

サブバンド間遷移素子を用いた多値位相変調信号光信号処理の研究開発 (101503011)

Optical signal processing of phase modulation signals by inter sub-band transition devices

研究代表者

鎌塚治彦 産業技術総合研究所

Haruhiko Kuwatsuka National institute of advanced industrial science and technology

研究分担者

秋本良一[†] 小笠原剛[†] 物集照夫[†] 土田英実[†] 牛頭信一郎[†]

Ryoichi Akimoto[†] Takashi Ogasawara[†] Teruo Mozume[†] Hidemi Tschida[†] Shinichirou Gozu[†]

[†]産業技術総合研究所

[†]National institute of advanced industrial science and technology

研究期間 平成 22 年度～平成 24 年度

概要

InP 基板上に他の通信用光素子とのモノリシック集積が可能な AlAsSb/InGaAs 多重量子井戸のサブバンド間遷移素子を用い、多値位相変調された光信号を、電気信号に変換せずに光信号のまま処理する光信号処理の研究開発を行った。AlAsSb/InGaAs 多重量子井戸サブバンド間遷移素子の効率を向上させ、波長変換、パルス圧縮、リタイミング等のフォトニックネットワークに不可欠な処理の実証や検証を行った。

1. まえがき

コア・メトロフォトニックネットワークで適用が拡大する多値位相変調光信号を超小型、低消費電力で処理するための技術の確立が必要とされている。超小型を実現するため、他の通信用光半導体素子や電子回路と集積可能で、低消費電力な技術を実現するため、パンプ動作が可能な新しい光半導体素子を用い、光パスネットワークシステムや、位相多値変調・光時分割多重複合システムにおいて不可欠な光信号処理技術の確立することを目的として研究を進めた。InP 基板上に他の通信用光素子とのモノリシック集積が可能な InGaAs/AlAsSb 多重量子井戸のサブバンド間遷移素子を用い、多値位相変調された光信号を、電気信号に変換せずに光信号のまま処理する光信号処理の研究開発を行った。サブバンド間遷移素子の効率を向上させ、波長変換、パルス圧縮、リタイミング等のフォトニックネットワークに不可欠な処理の実証や検証を行った。これにより、新しい光信号処理半導体素子の応用技術の確立できた。

2. 研究開発内容及び成果

高効率化に向けて InGaAs/AlAsSb サブバンド間素子における四光波混合のメカニズムの検討を行った。

InGaAs/AlAsSb 量子井戸においては、通常光通信システムの光デバイスに用いられる InGaAsP 系や AlInGaAs 系の量子井戸と異なり、伝導帯のバンド不連続が非常に大きく、サブバンド間遷移(ISBT)を 0.8eV と 1.55 μm 波長に対応するエネルギーに合わせることができる点にある。サブバンド間遷移は、TM 偏光の光のみ吸収する。一方、バンドギャップエネルギーは、0.8eV よりやや大きく設定されている。1.55 μm の TE 偏光の光に対しては透明となる。瞬時的な非線形応答を、緩和時間近似のもとで、密度行列で見積もった[1]。さらに、別の四光波混合のメカニズムとして、ISBTの実励起によるメカニズムを検討した。二つの TM 波が ISBT に吸収されると、そのビートにより伝導帯の電子の分布が振動し、その結果、バンド間遷移の分散カーブに変調がかかる。もうひとつの波である、TE 波に変調がかかり、新たな波が生じる。この過程は、SOA 中の四光波混合を生じさせるキャリア密度変調効果と同様に取り扱った。

図 1 に、三次非線形効果の計算結果を示す。TM の励起光と信号光の離調を横軸にとってある。実励起によるメカニズムは、瞬時的なメカニズムに比べて 5 桁以上大きな値であり、このメカニズムが支配的であることが分かる。実励起によるメカニズムの帯域は、ISBT の緩和時間の数 ps で制限されており、瞬時的なメカニズムの帯域は、伝導帯の底の電子状態の緩和時間の数 10fs で制限される。比較のため、SOA の $\chi^{(3)}$ の測定結果の一例をプロットしてあるが、実励起に比べて、一桁半ほど大きな値である。これは、SOA の場合、全ての波が、バンドギャップに共鳴しているのに対し、ISBT の場合は、2 波のみが共鳴し、2 波は、非共鳴であることによると考えられる。

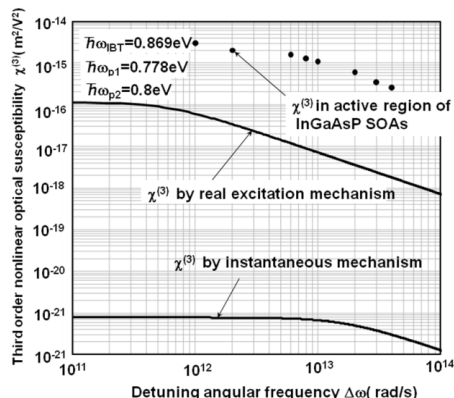


図 1 $\chi^{(3)}$ の励起光信号光離調依存性

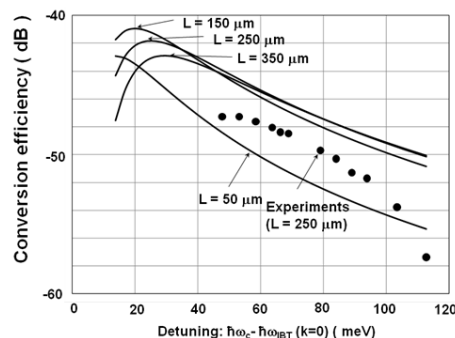


図 2 変換効率のバンドギャップ依存性

サブバンド間遷移素子の四光波混合は、光信号処理で従来用いられてきた光ファイバや半導体光増幅器の四光波混合と異なり、二波の TM 光が ISBT により強く吸収される一方、二波の TE 光はバンド間吸収が少なく四光波混合光が発生する状況になっている。この状況下での、四光波混合光の伝搬を解析した。図 2 に変換効率をバンドギャップと変換光エネルギー差に対して計算した結果を示す。短波化するに従って $\chi^{(3)}$ が増加し効率が改善するが、短波化によりバンド間吸収が強くなり過ぎると、効率は劣化することが分かった。

以上の検討に基づき、変換効率の改善に向けた設計指針の検討を行った。

- (1) 変換光とバンドギャップ差を 80meV から 30meV にすることにより、変換効率を 6dB 改善することが可能。
- (2) TE の励起光のパワーを、13dBm から 20dBm へ 7dB 増加することにより、変換効率の 7dB 改善が可能。
- (3) n のドーピング濃度を減少させることにより、ISBT の吸収係数を 250 cm^{-1} 100 cm^{-1} に減少させる。これにより、単位長さ当たりの TM 励起光の吸収量を、4dB 減らすことができる。TM の励起光のパワーを 13dBm から 17dBm へ、4dB の改善が可能。

これらにより、-48dB の変換効率を -31dB に改善できる。目標の -30dB の変換効率を、設計上ほぼ達成できる見込みであることが分かった。

サブバンド間遷移素子による多値位相変調信号光信号処理の実証を行った。

既存の評価装置に、送受信器や光学部品を追加して評価系を再構成し、DQPSK 信号の生成と受信を可能とすると同時に、既存素子の試作やモジュール化を行い、これらを用いて図 3 に示す 21.4Gbps 以上の DQPSK 信号の波長変換の実証を行った。1560nm 波長の DPSK 信号光を LN 変調器で作成し、この信号光と 1559.7nm 波長の TM 光と 1545nm 波長の TE 光を、信号光と一緒に ISBT 素子に入射して、四光波混合により、1456nm の波長の変換光を作り出す。図 4 には、波長変換前後の信号波形とビットエラー特性を示す。変換後に EYE 開口が得られており、2dB のパワーペナルティで変換ができています。サブバンド間遷移光導波路による位相変調信号の波長変換が原理的に可能であることが確認できた[3]。

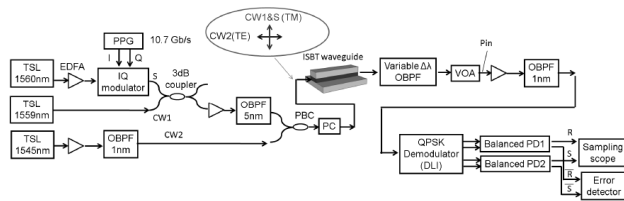


図 3 ISBT 導波路による位相信号の波長変換実験系

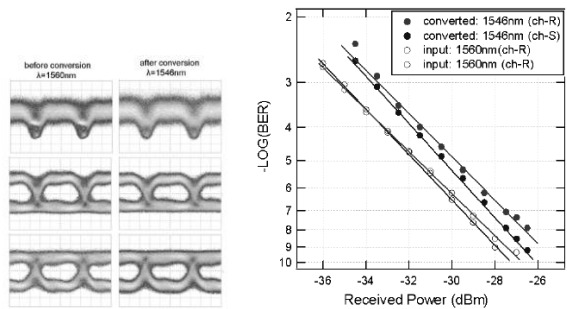


図 4 変換前後の信号波形とビットエラーレート特性

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

現時点において、光カットスルーに向けた、小型のコヒーレントな波長変換技術は存在しない。位相多値信号の波長変換技術により、光カットスルーシステムの設計自由度を大幅に拡大することになり、ネットワーク技術自体への大きなインパクトがある。波及効果創出への今後の取り組みとして、産総研が協働企業と進めている文部科学省のイノベーションシステム整備事業 先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点」(2008~2017 年度)を通じて、成果の普及を進める。特に、本研究で得られた成果のうち、非線形素子を用いたキャリア信号抽出技術は、位相多値信号の再生への適応を共同企業と進める。

4. むすび

サブバンド間遷移素子の高効率化に関する研究、サブバンド間遷移素子による多値位相変調信号光信号処理の実証、の二つのサブテーマに分けて研究を進めた。

サブバンド間遷移素子の高効率化のサブテーマでは、光信号処理のための四光波混合の原理の理論検討を行い、これをもとに、バンド構造とバンド間遷移波長の最適化設計を行った。6dB 以上の改善が得られる設計が可能なが分かった。さらに、励起光を増加させるための光入力耐性の向上に向けた設計指針を得て、TM 励起光を 4 dB 増加させさらに TE 励起光を 7dB 増加することにより、目標の -30dB の変換効率を設計上ほぼ達成できる結果を得た。

他プロジェクトの集積化技術に鑑み、集積化に向けた結晶成長の研究を進め、Al の組成が少なく Sb の含まれない量子井戸構造で、ISBT を実現できる可能性を見出した。

サブバンド間遷移素子による多値位相変調信号光信号処理の実証においては、四光波混合による光信号処理の一つとして、ISBT 素子による、20Gbps-QPSK 信号の波長変換の実証実験に初めて成功した。

また、パルス圧縮の検討を行い、目標とする 2ps のパルス圧縮を実現する条件を得た。また、多値位相変調信号の受信技術に用いられているデジタル信号処理回路に復調処理の一部を、光信号処理で肩代わりする可能性の検討を行い四光波混合による光信号処理の可能性を見出した。

【誌上发表リスト】

- [1] H. Kuwatsuka, R. Akimoto, T. Ogasawara, S. Gozu, T. Mozume, T. Hasama, and H. Ishikawa, "Four-wave mixing in InGaAs/AlAsSb intersubband transition optical waveguides," J. Appl. Phys., 110, 063114 (2011)
- [2] T. Mozume and S. Gozu, "Photorefractance study of InGaAs/AlAsSb coupled double quantum wells", physica status solidi c Vol.9, No.2 pp334-337, (2012)
- [3] R. Akimoto, H. Kuwatsuka, S. Gozu, T. Mozume, H. Ishikawa, "All-optical Wavelength Conversion of 21.4-Gb/s QPSK signals using Intersubband Transition in InGaAs/AlAsSb Coupled Double Quantum Wells," in Proceedings of ECOC2012, (2012).

【申請特許リスト】

- [1] 鉦塚治彦、波長変換装置、日本、特願 2011-071614、2011 年 3 月 29 日
- [2] 鉦塚治彦、光信号処理装置、日本、特願 2012-047832、2012 年 3 月 5 日