

サブバンド遷移を用いた超高速光スイッチ

野田 進・浅野 卓

社会全般の情報化の進展に伴い、幹線系統の光ファイバー回線において要求される膨大な通信容量を従来の電気的な外部変調器方式のみで実現することは、今後困難になっていくと考えられる。電気的方式の限界を打破する方法として、(1) 波長領域において情報の高密度化を行う波長分割多重方式および、(2) 外部電気回路を必要としない超高速光-光変調デバイスを開発することにより、時間領域でのさらなる情報の高密度化を行う光時分割多重方式、さらには(1)と(2)を同時に用いる方法に大きな期待がもたれている。

このような背景のもと、われわれはピコ～サブピコ秒レベルの光-光変調を実現することを目的に半導体ナノ量子井戸構造中のサブバンド間遷移を利用する方式の研究を進めてきた。本稿では本変調方式の原理とその超高速動作特性について紹介する。

半導体量子井戸のようなナノレベルの閉じ込め構造中では、電子のエネルギーバンドは複数のサブバンドに分裂する。このため、1つのバンドの内部において、サブバンドの間の光学的電子遷移が可能になる¹⁾。このサブバンド間遷移では、高エネルギーのサブバンドに光励起された電子が、縦型光学(LO)フォノン散乱を介して基底サブバンドへと緩和できるため、非常に高速のキャリア緩和時間(～ピコ秒程度)を示す。われわれの提案する変調方式²⁾では、図1(A)に示すような伝導帯に2つのサブバンド(CB1, CB2)が存在し、かつn型不純物添加によりCB1の底付近が電子で占有されるように設計された量子井戸構造を用いる。また図1(A)に示すように、CB1-CB2間に共鳴する光(サブバンド間光)を制御光とし、VB1-CB1間に共鳴する光(バンド間光)を信号光とする。添加電子がCB1に存在するため、この構造にサブバンド間光を照射せずにバンド間光のみを透過させた場合、

バンド間光の吸収は抑制されている(図1(A)-(a))。しかし、ここでサブバンド間光を照射しCB1の電子をCB2に光励起すると、図1(A)-(b)に示すようにバンド間吸収の抑制が解除されて透過するバンド間光が減少する。サブバンド間光の照射を停止すると、前述のように～ピコ秒程度で電子はCB1に緩和するため、超高速の変調速度が期待できる。

われわれはこれまでに本変調方式について、密度行列を用いた理論的検討²⁾、および(In)GaAs/Al(Ga)Asを用いた変調動作の原理実証³⁾や変調速度の間接的評価等⁴⁾、種々の検討を行ってきた。ここでは最新の成果として、サブピコ秒の時間分解能で変調動作を観測した結果を紹介する。試料はGaAs(59 Å)/Al_{0.35}Ga_{0.65}As(150 Å):Si(1.5×10¹⁸ cm⁻³)からなる多重量子井戸(150周期)をもつ表面入射型の変調デバイスである。光パラメリックアンブ(パルス幅～120 fs)を用いて制御光パルス(波長5～7 μm:CB1-CB2)および信号光パルス(波長800 nm:

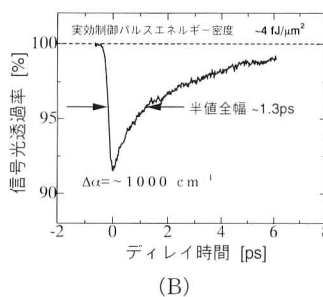
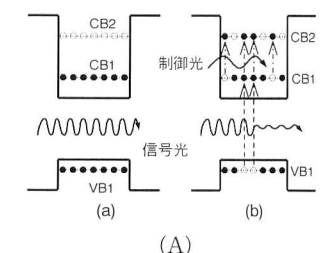


図1 (A) サブバンド間光(制御光)によるバンド間光(信号光)の変調の原理。(a) 制御光あり、(b) 制御光なし。(B) 変調実験結果の一例。

京都大学大学院電子物性工学専攻科(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: snoda@kuee.kyoto-u.ac.jp

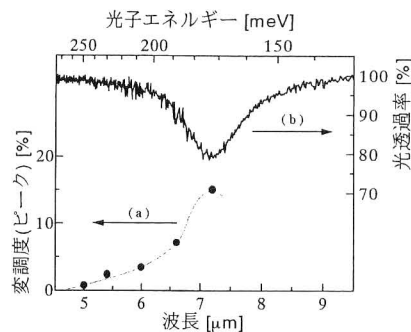


図2 (a) 変調度ピークの制御光波長依存性 (長波長側は光源の制限のため測定できていない), (b) FTIR により測定した試料のサブバンド間吸収スペクトル。

VB 1-CB 1) を生成し, 2 色ポンプ・プローブ法により変調特性を測定した. 図 1(B) に制御光パルスの中心波長をサブバンド間吸収ピーク (7.2 μm) に一致させた場合の測定結果の一例を示す. この変調は半値幅で 1.3 ps 程度の短時間で回復しており, 本方式により ~ 1 ps 程度の超高速変調デバイスが実現可能なことを示している.

次に制御光パルスの中心波長を 5 \sim 7 μm と変化させて変調特性の測定を行った (制御光エネルギー密度は 8 fJ/ μm^2 に固定). 測定された変調の深さ (ピーク値) の制御光波長依存性を試料のサブバンド間吸収スペクトルと対比させて図 2 に示す. 両者はよく一致しており, 観測された光-光変調がサブバンド間吸収に起因することを明瞭に示している.

図 3 に制御光パルスの中心波長を 7.2 μm に固定し, 制御光パルスのエネルギー密度を 2 \sim 140 fJ/ μm^2 と変化させた場合の変調特性の変化を示す. 同図から制御光が弱くなるに従って変調は浅くなるが, その回復は速くなることがわかる. この緩和時間の制御光強度依存性は電子のバンド内緩和過程で放出されるフォノンの蓄積に伴う緩和の遅れに起因するものと考えられる⁵⁾.

以上の結果から, 本方式では制御光パルスのエネルギー密度を数 fJ/ μm^2 程度と弱くすることでフォノン蓄積の影響を回避し, かつ導波路構造等を用いて相互作用長を増して変調を深くする方法が有効と考えられる. たとえば, このナノ量子構造を活性層とする長さ 100 μm 程度, 閉じ込め係数 0.4 程度の導波路構造を作製した場合, 1 pJ 程度の低スイッチングエネルギーで半値幅 1 ps 程度かつ変調深さ 99% の光-光スイッチングを達成できるデバイスとなることが予想される⁵⁾.

さらにわれわれは, フォノン蓄積の影響を避けてより高

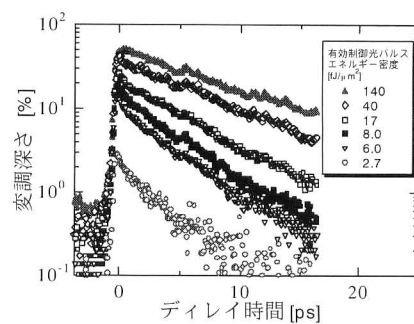


図3 信号光の変調深さの制御光強度依存性.

速な変調を実現するため CB 2 の電子密度の変化を利用した新方式の検討, サブピコ秒のキャリア緩和時間が期待できる GaN/AlGaN 量子井戸の検討など, 種々の展開を行いつつある. またわれわれの成果⁶⁾ を含めサブバンド間遷移波長の短波長化も盛んに研究されており, 通常の半導体レーザーが使用可能な 1.55 μm 程度の遷移波長も達成され⁷⁾, 制御光の光源の問題も解決されつつある.

文 献

- 1) L. C. West and S. J. Eglash: "First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well," *Appl. Phys. Lett.*, **46** (1985) 1156-1158.
- 2) S. Noda, T. Uemura, T. Yamashita and A. Sasaki: "All-optical modulation using an n-doped quantum-well structure," *J. Appl. Phys.*, **68** (1990) 6529-6531.
- 3) S. Noda, T. Yamashita, M. Ohya, Y. Muromoto and A. Sasaki: "All-optical modulation for semiconductor lasers by using three energy levels in n-doped quantum wells," *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (1993) 1640-1647.
- 4) T. Asano, S. Noda and K. Tomoda: "Pump & probe measurement of intersubband relaxation time in short wavelength intersubband transition," *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 1418-1420.
- 5) T. Asano and S. Noda: "Ultrafast all-optical modulation using intersubband transition in GaAs/AlGaAs," *Proc. SPIE, Ultrafast Phenomena in Semicond. IV, San Jose*, **3940** (2000) 146-158.
- 6) T. Asano, S. Noda, T. Abe and A. Sasaki: "Investigation of short wavelength intersubband transitions in InGaAs/AlAs quantum wells on GaAs substrate," *J. Appl. Phys.*, **82** (1997) 3385-3391.
- 7) T. Mozume, H. Yoshida, A. Neogi, K. Asakawa and M. Kudo: "Near-infrared intersubband transitions in InGaAs/AlAsSb coupled double quantum wells grown by molecular beam epitaxy," *Proc. of 25th Int. Symp. on Compound Semicond.*, Nara (1999) pp. 131-136.

(2000年5月8日受理)