

- 平成7年度入学 大学院博士後期課程 システム情報工学専攻（電子光工学講座）

氏 名 井 上 潤 ( Jun INOUE )

論文題目： 半導体光増幅器中の超短光パルス間高非縮退4光波混合とその応用に関する研究

### Abstract

Semiconductor optical amplifiers (SOAs) have been studied as many functional devices in future ultrafast optical networks because they have large optical gain, and optical nonlinearities, and are suitable for optical fiber transmission. Nondegenerate four-wave mixing (FWM) in SOAs has been widely studied both as a spectroscopic tool and as a mechanism of optical functional devices such as wavelength converter, optical gate, and optical sampling. The purposes of this thesis reveal the essential properties of FWM among ultrafast optical pulses in an SOA and try to apply it for optical functional devices.

First, we have studied the propagation characteristics of short optical pulses in a multiple-quantum-well (MQW) SOA and a bulk SOA using the cross-correlation technique. We have measured the waveform of propagated optical pulses of two types of input waveforms (a sech<sup>2</sup>-shape and a single-side-exponential-shape) with a high-time resolution and measured their asymmetric waveforms. We have demonstrated, for the first time, the highly nondegenerate FWM among sub-picosecond optical pulses in a 1.3- $\mu$ m MQW SOA. We have directly measured the FWM signal in the output spectrum by applying current pulse to the device. We have achieved a high conversion efficiency of over 10 % at a frequency conversion range of less than 2 THz. We have also studied FWM characteristics among sub-picosecond optical pulses in an SOA with different time-delays between the pump and the probe beams, for the first time. Our experimental results showed that an optimum time-delay for getting the strongest FWM signal shifted from the perfect pump-probe overlap condition when the input probe beam energy increased. An optimum intensity of the pump beam has also been obtained to generate the maximum FWM signal. We have demonstrated the optical sampling using the FWM process in a SOA, as one of the possible applications. The results of optical sampling with picosecond time resolution and linearities of 20 dB are also described. It is expected from our results that the optical pulse waveforms generated by a semiconductor laser can be measured with this optical sampling system.

---

## 和文要旨

半導体光増幅器(SOA)は光利得と大きな光非線形性を持ち、光ファイバとの親和性も良いことから、将来の超高速光通信ネットワークで用いられる各種光機能デバイスとして盛んに研究されている。特に SOA 中の4光波混合(FWM)は SOA 中の超高速緩和過程のメカニズム解明の手法として、又、波長変換や光論理デバイス、光サンプリング素子等の光機能素子への応用が考えられている。本研究の目的は、これまで解明されてこなかった SOA 中の超高速時間領域の FWM 特性を実験的に明らかにし、光機能素子への応用をはかることである。本研究では、 $1.3\mu\text{m}$  帯圧縮歪み多重量子井戸(MQW)構造 SOA に、パルス幅が $<1\text{ps}$  で波長の異なる2つの短光パルス列を入射し、FWM 過程で新たに生成された FWM 信号光の特性を測定した。実験結果では、 $<2\text{THz}(11\text{nm})$ の波長変換において 10%以上の高変換効率が得られた。また、実験で確認された最大変換周波数は  $12.5\text{THz}(69.2\text{nm})$ である。この実験は、 $<1\text{ps}$  の光パルス幅の領域ではじめて行われた FWM であり、超高速光通信や半導体中の超高速緩和過程の物理的メカニズムの解明に有用である。また、この超短光パルスを用いた FWM を高時間分解能を持つ光サンプリングに応用するために基礎特性を測定した。実験の結果から、このサンプリングシステムの時間分解能は  $1\text{ps}$  程度であり、 $20\text{dB}$  のリニアリティが得られ、最小感度特性から半導体レーザから発生された光パルスを光サンプリングすることが可能なことを示した。本学位論文は以下のように構成されている。

第1章では緒言として半導体レーザの特徴を簡単に述べ、SOA 中の4光波混合の有用性と応用を上げ示した。

第2章では本論文に関する基礎事項をまとめた。まず、SOA の構造と動作特性について説明した。次に、SOA の光非線形効果として主にキャリア効果(バンド間遷移、バンド内遷移)について説明した。次に、光パルスが SOA を伝搬することによる非線形効果について説明した。次に、FWM 現象の説明をし、SOA 中の高非縮退 FWM の理論を説明し、パルス光間の FWM やパルス光間に時間遅延がある場合のこれまで報告された実験結果を理論計算結果と共にまとめる。また、SOA 中の FWM の応用について詳しく説明する。最後に、本研究で用いた超高速現象の測定法について説明する。

第3章では、2つの異なる構造の SOA を用いて行った短光パルス伝搬特性の実験結果を述べる。SOA を伝搬した短光パルスの時間波形は  $100\text{fs}$  の光パルスとの相互相関波形を測定することにより求められ、波形の非対称性も含め、高時間分解能で測定することが可能となった。実験で用いた SOA は MQW 構造 SOA とバルク構造 SOA であり、パルス幅が  $550\text{fs}$  の  $\text{sech}^2$  型と  $700\text{fs}$  の片指数型の2種類の光パルスで測定され、SOA の構造や光パルス形状による伝搬特性の違いを明らかにした。

第4章では、短光パルス間の SOA 中の FWM 特性について述べた。 $<1\text{ps}$  の光パルス間の FWM を SOA 中ではじめて行い、 $<2\text{THz}$  の波長変換において $>10\%$ の高変換効率得られた。FWM を短光パルス間で行うことによって SOA の利得飽和による変換効率の低下を回避することができ、高変換効率が期待できる。FWM 信号が光スペクトルアナライザ上で直接観測できるように、光パルスが SOA に入射するタイミングに一致させた電流パルスで SOA を駆動し、SOA から出力される自然放出光雑音を相対的に抑制した。また、実験で確認された最大変換周波数は  $12.5\text{THz}$  であった。

第5章では、短光パルス間に時間遅延がある場合の FWM 特性について述べた。短光パルス間に時間遅延がある場合の FWM 特性は実用上大変重要である。サブピコ秒光パルス間の FWM の時間遅延特性をはじめて測定した。FWM 信号光の最大強度が得られる時間遅延量がプローブ強度に依存することを示した。

また、FWM 信号光のポンプ光強度依存性より、FWM 信号光強度が最大になる SOA の利得飽和量を  $3\sim 5.5\text{dB}$  と求めた。

第6章では、SOA 中の FWM を光サンプリングに応用するために基礎特性について述べた。ジッターを除いた 700fs の被測定光パルスを 700 fs のサンプリング光パルスで光サンプリングしたところ 1ps オーダーの時間分解能があることが分かった。また、入出力の直線性は少なくとも 20dB あることが分かった。この光サンプリングの最小感度は 2 mWp-p と求められ、半導体レーザで発生される光パルスを直接光サンプリングすることができることを示した。

第7章では以上の研究結果をまとめ、今後の課題を示した。