

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20360038

研究課題名（和文） 半導体量子構造における表面音響波を用いた電子・光物性制御

研究課題名（英文） Controlling electronic and optical properties in semiconductor quantum structures using surface acoustic waves

研究代表者

松田 理 (MATSUDA OSAMU)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30239024

研究成果の概要（和文）：

超短光パルス照射によって半導体試料に励起された表面音響波を用いて試料中の励起子を輸送しまたその寿命を制御することを目的とした。このために GHz 領域の表面音響波伝播の時間分解 2 次元イメージングとフォトルミネッセンス 2 次元イメージングを試料の同一領域にて低温(10K)で行える測定装置を開発した。また、イメージングにおいて励起光と検出光を共に変調するヘテロダイン法を発展させた。さらに偏光を用いて音響波の歪成分を解析する方法を構築した。

研究成果の概要（英文）：

We aimed to transfer the excitons and to control their life time in semiconductor samples using the surface acoustic waves generated by the ultrashort light pulse absorption. For this purpose, we developed an experimental technique which allows the time resolved two-dimensional imaging of the GHz surface acoustic wave propagation and the two-dimensional imaging of the photoluminescence at the same region of the sample at low temperature (10K). Connecting to this, we also developed a heterodyne technique which use the modulated light for both excitation and probing light. We also developed an analyzing method for the strain components using the polarization of the probing light.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2009 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：半導体量子井戸、フォトルミネッセンス、表面音響波、キャリア輸送、超高速分光、イメージング、圧電性、励起子

1. 研究開始当初の背景

半導体量子井戸中の励起子を表面音響波に伴う動的ポテンシャル井戸を用いて輸送できることが1997年にRockeらによって示されて以来、音響波によって物質の光学的性質を変調するということが大きな注目を集めている(C. Rocke, et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 4099 (1997))。これは励起子の寿命を人為的に制御可能にしたという点で画期的な成果であり、光ストレージや光マルチプレクサ・デマルチプレクサなどのデバイスへの応用も期待されている。その後、室温動作の確認(M. Streibl, et al., Appl. Phys. Lett. **75**, 4139 (1999))、スピン偏極した電子の輸送(T. Sogawa, et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 276601 (2001))、更には量子コンピューティング素子への応用(S. Furuta, et al., Phys. Rev. B **70**, 205320 (2004))など研究の裾野はますます拡がりを見せている。しかしながらこれらの研究は全て表面音響波の生成に試料上に形成された楕円対向電極トランスデューサーを用いており、輸送の自由度は制限されている。一方、光励起による音響波の生成は、試料に特別な構造を必要とせず、上記の励起子輸送に使用すれば、輸送の自由度を高めることができると考えられる。

2. 研究の目的

閉じ込めポテンシャル中でのキャリア制御は半導体デバイス工学の中核をなす。本研究の目的は、超短光パルス照射によって半導体試料に励起された表面音響波を用いて、半導体試料中の励起子を自在に輸送し、またその励起子の寿命を制御する手法を開発・発展させることである。

3. 研究の方法

半導体量子井戸層を表面近傍に持つ試料における表面音響波は、量子井戸層の伝導帯および価電子帯エネルギー準位を変調する。特にGaAsなどの圧電性結晶においてはこの変調幅は容易に数 meV 程度になり、光励起された励起子を面内方向に閉じ込める動的なポテンシャル井戸を形成する。閉じ込められた励起子は表面音響波の伝搬に伴って輸送される。変調された伝導帯・価電子帯ポテンシャルの山同士・谷同士が同じ位置にできる場合は、励起子を構成する電子と正孔が空

間的に分離して捕獲・輸送されることにより励起子の寿命が著しく増大する。何らかの方法でこの動的ポテンシャル井戸を消滅させることにより、励起子を再結合させることができる。

このような動的ポテンシャル井戸による励起子輸送の研究はこれまで主として電気的に発生された表面波を用いて進められてきた。これに対して本研究では、表面音響波の生成をサブピコ秒程度の超短光パルスを試料に照射することによって行う。生成する表面音響波の典型的な波長は1~10 μm程度である。表面音響波生成のための光あるいは別途照射された光によって生成された励起子を、音響波によって輸送する。その様子を発光および過渡的反射スペクトルの時間・空間分解イメージとして観測・解析する。

4. 研究成果

(1) 時間分解表面音響波イメージおよびフォトルミネッセンスイメージ同時測定装置の開発

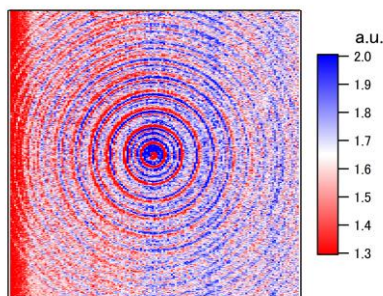
本研究においてはミクロンスケールの波長を持つ表面音響波を励起し、その伝播によるフォトルミネッセンスの変調を観測する必要がある。このために表面音響波の時間分解イメージングとフォトルミネッセンスのイメージングを試料の同一部位に対して行える測定装置を開発した。これらの測定は試料の励起条件を全く変更することなく行える。

音響波イメージングにおいてはサブピコ秒時間幅の光パルス列を生成するモードロックTi:サファイアレーザーを光源として用いる。光パルスの第2高調波(ポンプ光パルス、波長415 nm)を試料表面に集光して照射し表面音響波を生成する。時間遅延された光パルス(プローブ光パルス、波長830 nm)を試料上の任意位置に集光し、その反射光の位相変化を観測することで、伝播する表面音響波による表面変位を検出する。遅延時間とプローブ光パルス集光位置を走査することで、表面音響波伝播の時間分解2次元イメージを取得する。この装置はピコ秒の時間分解能、1ミクロン程度の横空間分解能、0.1ピコメートル程度の縦空間分解能を持つ。

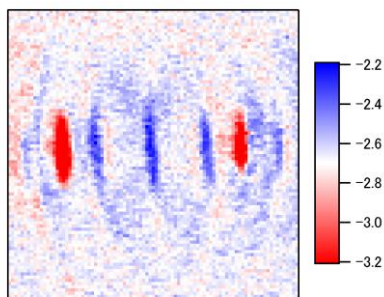
ルミネッセンス測定においては上記のプローブ光の光学系を用いて、試料からのルミネッセンス光を光検出器に導く。光路中にピンホールを挿入して共焦点顕微鏡を形成す

ることにより、10 ミクロン程度の空間分解能でフォトルミネッセンスの空間分布を計測できる。この装置は直接的な時間分解測定はできない。

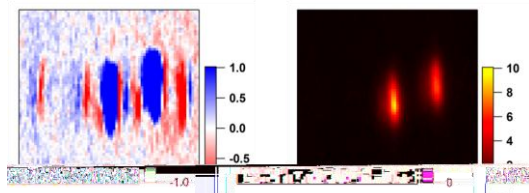
これらの共通の最大観測可能領域は 600 ミクロン×600 ミクロンである。試料はクライオスタットにより 10K 以下の低温に保持できる。下図に本装置による金薄膜の表面音響波イメージの測定例を示す。画面中央に 12.5ns 間隔で照射されたポンプ光パルスによる同心円状の音響波束のある瞬間の様子が 600 μm ×600 μm の領域で観測されている。



また、下図は GaAs 試料の 160 μm ×160 μm の領域に、ポンプ光を 2 本の線状の領域（赤色部分）に集光した場合の音響場のある瞬間の様子である。画面両側から周期的に励起された線状の音響波束が対向方向に伝播している。



下図は同一領域に対して表面音響波イメージング(左図)とフォトルミネッセンスイメージング(右図)を行った例である。イメージング領域は 120 μm ×120 μm である。音響波イメージにおいては太い線状の青色部分がポンプ光照射部位に対応し、伝播している音響波束が赤色および青色の細い線状パターンで示されている。右図においてはポンプ光照射位置のみで強いフォトルミネッセンスが観測され、輸送された励起子による信号は確認できない。



そこで、より単純な系で音響波による励起子輸送制御を確認すべく、2 つのポンプ光の照射のタイミングを自由に選べるような光学系を構築し、一方のポンプ光照射部位で生成された音響波の到着部位、到着時刻に合わせてルミネッセンス励起用のもう一方のポンプ光を照射する。後者の照射時刻を走査することで音響波到着前後でのルミネッセンス強度の変化を調べる実験を進めている。今後、2 つのポンプ光照射位置を系統的に変化させてより詳細な測定を行う。また励起光強度が不足していることが考えられるので、光学系を見直し、より強い励起光を使用できるようにする必要がある。

(2) 偏光を使用した音響波イメージの解析法の確立

表面音響波検出に光弾性効果による複屈折現象を用いた場合の理論構築を行い、表面音響波イメージング結果から試料中の歪モードを同定することを可能にした。この結果は専門学術雑誌 Journal of the Optical Society of America B に投稿、掲載された。この方法は従来の干渉計を用いた方法では検出できなかった試料面内方向に平行な変位にも感度を持ち、音響場の定量的測定にも有効である。また、我々は同理論を異方性の強い試料にも適用できるように拡張した。

(3) ヘテロダイン法による音響波伝播の高感度観測法の開発

(1)の研究において 2 つのポンプ光による信号を適切に扱うために、それぞれを異なる周波数で変調し、その差周波数成分を信号中から検出するヘテロダイン法を発展させた。この方法を用いて通常の音響波伝播測定においてポンプ光とプローブ光を異なる波長で変調することで、単一周波数の変調を用いる従来法に比べて信号雑音比が改善され、またポンプ・プローブ光を同一波長に選択可能になるなどの測定の自由度が拡大された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. T. Saito, O. Matsuda, M. Tomoda, and O. B. Wright, Imaging gigahertz surface acoustic waves through the photoelastic effect, Journal of the Optical Society of America B, 108, 2632-2638 (2010).

[学会発表] (計 8 件)

1. O. Matsuda, T. Saito, M. Tomoda, H. Sakuma, and O. B. Wright, Time-resolved imaging of sub-GHz surface acoustic waves on an anisotropic medium using the photoelastic effect, 16th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 2011年11月28日, Hyatt Regency Hotel Merida, Merida (Mexico).

2. 外村 将大, 松田 理, 友田 基信, オリバ ライト, ピコ秒レーザー超音波法による SiO₂ 薄膜/GaAs(411) 基板における GHz 音響波の生成と検出, 第 32 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2011年11月9日, 京都大学 100 周年時計台記念館 (京都).

3. 齊藤 大樹, 松田 理, 友田 基信, Oliver B. Wright, 光弾性効果による異方性媒質上での弾性表面波二次元イメージング, 第31回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2010年12月8日, 明治大学駿河台アカデミーコモン(東京).

4. 兼子 翔伍, 松田 理, 友田 基信, Oliver B. Wright, GaAs における弾性表面波とフォトルミネッセンスの二次元イメージング, 第31回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (USE2010), 2010年12月6日, 明治大学駿河台アカデミーコモン(東京).

5. 松田 理, 齊藤 大樹, 友田 基信, Oliver B. Wright, 光弾性効果によるGHz弾性表面波伝播の実時間二次元イメージング, 日本物理学会秋季大会, 2010年9月25日, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス(大阪).

6. O. Matsuda, T. Saito, M. Tomoda, and O. B. Wright, Time-resolved imaging of sub-GHz surface acoustic waves using the photoelastic effect Time-resolved imaging of sub-GHz surface acoustic waves using

the photoelastic effect, 2nd International Symposium on Laser Ultrasonics, 2010年7月7日, Université Bordeaux 1, Talence (France).

7. 兼子 翔伍, 松田 理, 友田 基信, Oliver Wright, GaAsにおける弾性表面波の時間分解イメージング, 第30回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2009年11月20日, 同志社大学今出川キャンパス寒梅館(京都).

8. 斎藤大樹, 松田 理, 友田 基信, Oliver Wright, 光弾性効果によるギガヘルツ弾性表面波 2次元イメージング, 第30回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2009年11月18日, 同志社大学今出川キャンパス寒梅館(京都).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田理 (MATSUDA OSAMU)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 30239024

(2) 研究分担者

オリバ ライト (WRIGHT OLIVER)

北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 90281790

友田 基信 (TOMODA MOTONOBU)

北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 30344485

(3) 連携研究者

()

研究者番号: