

Title	Investigation of Picosecond Optical Phenomena in III-V Quantum Confined Structures
Author(s)	Takeuchi, Atsushi
Citation	
Issue Date	
Text Version	ETD
URL	https://doi.org/10.11501/3063586
DOI	10.11501/3063586
rights	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

氏名	竹内 淳
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	第 10368 号
学位授与年月日	平成 4 年 7 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文名	Investigation of Picosecond Optical Phenomena in III-V Quantum Confined Structures (III-V 族量子閉じ込め構造の超高速光学現象に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教授 張 紀久夫 (副査) 教授 冷水 佐壽 教授 小林 哲郎 教授 中島 尚男

論文内容の要旨

近年の電子デバイスの発展は、新機能化と高速化の両面においてめざましいものがある。なかでも、III-V 族化合物半導体中の量子閉じ込め効果によって生じる室温励起子の可飽和吸収効果やトンネル効果などに基づく各種の新機能は、デバイス応用上極めて興味深い。このため、デバイスの高速化の進展とあいまって、量子閉じ込め効果に関する各種の超高速現象の研究の重要性が増している。本論文は、量子閉じ込め系での超高速現象として、励起子の可飽和吸収からの超高速回復やトンネル効果、そしてスピン緩和過程などを取り扱う。特に、通常の量子井戸中で、励起子の吸収回復が遅いという問題は、光で光を制御する全光学的なデバイスを実現するための重大な障害の一つとなっている。本論文では主要な主題として、この問題を解決するために、トンネル効果や表面での再結合などを利用した各種の新しい構造を提案および作製するとともにその超高速過程を調べる。

始めに、筆者は励起子吸収からの高速回復を実現するために、トンネル効果を利用した新しい超格子構造 Tunneling Bi-Quantum well (TBQ) の提案を行う。TBQ 構造は狭い量子井戸と広い量子井戸がバリア層をはさんだ構造になっており、狭い井戸中に光励起された電子は励起子を形成して可飽和吸収効果を起こしたのち、隣の広い井戸にトンネルする。このトンネル時間は、バリア幅を薄くすることによってピコ秒まで短縮することが可能であるため、従来構造よりはるかに速い応答を示す材料系を提供できる可能性がある。実際に筆者らは、井戸として GaAs を、そしてバリア層として $\text{Al}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{As}$ を用いた TBQ 構造を作成し、その吸収飽和過程の時間変化をポンププローブ法で計測した。その結果、バリア幅 1.7nm の TBQ では、通常の量子井戸中でのナノ秒オーダーの回復時間をはるかにしのぐ、1 ps の回復時間が実現できることを明らかにした。また、トンネル時間の計算を行い、LO フォノン散乱によるトンネル過程がこの系でのトンネルの支配的なメカニズムであることを明らかにした。

ここでのトンネル過程は非共鳴トンネルであるが、次に、筆者らは、光励起された電子が、狭い井戸の $e1$ 準位から広い井戸の $e2$ 準位へ共鳴トンネルで抜ける共鳴 Tunneling Bi-Quantum well を作製し、その応答変化を見た。その結果、共鳴 TBQ では、回復時間の短縮と吸収変化のピーク対テール比の劣化をみとめた。

TBQ 構造では、狭い井戸を光励起した際に、あわせて広い井戸も光励起されてしまう。次に筆者らは、この広い井

戸での吸収を避けるために、広い井戸を AlAs 層で置き換えたタイプ II TBQ を提案および作製するとともにその吸収の時間変化を測定した。この構造では、GaAs 量子井戸中に励起された電子は AlAs 層の X 点へトンネルする。その結果、バリア幅 1.1 nm のタイプ II TBQ では 8 ps の吸収回復を実現した。

さらに筆者らは、これらとはまったく異なるアプローチとして、多重量子井戸 (MQW) に細線加工を施し、細線の側壁での高速の表面再結合を利用して吸収回復を早める試みを行った。細線加工には、集束イオンビームと electron cyclotron resonance chlorine-plasma エッチングを用いた。その結果、線幅 130 nm の MQW 細線において 11 ps の高速回復が実現された。

筆者らは、さらにその他の高速緩和過程の一つとして、量子井戸中での電子スピン緩和過程を、円偏光を用いた時間分解吸収計測を用いて始めて明瞭に測定した。その結果、時定数 32 ps のスピンの超高速緩和過程を観測した。

最後に、筆者らは、共鳴トンネルバリアダイオードのスイッチング過程を電気光学サンプリングを用いて測定するとともに、現象論的にトンネル効果を含む新しい等価回路を提案し、実験結果とよい一致を得た。

論文審査の結果の要旨

本論文は、半導体量子井戸構造など種々の量子閉じ込め系の特徴を利用した超高速光学応答の実験的研究をまとめたものである。これらの量子閉じ込め系では、室温においても励起子が安定に存在するが、それを共鳴的に光励起することにより、試料の光学定数が過渡的に変調されるので、一つの光で他の光に対する応答を制御することが可能となる。その際、過渡的な変調の時定数、特に回復の時定数をできるだけ短くすることが重要であるが、閉じ込めの構造の中でトンネル効果や表面での再結合などを利用できるようにすることにより、従来の量子井戸ではナノ秒の領域にあった時定数をピコ秒の程度まで短くすることに成功した。

そのような構造の一つとして竹内らが提案し、実験的にも有効であることを示したものが Tunneling Bi-Quantum Well (TBQ) 構造であるが、これは狭い量子井戸と広い量子井戸がバリア層を挟んだ構造になっており、狭い量子井戸中に光励起された励起子が広い量子井戸にトンネルして行くために、過渡的変調の回復時間が短くなるというものである。実際に、井戸として GaAs、バリアとして AlGaAs を用いて、このような構造をつくり、その吸収飽和過程の時間変化をポンプ・プローブ法で計測した結果、バリア幅 1.7 nm の TBQ において 1 ピコ秒の回復時間が得られるということがわかった。また、この時定数の理論的見積を行って、LO フォノンによる電子の散乱がこの時定数を決める支配的なメカニズムであることを明らかにした。

同様な TBQ 構造で、広い井戸の電子に対する下から二番目の量子化準位が狭い井戸の一番目の量子化準位に一致していて、トンネル効果が共鳴的に起こる構造や、広い井戸に AlAs を用いたタイプ II の TBQ 構造も作成して、吸収の時間変化を測定し、バリア層の厚さにより回復時間や吸収変化のピーク対テール比がどのように変化するかを詳しく調べた。その結果、バリア幅 1.1 nm のタイプ II TBQ において、8 ピコ秒の回復時間を実現した。

さらに別の構造として、多重量子井戸に細線加工を施したものをを用い、細線の側壁での高速の表面再結合を利用して回復時間を短縮することも試みた。その結果、線幅 130 nm の細線において、11 ピコ秒の回復時間を得た。

さらにその他の高速緩和の一例として、量子井戸中での電子スピン緩和を、円偏光を用いた時間分解吸収計測により、初めて明瞭に観測し、室温におけるスピン緩和時間として 32 ピコ秒という値を得た。

最後に、共鳴トンネルバリアダイオードにおける高速のスイッチング過程を電気光学サンプリングの方法によって測定するとともに、現象論的にトンネル効果を含む新しい等価回路を提案し、実験結果とよく一致することを示した。

以上のように、本論文では、過渡的な光学定数変化の回復時間をピコ秒の領域にまで短くするため、種々の量子閉じ込め構造が有用であることを提案し、また実際にそうなっていることを示した。またその過程で、物性的に興味ある測定結果をいくつか得ているが、特に量子井戸中の電子の室温におけるスピン緩和のデータは、スピンを含む伝導

帯の構造と散乱機構の解明に役立つ重要なものと考えられる。よって本論文は博士論文として、十分価値あるものと認める。