

# 超高速半導体光ゲート研究の進展と将来展望

## Recent Trends in the Research of Ultrafast, All-optical Semiconductor Gate Devices

上野 芳康  
 Yoshiyasu Ueno

国立大学法人 電気通信大学 電子工学科  
 Department of Electronic Engineering, University of Electro-Communications, Tokyo, Japan

### 1. 研究の背景

わが国の新規加入者回線が DSL から FTTH へ移行し、FTTH 加入者数は 1,000 万を越えて勢いを増し、無線端末通信速度も漸増を続けていることに呼応して、大容量かつ低コストな光通信システム (DWDM, DPSK, OFDM 等) の新規開発が進展している。その一方で、大規模な IP 交換システムやデータセンターでは、処理能力と消費電力上の課題が現れ始めている。近年主に日本と欧州では、5 年・10 年後の世界情勢を踏まえ、高速かつ低消費電力かつ高密度集積可能な光信号処理システムデバイス構成群(短パルス光源、Mux/Demux、信号波長変換器、XOR、3R、バッファ) のそれぞれへの新しい挑戦と努力が続けられている。

高速化に特化するならば半導体光増幅器(SOA)方式や非線形光ファイバー方式が、低消費電力に特化するならば量子ドット方式が、高密度集積化に特化するならばフォトニック結晶・プラズモン方式が、優れている。3 つの全てに優れた光材料とデバイス方式の実現は、21 世紀初頭の現在なお、『挑戦的な』研究目標である。

高純度で高精度な光半導体材料技術に基づく全光ゲート方式や全光バッファ方式は、有力候補の 1 つと考えられる。

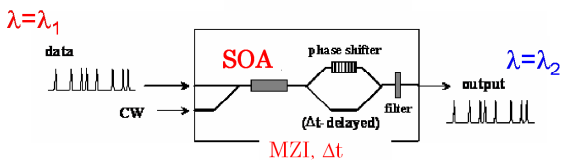


図 1 波長変換実験配置の半導体全光ゲート [2]

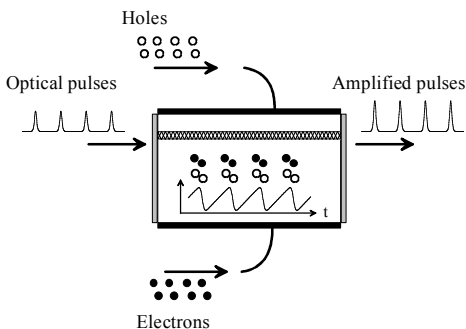


図 2 半導体全光ゲートを高速駆動する半導体光増幅器 (semiconductor optical amp, SOA) の光パルス増幅作用と反作用 (キャリア密度振動、相互利得・相互位相変調)

### 2. 最近の進展

全光ゲート方式に関しては、XOR 機能や 3R 機能以前の、連続光を全光デジタル変調する基礎的 “ゲート処理” 実験 (= 信号波長変換実験配置、SMZ-DISC 構造、図 1、2) の段階ながら、新しい進展が積み重ねられている。NEC グループが 160Gb/s 波長変換[1, 2]に成功した後、アイントホーフェン工大グループが、160Gb/s 波長変換追試[3]、さらに 320Gb/s 波長変換に成功した[4][\*a]。320Gb/s 実験時の dc 消費電力 800mW=2.5 pJ/bit、寸法 1mm 程度である[\*b]。

90 年代後半から現在までにアイントホーフェン工大や著者らを含む複数グループが着目してきたゲート速度限界要因は、(1) SOA の材料・構造に固有なキャリア緩和時定数、(2) 外部光注入加速に基づくキャリア緩和時定数短縮(いわゆるホールディングビーム作用)[5]、(3) 短波長側に偏らせた出力信号スペクトル帯域制限に基づく信号パタン誘起雑音抑制作用[6]の 3 種類、である。

速度制限要因(1)(2)(3)に加えて、著者らは、(4) 非線形偏光回転作用の積極活用方法[7]、(5) フェルミ分布電子冷却時定数起因の歪成分[8][\*c]の解消方法[9]に注目している。図 3 は、200Gb/s で要因(1), (2), (4)に着目した研究成果例である[7]。ビットレートは及ばないが、アイントホーフェン工大(文献[4])のゲート性能水準に近いと見込んでいる。

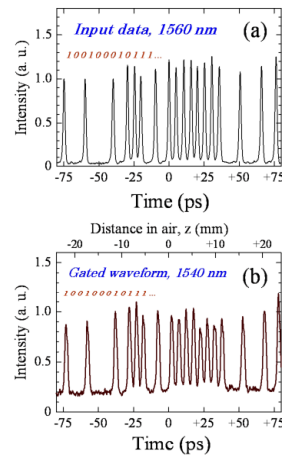


図 3 波長変換配置の 200Gb/s 高速実験の 1 例 [7]  
 (a) 長さ 5,000 ビットの擬似データ入力、(b) データ出力。  
 dc 消費電力 600mW=3pJ/bit、寸法 約 1mm。

消費電力[\*b]に関しては、直流電流 200mA(160G) ~ 400mA(320G) 程度、従って消費電力 300mW(160G) ~ 800mW(320G)程度の数値が報告されている[1-4]。光信号 1 ビット当たり 3 pJ/bit である。しかし、消費電力の基本的

傾向や限界要因に着目した体系的研究が見当たらなかった。著者らは、近年、日米欧それぞれの機関が研究試作した計8種の最新 SOA チップを入手し、それらのキャリア緩和時定数(前述の要因 1)、光注入加速作用(要因 2)、3 段階の量子効率などを体系的に評価し、消費電力モデルを作成した(図 4)。時定数や量子効率の注入電流依存性を経験論的に導入した消費電力モデルの予想値は、やや複雑な振る舞いを示す。ただし粗く近似すると、消費電力、 $P_{OP} \propto$  動作周波数帯域、 $B^2$  という 2 乗則が導き出された。実験検証結果は、むしろモデルの予想以上に、2 乗則、 $P_{OP} \propto B^2$  に合致した(図 4(b))。この 2 乗則の結果、1 ビット当たりの消費エネルギー ( $P_{OP}/B$ )は周波数に比例すると期待され、100Gb/s で 10 pJ/bit、200Gb/s で 20 pJ/bit である[\*d]。

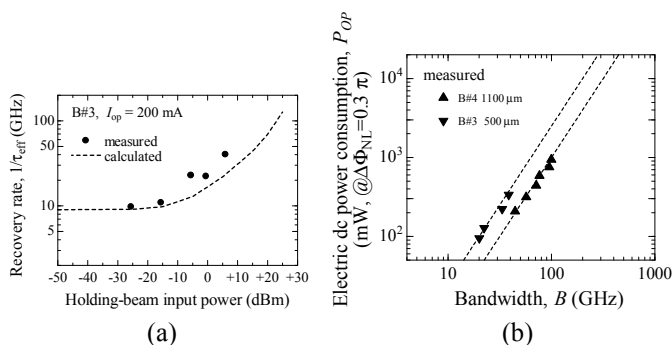


図 4 光加速作用モデル(a)と dc 消費電力モデル(b) [5]

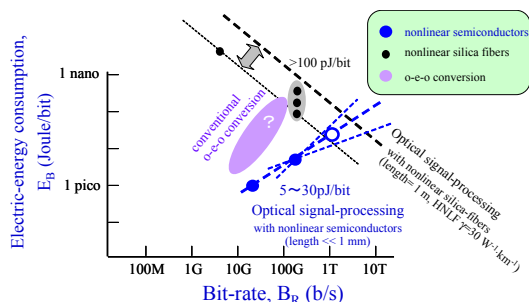


図 5 半導体全光ゲート、o-e-o 方式、および高非線形ファイバー方式の消費電力比較 [10]

以上により、現段階の全光ゲートの消費電力は、例えば 40Gb/s EAM ドライバアンプ(25 pJ/bit, 量産品)や 100Gb/s 電子 demux (55 pJ/bit, 研究段階)の 1/5 ~ 1/10 程度に省エネルギーとみなしてよいであろう(図 5)。

半導体材料に基づく全光パッファについても、超高速・超低エネルギー・高密度集積を目指して、マイクロリングレーザ方式(速度 25 Gb/s, dc 消費電力 1 pJ/bit, 寸法  $20 \times 40 \mu\text{m}^2$  [11])、面発光レーザ方式(同 >10 Gb/s, 3 pJ/bit,  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  [12])、PC/QD-SMZ 光ゲート方式[13]など、活発な研究が進められている。

半導体材料に基づく短パルス光源については、すでに多くの機関がモードロック半導体レーザ研究を積み重ねた。ただし著者らは、「光信号処理デバイス群」を構成するデバイスや材料の種類を最小化し、要素技術の互換性を最大化し、信頼性を高めることが量産化と高密度化の大きな鍵と考えている[14]。例えば、過飽和吸収体(SA)を使わずに、上述の全光ゲートに独自の正帰還を加えると、モードロックパルス発振を開始する。ほぼフーリエ変換限界な 2ps,

40GHz パルス列発生や、ゲート透過窓幅設定値、 $\Delta t$  に伴って出力パルス幅が狭まるなどの基本原理が実証された[15]。

### 3. 将来展望

超並列信号処理の限界追究と独立に、時系列処理の速度限界追究は人類史の王道の 1 つである。これまでのようなブレークスルーを重ねることで、量子コンピュータに到達不可能な「汎用機能を備える光コンピュータ」へ進むと期待される。光コンピュータに先立つ第 1 目標が、「光通信信号の、光信号処理」である。すでに高い目標である。

現在進行中の研究課題(上述の要因 3, 4, 5)の他にも、いまなお誰も探求していない速度制限要因や電力浪費要因が 2, 3 存在し、これらの探求と躍進も期待される。まず今後 5 年程度で 300Gb/s XOR ゲート、消費電力 10 pJ/bit/unit, ゲート寸法  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  (半導体基盤上の素子数  $\approx 3,000$ )の実現見通しが立つのではないかと、大いに期待される。

注記: \*a 光 Demux とクロック抽出については、640Gb/s 実験結果が速報されている。\*b それぞれ簡単のため、半導体光増幅器チップ(図 2)の dc 消費電力と寸法(長さ)。ペルチェ冷却器の消費電力を含まない。\*c この要因は、300Gb/s 以上における速度制限要因の 1 つと考えられている[8]。\*d 現在の材料とデバイス試作技術では信号 1 ビット当たり  $7 \times 10^7$  個の励起電子・正孔対(図 2)を消費すると言い換えることもできる。なお前述の実験結果[3, 4, 7]では、それぞれの加速要因(3)或いは(4)を加えた結果、200Gb/s で 5pJ/bit 相当以下に低下したと考えられる。

[1] S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima, IEEE Photonics Technol. Lett. vol. 13, pp. 1091-1093, Oct. 2001.

[2] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, J. Opt. Soc. Am. vol. B19, pp. 2573-2589, Nov. 2002.

[3] Y. Liu, E. Tangdiongga, et al., J. Lightwave Technol. vol. 24, pp. 230-236, Jan. 2006.

[4] Y. Liu, E. Tangdiongga, et al., Optical Fiber Communication Conference (OFC 2006), Anaheim, PDP28, March 2006.

[5] J. Sakaguchi, F. Salleras, Kohsuke Nishimura, et al., Opt. Express vol. 15, pp. 14887-14900, Oct. 2007.

[6] M.L. Nielsen, J. Mørk, et al., Opt. Express vol. 14, pp. 331-347, Jan. 2006.

[7] J. Sakaguchi, T. Nishida, and Y. Ueno, to be submitted to Opt.Comm.; 坂口淳、西田武洋他、応用物理学会、4a-ZN-2、2008 年 9 月 4 日発表予定。

[8] S. Nakamura, Y. Ueno, and K. Tajima, Appl. Phys. Lett. vol. 78, pp. 3929-3931, June 2001.

[9] Y. Ueno, R. Nakamoto, et al., Opt. Express vol. 14, pp. 12655-12664, Dec. 2006.

[10] 上野芳康、IEICE, PN 研究会、チュートリアル講演会、2007 年 12 月、東京。

[11] M. T. Hill, H.J.S. Dorren, et al., Nature vol. 432, pp. 206-209, Nov. 2004.

[12] T. Mori, Y. Sato, et al., CLEO 2006, Long Beach, May 2006, paper CWG6 and 7.

[13] K. Asakawa, Y. Sugimoto, et al., New J. Phys. vol. 8, p. 208, 2006.

[14] M.K. Smit, 8E2-1 (invited), OECC, Seoul, Korea, July 2005.

[15] R. Suzuki, T. Ohira, et al., CLEO 2006, Long Beach, May 2006, paper CMG5.

(8)

依頼シンポジウム

BCI-1. 光通信における最新極限技術

(光通信システム研専、光エレクトロニクス研専、レーザ・量子エレクトロニクス研専)

- 9月18日 10:00～16:30 第二校舎 A館 A301 講義室 座長 植之原裕行 (東工大)  
 講演時間：各25分
- BCI-1-1 超小型光ファイバモジュールによる高効率 SC 光発生技術 .....高橋正典 (古河電工)  
 BCI-1-2 マルチキャリア光発生技術および 1000 波長 WDM 伝送技術  
 ..... ○高良秀彦・大原拓也・山本貴司・山崎悦史・犬塚史一・高田 篤 (NTT)
- BCI-1-3 光通信用ファイバにおける超低損失化技術 .....○桑原一也・平野正晃・石川真二 (住友電工)  
 BCI-1-4 低損失・低電力・多チャンネル PLC 技術 ..... 井上靖之 (NTT)
- 休憩 (80分) 座長 水落隆司 (三菱電機)
- BCI-1-5 光信号処理技術の現状と可能性 .....渡辺茂樹 (富士通研)  
 BCI-1-6 超高速半導体光ゲート研究の進展と将来展望 .....上野芳康 (電通大)  
 BCI-1-7 量子ドット・フォトリック結晶ナノ共振器を用いた超低閾値レーザ .....○野村政宏・岩本 敏・荒川泰彦 (東大)  
 BCI-1-8 超高速・高出力単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) 技術の最新動向  
 ..... 村本好史・若月 温・古田知史・高橋 亮 (NTT)・石橋忠夫 (NTT エレクトロニクス)
- 休憩 (10分) 座長 関根賢郎 (日立コム)
- BCI-1-9 分散補償を不要とする 100Gbit/s 級光 OFDM 伝送技術 ..... ○森田逸郎・Sander Jansen・田中英明 (KDDI 研)  
 BCI-1-10 コヒーレント QAM 伝送における超多値化技術の最前線 .....中沢正隆 (東北大)  
 BCI-1-11 20Tb/s 超級大容量伝送に向けた超広帯域・超低雑音光増幅中継技術 ..... 増田浩次 (NTT)  
 BCI-1-12 シャノンリミットに迫る光通信用誤り訂正技術 .....水落隆司 (三菱電機)

BI-1. 月周回衛星「かぐや (SELENE)」が拓く月探査の新時代

(宇宙・航行エレクトロニクス (SANE) 研専)

一般無料公開：本企画の聴講は無料です。直接、会場へお越し下さい。

- 9月19日 9:00～12:00 中央校舎 0406 講義室 座長 高島 健 (JAXA)  
 講演時間：指定以外各25分
- BI-1-1 「かぐや (SELENE)」の概要について (30分) .....○滝澤悦貞・佐々木 進・加藤 學 (JAXA)  
 BI-1-2 「かぐや」のサイエンスについて (30分) .....◎加藤 學・滝澤悦貞・佐々木 進 (JAXA)  
 BI-1-3 「かぐや」の成果について—固体惑星科学—  
 ..... ○岡田達明・春山純一・大竹真紀子 (JAXA)・松永恒雄 (国立環境研)・  
 長谷部信行 (早大)・小野高幸 (東北大)・荒木博志・花田英夫 (国立天文台)・  
 並木則行 (九大)・綱川英夫 (東工大)
- 休憩 (20分)
- BI-1-4 「かぐや」の成果について—宇宙プラズマ分野—  
 ..... ○斎藤義文 (宇宙研)・綱川秀夫 (東工大)・小野高幸・熊本篤志 (東北大)・  
 笠原禎也 (金沢大)・吉川一朗 (東大)・田口 真 (極地研)・高島 健 (宇宙研)
- BI-1-5 初の月裏側重力場の観測  
 ..... ○河野宣之 (国立天文台)・並木則行 (九大)・花田英夫 (国立天文台)・岩田隆浩 (JAXA)  
 BI-1-6 「かぐや」の地上システムについて .....◎祖父江真一・奥村隼人・星野宏和・滝澤悦貞 (JAXA)