

電気通信大学 上野 芳康

1987-1999年 NEC 光エレクトロニクス研究所 1999-2001年 NEC 光・超高周波デバイス研究所 2001-2002年 NEC ネットワーキング研究所

2002~現在 電気通信大学 電子工学科

PN研究会 チュートリアル講演会 テレコム先端技術研究支援センター 2007年12月6日

Ultrafast Optical Logic Lab., UEC

The 21st century COE Program INNOvation in Coherent Optical Science





国立大学法人 電気通信大学、京王線調布駅徒歩5分 在学生約6,000人のうち、博士課程約300人(留学生約50人)。 産学連携研究、社会人博士課程、論文博士審査、修了生ご採用など、 どうぞよろしく !





The 21st century COE Program

Innovation in Coherent Optical Science





The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science



[2] 光信号処理、非線形半導体アンプ方式 1990年代半ば~現代まで

[3] それぞれの光信号処理方式の消費電力の特徴 (O-E-O方式との比較)

[4] 将来展望



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science



光信号を光で直接制御し、 光信号⇔電子信号変換を減らし、 超高速に、かつ、省エネルギーに

1980年代は: 無機χ⁽³⁾材料、χ⁽²⁾材料、カルコゲナイド、DAN/DANS、 PPLN、半導体VCON、有機非線形材料など



1990年代初期には:

- [1] 非線形半導体, half-Eg方式 ··· 高速、集積
- [2] 非線形光ファイバー, NOLM方式 ・・・ 高速、しかし長尺

それぞれの消費エネルギーは・・・



The 21st century COE Program

Innovation in Coherent Optical Science

1990年代初期、非線形半導体, half-Eg方式

DEMONSTRATION OF ALL-OPTICAL DEMULTIPLEXING AT 1555 nm WITH AN AIGaAs DIRECTIONAL COUPLER

A. Villeneuve, K. Al-Hemyari, J. U. Kang, C. N. Ironside, J. S. Aitchison and G. I. Stegeman

米国フロリダ中央大学と英国グラスゴー大学の共同提案

Villeneuve, Stegeman, Aitchison & Electron. Lett. 1992.

AlGaAs半導体導波路(長さ20mm)、1.55µm光信号で、

1Tb/s相当の信号列を、光Demuxした。



Fig. 1 Schematic diagram of the pulse-device interaction geometry for demultiplexing signal pulses in a nonlinear directional coupler



The 21st century COE Program

1990年代初期、非線形光ファイバー, NOLM方式

Nonlinear Optical Loop Mirror (NOLM)、英国BT研究所、Doran & Wood, 1988.

ファイバーループ干渉計 (長さ 500m)、1.3µm光信号で、 やや遅い5Gb/s相当の信号列を、光ゲートした。



光制御パルスエネルギー(消費光エネルギー)= 200 pJ/bit



Ultrafast Optical Logic Lab., UEC





9

Ultrafast Optical Logic Lab., UEC





Innovation in Coherent Optical Science

光ファイバー NOLMで、640Gb/s光信号処理 (2000年)





消費光エネルギー (Joule) ⇔ 消費光パワー (Watt)



(A) 64:1 #Demux, 640Gb/s→10Gb/s, 2 pJ/bit

⇒ 2 pJ/bit × 10 GHz = 消費光パワー= 20 mW

(B) もしもクロック周波数で、波長変換・光3R処理すると、

⇒ 2 pJ/bit × 640 GHz = 消費光パワー= 1.3 Watt かなり、大きい。

The 21st century COE Program UFC Innovation in Coherent Optical Science

因みに、光ファイバーNOLM光信号処理、最近は:

1) 1Tb/s 光伝送実証研究の、研究用受信機として:

・1.28Tb/s OTDM伝送(640Gb/s×偏波多重)→光Demux処理,

DFF-NOLM (L= 450 m), NTT Nakazawa, 2000

・ 640Gb/s OTDM伝送(320Gb/s×DPSK)→ 光Demux処理,

HNLF-NOLM (L= 850m), Fujitsu-HHI, ECOC 2004

・640Gb/s OTDM伝送(640Gb/s TDM)→光Demux処理,

HNLF-NOLM (L= 50m), TU Denmark Jeppesen, CLEO Europe 2007

2) 160Gb/s ラベルスイッチ、ルータ実証研究の、暫定的な光処理ゲートとして:

・160 Gb/s OTDMラベルスイッチ、波長変換と光2R

DSF-NOLM (L= 500m), UCSB Blumenthal, OFC 2004

・他にも160 Gb/s 波長変換や光3R、Fujitsu-HHI、住友電工、旭硝子-東大菊池研など

フォトニックファイバ、HNLF、ビスマスファイバ、など



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science





Figure 1: Experimental Setup of 160 Gb/s Mux/Demux link with fiber XPM all-optical wavelength converter.

Channel Channel 2 Channel 3 Channel 4 Channel 5 Channel 6 Channel Channel 8 Channel 12 Channel 9 Channel 10 Channel 11 Channel 13 Channel 14 Channel 15 Channel 16

Figure 3: Eye Diagrams of the 16 wavelength converted channels after demultiplexing



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science UCSB, L. Rau, Daniel Blumenthal, et al., PDP-8, OFC 2004.

光2R機能を有する波長変換器 DSF-NOLM(L=500m)



消費光エネルギー = 6 pJ/bit

160 Gb/s OTDM Wavelength Conversion using XPM in Dispersion Shifted Fiber

Lavanya Rau, Wei Wang, Henrik N. Poulsen and Daniel J. Blumenthal Department of Electrical & Computer Engineering University of California, Santa Barbara, California 93106 Email: lavanya@ece.ucsb.edu

Abstract: Wavelength Conversion of 160 Gb/s OTDM data using cross-phase modulation in 500m of dispersion-shifted fiber is demonstrated for the first time. The converted channels can be received with a BER better than 10⁹ and have a power penalty of < 5dB as compared to the 10 Gb/s baseline across all 16 x 10 Gb/s channels.

© 2003 Optical Society of America OCIS codes: (060.2330) Fiber Optics Communications, (060.4510) Optical Communications



光ファイバーNOLM

Energy per one-bit operation, 1ビット信号処理当りの消費電力は?







The University of ctro-Communications The 21st century COE Program

Innovation in Coherent Optical Science

半導体光アンプ方式 320 Gb/s 波長変換、TU Eindhoven COBRA (2006)



TU Eindhoven, Cobra, Liu, de Waardt, Dorren, et al., OFC 2006 PDP-28

Fig. 1. (a) 320 Gb/s all-optical wavelength conversion setup. (b) eye-diagram of the 320 Gb/s input pump signal. (c) and (d) are eye-diagrams at various positions in the all-optical wavelength converter. The eye diagrams are measured by a 700-GHz optical sampling scope. HNF: high nonlinear fiber, \times : pulse interleaver.



消費光エネルギー = 0.2-0.3 pJ/bit 程度

消費電力(dc)= 800mW/320G= 2.5 pJ/bit



The 21st century COE Program

Innovation in Coherent Optical Science

Ultrafast Optical Logic Lab., UEC

半導体光アンプ方式 640 Gb/s 光DemuxとCR、TU Eindhoven COBRA (2007)



消費光エネルギー < 0.1 pJ/bit 消費電力(dc)= 800mW/40G= 20 pJ/bit (暫定)



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science

Ultrafast Optical Logic Lab., UEC

PDP 1.1.2



日本 材料とデバイス(半導体方式)⇒160Gb/s SMZ-DISC NEDO-FESTA, 1996-2004、斉藤冨士郎氏(神谷氏、中澤氏) 目標: 1Tb/s, 1pJ/bit

TAO-トータル光通信, 1996-2005、阪大長谷川晃氏 10Tb/s DWDM

材料・デバイスと40Gバースト(半導体方式) NEDO-フォトニックネットワーク, 2002-2006、東大中野氏・荒川氏 NEDO-次世代高効率ネットワークデバイス, 2007-2011

米国 材料・デバイスとルーティング(ファイバー方式から半導体方式へ, 40-160 Gb/s) DARPA (UCSB Blumenthal, UC Davis Yoo, MIT Ippen, ...)

欧州 材料・デバイスとルーティング(半導体方式, 160-640 Gb/s)

TopRate, e-Photon, Lasagna (Eindhoven, Denmark, HHI, Alcatel, CIP, ...)



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science

ここから: 消費光エネルギーを、消費電力へ、換算する

標準的な光増幅器(EDFA)を前提し、

消費電力(dc) ⇒ 光パワー 変換効率

= 励起レーザ変換効率 × 励起-発光量子損失 × EDF発光その他損失

 $= 0.3 \times 0.6 \times 0.2 = 1/20程度$ とする。



ただし、 デバイス温度制御(冷却)に基づく、消費電力増大係数





本講演では除外します (デバイス単体の消費電力)



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science



Innovation in Coherent Optical Science

半導体光アンプ方式の光信号処理デバイスの、 消費電力、およびその周波数依存性について

高速動作実証で顕著な成果を挙げているものの、
 ⇒ 消費電力に関する研究は、殆ど無いかもしれない。

・以下、

半導体光アンプ方式(DISC波長変換器)に関する、 私たちの基礎研究をご紹介します (NEC 2002~電通大2007)。



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science

半導体SMZ-DISC方式の波長変換器の、

消費電力、およびその周波数依存性について(1)





半導体SMZ-DISC方式の波長変換器の、

消費電力、およびその周波数依存性について(1)



消費電力、およびその周波数依存性について (2) 半導体アンプで高効率かつ高周波な非線形位相シフトを発生するには?

電通大-KDDI研(Sakaguchi, Nishimura, Ueno, Optics Express 2007)



研究目的:非線形位相シフト量の、

周波数、電流(⇒消費電力)、SOA量子効率、SOA構造依存性を。



The 21st century COE Program

Innovation in Coherent Optical Science

消費電力、およびその周波数依存性について(2) 半導体アンプで高効率かつ高周波な非線形位相シフトを発生するには?

電通大-KDDI研(Sakaguchi, Nishimura, Ueno, Optics Express 2007)





Custom-designed SOA chips, Leff= $300-1100 \ \mu m$



using lensed-fiber and xyz-stages

消費電力、およびその周波数依存性について (2) 半導体アンプで高効率かつ高周波な非線形位相シフトを発生するには?

SOA内部で3段階の量子効率(損失)をモデル化し、各段階の測定結果を再現した。



消費電力、およびその周波数依存性について(2) 半導体アンプで高効率かつ高周波な非線形位相シフトを発生するには?

電通大-KDDI研(Sakaguchi, Nishimura, Ueno, Optics Express 2007)

SOA試作品:構造×3種(日、米、欧)、導波路長×3種を、評価・モデル化した結果:





消費電力、およびその周波数依存性について(2)

半導体アンプで高効率かつ高周波な非線形位相シフトを発生するには?

電通大-KDDI研(Sakaguchi, Nishimura, Ueno, Optics Express 2007)



The 21st century COE Program
Innovation in Coherent Optical Science





光3R長距離中継器 (NEC/FESTA, 40Gb/s)

Data Data 40G 10G LN Receiver 10→40G I 40→10G -PC-SW1 ED MLLD Mod. O-MUX. CLK E-DMUX Extraction 10 GHz 10 Gb/s CLK Data Δλ=3nm Optical 3R SW4 EDFA SWB Span4 Span3 Span2 Span1 50 km 50 km 50 km 50 km

Figure 2: Setup for a transmission experiment with an optical 3R regenerator

Y. Ueno, et al., IEEE PTL 2001.Y. Hashimoto, et al., ECOC 2003.

半導体SMZ方式の光3Rゲート×2台。 40Gb/sを400km間隔で光3R中継。 30周回し、12,000km伝送。

400 km	1000 km	12000 km
$\Lambda \Lambda \Lambda \Lambda$	AAAA	AAAA
AVVA	AAAA	
Conference and the	Constant and	

Figure 4: Eye diagram after transmission with the regenerator span of 400 km using an optical 3R.

消費光エネルギー < 0.05 pJ/bit 消費電力(dc)= 600mW/40G= 15 pJ/bit



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science

Ultrafast Optical Logic Lab., UEC

光3R中継器プロトタイプ

<u>NEC/NEDOフェムト秒Pj</u> ECOC 2003 電子情報通信学会 2003秋

全半導体ベースの光3R中継器による 小型、低コスト、低消費電力動作可能なサブシステム



光メモリ (TU Eindhoven, M.K. Smit氏)





M.T. Hill, M.K. Smit, et al., Nature 2004

"Planar configuration"
光半導体集積リング型双安定レーザ
面積 18 × 40 µm²
0⇔1 切替時間 20 ps (25Gb/s相当)

消費光エネルギー < 0.005 pJ/bit 消費電力(dc)= 30mW/25G= 1 pJ/bit



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science

Ultrafast Optical Logic Lab., UEC

光メモリ (奈良先端大,河口氏)



Fig. 1. Polarization bistable operation in a VCSEL.



消費光エネルギー < 0.001 pJ/bit 消費電力(dc)= 30mW/10G= 3 pJ/bit

The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science H. Kawaguchi et al., CLEO 2006, CWG6, 7

"Vertical configuration"

0.98-µm-wavelength, 2-dim., bistable VCSEL array. 0⇔1 切替時間 7 ps







Monolithic PC/QD-SMZ by FESTA, Optics Express 2004

光メモリ (筑波大-産総研-電通大-NEC/NEDO)



Targets: Very small and low-power Application: FF memory for buffering

NEDOプロジェクト、2005~2007現在進行中



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science



- 電気通信大学 坂口淳、大平高志、Ferran Salleras、中本亮一 KDDI研究所 西村公佐、矢崎智基
- デンマークエ科大 Jesper Mörk, Mads Nielsen
- NEC研究所 田島一人、中村滋、小倉一郎、橋本陽一
- 筑波大学 浅川潔、杉本喜正
- カールスルーエ大 Juerg Leuthold
- 沖電気研究所 辻弘美、藤井浩三
- 情報通信研究機構 和田尚也
- 電気通信大学 三木哲也、来住直人



The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science

Ultrafast Optical Logic Lab., UEC

本講演のまとめ

・1990年代以降 半導体アンプ方式 と 非線形光ファイバー方式

・半導体アンプ方式は、『O-E-Oに比べて省電力かつ高速』を目指している。

しかし従来、消費光エネルギーが報告されてきた。

・本講演では、直接・間接関わってきた専門家の1人として、

デバイス単体レベル

『消費電力』の現状とその理解度、そして今後の展望

を整理し、ご紹介しました。

光信号処理方式では 5 pJ/bit (160G) ~ 30 pJ/bit (1Tb/s) [1W@160G ~ 30 W@1Tb/s]

電子数 7,000万個

41

The 21st century COE Program Innovation in Coherent Optical Science