

サブバンド間遷移超高速光スイッチの研究開発 (041403001)

Development of ultrafast optical switches using intersubband transition

研究代表者

秋本良一 独立行政法人 産業技術総合研究所

Ryoichi Akimoto National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

研究分担者

秋田一路[†] コンガンウェイ[†] リビンシェン[†]

Kazumichi Akita[†] Guangwei Cong[†] Bingsheng Li[†]

[†]独立行政法人 産業技術総合研究所

[†]National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

研究期間 平成 16 年度～平成 20 年度

概要

半導体量子井戸中のサブバンド間遷移においては、サブバンド間のキャリアの緩和時間がサブピコ秒～数ピコ秒と短いため 1Tb/s 級の超高速光スイッチへの応用が期待されている。我々はワイドギャップ II-VI 族半導体ベースの量子井戸 (CdS/ZnSe/BeTe) において通信波長帯のサブバンド遷移を実現し、これをスイッチ活性層とするチャンネル導波路型デバイスを作製することに成功した。この光スイッチデバイスにおいて、低エネルギー動作可能なサブピコ秒の光ゲート動作を実証した。これにより 1Tb/s 程度の光時間多重信号の信号処理に応用可能であることを示した。将来の大容量フォトリックネットワークの構築に必要な超高速光スイッチとして応用できるポテンシャルを有している。

Abstract

Intersubband transition is promising for ultrafast optical switch of 1Tb/s band width due to fast carrier relaxation time. We have developed all-optical switches using intersubband transition in wide-gap II-VI-based CdS/ZnSe/BeTe quantum wells in a channel waveguide structure. Sub-ps optical gate with low operation energy is demonstrated, showing a capability of processing 1Tb/s optical time-domain multiplexing signal that will be used in future high-capacity photonics network.

1. まえがき

近年インターネットをはじめとした情報トラフィックは急増しており、大容量・高速通信を可能とするフォトリックネットワークの構築は急務の課題となっている。現在、大容量光通信を実現するためチャンネルの数を増やす努力とともに、チャンネル当たりの伝送速度を上げる努力もなされている。しかしチャンネル当たり約 160Gb/s (ギガビット/秒) 以上の伝送速度においては、電子デバイスの速度限界から現行の送受信の信号処理を電気回路で行う方式をそのまま続けていくことは困難であると考えられている。そのため 160Gb/s 以上の信号処理においては光信号を電気信号に変換せずにそのまま信号処理を超高速に行うことが必要となる。

超高速の光信号処理に向けて、種々の全光スイッチの研究が行われているが、量子井戸の伝導帯におけるサブバンド間遷移(ISBT)の吸収飽和を利用した全光スイッチは、サブバンド間の電子緩和時間が短いことから超高速の動作が可能で、全光スイッチとして期待される。現在 InGaAs/AlAsSb、GaN/AlN、ZnSe/BeTe 等の伝導帯オフセットが十分大きく光通信波長帯のサブバンド間遷移が実現できる材料系により研究が進められている。本研究開発では、高速動作と低エネルギー動作が期待できる II-VI 族半導体の CdS/ZnSe/BeTe 量子井戸を用いたサブバンド間遷移スイッチの研究開発を進めてきた。

2. 研究内容及び成果

サブバンド間遷移を 1.55 μm 通信波長帯 (光子エネルギー 0.8eV に相当) において実現するためには、半導体量子井戸構造の井戸層と障壁層の材料間の伝導帯のバンドオ

フセットが $\sim 2\text{eV}$ 程度と十分に深い必要がある。CdS、ZnSe、BeTe においてはそれぞれの材料の組み合わせがタイプ II 型のバンド配置をもつことにより、伝導帯のバンドオフセットが非常に大きくなるという特徴がある。伝導帯バンドオフセットは ZnSe/BeTe 間では 2.3eV であり、CdS/BeTe 間では、3.1eV にも達する。禁制帯幅の大きな材料系であるため、2 光子吸収を無視できることも大きな特徴である。さらに、これらの材料は成長基板となる GaAs との格子不整合が小さく、ZnSe と BeTe は、GaAs 基板に対する格子不整合がそれぞれ、+0.25%、-0.55% である。膜の成長は分子線エピタキシー法を用いた。

光スイッチ用の光導波路を実現するためには、光導波路構造が必要となる。この際、光導波路のクラッド層材料として、4 元混晶材料である ZnMgBeSe を利用した。この材料は、GaAs 基板上に格子整合条件で成長させつつ、禁制帯幅を 2.7~4.5eV の範囲で変化させることが可能であり、組成を適切に選べば光導波路の構成材料として機能させることが可能である。実際このような導波路構造を試作し、サブピコ秒の光ゲート動作を実現した。しかし 10pJ 以上の大きな動作エネルギー必要であり、低エネルギー動作化が課題であった。[誌上発表 1]

サブバンド間遷移スイッチの動作原理では、吸収飽和が生じてスイッチが ON 状態になる。従って、いかに低い入力エネルギーで吸収飽和を起こさせるかがポイントになる。その方法の一つとして、光導波路内の光強度を増大させ、低い入力エネルギーで吸収飽和を生じさせることが考えられる。このために、(1) 分離閉じ込め構造の導入、(2) 狭メサ化によるモード断面積の縮小、(3) 導波路入出力における光結合の向上、以上の 3 点の方策を検討した。

分離閉じ込め構造を採用すると、光導波路の積層膜面に垂直方向の光強度の最も強い部分だけ利用して効率的に吸収飽和を起こさせることが期待できる。従来のコア層の構造では、吸収飽和を起こす各(CdS/ZnSe)/BeTe 量子井戸間を ZnSe のスペーサーで隔離することによりコアの厚みと吸収量を調整していた。これに対して分離閉じ込め構造では、スペーサーを除去し多重量子井戸をコアの中央に配置する。その上下に光閉じ込め層となる $Zn_{1-x}Be_xSe$ を配置し、全体の厚みがコア層として最適な寸法になるように設計した。ここで $Zn_{1-x}Be_xSe$ の組成は GaAs 基板に格子整合するように結晶成長している。一般的に上記のような構造を他の材料系に適用すると、コア中心に障壁材料の割合が集中するため、この部分の屈折率の低下が避けられない。一方、障壁材料である BeTe の屈折率は、II-VI 半導体導波路を構成するどの材料よりもその値が大きいという特異な性質がある。よって分離閉じ込め構造を作製してもコアの中心の屈折率が下がらないという有利な特徴がある。図1のSEM像に示すように、カットオフ近傍の1 μ mの導波路幅を持ち、さらに入出力部にテーパ構造を有するメサ型の導波路を作製した。【誌上発表2】

以上の光導波路構造の光閉じ込め効果を確認するため、吸収飽和特性を評価した。波長 1565nm のサブピコ秒光パルスを先路加工された分散シフト偏波保持ファイバーを通じて光導波路に入射し測定を行った。光導波路へ入力するパルスのエネルギーを増大させるにしたがい、吸収飽和により挿入損失は急速に減少し、20dB 以上の吸収飽和が観測された。次に吸収飽和とエネルギーの波長依存性について測定した。図2は10dBの吸収飽和を生じさせるのに要するパルスエネルギーの入射レーザー波長依存性である。吸収飽和エネルギーは1565nm 付近で最低となり、この波長からの離調が大きくなるにつれてエネルギーが増大していくことがわかる。この光導波路においては、サブバンド間遷移吸収バンドのピーク波長が1560nm であることから、共鳴効果が顕著に現れていることがわかる。ISBT 共鳴付近の1550~1580nm の波長範囲において10dBの吸収飽和に必要なパルスエネルギーは2~2.2psと他材料系と比較して非常に低い値であることがわかった。

光ゲートの時間応答を図3に示す。制御光と信号光の両パルスが光導波路内で一致するとき、吸収飽和により透過信号光の光強度が増大することを観測した。時間応答波形の半値幅は0.36ps であるのでサブピコ秒のゲートスイッチ動作を生じていることを確認した。この時間応答の半値幅0.36ps は測定系の時間分解により決まっているものと考えられる。別の実験によりキャリアの緩和時間は0.15~0.2ps と見積もられているので、本測定系では観測できなかったと考えられる。スイッチ消光比は制御光パルスエネルギーに対してほぼ線形に10dB 程度まで増大する。10dBのスイッチ消光比を得るのに必要な、ファイバー入力時の制御光エネルギーは約6.8pJ であった。【誌上発表3】

3. むすび

ワイドギャップII-VI族半導体量子井戸のサブバンド間遷移を用いて、光通信帯で動作する光スイッチ導波路素子を開発した。本素子はサブピコ秒のゲート動作特性および数pJ の低エネルギー動作可能である。1Tb/s 程度の光時間多重信号の信号処理に応用可能であることを示した。将来の大容量フォトニックネットワークの構築に必要な超高速光スイッチとして応用できるポテンシャルを有することを実証した。

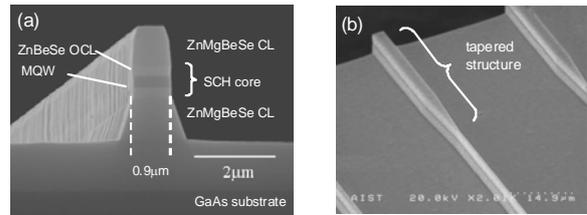


図1 導波路断面構造およびテーパ入出力部

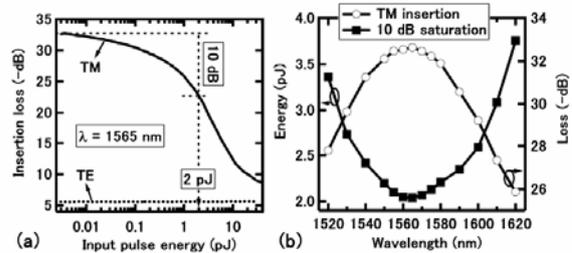


図2 吸収飽和特性および波長依存性

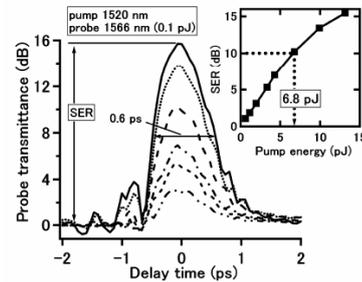


図3 光ゲート時間応答およびスイッチ消光比特性

【誌上発表リスト】

- [1]R. Akimoto, BS. Li, K. Akita, T. Hasama, “ Sub-picosecond saturation of intersubband absorption in (CdS/ZnSe)/BeTe quantum-well waveguides at telecommunication wavelength”, Appl. Phys. Lett., Vol.87, No.18, pp. 181104-1 - 181104-3 (2005年10月29日)
- [2]K. Akita, R. Akimoto, T. Hasama, H. Ishikawa, Y. Takanashi “Intersubband all-optical switching in sub- μ m high-mesa SCH waveguide structure with wide-gap II-VI-based quantum wells”, Electron. Lett., Vol.42, pp.1352-1353, (2006年11月1日)
- [3]G. W. Cong, R. Akimoto, K. Akita, T. Hasama, and H. Ishikawa, “Low-saturation-energy-driven ultrafast all-optical switching operation in (CdS/ZnSe)/BeTe intersubband transition”, Optics Express, Vol. 15, No.19, pp.12123-12130, (2007年9月1日)

【申請特許リスト】

- [1]秋田一路、秋本良一、導波路の作製方法（特願2008-242200）、日本、平成20年9月22日

【報道発表リスト】

- [1]“最速レベル半導体光スイッチ”、科学新聞、平成16年12月3日(金)
- [2]“200 フェムト秒以下の動作実現”、日刊工業新聞、平成16年11月1日(月)
- [3]“超高速半導体光スイッチ 産総研が試作に成功”、化学工業日報、平成16年11月1日(月)