

超高速で省エネルギーな 光半導体ゲート

*Ultrafast, low-power-consumption,
semiconductor-waveguide-based,
all-optical gates*

InGaAsP waveguide on InP substrate

10 GHz ~ 100 GHz ~ 1,000 GHz (1 THz)の信号を動かす世界



上野 芳康

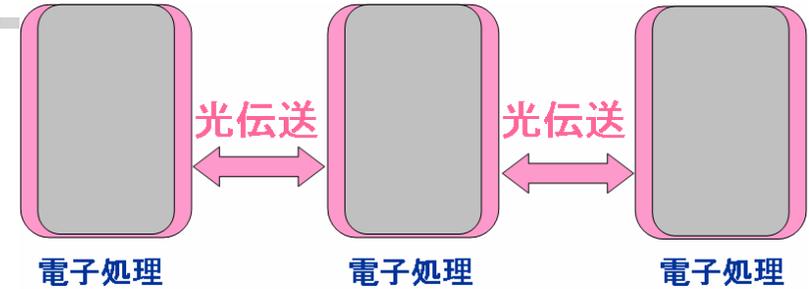
電気通信大学 電子工学科

<http://www.ultrafast.ee.uec.ac.jp/>

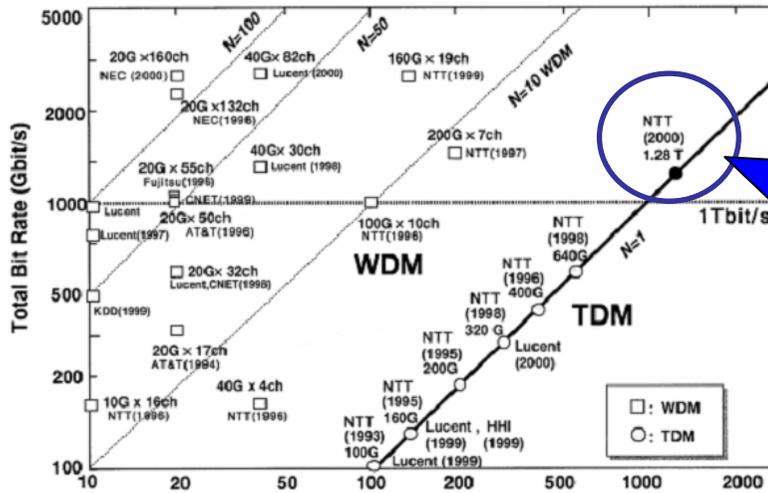
木村一色上野研究室合同セミナー
2008年4月4日

”光伝送”は、1990年代に1Tb/s, 10Tb/s達成

従来の『光』通信研究



↑ [TDM × WDM] 周波数



→ TDM周波数

TDMの1Tb/s伝送(2000年)

エレクトロニクスは40Gb/s

WDMの10Tb/s伝送(2001年)

高速エレクトロニクスは、現在も将来も、

- ・ 40~100 Gb/s = 5ピコ秒まで？
- ・ 消費電力が増大？！

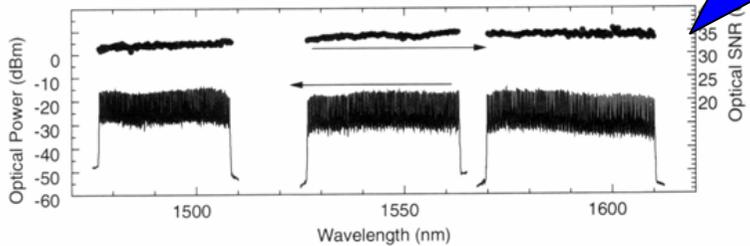


Figure 5. Optical spectrum and the optical SNR at the preamplifier input. Resolution bandwidth is 0.1 nm.

WDMスペクトル

通信・コンピュータの最速部に、もっと光を！



example: big power consumer in the world

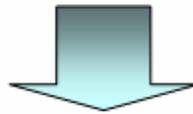


最速・最大規模の電子ルータ
(CISCO社製)

Big consumer

CISCO's high-end router, CRS-1

Electricity consumption= 1 MW



30 nJ/bit
40-Gb/s electronics

for comparison

power suppliers

Capacity of nuclear power plants = 1 GW / reactor

Max capacity of them in Tokyo area (TEPCO) = 65 GW

already 3%



“Data centers”

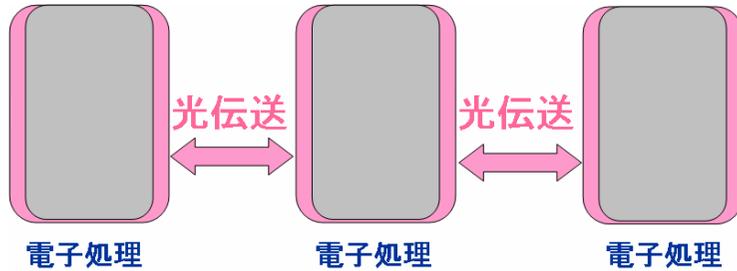
for google, yahoo.

Electricity= 20-30 MW/center

Groningen and Eemshavn, Netherlands.

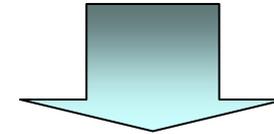
通信・コンピュータの最速部に、光を！

現在全ての光通信



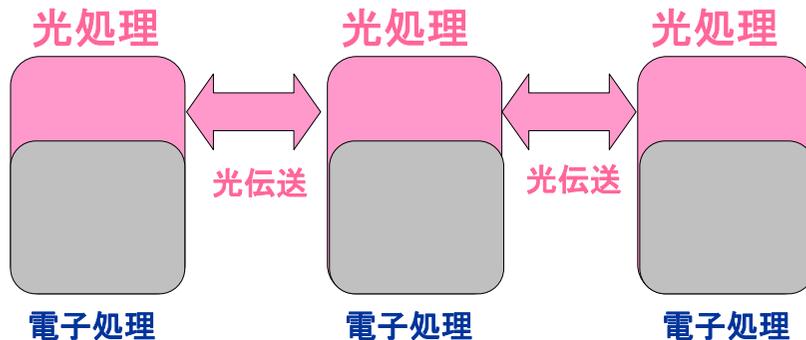
光と物質電子の超高速相互作用は、
きわめて弱い。

(マイクロジュールパルスSWならば、30年前すでに)



研究目標

21世紀は



- ・ **ビットレート = 160 Gb/s ~ 1 Tb/s**
(応答速度 < 2 ps)
- ・ **消費光エネルギー < 0.1 pJ/bit**
- ・ **消費電力 < 10 pJ/bit**
- ・ **その後に、光回路集積**

『超高速 高効率 集積』の3つを兼ね備える材料と方式 = **半導体！**

半導体導波路を利用する

320 Gb/s 光ゲートと消費電力、TU Eindhoven (2006年)

SMZ-DISC構造 (Blue-BPF 付加)

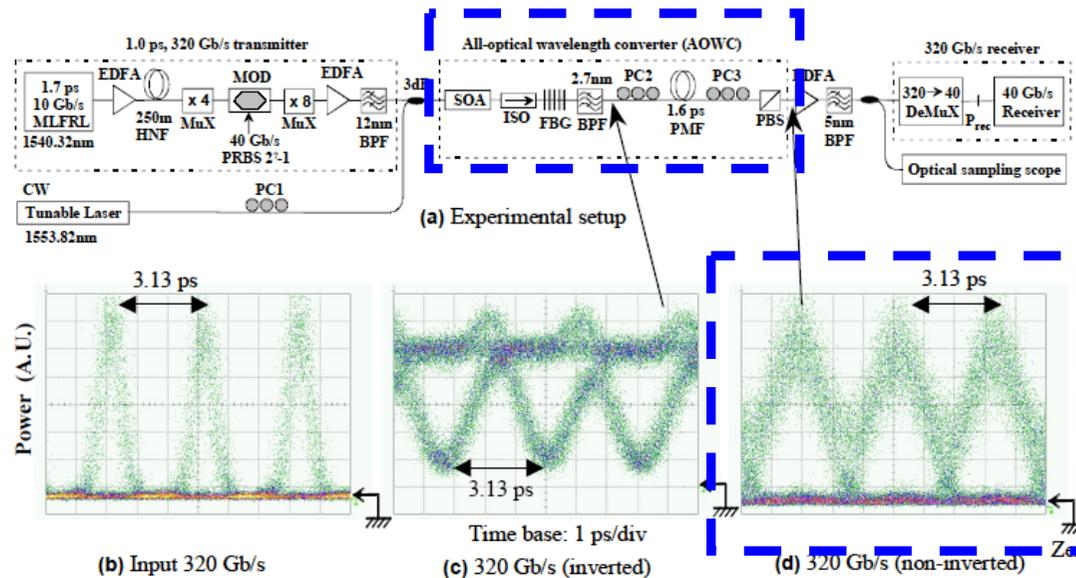


Fig. 1. (a) 320 Gb/s all-optical wavelength conversion setup. (b) eye-diagram of the 320 Gb/s input pump signal. (c) and (d) are eye-diagrams at various positions in the all-optical wavelength converter. The eye diagrams are measured by a 700-GHz optical sampling scope. HNF: high nonlinear fiber, ×: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

TU Eindhoven, Cobra,

Liu, de Waardt, Dorren, et al., OFC 2006

PDP-28



世界最速:

640-Gb/sゲート実験

現在進行中。

(アイントホーフェン工大)

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

光波形歪や消費エネルギーの

原理的理解と設計手法が、

まだまだ未熟。

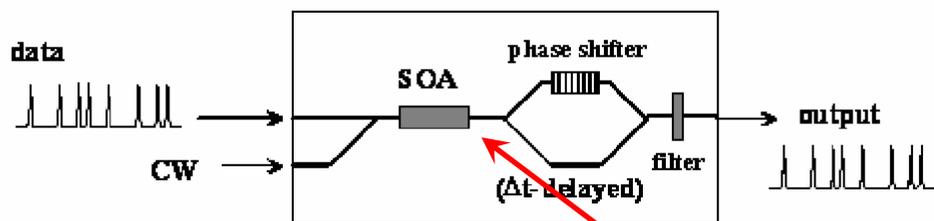
⇒⇒ 地道に研究進行中

(電気通信大学)

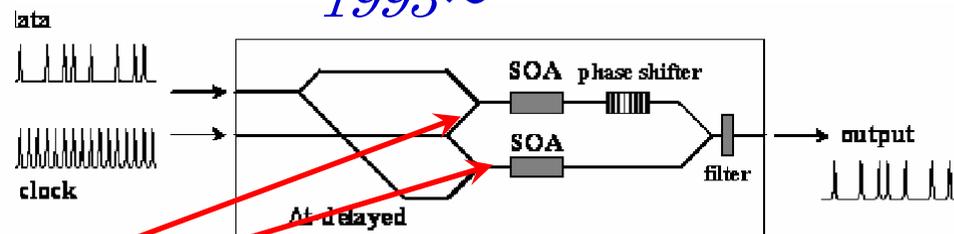
SMZ, SMZ-DISCゲート構造は、日本のオリジナル = 量子的な半導体材料 と 光波的な導波路回路 で 超高速化

(日米欧で殆ど同時進行)

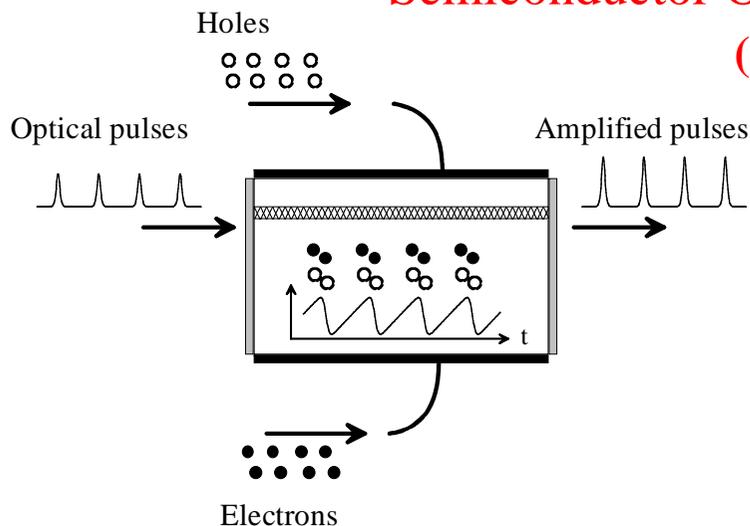
SMZ-DISC構造
1998~



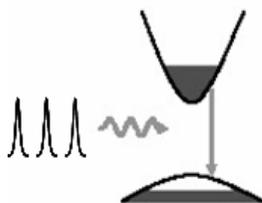
SMZ構造
1993~



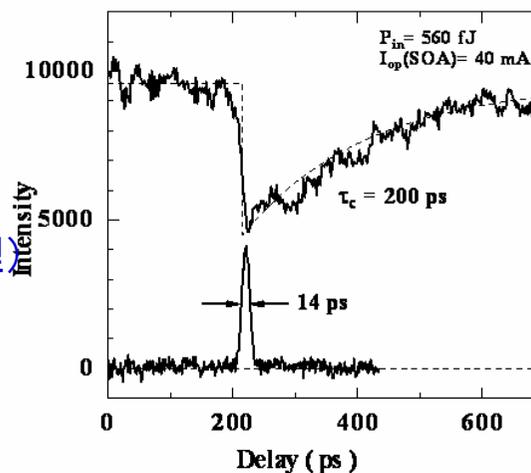
Semiconductor Optical Amplifier (SOA)



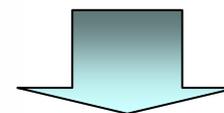
Resonant Band-filling
(高効率な動作原理)



光出力波形



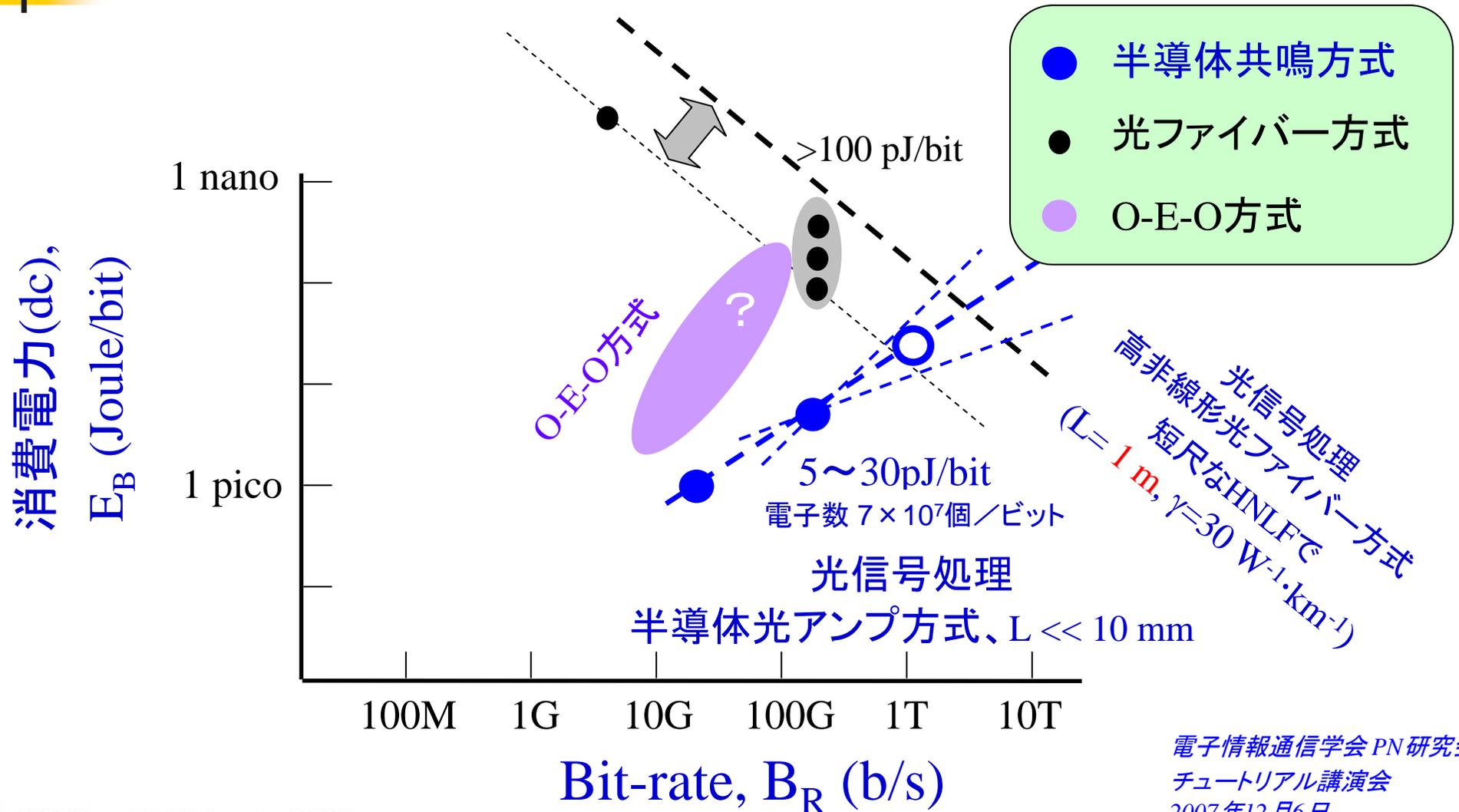
干渉前



干渉後
(DISC, 1998)

1ビット信号処理当りの”消費電力”

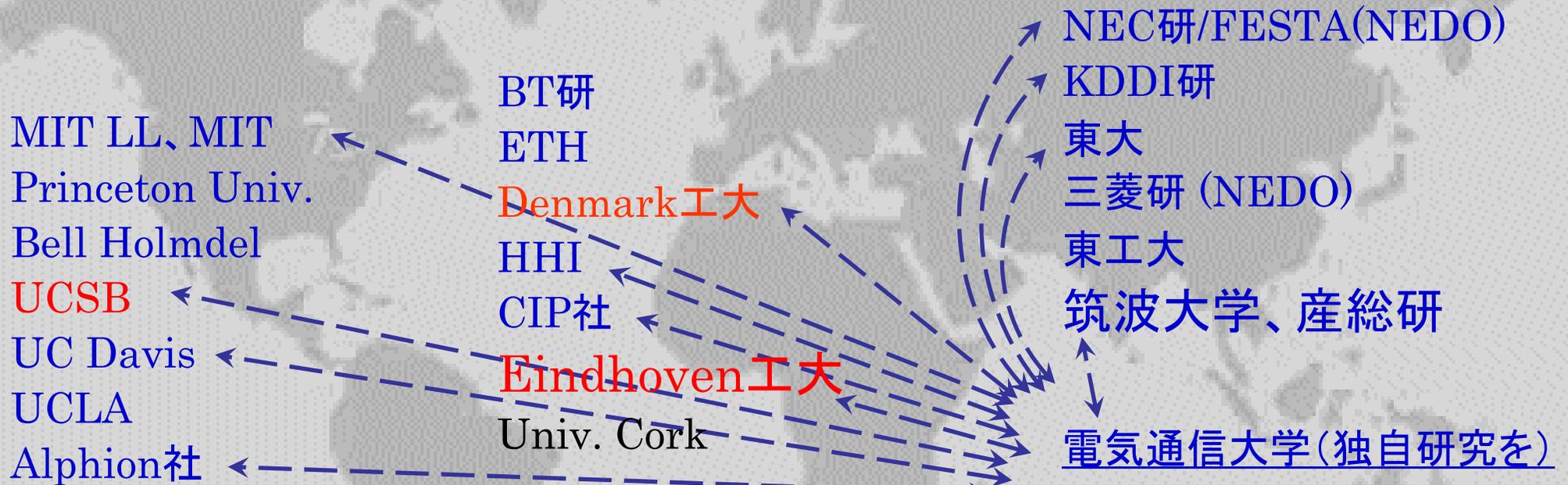
半導体光アンプ方式 vs. 光ファイバー方式、今後の展望



電子情報通信学会 PN 研究会
チュートリアル講演会
2007年12月6日

半導体SMZ, SMZ-DISCゲート研究の、展開と交流

IEEE LEOS, OSA
(OFC, ECOC, CLEO, IPRM)

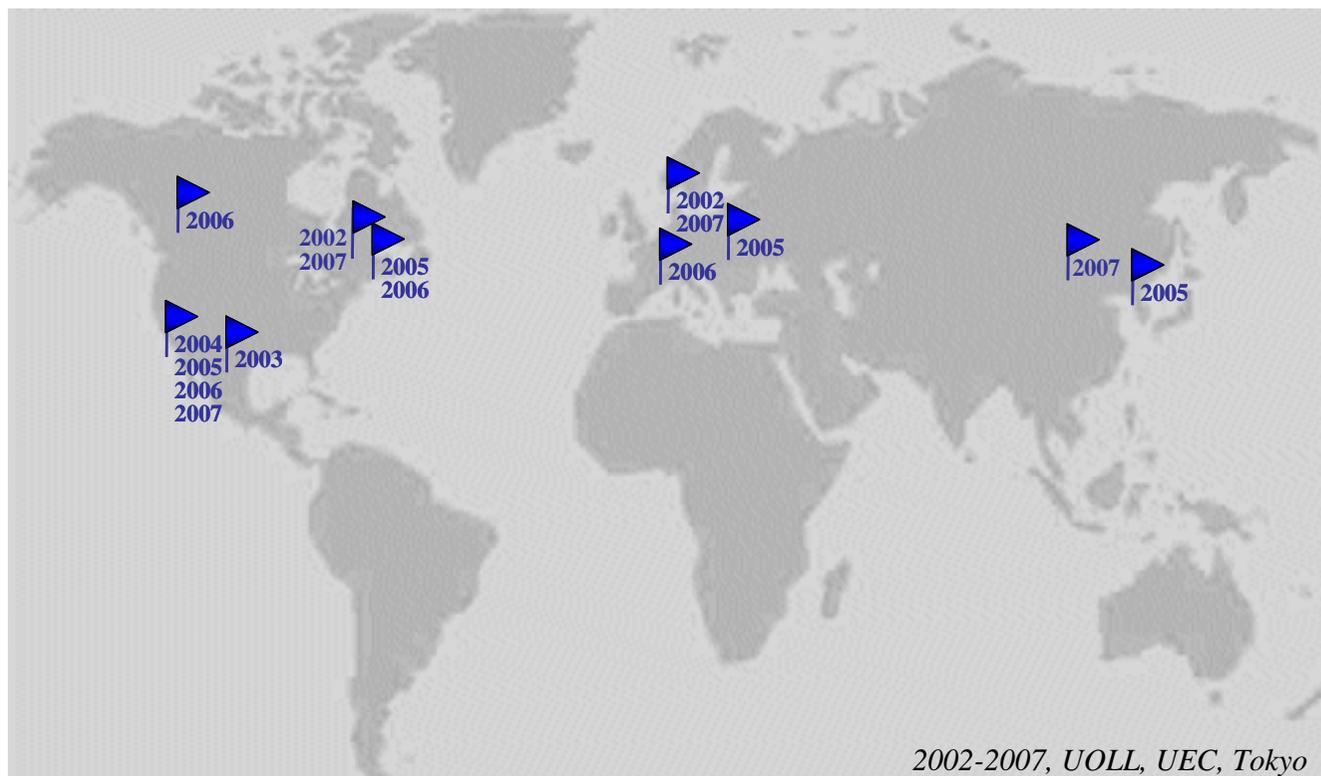


*) 光半導体集積試作施設も、強い。

(中国・インドは、まだ)

国際学会出張、上野研 2002-2007

ドクター学生は必ず、
マスター学生もできれば、
狙ってくださいネ！



半導体、光集積導波路回路の世界

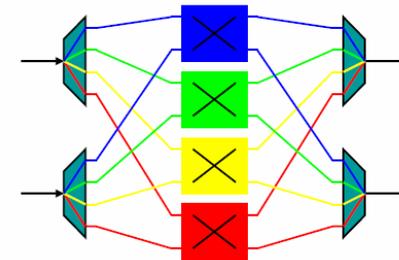
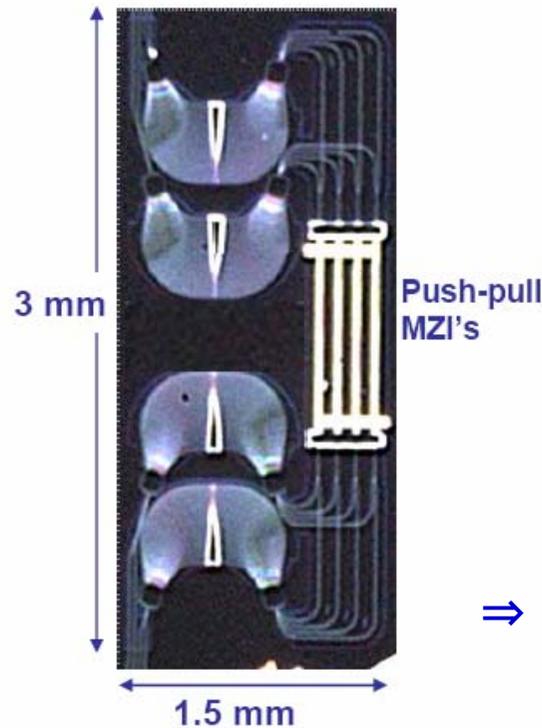


TU/e

Courtesy from Prof. M.K. Smit (invited talk, 2005)

Trends in Passive Devices for Photonic Integration

OECC '05, July 5-8, Seoul



Total on-chip loss (TE) < 12 dB
Inter-channel crosstalk < -18 dB
Dimensions 1.5x3 mm²

⇒ 最近は、
分散補償モードロックレーザも

大学にとっては、半導体は重い？ 高い？
⇒⇒ 未来があり、そして、やり方次第！

1歩ずつ歩んできた 光ゲート研究、次の5年間に（電通大で）

Sakaguchi, et al, Optics Express 2007

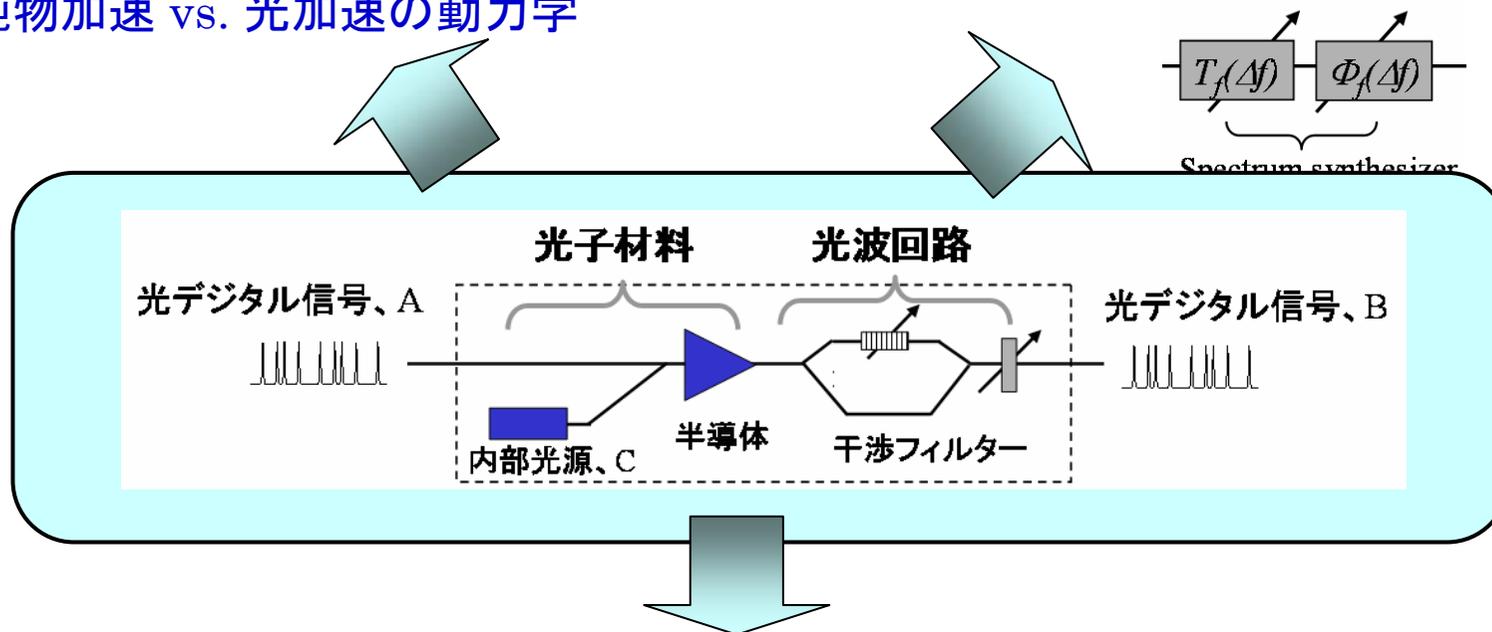
- ② 材料の第1時定数(τ_1)は、
消費電力決定要因では無い？

不純物加速 vs. 光加速の動力学

Ueno, Nakamoto, et al, Optics Express 2006

- ① 材料共通の第2、第3時定数(τ_2, τ_3)を、
光回路で解決しよう
光スペクトル合成 (UEC-NICT共同)

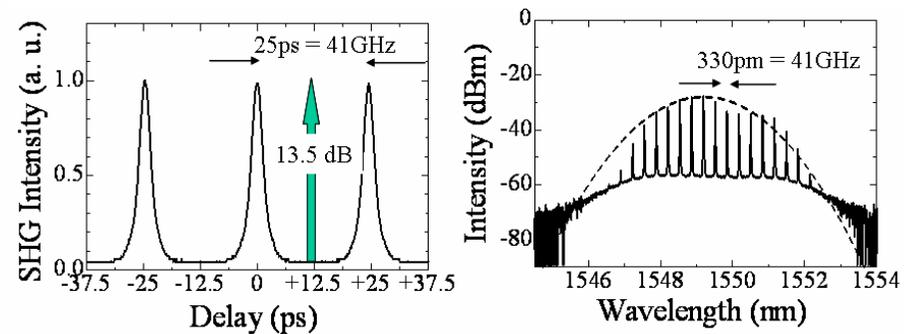
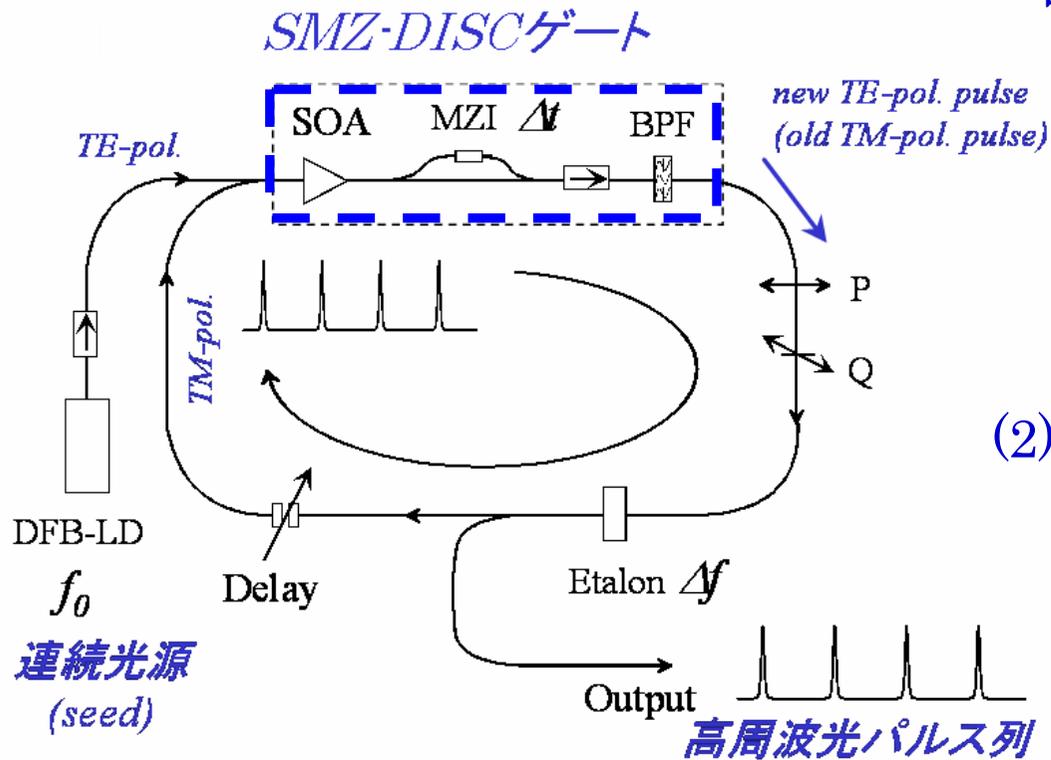
*) フォトニック結晶と相性



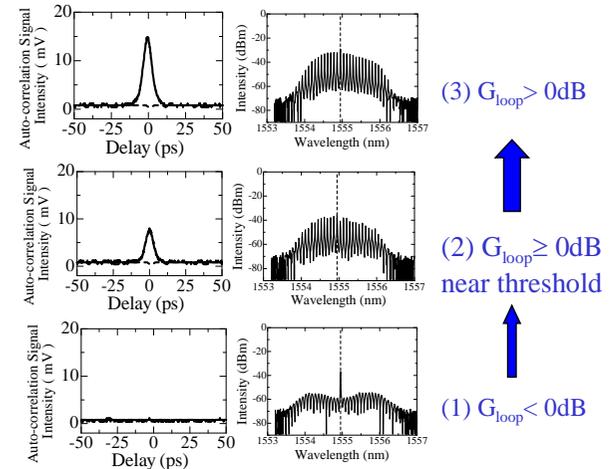
- ③ 将来の超小型回路を見据え、
電子励起から光励起の省電力性

光ゲートの応用研究：独自のモードロックパルス発生

(1) 2-ps, 40-GHzパルス発生 ($\Delta t \cdot \Delta f = 0.53$)
Suzuki et al., CLEO 2006



(2) パルス発生閾値特性(原理確認)



周波数、純度1000倍に

毎秒200ギビット級 高速光通信へ 電通大が光源開発

電気通信大学の上野芳康准教授らは、毎秒200ギビット級（キガは10億）の次世代高速光通信システムへの適用を目指す高性能な光源を開発した。既存の半導体レーザーが使える独自の光半導体回路方式を採用した高速パルス光源で、光周波数の純度を従来比1000倍に高めた。1、2年後をめどに集積化し、通信分野のほか、小型で安価、低消費電力の特徴を生かせる医療や計測分野への応用も視野に入れる。

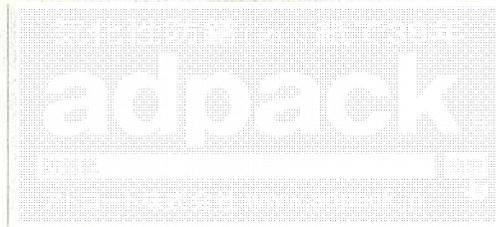
上野准教授らは01年、既存の光部品で構成できる量産に適した独自の光半導体回路方式を提案。この方式で、06年に半導体レーザーの連続光から毎秒40ギビットの光信号を生み出すことに成功した。ただ、同方式を採用すると、周波数の純度が低くなる課題があった。

今回、日本航空電子工業と協力し、高品質で高い反射率を持つ新しい反射干渉回路（エタロン）を試作。これを従来の半導体回路に組み込んで不要なスペクトル成分を除去、周波数純度を大幅に向上した。試作した装置

の消費電力は1・5ワ。毎秒10ギビットの光信号で今回性能を確認したが、同40ギビットの試作機完成も近いという。同40ギビットの信号を光時分割多重（OTDM）で5本束ねれば、約5年後にも毎秒200ギビットの高速光通信が実現できるという。27日から日本大学（千葉・船橋）で開かれる応用物理学学会講演会で発表する。



試作した高速パルス光源の主要部



今回、日本航空電子工業と協力し、高品質で高い反射率を持つ新しい反射干渉回路（エタロン）を試作。これを従来の半導体回路に組み込んで不要なスペクトル成分を除去、周波数純度を大幅に向上した。試作した装置



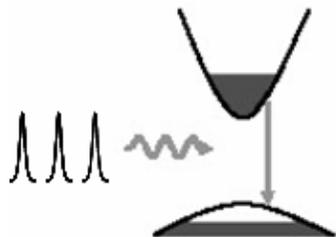
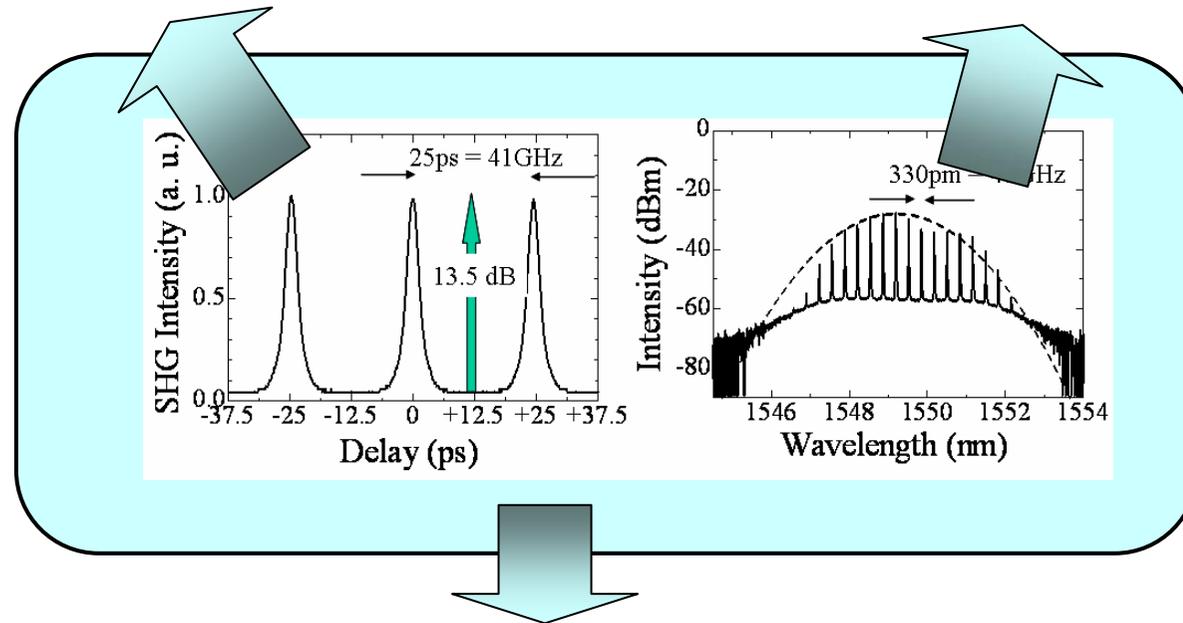
(2008年3月25日付け第1面)

SMZ-DISCモードロックパルス：次の5年間に

① 640Gb/s用パルス信号源へ

半導体集積回路化(共同研究)、
正反対に、low-endな σ 共振、FP共振(計測用)

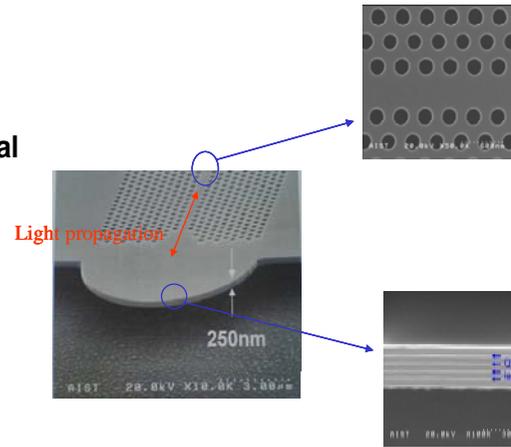
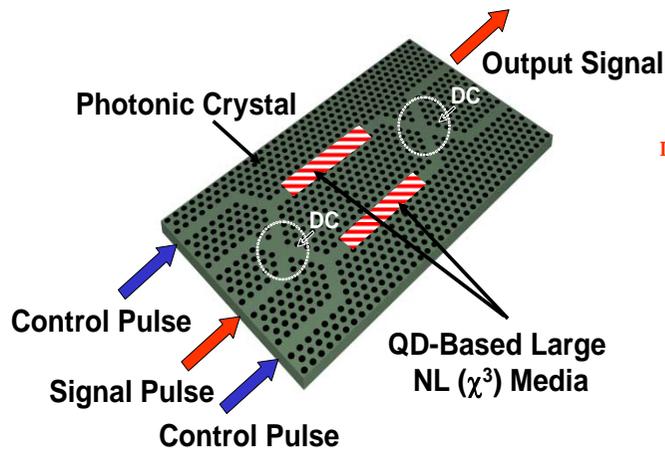
② 特徴を活かして、 超小型集積可能な 10THz 光コム発生 (NICT、AISTにご相談中...)



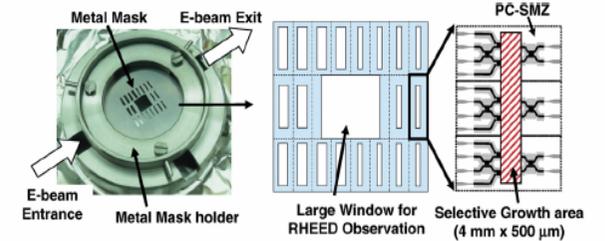
半導体のband-to-band遷移さえあれば、
SA不要。どの帯域でもモードロック可能?!

③ 特徴を活かして、 緑～近紫外でモードロックパルス発生

Photonic-crystal/quantum-dot-integrated SMZ gate for FF memory

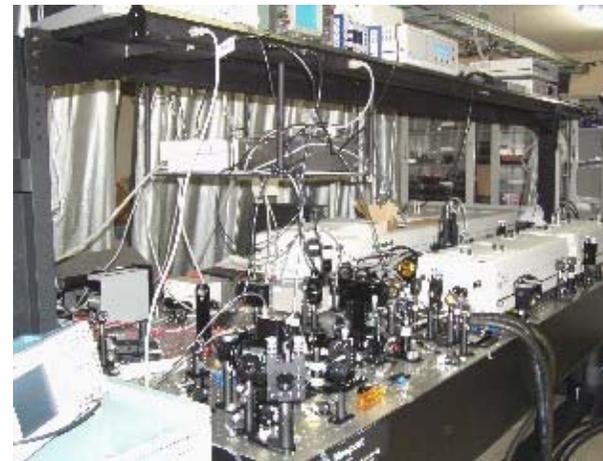


筑波大学・産総研



Monolithic SMZ by FESTA, Optics Express 2004

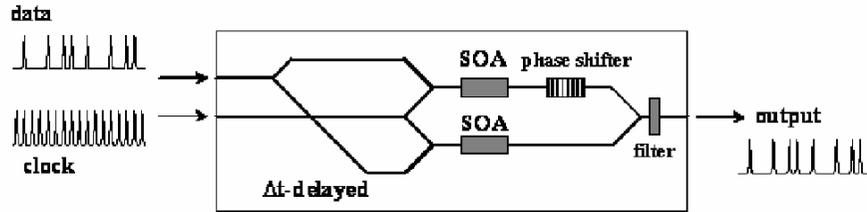
Targets: Very small and low-power
Application: FF memory



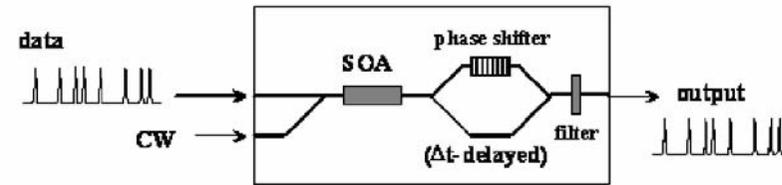
光位相緩和特性
評価装置、
電通大W7-513

超高速な光半導体ゲートの、動作設計モデルの成功例

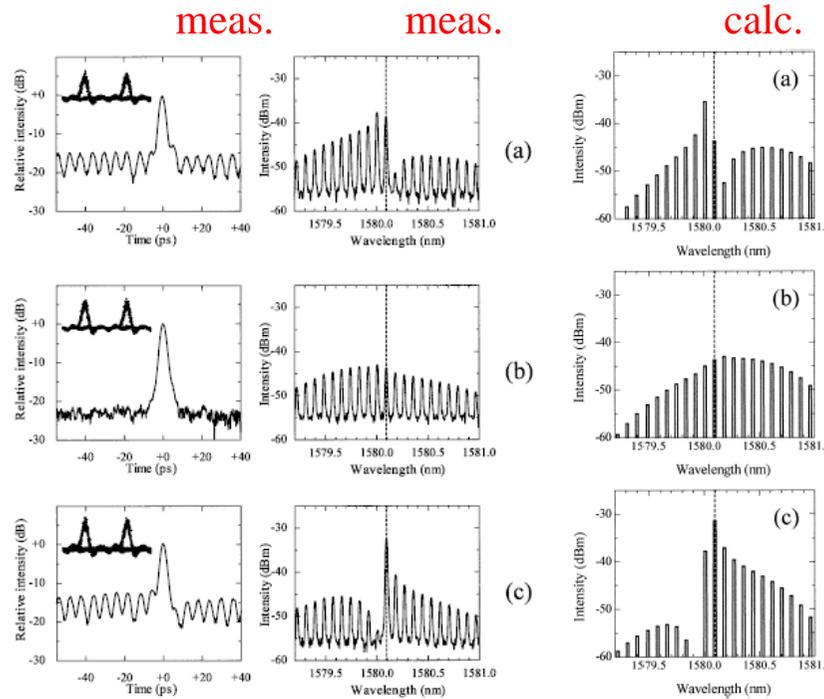
SMZ方式、1993~



DISC方式、1998~



waveforms
in the log scale

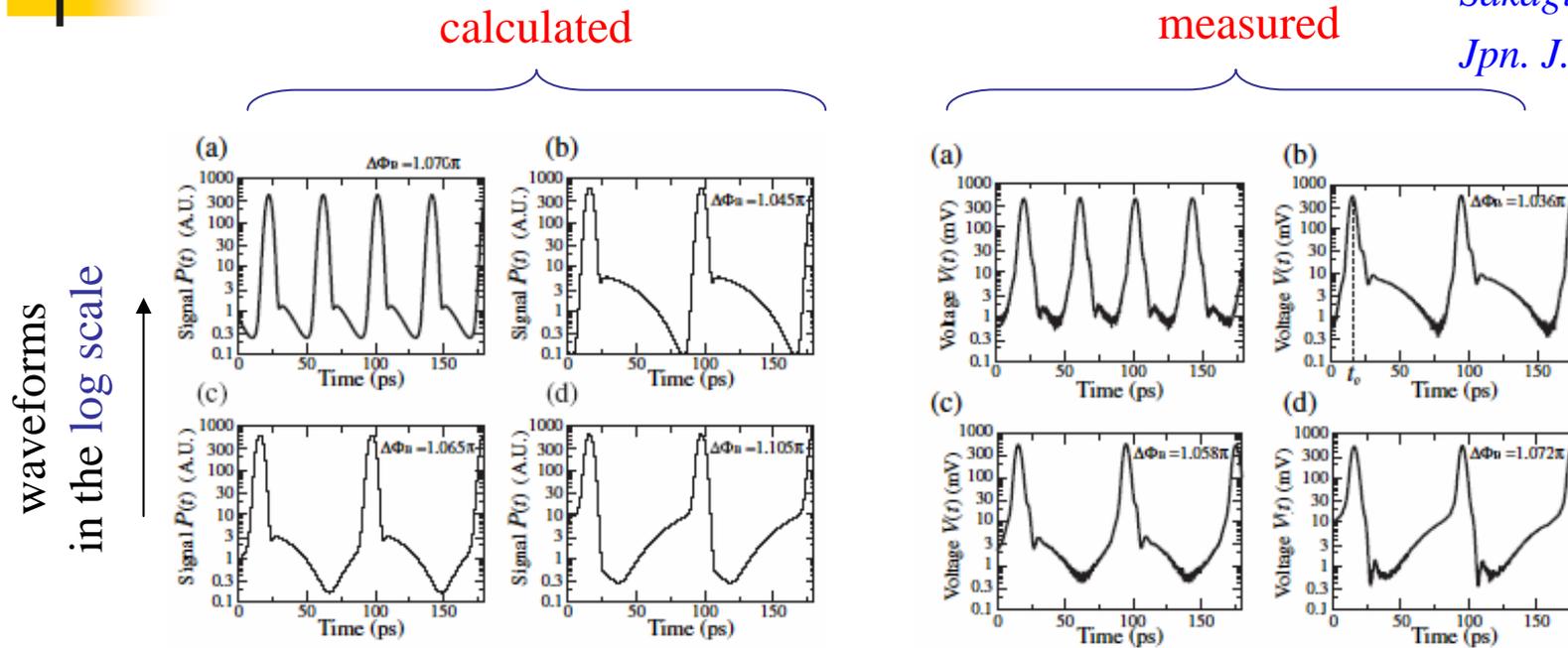


*Ueno et al., 2001-2002
ECOC, IE³ PTL, IEICE Trans.*

超高速な光半導体ゲートの、動作設計モデルの成功例

Sakaguchi, et al.

Jpn. J. Appl. Phys. Oct. 2005



デバイスモデルの骨格は:

半導体材料のバンドフィリング効果

入力光パルス ⇒ 励起電子密度が過渡応答 ⇒ 屈折率が過渡応答 (非線形光学応答)

⇒ 導波光に光位相シフトが発生 ⇒ 出力光パルスが発生する

現在までに、時定数 2ps、周波数 200GHz、光相対強度 10^3 程度までの妥当性が検証されている。

⇒ 研究開発にとっても、実用的な光デバイス回路設計にとっても、モデルが必須である。

今後、1ps以下、200GHz以上の高速領域へと、拡張を続ける。

日本と世界の情報通信産業が、**光半導体固有の超高速・高効率特性を、**
どれくらいまで大きく育てられるか楽しみ !

今日の、個別発表内容



現在～今後5年間
(私達の目安と役割)

500Gクラス材料共通の第2・第3時定数(τ_2, τ_3)を
解決する光回路設計と基礎実験開始。(西田)

500Gクロックパルス段階の初歩的DISC変換

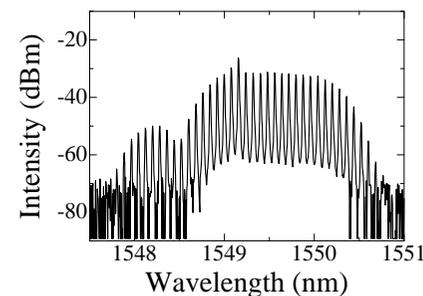
200GデータパルスのDISC変換実験、
超高速データ発生と計測を含む。(坂口)

200GデータパルスをXOR演算
(平易な偏光保持伝送を前提に、ゲート先行)

40Gクラスの光双安定メモリー材料特性評価、
ナノ光導波路を利用。(本間)

1ps, 40～160G高純度クロックパルス光源
XPM蓄積し、光周波数コム帯域を5THzへ拡大

2ps, 10GHzクロックパルス光源を高純度化。(竹内)



(光集積協力候補: NTT, TU/e, TU Denmark)