では、へき開面上にGaAs (110)量子井戸構造をMBE成長し、そこで形成される界面ラフネスとその電子状態を顕微分光画像計測法を用いて調べた。(110)量子井戸界面には平均3.5原子層もの大きな界面ラフネスが存在し、電子状態が局在化してしまうことを明らかにした。

第5章では、(110)CEO成長表面に形成されるこの大きな界面ラフネスを著しく減少させる新手法として、へき開面への

CEO成長後に、その成長表面で基板温度を上げて成長中断を行う成長中断アニール法を開発した。図3にCEO成長した5nm GaAs層表面で、基板温度を変化させて成長中断アニールを行ったときの表面AFM像を示す。成長表面(a)には最大5原子層もの表面ラフネス構造が存在しているが、アニール温度を上げるに従い、表面の平坦化がおり、600°C、10分間アニールでは数十 μm 以上にわたり原子平坦な表面を形成することができた。また、アニール表面のGaAs層厚(GaAs堆積量)依存性に、面方位に依存する特徴的な表面構造(図4中の構造A, B, C)が形成されることを発見した。その形状と(110)表面原子配列との比較から、アニール時表面平坦化メカニズムの考察を行い、ステップエッジでの表面原子の結合数の違いが表面平坦化の駆動力であるという結論を得た。

第6章では、前章で開発した成長中断アニール法が高品質半導体ナノ構造作製に適用可能かどうかを調べるため、CEO法による原子平坦界面を有する(110) GaAs量子井戸構造の作製を試みた。図5に成長中断アニール法を適用しCEO成長した量子井戸構造からの発光像を顕微発光画像計測法により測定した結果を示す。GaAs堆積量(量子井戸厚)を変化させると、図4のアニール表面での特徴的な表面形状と同じ発光像が観測された。これは、アニールで形成された原子平坦表面が量子井戸界面としてそのまま保持

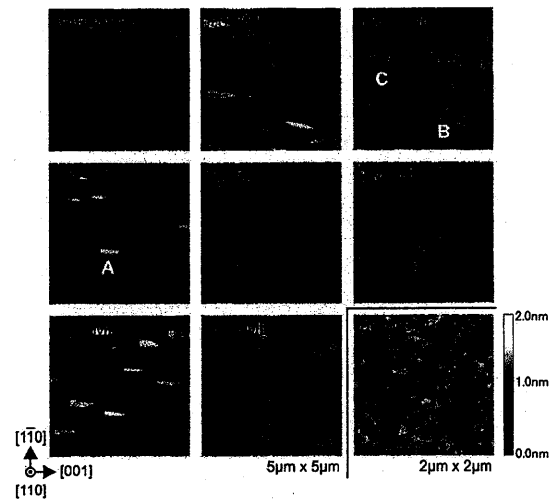


図4：成長中断アニール後表面のGaAs堆積量依存性(成長中断アニール600°C、10分間)

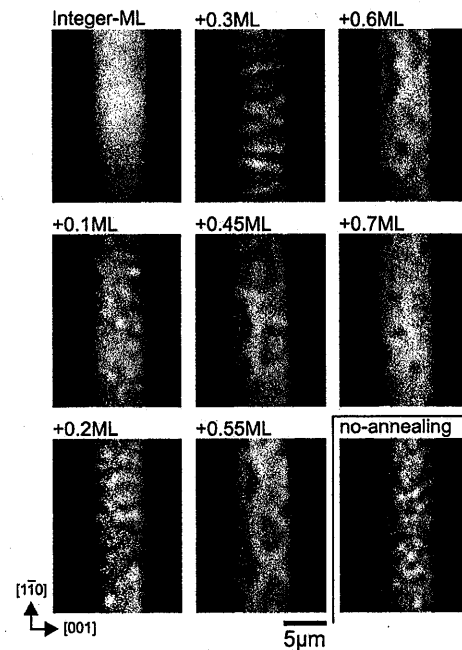


図5：成長中断アニールを行ったCEO成長GaAs量子井戸からの発光像のGaAs堆積量依存性

されることを示しており、特に、井戸厚が原子層の整数倍の位置では、両ヘテロ界面が原子平坦な量子井戸が形成されていることになる。図6にはこの原子平坦界面領域での発光スペクトルを示す。比較として成長中断アニールを行わない従来のCEO法で成長した量子井戸の発光スペクトルも示してある。成長中断アニールを行うことで発光効率が劣化することなく発光線幅が2 meVへと大きく減少しており、成長中断アニール法が界面ラフネスの低減に非常に有効であり、光学特性にも優れた高品質な量子井戸が形成されていることが確認された。

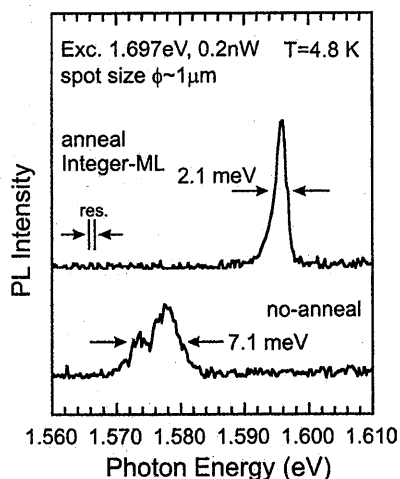


図6: CEO成長GaAs量子井戸の発光スペクトル

第7章では、(110)表面平坦化法を適用しCEO法によりT型量子細線構造(図7)を作製した。量子細線からの発光を空間分解顕微分光計測により調べたところ、細線(T-wire)の発光は主に自由励起子からのものであり、また、その空間分布が非常に均一であることから、高品質な量子細線が形成されていることが確認された。この量子細線の吸収スペクトルに1次元性を反映した励起子連続状態での抑圧効果が観測された。

この量子細線を活性層に用いた量子細線レーザー構造を作製し、光励起を行ったところ発振閾値が5 mWとこれまでに報告されているものに比べて非常に低閾値でのレーザー発振が観測された。また、発光スペクトルの励起強度依存性や発振スペクトルとの比較から量子細線レーザーにおけるレーザー発振起源について考察を行った。

第8章では、発光計測以外の計測手法として変調反射分光法を用い、半導体エピタキシャル構造の表面・基板界面に存在する内部電界分布の評価を行った。変調周波数依存性から表面と基板界面での内部電界を分離して評価することに成功した。また、この計測法を半導体ナノ構造の物性計測へ適用するための課題と今後の展開についても述べた。

最後に、第9章で本研究において得られた結果、知見をまとめた。

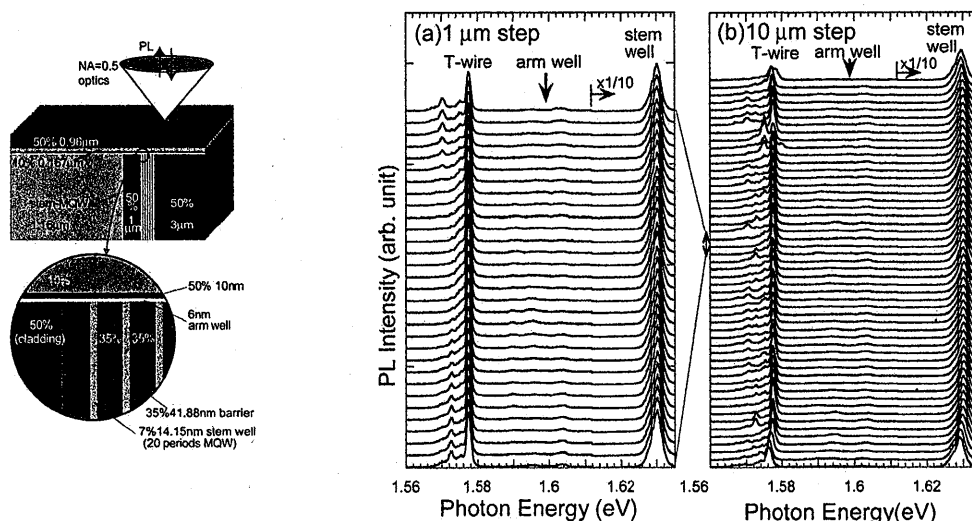


図7: T型量子細線試料構造と量子細線からの空間分解発光スペクトル