

量子マイクロヘテロ構造における波動関数の制御とそのデバイス応用

神 裕之

東京大学生産技術研究所 教授

1. はじめに

厚さ100オングストローム(約30原子層)程の半導体超薄膜とその積層構造においては、電子の量子力学的な波動性が顕在化するため、従来の半導体には見られない多様な物性と機能が発現する。本研究では、① GaAsや(AIGa)As超薄膜を積層化した量子マイクロヘテロ構造を原子スケールで完全なものとするための結晶成長法の新たな手法を確立し、② この技術を用いて、共鳴トンネル・ダイオードの伝導機構を解明・制御して、室温で優れた負性抵抗特性が実現できることを初めて明らかにした。更に、③ 超高速トランジスタとして注目される高電子移動度トランジスタなど各種のマイクロヘテロ構造FET(電界効果トランジスタ)における波動関数の形態とその電子移動度やデバイス特性に及ぼす影響を解明するとともに、④ FET構造を持つ新しいデバイス(例えば速度変調トランジスタやキャリア誘起効果を用いた光変調器やスイッチ)の提案や原理実証などを行うことができた。以下に、その要点を御報告させて頂く。

2. GaAs/(AlGa)As超薄膜界面における原子スケールでの凹凸の解明とその制御法(堆積中断平滑化法)

超高真空中でルツボを加熱し、Ga(又はAl)やAsの分子ビームを発生させ、600°C前後に保った清浄なGaAs基板上に供給すると、GaAsやAlAs薄膜やその積層ヘテロ構造を作ることができる。この分子ビーム・エピタキシー法では、ほぼ任意の膜厚の構造ができるものの、GaAsとAlAsとの界面は完全に平坦ではなく、一原子層程はGaAsとAlAsとが混在した層が生じ、界面凹凸として作用することが知られていた。この凹凸は、電子波を散乱させたり、トンネル確率を不均一化させるため、様々な新デバイスの実現に障害となる。この問題を解決するために、① 一原子層成長する毎に電子ビームの反射率が周期的に増減する事実を利用して、反射率が極大となる瞬間にシャッターを閉じる方法がまず提案された。本研究では、② 結晶成長表面の凹凸は、堆積する原子の数の統計的なゆらぎにより生じるために、前記の方法では凹凸を回避できないこと、③ その防止には堆積する原子(又は分子)の横方向の移動を促進することが不可欠であり、必要な原子層数を堆積した後にシャッターを数十秒間閉じて堆積中断期間を設けると、平滑化が進行し、電子に対する散乱作用を1/5程に低減できることを初めて示した。この方法は、a) 原子スケールで平滑な界面を得る手法として広く用いられるのみならず、b) 結晶成長の際に物質がどのように表面に沿って移動しているかなど、成長機構のミクロな解明に重要な新知見を与えた。

3. GaAs-AlAs 2重障壁共鳴トンネル・ダイオードの伝導機構解明と室温負性抵抗の実現

GaAs結晶中に(AIGa)Asの超薄膜を埋め込んだ構造において、電子を膜面に垂直な方向に入射すると、(AlGa)Asの障壁の作用で、電子波の大部分は反射し、一部はトンネル効果で通り抜ける。この種の障壁を2枚平行に埋め込み、その間隔 L_z を100Å以下にすると、電子波は多重に反射され干渉効果を示す。この種のダイオードに特定の電圧 V_0 を印加して、入射電子波の波長を L_z の2倍程にすれば、干渉効果のために反射波が消えて、電子波が共鳴的に透過して電流が流れることが予測される。印加電圧を更に増すと共鳴条件が破れ、電流

が減少し、負性抵抗特性を示すことも期待される。この現象は本研究を開始した時点では、極低温でのみ観測されており、室温での実現や応用は困難視されていた。本研究では、熱的な過剰電流成分を稼ぐ程の共鳴トンネル電流を流すためには、障壁層の (AlGa)As の膜の Al 組成を高めると共に、膜厚を 30Å 以下まで薄くすることが有効であることを見出した。更にこの考えを基に、AlAs を障壁とするダイオードを試作し、室温負性抵抗が室温でも可能なことを初めて示した。また、電極に導入する不純物の拡散によるダイオード特性の劣化の抑制や AlAs 層厚の精密な制御により、負性抵抗特性の最大電流と過剰電流との比が 3:1 に及ぶ高性能ダイオードが実現できることを示して、室温デバイスとしての有望性を明らかにした。この研究は、その後の内外の研究に指針を与え、活発化の端緒となった。

又、極めて最近、2枚の障壁の間を電子波が往復しつつ、トンネル効果で抜け出してゆく過程を極短光パルスを用いて検出するを行い、応答速度に関する新知見を得ている。

4. 超薄膜ヘテロ構造中の電子移動度とヘテロ構造 FET の特性限界に関する研究

GaAs/(AlGa)As 超薄膜ヘテロ構造に沿う電子伝導の研究は 1976 年に本研究者らが開始したが、1978 年ベル研究所でドナー不純物と電子とを空間的に分離可能な構造へと発展し、電子の移動度を高めるのに有効であることが示された。この構造は更に 1980 年富土通において、FET 材料として応用され、高電子移動度トランジスタ (HEMT) の名前で知られる超高速デバイスの実現に重要な役割りを果している。

本研究では、HEMT を含めて超薄膜ヘテロ構造 FET において、電子移動度を支配する要因を系統的に調べ、① 低温での電子移動度の上限は残留不純物の密度で定まっており、これを 10^{14}cm^{-3} 以下とすれば、 $2 \times 10^6\text{cm}^2/\text{Vs}$ を越える超高移動度も達成可能なことや、② 電子と音響型格子振動との結合強度、③ 界面凹凸の電子移動度に及ぼす効果、③ 光学型格子振動放出による電子温度の冷却効果など電子移動度の定量的理解に資する新知見を明らかにした。

更に、超薄膜ヘテロ構造 FET の速度限界が、① 究極的には電極間の走行時間で支配されて、ほぼ 1 ピコ秒 (10^{-12} 秒) 程となること、その低減には高い電子移動度が重要な役割りを果していることを示している。又、② 論理回路などに应用する場合には、電荷の充放電時間が遅れの主因であり、その低減には (a) ゲート・チャネル間隔の小さな FET 構造を用いて、(b) 多量の電子をチャネル中に誘起できる構造が不可欠であることなどを併せて示している。これに基づき、ダブルヘテロ型 FET の提案・試作・解析を進めたが、内外でも関連の研究が活発化しつつある。

この他、電子の波動関数の形状をゲート電圧で制御し、これに伴う電子移動度の変化を利用した新しいトランジスタ (速度変調トランジスタ) の原理的検証を行い、走行時間限界を破る超高速応答の可能性のあり得ることも示している。

5. その他の関連研究および結言

超薄膜 GaAs は、光学物性にも独特のものを持ち、量子井戸レーザなど高出力発光源の実現などに利用されている。本研究では GaAs 超薄膜に光を照射した時に作られる電子・正孔の結合体 (励起子と呼ぶ) が、別途の方法で導入した電子によって解離・消滅する事実を利用した新しい光スイッチを提案解析し、最近その基礎実験に成功している。このデバイスは、FET 型の構造で、ゲート電圧の作用で光の吸収率や屈折率を変えるもので今後の多様な発展が期待される。

以上の研究の他に、発光過程のミクロな機構解明や負性抵抗デバイスを集積化した光双安定デバイスなどの研究も進めてきたが、紙数の都合で省略させて頂く。

以上、高柳電子科学技術振興財団の研究助成を受領以後、約30ヶ月の間に量子マイクロヘテロ構造の分野において研究に専心し、僅かながらも成果を達成することができた。この間、多数の国際会議での講演や国際誌での論文発表をする機会が与えられ、成果の一部を知らせて、新しい学問の基礎的分野の進展に幾らかの貢献を果たせたものと考えている。この間、高柳先生および財団から頂いた御支援は、研究の物品購入や旅費などとして研究の円滑な推進に極めて有効であっただけでなく、創造的研究を目指す上での貴重な精神的支えとして働いてきており、末筆ながら心からの御礼を申し上げたい。なお、本研究に関する内容の詳細は個々の論文として発表してきており、御関心のある方々には御請求次第、お送りさせて頂きたい。