

量子ドット光増幅器と光スイッチ

菅原 充^{*1,*2}・秋山 知之^{*4,*5}・江部 広治^{*1,*2}・中田 義昭^{*4,*5}
 羽鳥 伸明^{*1,*2}・大坪 孝二^{*4,*5}・荒川 泰彦^{*1,*2,*3}

Quantum-Dot Optical Amplifiers and Optical Switches

Mitsuru SUGAWARA^{*1,*2}, Tomoyuki AKIYAMA^{*4,*5}, Hiroji EBE^{*1,*2}, Yoshiaki NAKATA^{*4,*5}, Nobuaki HATORI^{*1,*2}, Koji OTSUBO^{*4,*5} and Yasuhiko ARAKAWA^{*1,*2,*3}

This paper reports recent progress of semiconductor optical amplifiers and switches with quantum-dot active layers for photonic networks, especially focusing on their operation principles based on unique properties of quantum dots, and high-power and broadband amplification at around the wavelength of 1.5 μm.

Key words: quantum dot, optical amplifier, optical switch, photonic network

1. フォトニックネットワーク

光通信は、ある地点とある地点を光ファイバーで結ぶいわゆる point-to-point 伝送から、各ポイントをリング型やメッシュ型で結び、さらに光のままで伝送経路を自在に切り替えるフォトニックネットワークとして発展していくと期待されている。フォトニックネットワークでは、光ファイバー伝送路のつなぎめであるネットワークノードにおいて、大容量の光信号を自在に処理する技術—光パルスの流れを空間的・時間的に切り替えたり、伝送によって波形が乱れた光信号を増幅・再生したり、光の波長を変換したりする技術—が不可欠である。この光信号処理技術を実現するためには、半導体レーザー、変調器、半導体光検出器などの従来光デバイスに次ぐ、新機能をもった高性能光デバイスを開発しなければならない。

ナノサイズの半導体結晶である量子ドットを活性層に用いることで、高性能光増幅器と光スイッチが生まれ、次世代フォトニックネットワークへの応用が期待されている。本稿では、最近の研究開発成果と今後の課題を述べる。

2. 量子ドット光増幅器と光スイッチ

光増幅器は、反転分布した媒質の誘導放出作用を利用して、光信号強度を光のままで増幅するデバイスである。フ

ォトニックネットワークノードにおける光信号の損失は不可避であるが、光増幅器を用いることによって補償できる。現在の波長多重光通信で用いられているエルビウムドープファイバー増幅器は、増幅帯域が狭く固定されていて光ファイバーの波長資源の一部分しか使っていないこと、利得の応答時間がミリ秒と遅く波長チャネル数のダイナミックな変動に追随できないなどの欠点があり、いずれ限界がみえてくると思われる。また、半導体光増幅器は、増幅帯域の自由度が高く、ナノ秒オーダーの利得応答が可能であるという利点はあるものの、光出力限界が低いためにパターン効果によって信号波形が崩れてしまい、多重伝送では信号間にクロストークが発生するという問題がある。

筆者らは、量子ドットを半導体光増幅器の増幅媒質に利用することによって、従来ない広帯域・高出力の増幅器が実現可能であることを提案した¹⁻¹²⁾。量子ドット光増幅器とは、活性領域に半導体量子ドット（数ナノメートルから数十ナノメートルの微小半導体結晶¹³⁾）を用いた半導体光増幅器である。図1に示すように、増幅器の一方の端面から光信号を入射させると、量子ドットによる誘導放出によって光信号が増幅されて、反対側の端面から出力光信号が得られる。微小結晶であるという体積効果と、量子効果

*1 東京大学ナノエレクトロニクス連携研究センター（〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1）

*2 東京大学生産技術研究所（〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1）

*3 東京大学先端科学技術研究センター（〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1）

*4 富士通株式会社（〒243-0197 厚木市森の里若宮 10-1）

*5 (財)光産業技術振興協会（〒112-0014 東京都文京区関口 1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル 7F）

E-mail: msuga@iis.u-tokyo.ac.jp

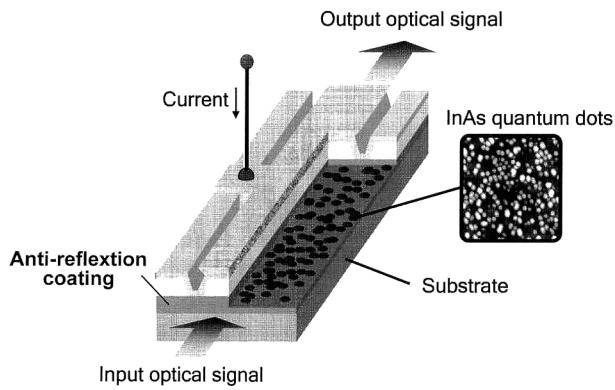


図1 量子ドット光増幅器の基本構造。

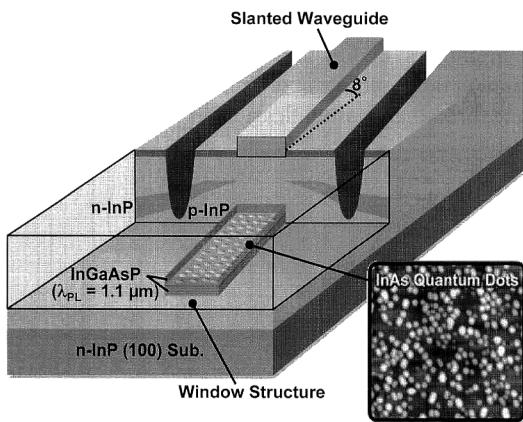


図2 波長 $1.5 \mu\text{m}$ 帯量子ドット光増幅器の構造図。

による離散準位によって、 20 dB m 以上の高出力特性が期待される^{4,12)}。また、サイズゆらぎによる光の共鳴周波数の不均一性と、体積効果による低状態密度によって、 100 nm 以上の広帯域利得が可能である⁹⁾。さらに、スペクトルホールバーニングによる高速非線形応答によって^{1,2,12)}、利得飽和領域でのパターン効果のない増幅^{1,3,8)}、高速広帯域波長変換⁵⁻⁸⁾、高速2R/3R波形整形^{7,8)}が実現する。

3. 1.5 μm 帯量子ドット光増幅器

図2は、最近開発した $1.5 \mu\text{m}$ 帯量子ドット光増幅器である。 (100) InP基板上に自己形成InAsドットを成長することによって、波長 $1.5 \mu\text{m}$ 帯において増幅利得が得られた。典型的な量子ドット面密度は $4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 、積層数は5~10層程度である。高出力、広帯域を実現するためには、十分な電流密度 ($20 \sim 30 \text{ kA/cm}^2$) とレーザー発振の抑制が必須である。それぞれを、埋め込み構造採用による効果的な電流狭窄、8度の斜め導波路とウインドウ構造採用により実現した。

図3は、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯量子ドット光増幅器（増幅器長は 6.15 mm ）の増幅利得、雑音指数、3dB飽和光出力の波長

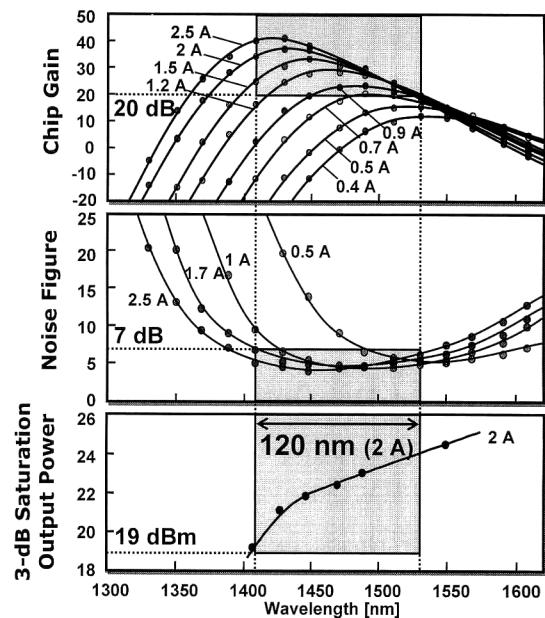


図3 量子ドット光増幅器の増幅利得、雑音指数、3 dB 飽和光出力の波長依存性。

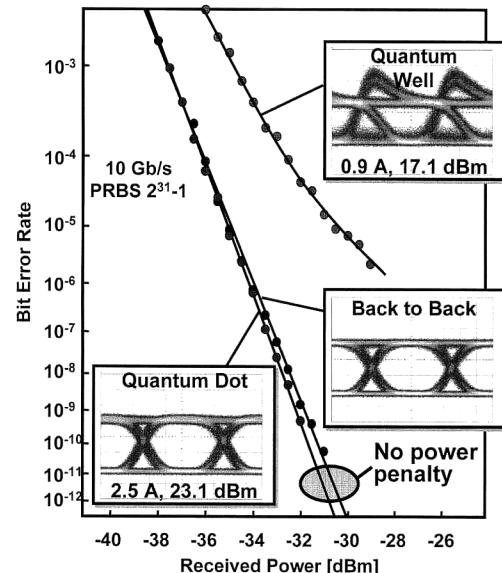


図4 量子ドット光増幅器と量子井戸光増幅器の出力波形とビットエラーレート。

依存性である。 20 dB 以上の増幅利得、 7 dB 以下の雑音指数、 19 dBm 以上の飽和出力が、 120 nm の帯域で実現されていることがわかる。

図4に、量子ドット光増幅器と量子井戸光増幅器の、波長 $1.55 \mu\text{m}$ における出力波形とビットエラーレートを比較した。量子井戸光増幅器は、長さ 1.2 mm で、 0.8% の圧縮歪みが加わった6層のInGaAsP/InP量子井戸を活性層とする。量子井戸では、 17.1 dBm の光出力において、利得飽和のためにパターン効果が起こり、大きなパワーペナル

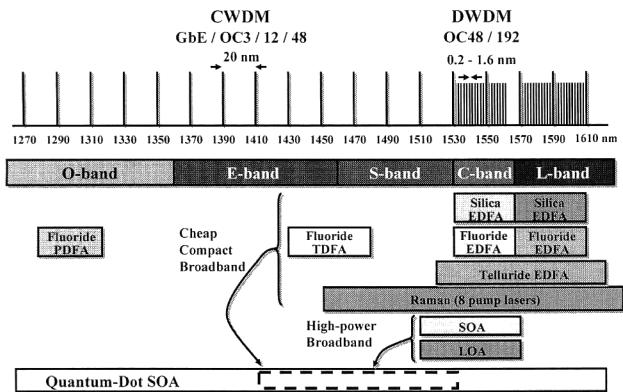


図5 光ファイバーの信号帯域と、光ファイバー増幅器と半導体光増幅器の利得帯域。量子ドット光増幅器の破線枠は図2の120 nm帯域を表す。

ティーが発生した。一方、量子ドットでは、23.1 dBm の出力においてもパターン効果は発生せず、ペナルティーフリーの一増幅動作が実現している。

図5に、光ファイバーの光信号帯域と、光ファイバー増幅器と半導体光増幅器の利得帯域を示した。量子ドット光増幅器 (quantum-dot SOA) の枠は、図3の120 nm 帯域を表す。光ファイバー帯域全域を利用して伝送容量を上げるために、また、CWDM (coarse wavelength division multiplexing) でチャネル間隔を広げてコストを下げるためには、広帯域の増幅器が必要である。今回の結果は、量子ドットを用いて、ファイバー増幅器の弱点である狭帯域 (現在実用化されている EDFA (erbium doped fiber amplifier) で約 35 nm), 半導体光増幅器の弱点である低出力 (図3) を大幅に改善することに成功したものである。さらに、理論的には、光ファイバーの 40 THz の帯域をカバーすることも可能である。

4. 今後の課題

今後の技術開発の3つのおもな課題について、簡単に現状を述べる。

(1) 偏波無依存化：光増幅器を半導体レーザーの直後に置いてブースターとして使用する場合を除き、光ファイバーで伝送されてくるランダムな偏光の光信号を処理するためには必須である。最近、量子ドットを積層成長することによって球状に近いドットを形成し、偏波無依存化が可能であることが実験的に発見され、デバイスでの実証が期待される¹⁴⁾。

(2) 低消費電力化：結晶品質向上とともに、単チップ化が有効である。消費電力と增幅器利得、消費電力と飽和出力にはそれぞれトレードオフの関係があり、おののの応用において最適設計を行うことになろう。

(3) 利得平坦化：導波路方向の注入電流分布に大小をつける多電極構造が有効であることを見いだし¹⁵⁾、現在、試作を進めている。

文 献

- 1) M. Sugawara, N. Hatori, T. Akiyama, Y. Nakata and H. Ishikawa: Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) L488-L490.
- 2) T. Akiyama, H. Kuwatsuka, T. Simoyama, Y. Nakata, K. Mukai, M. Sugawara, O. Wada and H. Ishikawa: J. Quantum Electron., **37** (2001) 1059-1065.
- 3) T. Akiyama, N. Hatori, Y. Nakata, H. Ebe and M. Sugawara: Electron. Lett., **38** (2002) 1139-1140.
- 4) M. Sugawara, N. Hatori, T. Akiyama and Y. Nakata: Proc. SPIE, **4905** (2002) 259-275.
- 5) T. Akiyama, H. Kuwatsuka, N. Hatori, Y. Nakata, H. Ebe and M. Sugawara: IEEE Photonics Technol. Lett., **14** (2002) 1139-1141.
- 6) T. Akiyama, N. Hatori, Y. Nakata, H. Ebe and M. Sugawara: *Proceedings of the 28th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Amsterdam, 2002 (IEEE, New York, 2002) p. II-76.
- 7) M. Sugawara, T. Akiyama, N. Hatori, Y. Nakata, H. Ebe and H. Ishikawa: Meas. Sci. Technol., **13**, (2002) 1683-1691.
- 8) M. Sugawara: U.S. Patent 6,590,701 B2, Date of Patent Jul. 8, 2003.
- 9) T. Akiyama: Japanese Patent 2001-311046 (2001) (pending), U.S. Patent 6639240 (2002) (pending).
- 10) T. Akiyama, K. Kawaguchi, M. Sugawara, H. Sudo, M. Ekawa, H. Ebe, A. Kuramata, K. Otsubo, K. Morito and Y. Arakawa: *29th European Conference on Optical Communication (ECOC 2003)*, Postdeadline Paper.
- 11) T. Akiyama, M. Ekawa, M. Sugawara, H. Sudo, K. Kawaguchi, A. Kuramata, H. Ebe, K. Morito, H. Imai and Y. Arakawa: Postdeadline Paper. PDP 12.
- 12) M. Sugawara, N. Hatori, T. Akiyama, H. Ebe, and Y. Nakata: Phys. Rev. B, **69** (2004) 235332-235370.
- 13) M. Sugawara: *Semiconductors & Semimetals*, ed. M. Sugawara (Academic Press, San Diego, 1999), Vol. 60, Chap. 1.
- 14) T. Kita, O. Wada, H. Ebe, Y. Nakara and M. Sugawara: Jpn. J. Appl. Phys., **41**, (2002) L1143-L1145.
- 15) T. Akiyama, M. Sugawara, K. Otsubo, H. Ebe, N. Hatori and Y. Arakawa: *The 8th OptoElectronics and Communications Conference* (Shanghai, 2003).

(2004年6月25日受付)