

「量子効果等の物理現象」
平成9年度採択研究代表者

小倉 睦郎

(産業技術総合研究所 光技術研究部門 主任研究官)

「原子層制御量子ナノ構造のコヒーレント量子効果」

1. 研究実施の概要

本プロジェクトの目的は、低次元量子ナノ構造の基礎物性の解明とその有効性の立証にある。流量変調法を用いたMOCVDや、原子状水素添加MBEにより、段差基板上に自己形成的に製作した高純度化合物系量子細線を起点として、低次元エキシトンの光物性、低次元電子伝導などの物性評価を行うとともに、量子細線レーザにおける基底レベル発振、量子細線FETの負性抵抗効果を初めて実現した。

2. 研究実施内容

2-1. 量子細線の高純度化、均一性の向上およびその評価

従来の量子細線は、細線に沿った原子層ステップやランダムな不純物によるポテンシャル分布のために、量子力学的にはほとんど等方的なドットの集合であった。本プロジェクトでは、GaAs基板上にストライプパターンを形成した後、再エッチングを施し、有機砒素(TBAs)を用いた流量変調法を適用することにより0.5 ~ 1 μm程度単一量子レベルとして一次元方向に拡張したエキシトン状態を初めて実現した。図1は、アルシンと有機砒素を用いた場合における、量子細線中のエキシトン発光寿命の温度依存性を示す。TBAsを用いた場合、発光寿命のピークが高温側に延びており、再結合寿命も長い。量子井戸においては、AsH₃を用いた場合もと大差はないことから、特に(111)A斜面における結晶性の向上が顕著であることが分かった。

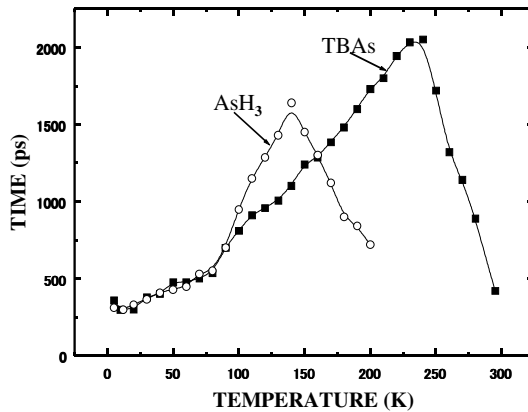


図1 アルシン (AsH₃) および有機砒素 (TBAs) を用いた場合のエキシトン発光寿命の温度依存性

2 - 2 . 高密度量子細線の形成と評価、光素子への応用

光機能デバイスにおいては、占有体積の小さい量子ナノ構造と光との相互作用をいかにして増強させるかが重要であるが、まず、均質な量子細線を高密度に集積することが前提となる。本項目では、干渉露光法を用いて、0.3~0.4μm程度のピッチを持つグレーティングをV溝基板上に形成し、そのグレーティング形状を保持したまま1μm以上のAlGaAsクラッド層を成長する形状保存成長に成功した。この手法は、一回の成長で波長安定化レーザを実現できるため、産業上のインパクトも大きい。また、利得結合型導波路の有限要素法によるシミュレーションを行い、単一周波数において発振閾値利得の最大値が得られることが判明した。図2は、3重量子細線を持つ利得結合型量子細線レーザの模式図およびSEM断面図を示す。

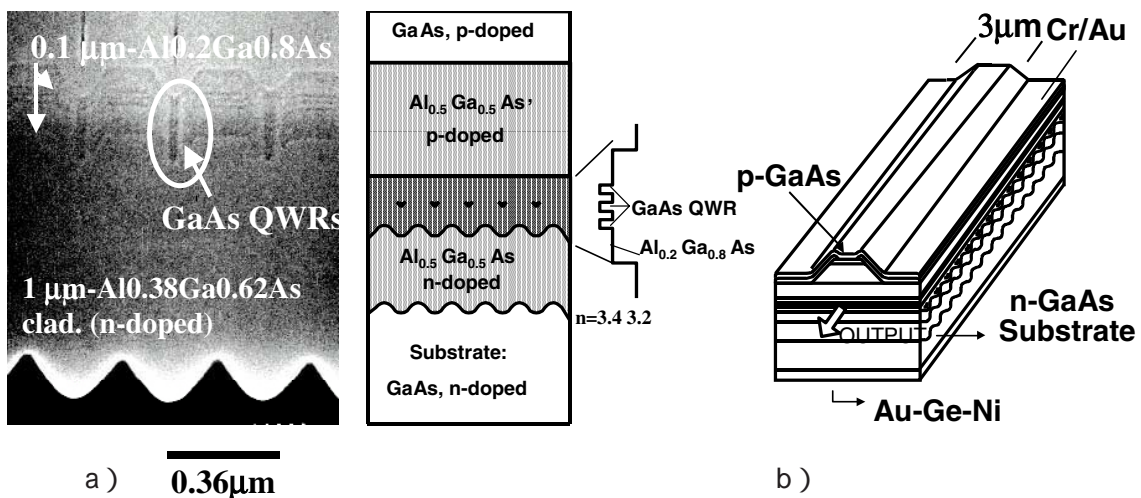


図2 利得結合型量子細線レーザのSEM断面図(a)および模式図(b)

2 - 3 . 量子細線FETの試作および評価

量子細線は、量子井戸構造よりも散乱確率が低く高移動度が期待できるという報告があるが、実際の量子細線は、界面の凹凸や不純物の影響を強く受け、細い細線ほど移動度が低下する傾向にあった。原子状水素源とクラックAs₂ソースを装備したMBE成長炉を用いて(100)InP基板上的リッジ型および(311)InP基板上的トレンチ型InGaAs/AlInAs系量子細線を形成した。原子状水素は、3族の表面吸着原子の拡散を増強するので細線のコア部分の成長に適しているのに対し、クラックAs₂ソースは、表面原子の拡散を抑制し、V溝の形成に適していることが判明した。図3にトレンチ型量子細線の透過電子顕微鏡による断面図を示す。図4に示すように、InGaAs/AlInAs系量子細線FETにおいて、ソースドレイン電圧0.1Vにおいて、実空間遷移による負性抵抗効果が得られた。このときのピークバレイ比は6である。この負性抵抗は、量子井戸よりも量子細線構造において顕著であることから、1次元電子の散乱が抑制される効果の存在を示している。

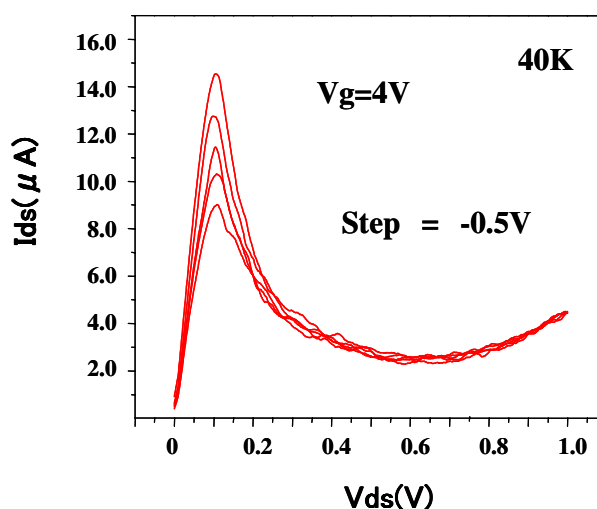


図4 (311)InP基板上的トレンチ型InGaAs/AlInAs系量子細線FETの負性抵抗効果
ゲート長50nm VNDR = 0.1V at
Vg = 4V, PVR = 6.2

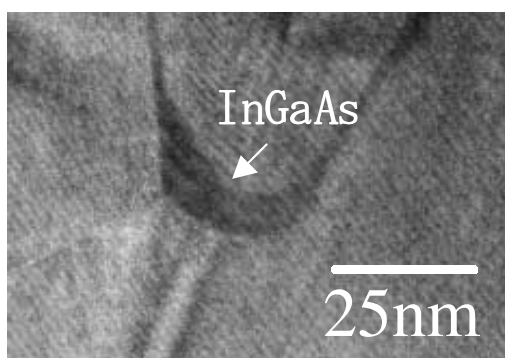


図3 (311)InP基板上的トレンチ型
InGaAs/AlInAs系量子細線のTEM
断面図

2 - 4 . フェムト秒ポンププローブ技術

量子ナノ構造における非線形光学効果を用いた光機能素子を念頭にエキシトンの位相緩和時間の評価を行うことを計画している。そのための予備実験として、ダブル励起パルスの遅延を変化させたときの反射率変調度の変化から量子井戸におけるエキシトンの位相緩和時間を評価した。また、表面を平坦化した多重量子細線において、量子細線の自己分極によるテラヘルツ電磁波の放射を検出した。

3 . 研究成果の発表

金 泰根、王 学論、鈴木 克弘、小森 和弘、小倉 睦郎、"Characteristics of the ground state lasing operation in V-groove quantum wire lasers" IEEE Selective Topics in J. Quantum Electron. Vol. 6, No. 3 pp511-521 May/June2000

王 学論、Valia Voliotis、Roger Grosson、小倉 睦郎、"Improved heterointerface quality of V-shaped AlGaAs/GaAs quantum wires characterized by atomic force microscopy and micro-photoluminescence" Journal of Crystal Growth 213 pp19-26, 2000

劉 興權、A. Sasaki、N. Ohno、王 学論、小倉 睦郎、"Temperature-dependent carrier trapping processes in short period quantum wires upper lattices grown by owrate modulation epitaxy" Applied Physics Letters Vol. 77, No. 10 pp1481-1483, 2000

A. Crottini、J. L. Staehli、B. Deveaud、王 学論、小倉 睦郎、"Probing Excitonic Nonlinearities in Quantum Wires" phy. stat. sol(b)221, 277, 2000

王 学論、小倉 睦郎、"Flow rate modulation epitaxy of high-quality V-shaped AlGaAs/GaAs quantum wires using tertiarybutylarsine as the arsenic source" Journal of Crystal Growth 221/04 p556-560, 2000

孫 昌植、金 泰根、王 学論、小倉 睦郎、"Constant growth of V-groove AlGaAs/GaAs multilayers on submicron gratings for complex optical devices" Journal of Crystal Growth 221 p201-207, 2000

菅谷 武芳、小倉 睦郎、杉山 佳延、松本 和幸、米井 健治、関口 隆史、"Trench-type narrow InGaAs quantum wires fabricated on α (311)A InP substrate" Applied Physics Letters Vol. 78, No. 1 p76-p78, 2001

諸橋 功、小森 和弘、T. Hidaka、菅谷 武芳、王 学論、小倉 睦郎、中川 格、孫 昌植、"Terahertz Electromagnetic Wave Generation from Quantum Nanostructure" Jpn. J. Applied Physics Vol. 40, pp3012-3017, Part1, No. 4B, April 2001

菅谷 武芳、小倉 睦郎、杉山 佳延、松本 和幸、米井 健治、張 起連、"Observation of negative differential resistance of a trench-type narrow InGaAs

quantum-wire field-effect transistor on a(311)A InP substrate" Applied Physics Letters Vol. 78, No. 16 pp2369-2371 April 2001

金 泰根、孫 昌植、小倉 睦郎、"Fabrication of AlGaAs-GaAs Quantum-Wire Gain-Coupled DFB Lasers by a Single MOCVD Growth Step" IEEE Photonics Technology Letters Vol. 13, No. 5 pp409-411 MAY 2001