

GaAs 薄膜中弱閉じ込め励起子のサブピコ秒光カー効果応答

菅野敦史^{A,B}、カトフ・レドワン^{A,B}、小島磨^{A,B,C}、早瀬(伊師)潤子^{A,B}、
土屋昌弘^{A,B}、井須俊郎^{A,B,D}

^A 情報通信研究機構、^BCREST-JST、^C神戸大学大学院工学研究科、
^D徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部

Sub-picosecond Response of optical Kerr effect induced by weakly confined exciton in GaAs thin films

A. Kanno^{A,B}, R. Katouf^{A,B}, O. Kojima^{A,B,C}, J. Ishi-Hayase^{A,B},
M. Tsuchiya^{A,B}, T. Isu^{A,B,D}

^A National Institute of Information and Communications Technology

^B CREST, Japan Science and Technology Agency

^C Department of Electrical and Electronics Engineering, Kobe University

^D Institute of Technology and Science, The University of Tokushima

We investigate fast response of optical Kerr effect induced by weakly confined exciton. In spite of the long exciton lifetime of 14 ns, observed decay time of optical Kerr effect was 200 fs under 100-fs pulse laser excitation. For confirmation of all-optical switching, fast response time of the optical Kerr effect using two sequential pump-pulses was observed. The signals with pulse separation of 800 fs, which corresponds to the switching speed of 1.25 Tbps, were observed.

1. 動機・背景

半導体量子構造中の励起子では高速応答・高非線形性が期待されており[1]、特に、超短パルスレーザーと整合性が高い GaAs 系半導体では高速な光応答の研究に適しているため、活発な研究がなされている。中でも「弱閉じ込め励起子系」では、その閉じ込め長から光の波長と励起子の波動関数の結合が非局所的となり、長波長近似が適用できない新奇な系[2]として理論・実験の両面から検証が行なわれている。特に、エネルギー・サイズ二重共鳴 (Non-locality Induced Double Resonance of Energy and Size、NIDORES) 条件下における弱閉じ込め励起子系では、理論的に超高速な輻射緩和および高非線形性が期待されており、それを裏付ける実験結果も報告されている[3-4]。著者らは GaAs 薄膜中に閉じ込められた NIDORES 条件下弱閉じ込め励

起子の励起子密度ダイナミクスに関する報告を行ってきた。弱閉じ込め励起子の寿命は数 ns と非常に長いことが判明したが[5]、四光波混合 (Four Wave Mixing、FWM) による非線形光学測定では高速な応答が得られ[6]、長寿命の励起子の存在下においても非線形応答を利用することで高速な応答を得ることが可能であることが示された。そこで本研究では、超短パルス光を用いた光カー効果による全光スイッチ動作の実験的検証を行なった。

2. 試料・実験方法

本研究では、分子線エピタキシー法により作製した活性層 GaAs 110 nm、障壁層 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 5nm のダブルヘテロ構造を 3 層含む試料を用いた。

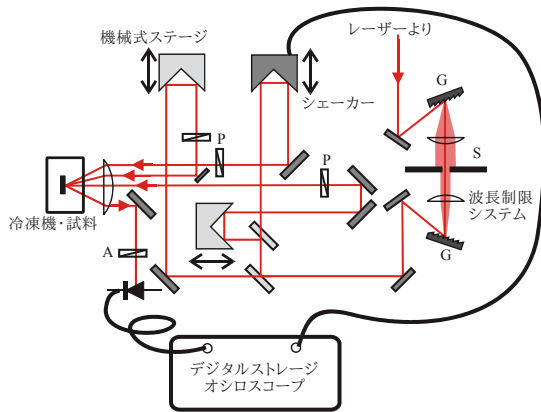


図 1 3 パルス入射時間分解光カー効果測定系の概略図。P:偏光子、A:検光子、S:スリット、G:回折格子を表す。

光カー効果のダイナミクスを観測する時間分解測定にはポンプ・プローブ法を用いたシステムを構築した(図1)。直線偏光のポンプ光に対し45度回転させた直線偏光のプローブ光を入射し、ポンプ光による光誘起屈折率変化を反射プローブ光の偏光変化により計測するシステムである。ポンプ・プローブ光間の時間差を制御することにより、光カー効果のダイナミクス観測が可能となる。本システムでは、多連パルス入力を行なうため、3 台の光路長可変デバイスを利用した。微弱な偏光変化の検出には、機械的光チョップを用いた和周波ロックイン検波法、および、光路長を周期的に変化させるシエカーと高速フォトダイオード、デジタルストレージオシロスコープを用いた高速積算検出法の 2 手法を適宜用いた[7]。レーザー光源としてモード同期チタンサファイアレーザー(繰り返し 80 MHz、パルス幅 100 fs)を用い、試料は熱伝導型冷凍機中で 5 K に保った。レーザースペクトル幅を変化させるため、回折格子対およびスリットを用いた分散補償型波長制限システムを入射系に組み込んだ。プローブ光強度はポンプ光強度の 1/10 に設定した。

励起子寿命の測定には 4 MHz 動作のモード同期チタンサファイアレーザーを光源とし、試料

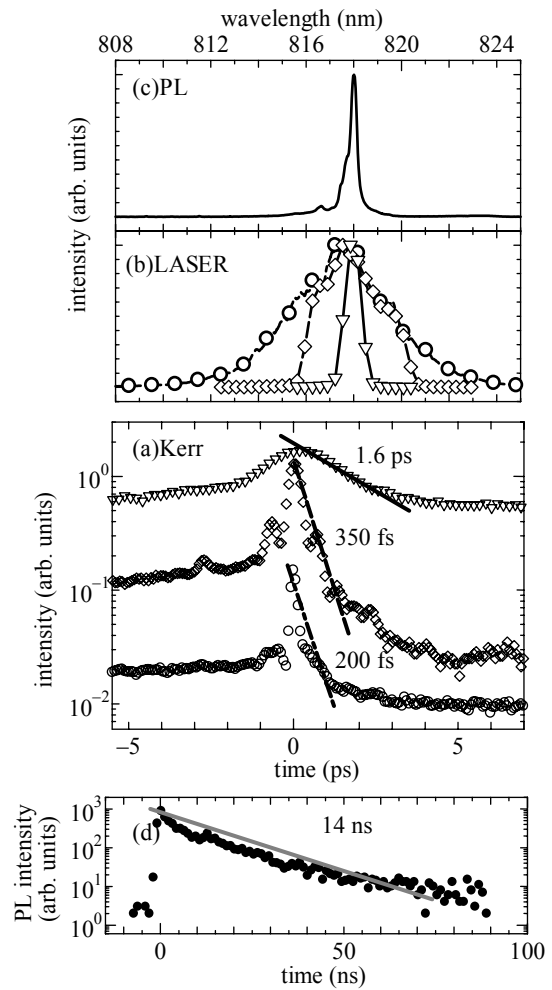


図 2 (a)時間分解光カー応答。各シンボルは(b)レーザースペクトルのシンボルに対応する。(a)発光スペクトルも同時に示す。(d)ストリークカメラにより測定した時間分解発光の結果を示す。

からの発光を分光器接続型ストリークカメラにより測定した。

3. 実験結果・考察

光カー効果の時間応答を観測したところ、入射レーザーパルスの時間幅に相当した高速な光応答が観測された(図 2)。ポンプ光強度は 100 μW とした。特に、フェムト秒パルス入射時には 200 fs の緩和時間を持つ超高速な応答が得られた。 $t > 5$ ps の領域における信号挙動の変化は光

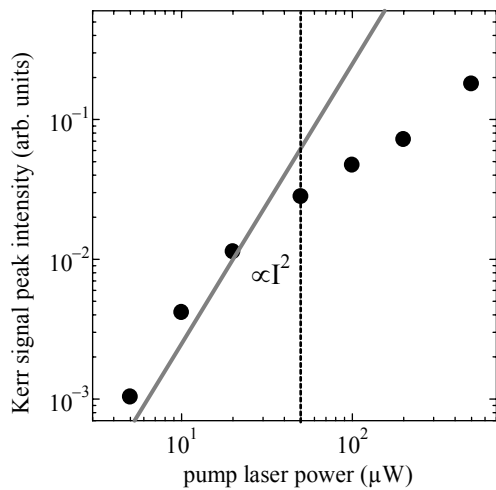


図 3 光カー効果のピーク強度の励起ポンプ光強度依存性。実線は強度の自乗比例のガイドラインを、点線は 50 μW のガイドラインを示す。

生成励起子による反射率変化と考えられる。励起子の緩和時間はストリークカメラによる測定から 14 ns 程度と見積もられており矛盾しない。光カー応答の緩和時間と密度緩和時間に 4 桁以上のギャップがあるため、両者の緩和過程の違いが推測される。光カー効果は直線偏光誘起による一軸性の屈折率変化に起因するため、その緩和過程の一つとして励起子分極の面内配向緩和が挙げられる。これは量子ドットの形状異方性による緩和過程として議論された過程のひとつであるが、密度緩和とは独立した過程であるため、上記の緩和速度の違いが明瞭に観測されたと考えられる[8]。

光カー効果のポンプ光励起強度依存性を図 3 に示す。弱励起条件では光強度の自乗に比例した挙動を示すが、50 μW 以上の領域では飽和する様子が見て取れる。これは光生成励起子の密度上昇により、励起子・励起子散乱などが引き起こされるためと考えられる。FWM による非線形応答の報告においても、100 μW を超える励起強度では応答強度の飽和が観測されており矛盾しな

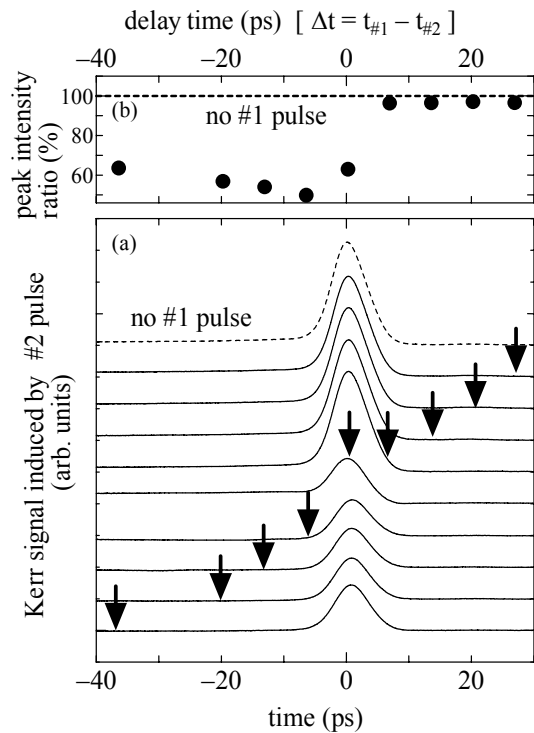


図 4 2 連パルス入力時における第 2 ポンプパルスによる光カー効果の(a)時間応答と(b)入射時間差によるピーク強度の変化を示す。矢印は第 1 ポンプパルス(#1 pulse)の入射時間を示し、点線は第 1 ポンプパルスの入射がない場合の第 2 ポンプパルスによる光カー応答・強度を示す。

い。

長寿命励起子による残留励起子密度が光カー効果に及ぼす影響をピコ秒 2 連パルス入射により調査した。具体的には第 1 ポンプパルスの遅延時間を変化させ、第 2 ポンプパルスに対する光カー応答の変化を観測した(図 4)。励起子密度緩和時間 14 ns は、励起レーザーの繰り返し 80 MHz(=12.5 ns)よりも長いため、励起子蓄積効果が期待される。先行パルス(第 2 パルス)入射による残留励起子の影響と考えられる光カー信号強度の減少が観測されたが、時間プロファイル形状の変化は見られず高速な応答が観測された。FWM でも同様の残留励起子による蓄積効果が

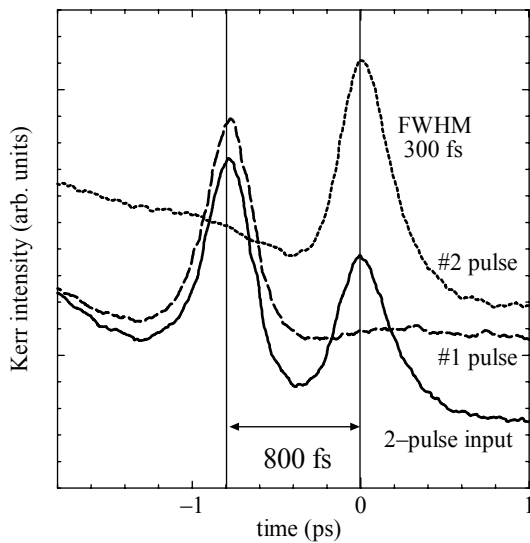


図5 2連サブピコ秒パルス入射時の光カー応答の様子。半値幅 300 fs の入射パルスを 800 fs 間隔で入射した。

確認されておりよい一致をみせる[9]。前述の緩和過程の違いにより、励起子蓄積効果に因らず光カー効果の高速応答が維持されると考えられる。

サブピコ秒 2 連パルスを用いた光カースイッチ動作のデモンストレーションとして、プローブ光時間軸走査による時間分解光カー効果を観測した(図5)。プローブ光強度は 100 μW 、プローブ光強度は 50 μW 、パルス幅は 300 fs とした。2 連ポンプパルス入力(パルス間隔 800 fs)に対して、第 2 パルスの強度減少は見られるものの、明瞭な分離を持つ高速な応答が確認された。このパルス間隔は 1.25 Tbps に対応し、1 Tbps 超の光カースイッチ速度が達成された。

4. まとめ

GaAs 薄膜中の弱閉じ込め励起子の時間分解光カー効果測定において、フェムト秒パルス励起時にサブピコ秒に達する超高速な応答が得られた。励起子密度寿命 14 ns に比べ 4 桁以上速く、密度緩和と光カー効果の緩和過程の違いによるものと考えられる。光生成による励起子蓄積効果

にも関わらず、高速な光カー応答速度の維持が確認された。2 連続パルス入射時、特に 800 fs のパルス間隔において、時間プロファイル形状の変化が無いことから、新奇物理現象である弱閉じ込め励起子系を利用した全光スイッチの検討が可能になると期待される。

5. 参考文献

- [1] J. Shah, “Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures”, (Springer-Verlag, Berlin, 1996).
- [2] H. Ishihara and K. Cho, Phys. Rev. B **53**, 15823 (1996).
- [3] H. Ishihara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 17402 (2002).
- [4] K. Akiyama *et al.*, Appl. Phys. Lett. **75**, 475 (1999).
- [5] 菅野 他, 第 17 回光物性研究会, pp. 237 (2006).
- [6] O. Kojima *et al.*, phys. stat. sol. (c) **4**, 1731 (2007).
- [7] G. C. Cho *et al.*, Phys. Rev. Lett. **65**, 764 (1990); B.-R. Hyun *et al.*, Phys. Rev. B **56**, R12780 (1997).
- [8] T. Flissikowski *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 3172 (2001).
- [9] O. Kojima *et al.*, Proc. 34th Int. Symp. Compound Semiconductors, pp. 81 (Kyoto, Oct. 2007) MoD-P1.