

平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究終了報告書

◆記入に当たっては、「平成18年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究終了報告書記入要領」を参照してください。

ローマ字		Oliver B. Wright				
①研究代表者氏名		Oliver B. Wright		②所属研究機関・部局・職 北海道大学・大学院工学研究科・教授		
③研究課題名	和文	半導体量子井戸における THz 音響フォノンを用いた電子波動関数の可視化とその応用				
	英文	Spatial visualization of the electron wavefunctions and terahertz acoustic phonon transduction in semiconductor quantum wells and related applications				
④研究経費 金額単位：千円	平成13年度	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	総合計
	42,700	7,600	4,800	35,200	4,800	95,100
⑤研究組織（研究代表者及び研究分担者） *平成18年3月31日現在						
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）			
Oliver B. Wright	北海道大学 大学院工学研究科・教授	光物性	研究総括・装置作製			
松田 理	北海道大学 大学院工学研究科・助教授	光物性・半導体物性	装置作製・試料作製・測定			
友田 基信	北海道大学 大学院工学研究科・助手	光物性・フォノン物性	装置作製・測定			
⑥当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）						
<p>ナノメートルの波長を持つ音響波を自在に操ることにより、ナノスケールの構造観測が可能になる。これはナノエレクトロニクスや材料科学における新しい分野を切り拓く。本研究では、ピコ秒領域の音響フォノンパルス生成・検出を行う超高周波数音響トランスデューサーとして半導体量子井戸を利用する手法を確立する。また、量子井戸中の電子波動関数とフォノンパルスの相互作用を利用して、波動関数のマッピングを目指す。具体的な目的は以下のようなものであった。</p> <p>1) 光波長選択的な THz フォノン生成とその伝播：2重または3重量子井戸試料を用い、フォノンパルス励起光および検出光の波長を変化させて測定を行う。量子井戸の幅に依存する電子準位構造を反映し、フォノンパルス励起および検出効率が変化すると期待される。実験結果の解析から、フォノン生成メカニズムや励起子の果たす役割などについての知見を得る。</p> <p>2) 電子波動関数マッピング：超短パルス光励起によるフォノンパルス生成は電子格子相互作用にもとづいており、生成されるフォノンパルス形状は電子の存在確率密度$\psi ^2$に直接結び付けられる。従ってフォノンパルス形状を精密に観測することにより、電子波動関数についての知見が得られると期待される。特定の量子井戸で生成されて伝播するフォノンパルスを試料表面または別の量子井戸で観測する。電場印加によるポテンシャルの非対称化が電子波動関数に及ぼす影響についても調べる。</p> <p>3) 埋もれた構造における THz フォノンスペクトロスコーピー：量子井戸で生成された THz 音響フォノンの第一の応用として、埋もれたナノ構造中を伝播する THz 領域のフォノン周波数スペクトルを観測する。対象試料は埋もれたナノメートル厚薄膜構造やナノ量子ドットアレイなどである。</p> <p>4) 吸着層における THz フォノンスペクトロスコーピー（センサーへの応用）：InGaAs 量子井戸構造を用いることでフォノンパルス励起を基板側から行う。生成されたフォノンパルスの伝播は表面吸着層の影響を受ける。従ってこれを観測することにより、表面吸着層の状態についての知見が得られる。これは新しいガスセンサーへの応用が考えられる。</p>						

⑦研究成果の概要 (研究目的に対する研究成果を必要に応じて図表等を用いながら、簡潔に記入してください。)

1) THz音響フォノンの生成および検出: 2重または3重量子井戸層を持つGaAs/GaAlAs試料に、波長可変の近赤外域サブピコ秒光パルス(ポンプ光)を照射し、量子井戸層でTHzフォノンパルスを生成する。伝播するフォノンパルスを波長固定の青色サブピコ秒光パルス(プローブ光)を用いて試料

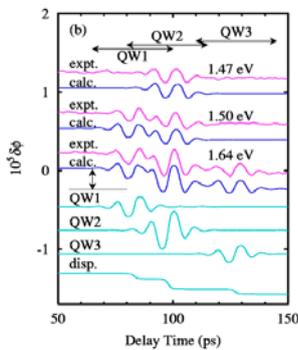


図1: 3重量子井戸試料におけるフォノン伝播による光位相変調の実験結果(expt.)と理論計算結果(calc.)。励起光エネルギーによる違いが見られる。最下段のdisp.で示された曲線は理論によって求められた1.64 eV励起相当の表面変位による位相変化成分である。

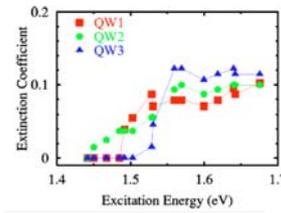


図2: 実験結果の解析により求められた各量子井戸層の消衰係数。各量子井戸層の厚みの違い、すなわち遷移エネルギーの違いに対応して、スペクトルの立ち上がりが異なる。

表面近傍で検出する。この研究はピコ秒音響法における最初の分光測定である。我々がこの測定のために新しく開発したジッター補正システムを用いた測定結果の例を図1に示す。我々はこの実験結果を定量的に解析するためにフォノン生成および検出についての理論モデルを構築した。図1には実験結果と理論計算結果の良い一致が示されている。図2は各量子井戸層の実効的な消衰係数を励起光子エネルギーに対してプロットしたもので、量子井戸をフォノントランスデューサーとみなしたときのフォノン生成効率スペクトルに対応する。構築した光検出の理論は音響波による屈折率の不均一な変調、表面・界面の変位、および表面界面による光の多重反射を考慮したもので、フォノン検出以外にも幅広い応用が考えられる。(Phys. Rev. BおよびJ. Opt. Soc. Am. B誌に発表済)

2) 時空間分解能の向上: 我々は実験を重ね、測定の時間分解能およびフォノンパルス形状測定の忠実度を向上させた。i)より短い光パルス(400 fs)を用いることにより量子井戸構造を用いて0.5 THzまでの音響フォノン生成を確認した。(Jpn. J. Appl. Phys.誌に発表済) ii)斜め入射プローブ光学系と偏光操作を用いた新しい測定系を構築した。これは測定信号から表面変位による寄与のみを抽出することができる。Cr薄膜を用いた実験により、新しい手法が有効であることを確認した。(Rev. Sci. Instrum.およびJ. Phys. IV誌に発表済)

3) 新しい超高速サニアック干渉計の開発: 我々はピコ秒領域のフォノンパルスを検出するための新しい超高速サニアック干渉計を開発した。この方法はひとつの集光レンズを用いてフォノン生成・検出を行うもので、試料の片面から垂直入射光学系により測定を行うことができる。ポンプ・プローブ光の水平位置を1ミクロンの精度で制御できる。(Rev. Sci. Instrum.誌印刷中)

4) バルクGaAsにおけるピコ秒音響法: 量子井戸の実験解析を補助するためにGaAs中での超高速フォノン励起に関する基礎的な研究を行った。研究にはi)n-dope GaAs (100)薄片、ii)微細加工技術により作製したGaAs (100)スラブ構造、(iii)GaAs (411)バルク結晶の3種類の試料を用いた。試料中の光励起キャリアの超高速拡散をモデル化し、生成されるフォノンパルス形状がどのようにキャリア拡散に影響されるかを調べた。また結晶の異方性を利用した剪断フォノンパルス生成・検出が可能であることを示した。(Phys. Rev. BおよびPhys. Rev. Lett.誌に発表済)

5) フォトルミネッセンスを利用した新しいフォノンパルス検出法: 量子井戸試料を用いて新しいフォノンパルス検出法の研究を行った。ポンプ光パルス照射により生成されたフォノンパルスが試料中を伝播するとその歪により電子バンド構造が変調される。遅延されたプローブ光パルスによる量子井戸からのフォトルミネッセンス励起スペクトルにこのバンド変調の効果が現れることを期待して研究を進めている。この方法は表面でのフォノン検出よりも時間分解能を高められると期待される。

⑧特記事項 (この研究において得られた独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、当該研究分野及び関連研究分野への影響等、特記すべき事項があれば記入してください。)

本研究の成果は既にいくつかの他の分野で新たな興味を引いている。Phys. Rev. B誌に掲載された我々の量子井戸についての論文は、発表後間もないにもかかわらず既にGaN系のピコ秒音響研究のグループ(Wu et al., Appl. Phys. Lett. 88, 041917, 2006)、超高速X線回折研究のグループ(Hayashi et al., Phys. Rev. Lett. 96, 115505, 2006)、フォノン分光研究のグループ(R. N. Kini et al., Appl. Phys. Lett. 88, 134112, 2006)に引用されている。

さらに我々の論文は、台湾大学のC. K. Sunとカリフォルニア大学のS. P. DenBaarsの共同グループおよび独ドルトムント大学のM. BayerのグループによるGaN量子井戸音響学の分野での論文にも引用される模様である。このように我々の研究成果はこの分野の研究を触発している。

量子井戸中でのピコ秒音響フォノンパルス生成・検出はTHz領域のよく形状定義されたフォノンパルス操作に最適の方法である。従って量子井戸フォノントランスデューサーは将来のTHzフォノン研究の標準となると考えられる。

さらに我々の研究は理論研究の分野をも刺激している。北海道大学の鈴浦秀勝教授は平成17年度の学部学生の研究テーマとして「半導体量子井戸中の電子励起による超音波発生の解析」を設定し、同教授の研究室の徳尾貴洋氏がその研究に携わった。この研究は我々の2005年の論文の理論的アプローチを継承し、さらに非線形性を考慮したものである。励起光強度の増加に伴う生成フォノンパルス形状の変形が予測されており、実験サイドからの確認に興味を持たれる。

時期尚早のきらいがあるが、我々の当初の研究目的に含まれていた量子井戸を用いた吸着層センサーへの応用も実現性が高いと考えている。ここでの鍵は10,12項でも述べた超音波減衰の制御である。我々は現在この目標に向けて研究を進めている。別の問題点は商業化における価格である。もし低廉、小型、高出力のピコ秒、フェムト秒パルスレーザーが実用化されれば、これらの応用は真に商業化が可能となる。このようなレーザーの価格は継続的な低下傾向にあり、我々の構想が実際に商業ベースに乗る日もそう遠くはないと考えている。

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

論文

- 1) T. Tachizaki, T. Muroya, O. Matsuda, Y. Sugawara, D. H. Hurley and O. B. Wright, 'Scanning ultrafast Sagnac interferometry for imaging two-dimensional surface wave propagation', Rev. Sci. Instrum. (in press)
- 2) T. Tachizaki, O. Matsuda, T. Fukui, J. J. Baumberg and O. B. Wright, 'Terahertz ultrasonic generation and detection in GaAs/AlGaAs quantum wells', Jpn. J. Appl. Phys. 44, 4477-4479 (2005)
- 3) O. Matsuda, K. Aoki, T. Tachizaki and O. B. Wright, 'Direct measurements of ultrafast surface displacement in laser picosecond acoustics', J. Phys. IV, France 125, 361-363 (2005)
- ④ O. Matsuda, T. Tachizaki, T. Fukui, J. J. Baumberg and O. B. Wright, 'Acoustic phonon generation and detection in GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum wells with picosecond laser pulses', Phys. Rev. B 71, 115330-1-4 (2005)
- ⑤ O. Matsuda, O. B. Wright, D. H. Hurley, V. E. Gusev, and K. Shimizu 'Coherent shear phonon generation and detection with ultrashort optical pulses', Phys. Rev. Lett. 93, 095501-1-4 (2005)
- 6) O. Matsuda and O. B. Wright, 'Ultrafast spectroscopy using ultrashort acoustic pulses generated and detected by picosecond light pulses', Kogaku (Jpn. J. Optics) 34, No. 2, 69-74 (2005)
- 7) T. Tachizaki, O. Matsuda, T. Fukui, J. J. Baumberg, and O. B. Wright, 'Acoustic phonon pulse generation and detection in GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum wells', phys. stat. sol. (c) 1, pp. 2749-2752 (2004)
- 8) O. Matsuda and O. B. Wright, 'Laser picosecond acoustics in a two-layer structure with oblique probe light incidence', Ultrasonics 42, 653-656 (2004)
- 9) T. Saito, O. Matsuda, and O. B. Wright, 'Picosecond acoustics phonon pulse generation in nickel and chromium', Phys. Rev. B 67, 205421-1-7 (2003)
- 10) Y. Sugawara, O. B. Wright and O. Matsuda, 'Real-time imaging of surface acoustic waves in thin films and microstructures on opaque substrates', Rev. Sci. Instr. 74, 519-522 (2003)
- 11) O. Matsuda and O. B. Wright, 'Laser picosecond acoustics with oblique probe light incidence', Rev. Sci. Instr. 74, 895-897 (2003)
- 12) Y. Sugawara, O. B. Wright and O. Matsuda, 'Watching ripples on crystals with a Sagnac interferometer', Opt. Photon. News 13, 20 (2002)
- ⑬ O. Matsuda and O. B. Wright, 'Reflection and transmission of light in multilayers perturbed by picosecond strain pulse propagation', J. Opt. Soc. Am. B 19, 3028-3041 (2002)
- 14) Y. Sugawara, O. B. Wright, O. Matsuda, M. Takigahira, Y. Tanaka, S. Tamura and V. E. Gusev, 'Watching ripples on crystals', Phys. Rev. Lett. 88, 185504-1-4 (2002)
- 15) O. Matsuda and O. B. Wright, 'Laser picosecond acoustics in multilayer structures', Ultrasonics 40, 753-756 (2002)
- 16) Y. Sugawara, O. B. Wright, O. Matsuda and V. E. Gusev, 'Spatiotemporal mapping of surface acoustic waves in isotropic and anisotropic materials', Ultrasonics 40, 55-59 (2002)
- 17) O. Matsuda, I. Ishii, T. Fukui, J. J. Baumberg and O. B. Wright, 'Wavelength selective photoexcitation of picosecond acoustic-phonon pulses in a triple GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum well structure', Physica B 316-317C, 205-208 (2002)

⑨研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。)

- 18) T. Saito, O. Matsuda and O. B. Wright, 'Ultrafast acoustic phonon pulse generation in chromium', Physica B 316-317C, 304-307 (2002)
- 19) O. B. Wright, R. Li Voti, O. Matsuda, M. C. Larciprete, C. Sibiliala and M. Bertolotti, 'Photothermal probing of inhomogeneously modulated transparent thin films', J. Appl. Phys. 91, 5002-5009 (2002).
- 20) O. B. Wright, B. Perrin, O. Matsuda, V. E. Gusev, 'Ultrafast carrier diffusion in gallium arsenide probed with picosecond acoustic pulses', Phys. Rev. B 64, 081202(R) (2001)

国際会議

- 1) O. B. Wright, 'A menagerie of phonon wave packets generated with ultrashort optical pulses', 2005 Gordon Research Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Trieste, Italy, June 26-July 1, 2005
- 2) O. B. Wright, 'Real time imaging of surface acoustic waves', 1st International Symposium on Nanovision Science, Hamamatsu, Japan, Feb. 14-15, 2005
- 3) O. Matsuda, T. Tachizaki, T. Fukui, J. J. Baumberg and O. B. Wright, 'Picosecond acoustics in semiconductor quantum wells', Photonics West, San Jose, Jan. 22-27, 2005
- 4) O. Matsuda, D. H. Hurley, K. Shimizu and O. B. Wright, 'Generation and detection of picosecond shear acoustic phonons in thin films', 11th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter, St. Petersburg, Russia, July 25-30, 2004
- 5) T. Tachizaki, O. Matsuda, T. Fukui, J. J. Baumberg and O. B. Wright, 'Acoustic phonon pulse generation and detection in GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum wells', 11th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter, St. Petersburg, Russia, July 25-30, 2004
- 6) O. Matsuda, K. Aoki, T. Tachizaki and O. B. Wright, 'Direct measurement of ultrafast surface displacement in laser picosecond acoustics', 13th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Rio de Janeiro, Brazil, July 5-8, 2004
- 7) O. B. Wright, T. Tachizaki, O. Matsuda, T. Fukui and J. J. Baumberg, 'Probing electron wavefunctions in quantum wells using ultrafast coherent acoustic phonon generation', Conference on Lasers and Electro-optics, International Quantum Electronics Conference, San Francisco, USA, May 16-21, 2004
- 8) O. B. Wright, 'Laser picosecond acoustics in thin films, multilayers and nanostructures', International Symposium on Nanotechnology for Photonics and Optoelectronics, Tokyo, Japan, March 5-6, 2003
- 9) O. Matsuda, T. Fukui, M. Akabori and O. B. Wright, 'Ultrafast carrier dynamics in a GaAs slab probed by acoustic phonon generation', 26th International Conference on the Physics of Semiconductors, Edinburgh, UK, 2002
- 10) O. Matsuda and O. B. Wright, 'Laser picosecond acoustics with non-normal probe incidence', 12th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Toronto, Canada, 2002
- 11) O. Matsuda and O. B. Wright, 'Analysis of laser picosecond acoustics signals in arbitrary transparent and opaque multilayer structures', Int. Congress on Acoustics, Rome, Italy, 2001

⑨研究成果の発表状況（続き）（この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）、及び国際会議、学会、特許等の発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に○を、また研究代表者に下線を付してください。）

- 12) O. Matsuda, I. Ishii, T. Fukui, J. J. Baumberg and O. B. Wright, 'Wavelength selective photoexcitation of picosecond acoustic phonon pulses in a triple GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum well structure', 10th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter, Hanover, New Hampshire, USA, 2001
- 13) O. B. Wright, B. Perrin, O. Matsuda and V. E. Gusev, 'Laser generation of picosecond acoustic pulses in bulk GaAs', Ultrasonics International, Delft, The Netherlands, 2001
- 14) Osamu Matsuda and Oliver B. Wright, 'Laser picosecond acoustics in multilayer structures', Ultrasonics International, Delft, The Netherlands, 2001
- 15) O. B. Wright, I. Ishii, T. Fukui, J. J. Baumberg and O. Matsuda, 'Wavelength selective photoexcitation of picosecond acoustic phonon pulses in a GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum well structure', 8th International Workshop on Femtosecond Technology, Tsukuba, Japan, 2001

学会

- 1) O. B. Wright, 'Challenges for inspecting nanodevices and nanosystems', FIS conference on Future Integrated Systems, Cambridge, Aug. 8-11, 2005
- 2) O. B. Wright, 'Ultrasonic generation with ultrashort laser pulses', 25th Annual Meeting of the Laser Society of Japan, Kyoto, Japan, Jan. 20-21, 2005
- 3) O. B. Wright, 'Real time imaging of surface acoustic waves on crystals and microstructures', 25th Symposium on Ultrasonic Electronics, Sapporo, Japan, Oct. 27-29, 2005
- 4) T. Tachizaki, O. Matsuda, T. Fukui, J. J. Baumberg and O. B. Wright, 'Terahertz ultrasonic generation and detection in GaAs/AlGaAs quantum wells', 25th Symposium on Ultrasonic Electronics, Sapporo, Japan, Oct. 27-29, 2005
- 5) T. Sasajima, T. Tachizaki, O. Matsuda, M. Akabori, T. Fukui and O. B. Wright, 'Ultrafast dynamics of photoexcited carriers in GaAs investigated by laser picosecond acoustics', 25th Symposium on Ultrasonic Electronics, Sapporo, Japan, Oct. 27-29, 2005
- 6) O. B. Wright, 'Ultrafast probing of phonon wavepackets with Sagnac interferometry', Annual Meeting of the Chinese Optical Society, Hangzhou, China, April 15-16, 2004
- 7) O. Matsuda, T. Fukui, M. Akabori and O. B. Wright, 'Ultrafast carrier dynamics in a GaAs air gap structure probed by picosecond phonon pulses', Annual Meeting of the Physical Society of Japan, Sendai, Japan, March 28-31, 2003
- 8) O. B. Wright, B. Perrin, O. Matsuda and V. E. Gusev, 'Ultrashort timescale carrier diffusion in GaAs probed with picosecond acoustic pulses', Autumn Conference of the Physical Society of Japan, Tokushima, Japan, 2001
- 9) O. Matsuda, I. Ishii, T. Fukui, J. J. Baumberg, and O. B. Wright, 'Wavelength selective light pulse excitation of picosecond acoustic phonon pulses in GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum well structures', Autumn Conference of the Physical Society of Japan, Tokushima, Japan, 2001