

フェムト秒光エレクトロニクスラボ (Femtosecond Optoelectronics Lab.)

研究項目：フェムト秒光電子デバイス基礎技術の研究
研究期間：平成7年度～16年度

1. はじめに

近い将来に訪れるテラビット毎秒レベルの情報通信技術に対応するため、ピコ秒あるいはそれ以下の応答速度の光電子デバイスの開発が望まれる。半導体デバイス中の電流は、通常マクロな総量としてのみ測定されるが、空間分解、時間分解した形の情報として得られれば、これらのデバイスの設計に非常に役立つと考えられる。

半導体は光を吸収すると、その後徐々に放出する、フォトルミネッセンスと呼ばれる性質がある。この性質をうまく利用すれば、集積回路等の中で電子が高速に移動している様子を、光で知ることができる。本研究では電流の様子を可視化する技術、さらにその高速化を進めてきた。

2. 研究経過と現状

半導体量子井戸内にレーザー光を照射してその光エネルギーを吸収させると、電子と正孔のペアが発生する。この電子と正孔が電氣的に引きつけあって互いに束縛している場合、このペアを励起子と言う。励起子が再び結合して光を発するまでの間に周囲に拡散するため、照射点を中心とした励起子密度分布ができ、それに比例した発光像が得られる。量子井戸の面内に電圧を印加すると、n型半導体の場合には多数電子が流れるが、それがレーザー照射によって生じた励起子に衝突してこれを流れの方向に押すため、その発光像は移動して行く。これをカメラで捕らえれば電子の流れる様子を直感的に表すものとなる。

用いた試料はパターニングを施した変調ドープn型GaAs/AlGaAs系半導体量子井戸である。図1(a)は試料を斜め上から見たもの。右端の凹凸のある表面の部分が絶縁領域で、左側が再成長で作った半導体。(b)は試料の断面で、黒く細い線に見えているのが量子井戸で

ある。絶縁体との境界から遠い左の方では量子井戸は平坦になっている。右方の絶縁体との境界付近では量子井戸が折れ曲がっているため、この角の付近が実質的に量子細線になり、エッジ量子細線と呼ばれる。量子細線内での励起子の寿命はある条件下で量子井戸内よりも長くなるのが理論的に予想されている。

図2に時間分解測定用システムを示す。チタンサファイアレーザーの第二高調波を用いており、パルス幅200fs、波長421nmである。試料上に集光されたレーザーのビーム径はおよそ1 μ mであり、空間分解能は発光波長の800nm周辺で1.5 μ mである。

超高速高繰り返しシャッターカメラの分解能は90psで、一連の過程がパルスレーザーの繰り返し周期80MHzに合わせて繰り返され、露光のタイミングはレーザーパルスと同期し、ある時間遅れを持って設定される。試料は、液体窒素によって冷されたコールドフィンガーに貼られており、およそ85Kに冷却されている。時間分解しない場合には、励起源としてヘリウムネオンレーザーまたはYVO₄レーザーの第二高調波を使い、超高速シャッターと同期用の遅延回路を除いたコン

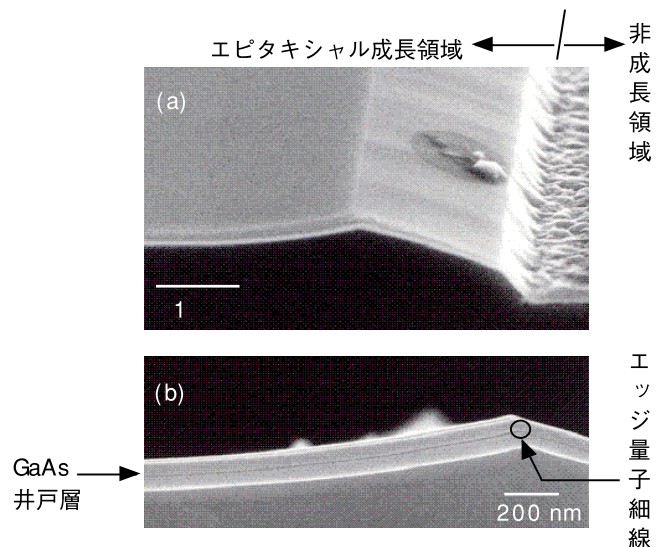


図1 選択成長Ga/AsAlGaAs量子井戸断面

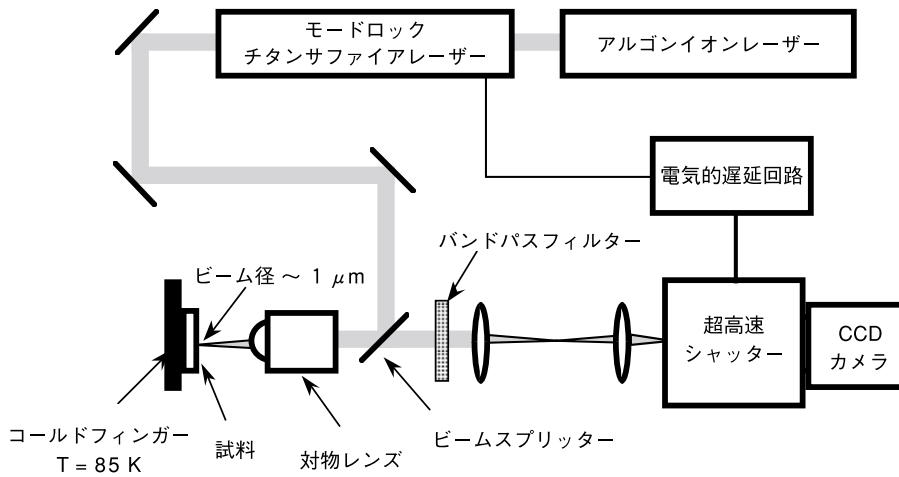


図2 時間分解計測システム

パクトなシステムとなる。

図3は 試料の各場所に連続発振のレーザー光を照射し、その発光像を測定したもの(発光強度分布を擬似カラーで表示)約30個と試料像を合成したものであるが、多点同時計測も実現している。電圧印加により、電子は左側の広い部分から右下の狭い部分に向かって流れている。

各発光像の様子を見ると、広い部分の上下ではほとんど発光像が流されていないが、狭い部分及びその入り口付近では大きく発光像が流されている。各場所における電子の速度あるいは電場の大きさを反映しており、試料形状に対する電子流の様子が、ベクトル表示のように示されている。

電子の流れる様子は水の流れに似ているが、異なる点は例えば、右上方の角の部分に淀みが見られることである。曲がった川などでは内側の流速が遅く、そのため内側に河原が形成される要因になっている。それに対して電子流の場合、電子は抵抗がより小さくなる内側の最短距離を流れようとするため、逆に外側に淀みができるものと考えられる。

伝導領域の端にはエッジ量子細線が形成されているが、そこでの発光像は非常に長くすそをひいている。量子井戸と細線を比較した時間分解測定結果と合わせて考えると、細線内における励起子の寿命が井戸内に比べて長いことを反映していると考えられる。

図4は、量子井戸面内に定常電流を流した状態で、パルス幅 200フェムト秒のレーザー光を照射した後、GaAs量子井戸からの発光像を時間経過にしたがって超高速で撮影し、試料像と画像的に合成したものである。

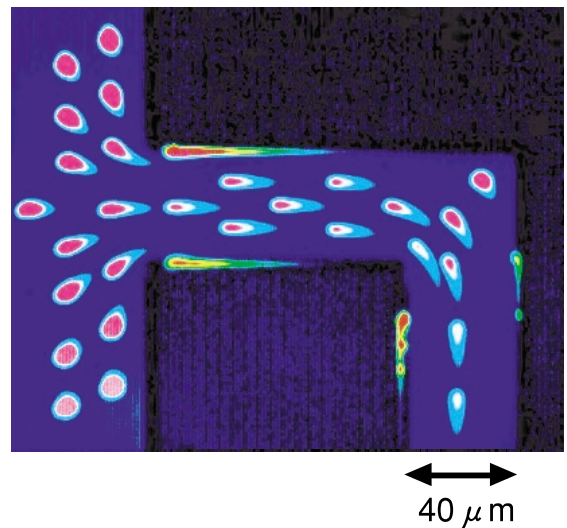


図3 連続光照射による発光像

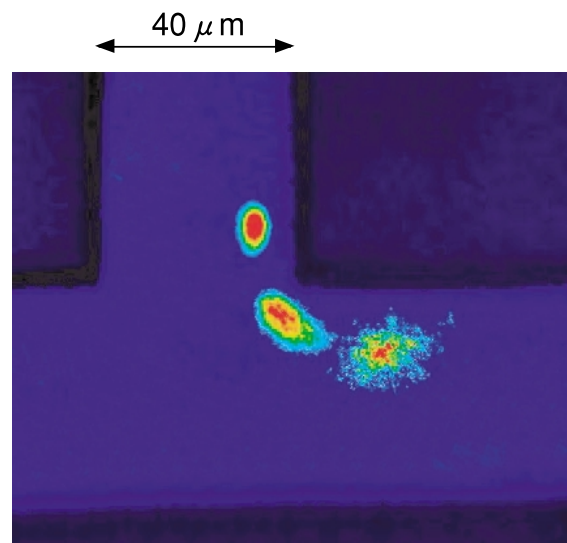


図4 時間分解発光像。200fsパルスレーザー照射後0.1, 1.1, 2.1ナノ秒の像

発光像はパルスレーザー照射後 0.1, 1.1, 2.1 ナノ秒後のものを合成してある。時間がたつにつれて発光強度は指数関数的に弱くなるので、強度を規格化して表示してある。2.1 ナノ秒後の像の形がくずれているのは、発光強度が弱く、SN比が低いためである。

一連の実験から、発光体の加速はナノ秒オーダーまで続いていることが分かった。従来は光照射によってできる電子・正孔対は、概ね独立であり続けるイメージを持たれていたが、その場合には加速はサブピコ秒で終了するはずである。したがって、今回の結果は、これらが励起子を形成していることを示していると考えられる。さらに時間分解能を向上できれば、励起子形成までの様子や、レーザー照射後初期の速い拡散の様子等が明らかにできると思われる。現在、光シャッタを用いたフェムト秒分解システムを構築中である。

3. 今後の展望

ここで述べた新しい測定法は、半導体素子内を二次元的に流れる電子の様子を直観的に理解する有効な手段であるとともに、高時間分解で観測できるので、半導体の基礎物性の研究や素子性能などの詳細な評価に非常に有効となると期待される。

現在のところは移動度が高い結晶が必要であり、また観測しやすい温度にも制約がある。これらの制約の緩和と、時間分解能の向上等により、いろいろなデバイス内における電子の流れ方、電子 - 正孔対形成後初期の速い拡散、励起子形成までの様子、電子と励起子との詳細な相互作用、注入された電子が量子細線や量子箱に捉えられる様子等が見えればさらに興味深い。

これらの実現を目指し、今後はさらに高速な計測とともに、実際のデバイスへの適用を行い、有用性を示してゆく予定である。

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数5名)

職員(5名) 渡辺正信*、永宗 靖、小森和弘、清水三聡
(光技術部) 小倉睦郎(電子デバイス部)

*ラボリーダー