

# 半導体光増幅器内の光周波数シフトを用いた光量子化技術の研究

## Optical quantization using frequency shift in semiconductor optical amplifiers



松浦 基晴 (Motoharu MATSUURA, Dr. Eng.)

電気通信大学 情報理工学研究所 准教授

(Associate Professor, Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications)

IEEE OSA 電子情報通信学会

受賞：第エリクソン・ヤングサイエンティスト・アワード(2008年)  
船井情報科学奨励賞 (2009年) 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞 (2011年)

研究専門分野：光ファイバ通信システム 光エレクトロニクス 光ファイバ給電

**あらまし** 光アナログ・デジタル変換は、光領域においてアナログ信号をデジタル信号に変換する技術であり、通信やデータ処理・記録・解析などへの幅広い利用が検討されている。近年、光アナログ・デジタル変換は、従来の電気領域でのアナログ・デジタル変換の性能限界を打破し、さらなる高速動作や低消費電力化を可能とする手段として注目を集めている。半導体光増幅器は半導体で構成された光増幅器で、光信号の増幅に良く使用されているが、素子内部の屈折率変化によって伝搬する光信号に光周波数シフトが発生する。本研究では、この半導体光増幅器での光信号の光周波数シフトに着目した独自の光量子化技術に関する研究開発を実施した。サンプリング速度 10 GSample/s での実証実験とその性能評価を実施し、8 レベルでの光量子化に成功し、光 A/D 変換としての有効性を明らかにした。

### 1. はじめに

アナログ・デジタル変換（以下、A/D 変換）は、アナログ信号をデジタル信号に変換する技術であり、通信やデータ処理・記録・解析などの分野で幅広く用いられている。A/D 変換の代表的な性能指標としては、

サンプリング速度と量子化ビット数がある。前者はサンプリング（標本化）を行う速度を表し、A/D 変換の動作速度と対応する。後者は標本化されたパルス信号の強度を細分化するビット数を表しており、デジタル化する際の分解能を示している。一般的に両者はトレード・オフの関係がある。近年、データ速度の高速化に伴い、電子回路の処理速度限界に達しつつある状況になっており、A/D 変換の進展において 2 つの問題が生じている。1 つは、サンプリング・クロックのタイミングジッタで発生する量子化誤差である。クロックの時間的な揺らぎ（ジッタ）は、量子化の際に強度レベルに誤差を発生させ、正確なデジタル信号への変換が困難となってくる。もう 1 つは、消費電力の問題である。パソコンの CPU に見られるように、信号処理が高速になると、電子回路にかかる負荷の多くは熱エネルギーとして放出され、消費電力が急増してくる。このような背景から、光の特徴を活かし、光領域で信号処理を行う光 A/D 変換の研究開発が活発に行われている[1]-[3]。

光 A/D 変換は、A/D 変換の 3 つのプロセスである、標本化、量子化、符号化を全て光領域で処理することになる。この中で最も実用的なものが標本化である。標本化では、クロックのタイミングジッタが量子化誤差の主要因となるが、電子回路のジッタ限界がおおよそ 0.1 ps と言われているのに対し、光クロックではその 10 分の 1 程度までジッタを低減することが見込まれ、量子化誤差を大きく改善することが期待されている。一方、量子化については、全てのプロセスを光領域で行う際に欠かせないものの、十分な性能を有する実証が困難であるため、現在でも精力的な研究開発が進められている状況である。

本研究課題では、半導体光増幅器内で発生する光周波数シフト現象を用いて光量子化を実現する独自の技術を提案し、その実証実験と性能評価を行った。

### 2. 半導体光増幅器内の光周波数シフトを用いた光量子化

半導体光増幅器（SOA : Semiconductor Optical Amplifier）は、半導体で構成された光増幅器で、組成

# 半導体光増幅器内の光周波数シフトを用いた光量子化技術の研究

## Optical quantization using frequency shift in semiconductor optical amplifiers

材料が半導体レーザやフォトダイオードと同じであるため、これらの能動素子との集積化が可能である。一方、SOAで増幅された光信号は、SOA内での利得変化で発生する屈折率変化によって光信号パルスの立ち上がり・立ち下がり時に周波数が変化する光周波数シフト（周波数チャープ）が発生する。このため、増幅された光信号が光ファイバ中を伝送する際、パルスに瞬間的に変化する周波数成分を含むため、光ファイバ中の波長分散との相乗効果によって特異な波形変化を発生してしまうという問題がある。著者らは、これまでに独自の周波数チャープ測定法を用いて、SOAや量子ドット半導体光増幅器（QD-SOA：Quantum-Dot SOA）で発生する光周波数シフト特性の評価を行ってきた[4][5]。その中で、光信号パルスの立ち上がり時に発生する低周波数側への光周波数シフトが、光信号パルスのピークパワーに依存することに着目し、これを応用した光量子化技術を提案している[6]。

図1に、提案する光量子化の構成を示す。光標本化されたサンプリングパルス列と強度が一定で波長の異なるプローブ光をSOA（ここでは、QD-SOA）に入力する。これにより、サンプリングパルスの強度変化に応じたQD-SOA内の屈折率変化によって、プローブ

光はパルスの強度に対応した光周波数シフトが発生する。これをQD-SOAの後段で並列配列した矩形波型光フィルタ（WS：WaveShaper）で周波数シフト成分のみを透過させるようにフィルタ周波数を調整する。それぞれのフィルタ短波長側の周波数（RSFF：Red-shifted filter frequency）は、図1に示すように、徐々に長波長側にシフトしていくように調整している。これにより、最も高いピークパワーのサンプリングパルスは全てのフィルタを透過し、最も低いピークパワーのパルスはどのフィルタも透過出来ない仕組みにフィルタ位置を調整している。すなわち、サンプリングパルスのピークパワーに応じて、並列配置したフィルタを透過するパルス（“1”）の数が決定する。出力されるデジタル信号は、別途符号化が必要になるが、サンプリングパルス列からデジタル情報への光量子化が行える。提案技術は、半導体素子と並列に構成された矩形波光フィルタのみで構成され、光量子化に必要な入力信号のパルスあたりのピークパワーも10 mW程度なので、従来の光A/D変換と比較しても、格段に小さいスイッチングエネルギーでの動作が見込める構成になっている。

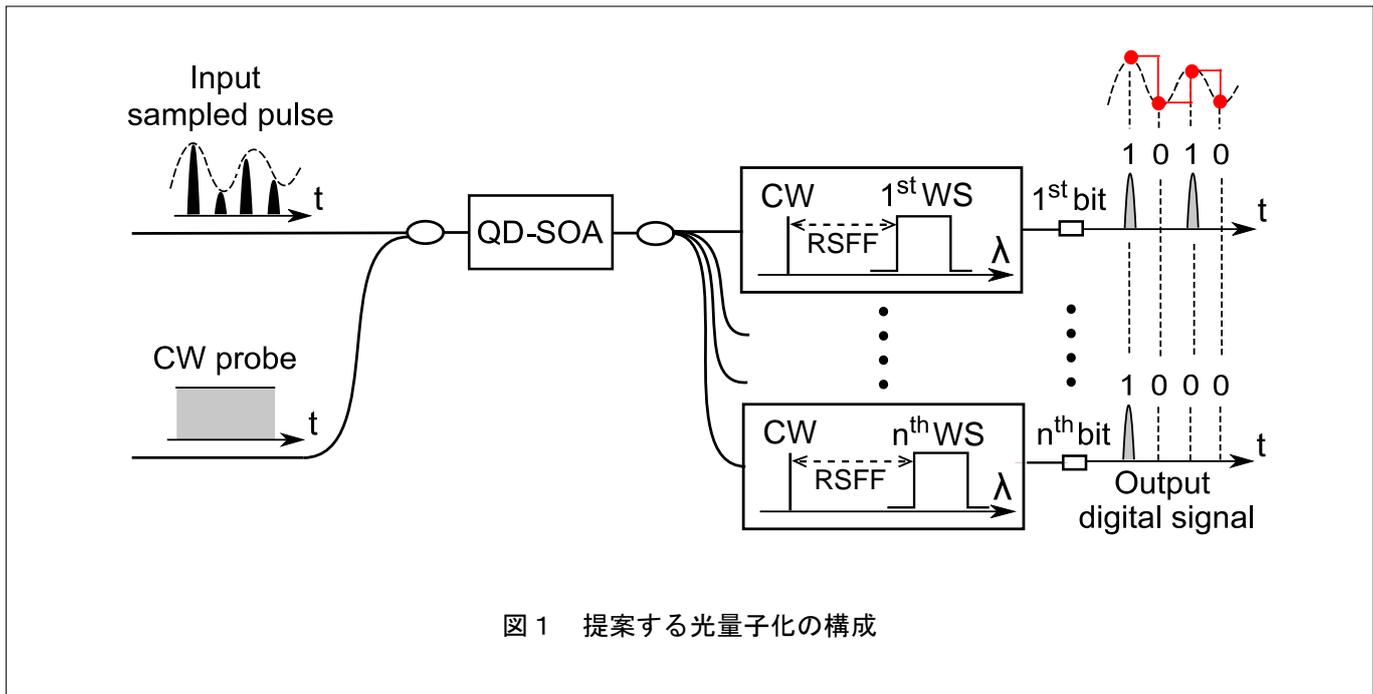


図1 提案する光量子化の構成

# 半導体光増幅器内の光周波数シフトを用いた光量子化技術の研究

## Optical quantization using frequency shift in semiconductor optical amplifiers

### 3. 光量子化の実証実験

提案する光 A/D 変換の有効性を検証するために、実証実験を行った[7]。その実験構成を図 2 に示す。波長 1530 nm のモード同期半導体レーザ (MLLD : Mode-Locked Laser-Diode) から出力された繰り返し周波数 10 GHz のパルス列を LiNbO<sub>3</sub> 変調器 (LNM) に入力した。パルスパターン発生器 (PPG : Pulse Pattern Generator) と同期したシグナル・ジェネレータ (SG) で生成された 10 GHz 正弦波で変調を行い、光アナログ信号を光標本化したことを想定した 10 GSample/s の光サンプリングパルス列を生成した。この信号光は、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA : Erbium-Doped Fiber Amplifier) で増幅後、光カップラ (OC : Optical Coupler) でプローブ光と合波される。プローブ光は波長 1559 nm の外部共振型半導体レーザ (ECL : External Cavity LD) で生成され、出力パワーは光可変減衰器 (VOA : Variable Optical Attenuator) で調整し、OC で信号光と合波されている。図 2(a) のように、信号光とプローブ光は合波後、量子ドット半導体光増幅器 (QD-SOA) に入力される。ここで、SOA ではなく QD-SOA を利用した理由は従来の SOA と比較して、QD-SOA は高速な利得回復時

間を有しており、高速なサンプリング速度での実証実験には有利なため、本実験でも使用した。この QD-SOA は、これまでも伝送速度 320 Gbit/s での光信号処理実証実験に使用されている[8]-[11]。QD-SOA 内では、図 2(b) に示すように、サンプリングパルスのピークパワーに対応した大きさの光周波数シフトがプローブ光に発生する。プローブ光は増幅後、波長可変型の WS に入力される。図 1 では、並列に複数段の WS を配置していたが、本実験では、1 台の WS の透過波長をシフトさせて代用している。実際には、図 2(c) に示すように、WS の RSFF を変化させ、光量子化の性能評価を行っている。実験に使用した WS の透過スペクトルの例を図 2(d) に示す。理想的には、より急峻なロールオフを有する光フィルタが必要であるが、使用した WS においても十分な光量子化性能の実現が可能である。RSFF に応じて抽出したプローブ光の光周波数シフト成分は増幅後、光スペクトルアナライザ (OSA : Optical Spectrum Analyzer) と、フォトダイオード (PD : Photo-Diode) で光電変換された電気信号波形を、帯域 50 GHz のサンプリングオシロスコープ (OSC : Oscilloscope) でパルスのピークパワーレベルと波形の評価を行っている。

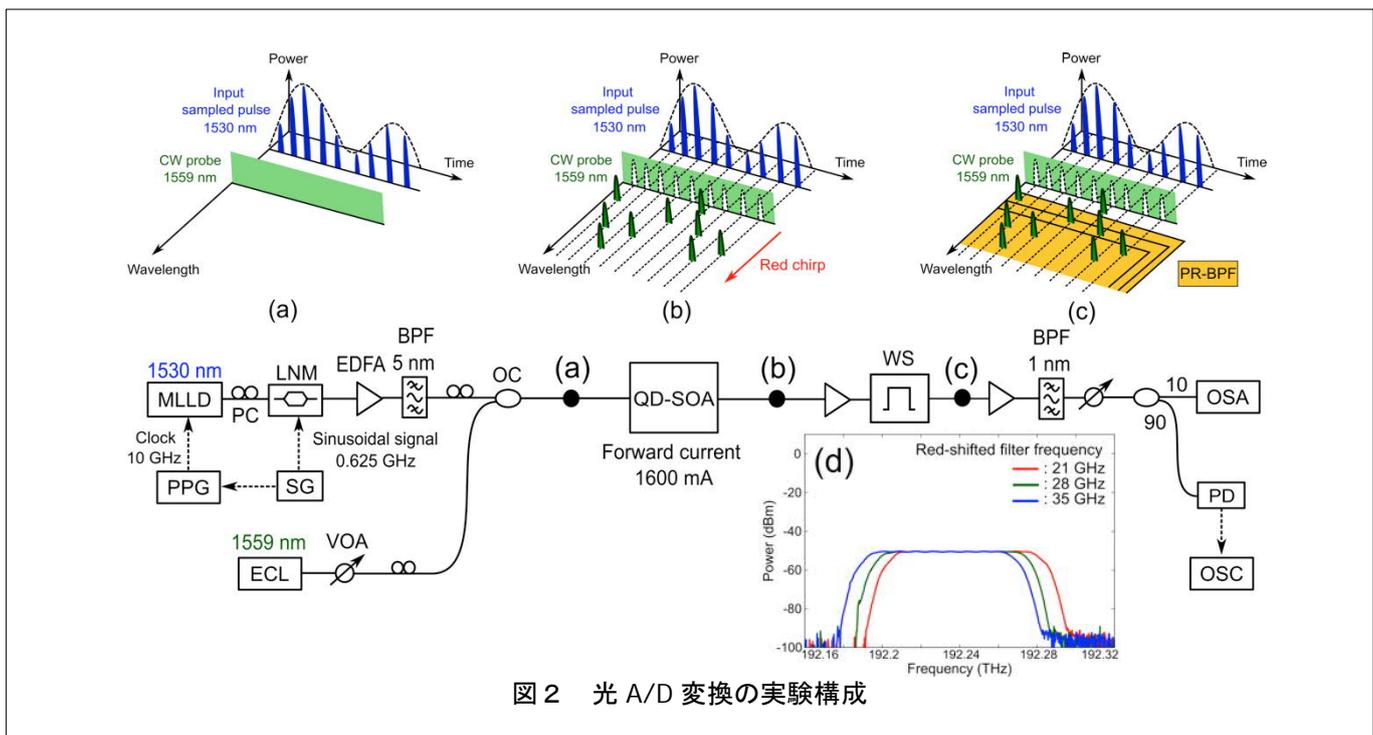


図 2 光 A/D 変換の実験構成

# 半導体光増幅器内の光周波数シフトを用いた光量子化技術の研究

## Optical quantization using frequency shift in semiconductor optical amplifiers

図3に、光フィルタの短波長側周波数を変化させた際に観測された光周波数シフト成分の光スペクトルを示す。フィルタをシフトされる毎にスペクトル成分は、低周波数側にスライドしていくのが確認出来る。一方、スペクトル成分は、シフトしても10 GHz 間隔に立つコム成分は共通して存在しているのが確認された。

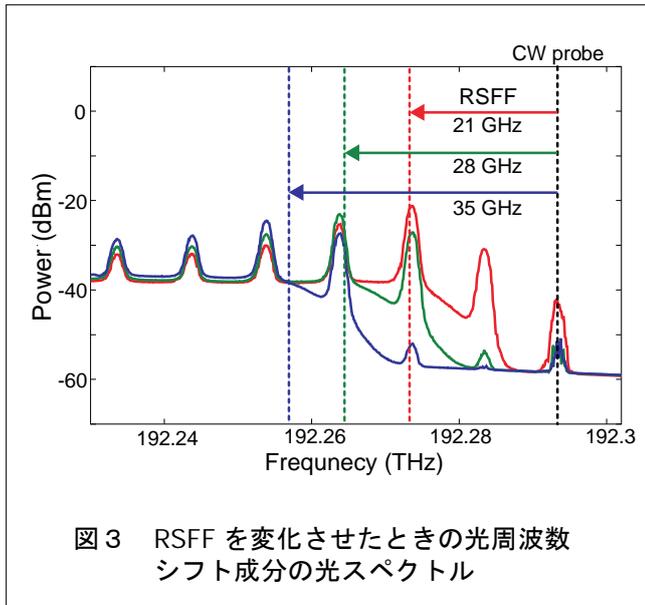


図3 RSFF を変化させたときの光周波数シフト成分の光スペクトル

光量子化性能の評価を行うために、入力したサンプリングパルス列を規格化し、出力パルスのピークパワーが設定した閾値を越えた(“0”から“1”となった)ときのRSFFの変化を図4に示す。閾値については、過去の研究を参考に3つの値を任意に設定し、比較評価を行っている。図より、入力パルスのピークパワーが大きくなるにつれて、必要となるRSFFも大きくなっているのがわかる。ここで、閾値を規格化されたパルスのピークパワーの0.16と設定したときに、最大8レベルのステップが得られることが確認された。また、その際に8レベルの光量子化が行えることが示された。さらに、最新の研究成果においては、本系において15レベルの光量子化の実証実験にも成功している[12]。

A/D変換としての有用性を示すため、積分非線形誤差(INL: Integral NonLinearity)と微分非線形誤差(DNL: Differential NonLinearity)による性能評価も行った。前者は、理想の光量子化性能における各ステップの midpoint を結んだ際の各量子化レベルにおけるパ

ワー差を表し、後者は、理想的なステップ幅に対する実測のステップ幅のパワー差を意味する。INLとDNLによる光量子化特性の性能評価を図5に示す。この評価において、 $\pm 1$  LSB (最低有効ビット数, LSB: Least Significant Bit) 以下に抑えることが出来れば、ミッシングコードを発生せずにA/D変換を行えることになる。図より、INLは最大+0.79 LSB、DNLは最大+0.59 LSBとなり、全てのステップで $\pm 1$ を下回っていることから、提案技術のA/D変換としての有効性を示した。

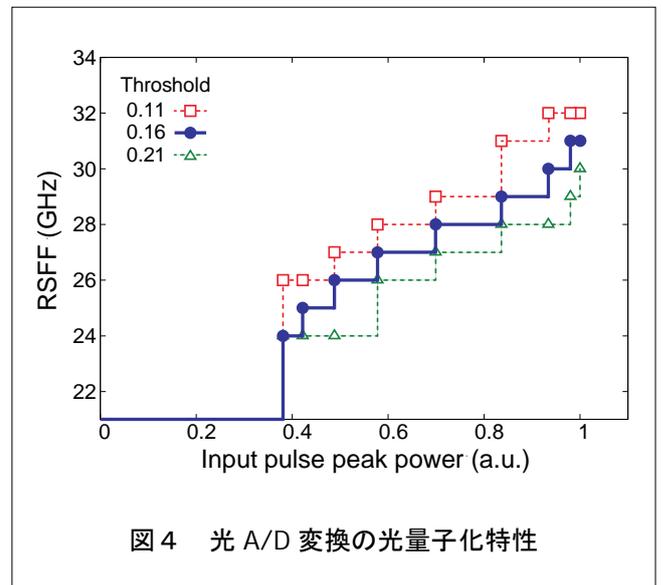


図4 光 A/D 変換の光量子化特性

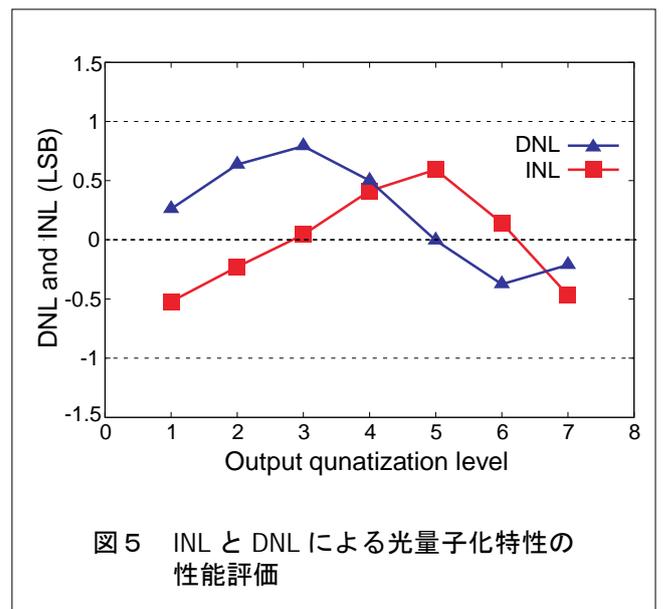


図5 INL と DNL による光量子化特性の性能評価

# 半導体光増幅器内の光周波数シフトを用いた光量子化技術の研究

## Optical quantization using frequency shift in semiconductor optical amplifiers

### 4. まとめ

半導体光増幅器内の光周波数シフトを用いた光量子化技術に関する研究を行った。半導体光増幅器で発生する光周波数シフトは、増幅された信号光に周波数変化を与え、伝送特性に影響を与えるというデメリットがあるが、提案手法では、これを逆手に取って、光強度-周波数変換として応用した光量子化技術を提案し、サンプリング速度 10 GSample/s での実証実験に成功した。従来技術と比較して、低消費電力化や小型化に優位性があるため、今後もさらなる高性能化を目指した研究開発を進めていきたいと考えている。

### 参考文献

[1] B. L. Shoop: "Photonic analog-to-digital conversion," Springer (2001).  
[2] G. C. Valley: "Photonic analog-to-digital converters," Opt. Express, 15, 1955-1982 (2007).  
[3] A. Khilo et al.: "Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electric jitter," Opt. Express, 20, 4454-4469 (2012).  
[4] M. Matsuura et al.: "Time-resolved chirp properties of SOAs measured with an optical bandpass filter," IEEE Photon. Technol. Lett., 20, 2001-2003, (2008).  
[5] M. Matsuura et al.: "Experimental investigation of chirp properties induced by signal amplification in quantum-dot semiconductor optical amplifiers," Opt. Lett., 40, 914-917 (2015).  
[6] N. Ninomiya et al.: "Optical quantization based on intensity to frequency conversion using frequency chirp in a QD-SOA," Proc. of OFC 2017, Th1F.6, Los Angeles, USA, (2017).  
[7] H. Hoshino et al.: "Photonic analog-to-digital conversion using red frequency chirp in a semiconductor optical amplifier," Opt. Lett., 43, 2272-2275, (2018).  
[8] M. Matsuura et al.: "320-Gbit/s wavelength conversion using four-wave mixing in quantum-dot semiconductor optical amplifiers," Opt. Lett., 36, 2910-2912 (2011).

[9] M. Matsuura et al.: "Ultrahigh-speed and widely tunable wavelength conversion based on cross-gain modulation in a quantum-dot semiconductor optical amplifier," Opt. Express, 19, B551-B559, (2011).  
[10] M. Matsuura et al.: "320-to-40-Gb/s optical demultiplexing using four-wave mixing in a quantum-dot SOA," IEEE Photon. Technol. Lett., 24, 101-103, (2012).  
[11] M. Matsuura et al.: "Error-free 320-to-40-Gbit/s optical demultiplexing based on blue-shift filtering in a quantum-dot semiconductor optical amplifier," Opt. Lett., 38, 238-240, (2013).  
[12] T. Okada et al.: "10-GSample/s, 15-level optical quantization using frequency chirp in a quantum-dot SOA," Proc of OECC 2018, P1-26, Jeju, Korea, (2018).

この研究は、平成26年度S C A T研究助成の対象として採用され、平成27～29年度に実施されたものです。