

半導体光集積デバイス研究の40年

中野 義昭

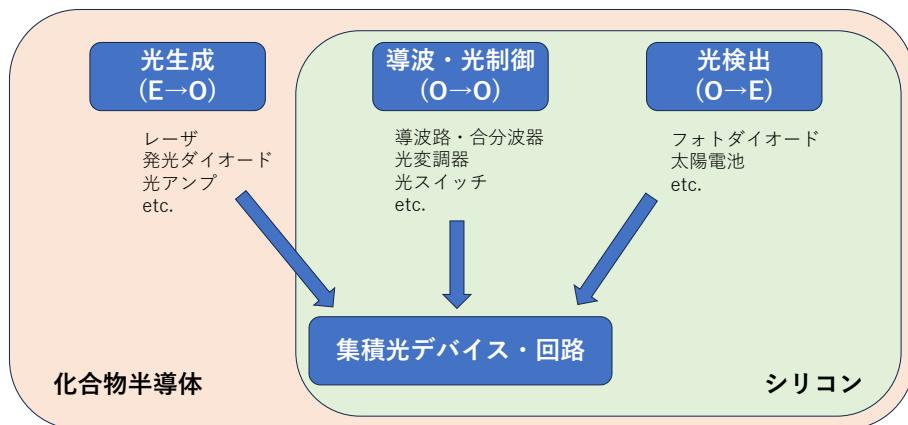
東京大学 工学系研究科 電気系工学専攻

謝辞

- 実際に現場で研究を遂行してくれた、研究室の歴代および現役大学院生、卒論生、研究員の皆様に深く感謝します。
- 研究現場や研究室運営を支えてくれた歴代および現役職員の皆様に深く感謝します。
- 共に研究室を運営してきた先端研 杉山正和所長・教授、工学系研究科 種村拓夫准教授に深く感謝します。
- 皆様のご協力なしには、今日の話はありません。

2023.8.25 15:00-16:00 @機械振興会館

光エレクトロニクスの3大要素



中野研究室 (Prof. Yoshiaki Nakano)
Integrated Photonics Laboratory

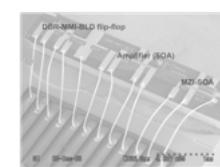
URL:<http://www.ee.t.u-tokyo.ac.jp/~nakano/lab/> Bldg. Eng-3 1F Room 125

学部	電気電子工学科	本郷
大学院	工学系・電気系工学専攻	

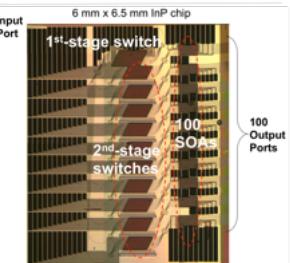
21世紀の光情報通信ネットワーク、光情報処理・記録に向けて、化合物半導体をベースにした新しい高性能な半導体レーザや半導体光制御デバイス(光スイッチ、波長変換器、光アンプなど)と、これらのデバイスを集積化して構成される高機能な半導体集積光デバイス・光集積回路を研究しています。またエネルギー問題の解決に向けて、化合物半導体に基づく新しい高効率な太陽電池の研究開発も行っています。2010年にスタートした絶長直轄「太陽光を機軸とした持続可能なグローバルエネルギーシステム」総括寄附講座の核研究室です。これらデバイスを作製するための、InP、GaAs基板上の InGaAsP、InGaAlAs混合などによる量子マイクロヘテロ構造と、GaN、AlN、InN等のIII族窒化物量子マイクロヘテロ構造の結晶成長や加工技術も、研究対象です。

■大規模光集積回路 (pLSI) Large scale photonic integrated circuits

光集積回路の集積度は、超大容量光通信の進展とともに飛躍的に高まっています。本研究室では、次世代光通信や光インターフェクト応用はもとより、生体イメージング等の新たな応用に向けて、世界最大規模の光集積回路 (pLSI) の研究開発を行っています。



InP chip integrating all-optical flip-flops, optical amplifiers, and all-optical gates.

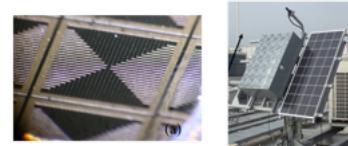


Monolithic optical switch integrated circuit on an InP chip having one of the largest integration scale in the world.

■超高効率太陽電池

Ultra-high efficiency photovoltaic cells

当研究室では、全ての太陽電池の中で最も効率の高い化合物半導体集光型太陽電池の研究開発を行っています。具体的には、量子マイクロ構造を活用した多接合太陽電池の結晶成長と作製、効率的な光閉じ込め構造の開発、集光光学系と追尾機構の設計と試作を行っています。企業や他大学と一緒に組むことで、変換効率の世界記録を米国、ドイツと共に競っています。現在は、2020年に50%を超える変換効率を実現することを目指して、日夜研究に励んでいます。



Photos of a multi-quantum well solar cell chip (left) and a roof-top concentrator PV module (right).

■太陽光を機軸とする再生可能エネルギーシステム

Renewable energy system based on sunlight energy

超高効率集光型太陽電池を基にしたオフグリッド自立型エネルギー・システムの研究を行っています。究極の目標は、化石燃料と核に頼らず、再生可能エネルギーのみで営むことのできる持続可能な文明を構築することです。研究開発の主眼は、太陽光由来のエネルギーを高効率に化学物質に注入する技術の開発、および、用途に応じたエネルギー蓄積媒体の開発です。エネルギーを長距離輸送するか、ローカルに利用するか、利用形態は何か(燃焼、発電、肥料その他)で、蓄積媒体(気体、液体、固体)の選択肢も変わってきます。システム思考で新しいエネルギー・システムを追求します。



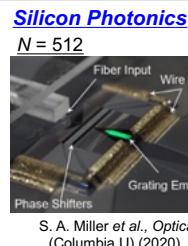
World-wide transport of solar fuel

自分で作ると見えてくる

当研究室では、太陽電池や集積光デバイスを、一から実際に作ります。実際に作製されたデバイスと向き合って、丹念に特性を調べてみると、コンピュータ上にモデル化されたいわば「アーチャルなデバイス」とは随分異なっていることがあります。リアルなデバイスとの対話は、われわれにとって最も重要な研究過程と言えます。

Demonstration of large scale optical phased arrays

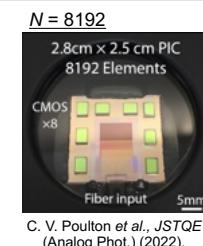
11



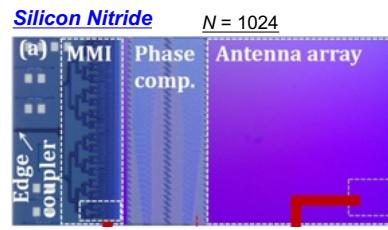
S. A. Miller et al., Optica (Columbia U.) (2020).



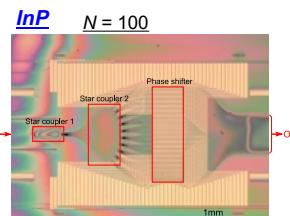
S. Chung et al., JSSC (USC) (2017).



C. V. Poulton et al., JSTQE (Analog Phot.) (2022).



C. Sun et al., JSTQE (Chin. U. H.K.) (2022).

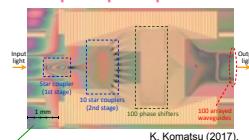


K. Komatsu et al., PTL (U. Tokyo) (2021).

半導体光集積回路

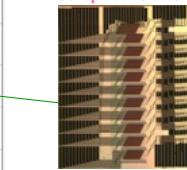
Integrating hundreds of optical components (lasers, detectors, amplifiers, phase shifters, splitters, etc.) on a compact semiconductor chip.

100-port optical phased array

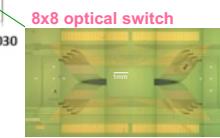


K. Komatsu (2017).

1x100 optical switch



I. M. Soganci (2012)



M. J. Kwack (2012)

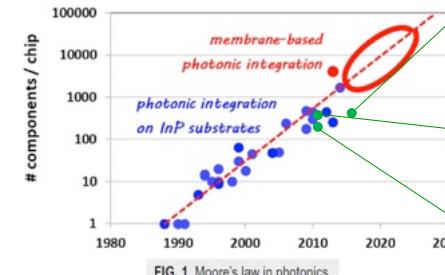
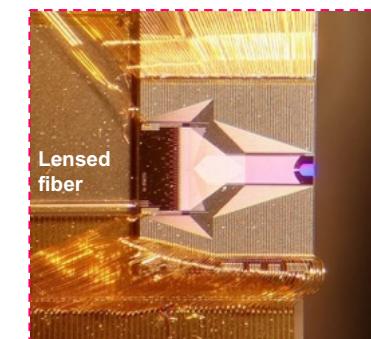


FIG. 1. Moore's law in photonics.

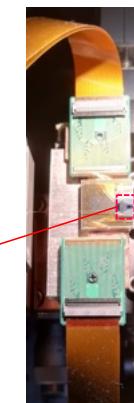
M. Smit, Laser & Photonics Rev., 6, 1 (2012).

Si photonic OPA with 128 phase shifters

- All 128 phase shifters were wire-bonded and controlled independently by a driver circuit
- Input light at 1550 nm and TE polarization was coupled to the chip using a lensed fiber.

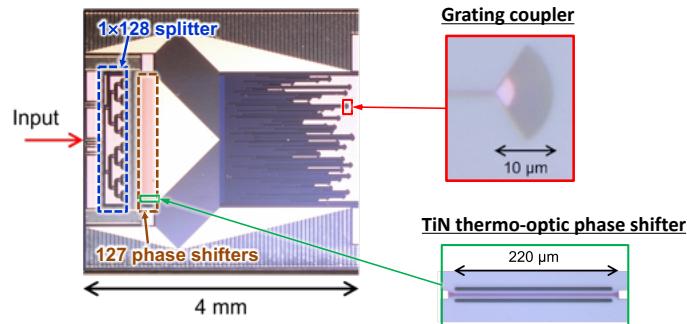


Lensed fiber



Driver circuit

Silicon photonic NRA chip ($N = 127$)



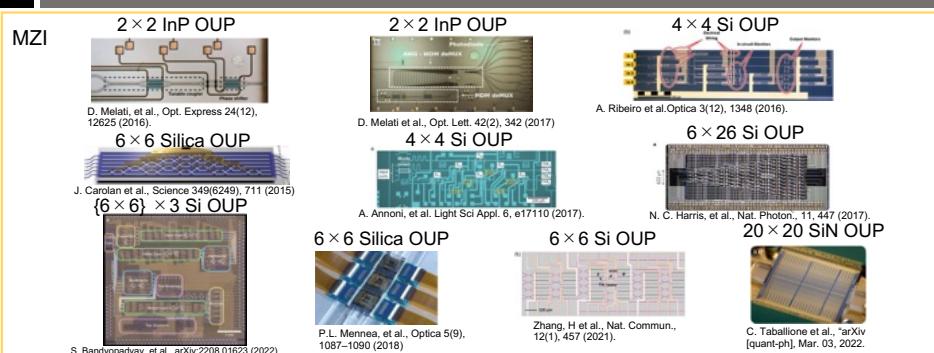
- 127 phase shifters and grating couplers are integrated.
- Grating couplers are placed in Costas array configuration with fundamental spacing of 15 μm.

Comparison w/ previous works

	Hutchison et al. (Intel), Optica (2016)	R. Fatemi et al. (Caltech), JSSCC (2019)	C. V. Poulton et al. (Analog photonics) JSTQE (2022)	This work T. Fukui et al., Optica (2021)
Array design	Pseudo-random	Genetic Algorithm	Uniform	Non-redundant array
No. res. points (Array scale)	~500 ($N = 128$)	~500 ($N = 128$)	~10,000 ($N = 8192$)	~19,000 ($N = 127$)
Figures				

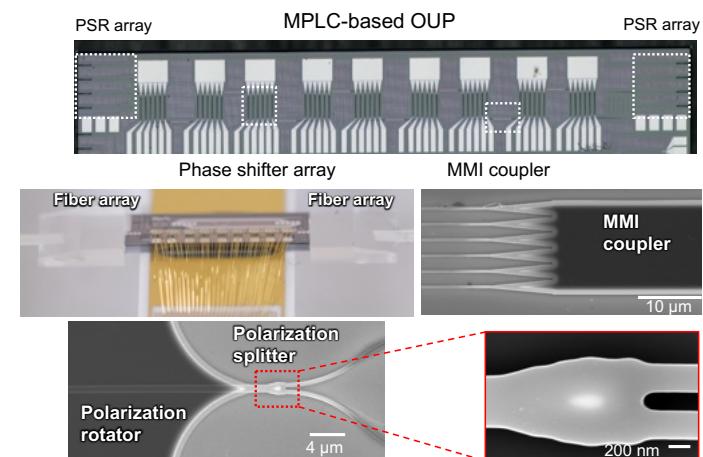
Previous demonstrations of OUPs

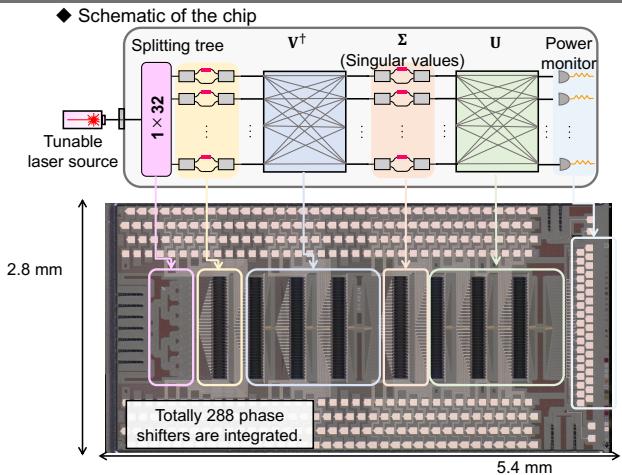
15



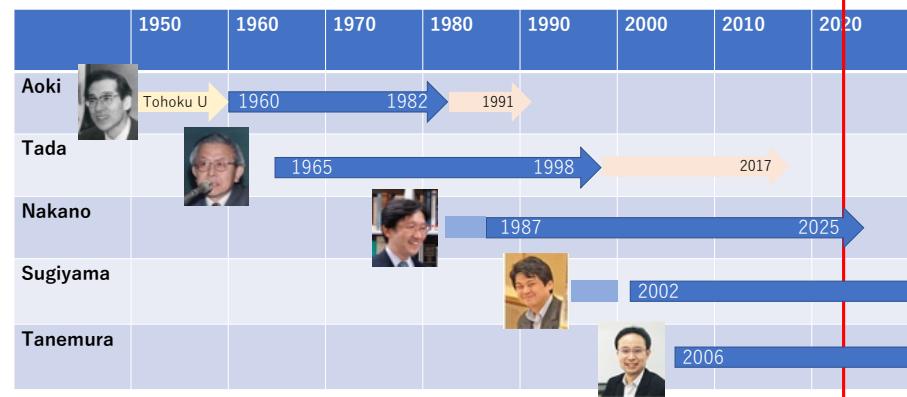
Fabricated DP MIMO OUP chip on Si

16





Lab History



Prof. Masaharu Aoki (青木 昌治 教授)



青木昌治

- Thermoelectric conversion devices
- Compound semiconductor crystal growth
- Materials for light emission and harvesting

One of the pioneers of GaN in Japan
Investigated GaN with Prof. Akasaki when he was with Panasonic in 1970s

在りし日の青木先生と御署名（昭和 57 年 1 月）

日付	種別	氏名	論文題目
1971.3	修士	松本 俊	GaNの結晶成長
1973.3	修士	佐野 雅敏	GaNの結晶成長とその光学的性質
1974.3	博士	松本 俊	GaNの電気的・光学的性質
1976.3	修士	荻野 俊郎	GaNのルミネッセンスと不純物
1976.3	博士	佐野 雅敏	GaNのルミネッセンスに関する研究
1977.3	修士	青木 孝充	電子線励起によるGaN針状結晶のルミネッセンス
1978.3	博士	蟹江 翔	GaNの結晶成長とその評価
1979.3	博士	荻野 俊郎	GaNけい光体の発光中心に関する研究
1980.3	修士	岡島 正季	GaN上へのZn:Teの気相成長とルミネッセンスに関する研究
1982.3	修士	小松 徹郎	近接法によるGaN気相エピタキシャル成長

Prof. Kunio Tada (多田 邦雄 教授)



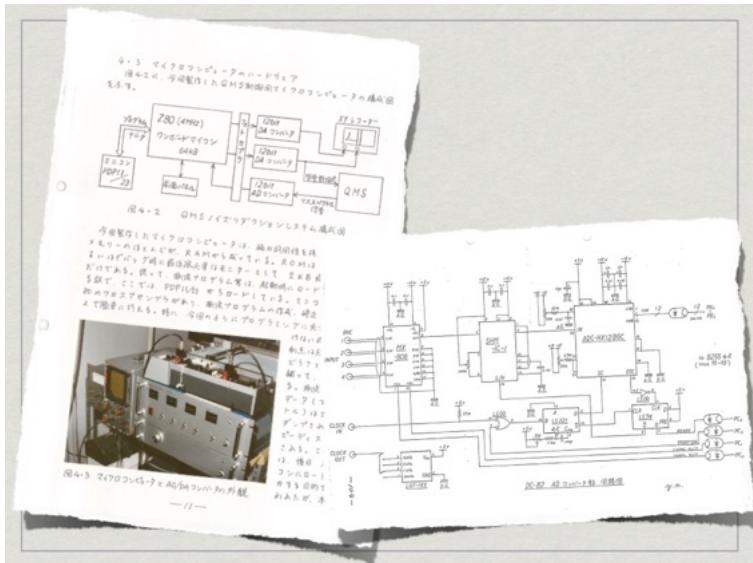
- Optical properties of semiconductors
 - Optoelectronic devices
 - Optical modulators / switches

Pioneer of GaAs directional coupler optical modulator

アウトライン

- 1982年以前
 - 1982年からの10年
 - 1992年からの10年
 - 2002年からの10年
 - 2012年からの10年
 - これから

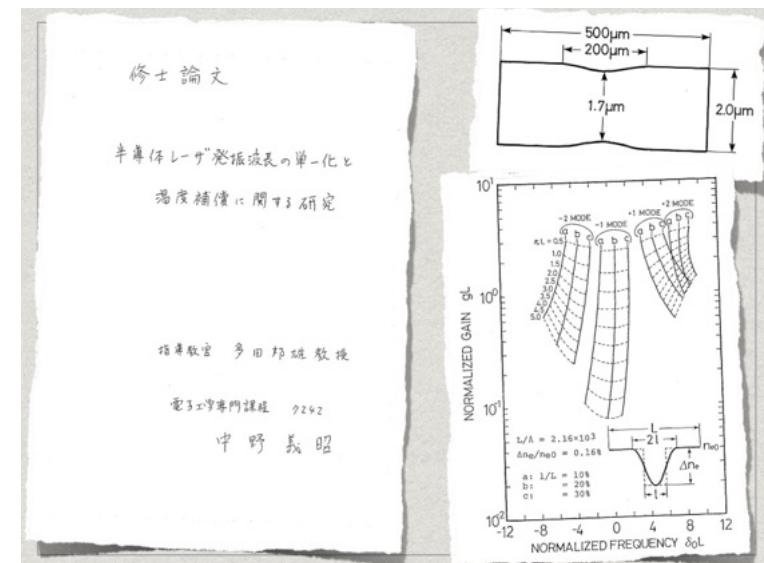
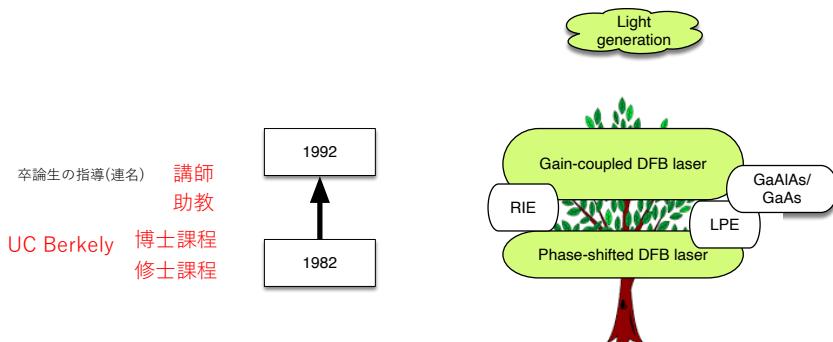


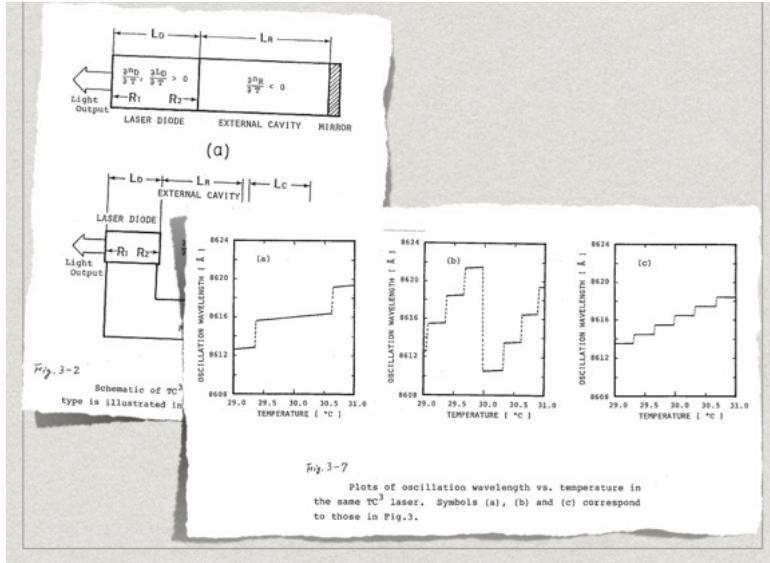


アウトライン

- 1982年以前
- 1982年からの10年
- 1992年からの10年
- 2002年からの10年
- 2012年からの10年
- これから

はじめの10年





Sather Tower (the Campanile)
Built 1914
Observation deck, carillon, Museum of Paleontology fossil storage

Popularly known as the Campanile, the 307-foot tower is named after James Sather, designed by John Galen Howard, and built at a cost of \$500,000. Its nickname derives from its resemblance to St. Mark's Campanile in Venice. The 61 bells in the carillon are played three times daily except during exams. The four

Cory Hall
Built 1950
Electrical Engineering & Computer Sciences

Named for Clarence L. Cory, dean of the College of Mechanics and a faculty member for almost 40 years. A number of floors were added in 1985, the exterior of which features a computer chip-inspired design motif. The building houses a

International House
Built 1930
Student housing

Homes to nearly 400 international and US students, I-House aims to foster intercultural respect and understanding by giving students and scholars from many lands a place to live and learn together. Despite considerable community resistance to the idea of mixing different nationalities, races, and

Prof. Shyh Wang
Won Tsang
Dan Botez
Connie Chang
Ming C. Wu
Yuhwa Lo

Press Release

[an error occurred while processing this directive]

UC Berkeley Prof. Shyh Wang, a leading researcher in the field of semiconductor lasers, has died

By Robert Sanders, Media Relations | 19 March 1992

BERKELEY —Shyh Wang, emeritus professor of electrical engineering and computer sciences at the University of California at Berkeley and one of the nation's top researchers in the field of semiconductor lasers, died suddenly Wednesday (2/18/92) at Alta Bates-Herrick Hospital in Berkeley. He was 66, and had been undergoing chemotherapy for liver cancer.

Wang worked for some 20 years on semiconductor lasers — small, lightweight and efficient lasers used today in compact disc players and more widely in optical communications. Many of his former students today hold leading positions in the semiconductor laser industry.

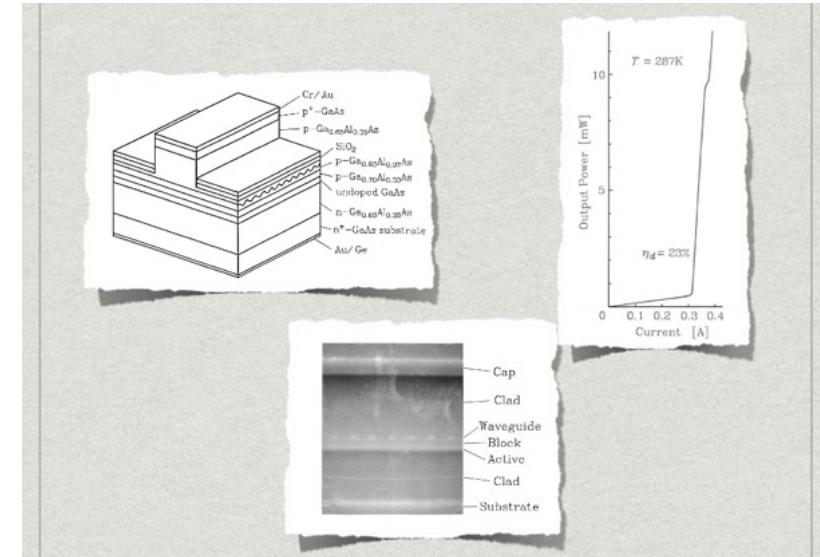
He retired last year after 33 years at U.C.-Berkeley, but continued to conduct research in his laboratory and to direct 10 graduate students.

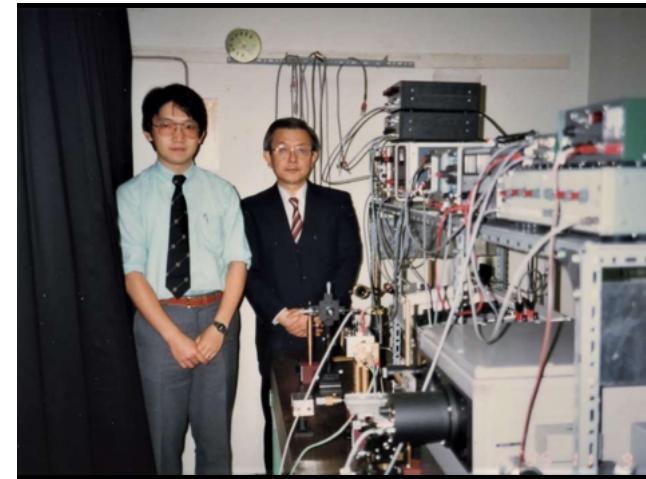
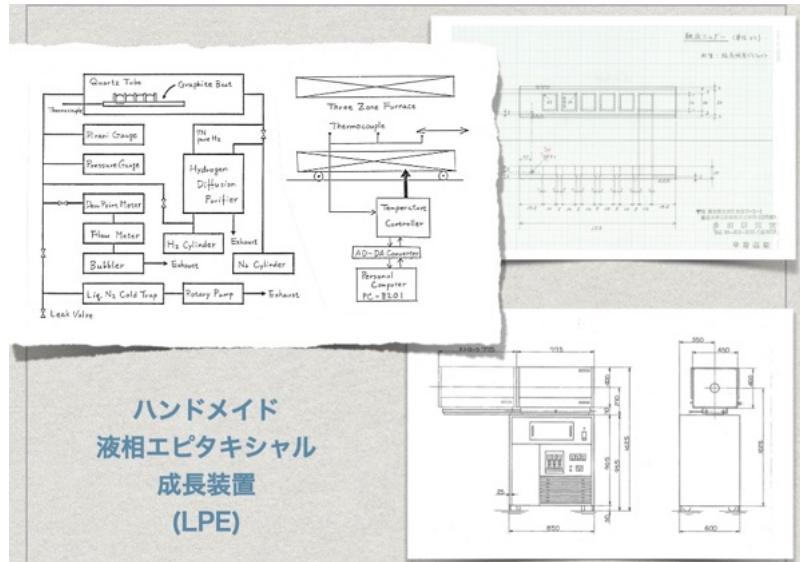
Wang was born in Wuhsi, Kiangsu Province, China in 1925 (d.o.b. 6/15/25) and obtained his undergraduate education at Chiotung University in Shanghai before coming to the United States in 1947. He received his M.A. (1949) and Ph.D. (1951) in applied physics from Harvard University, and spent two years there as a postdoctoral fellow.

In 1953 he took a job at Sylvania Electric Products (now part of GTE) as an engineering specialist, where he worked on semiconductor devices, including the transistor. He continued his work in this area after joining the Berkeley faculty in 1958.

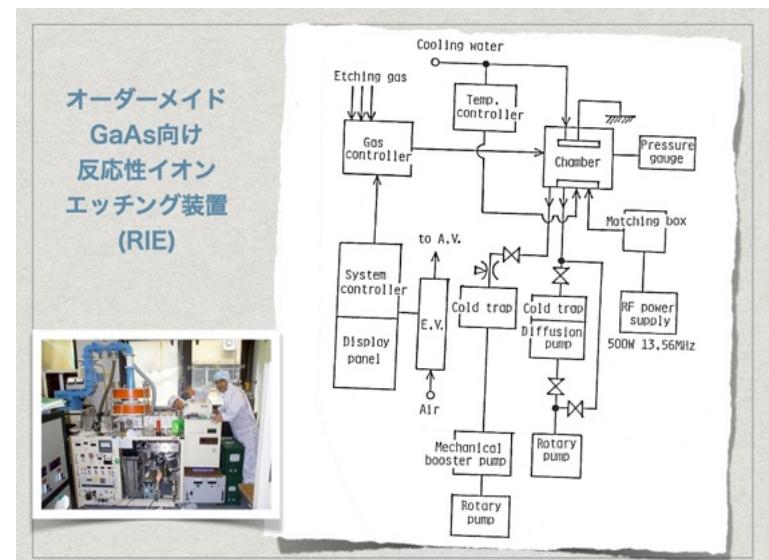
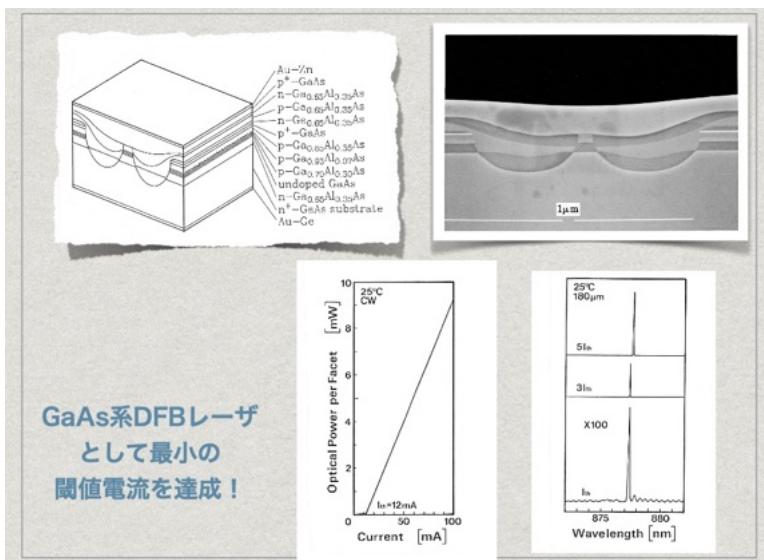
After the discovery of the laser in the early 1960s he switched to the fields of quantum and optical electronics, and for the past two decades has concentrated on semiconductor lasers and guided-wave optics.

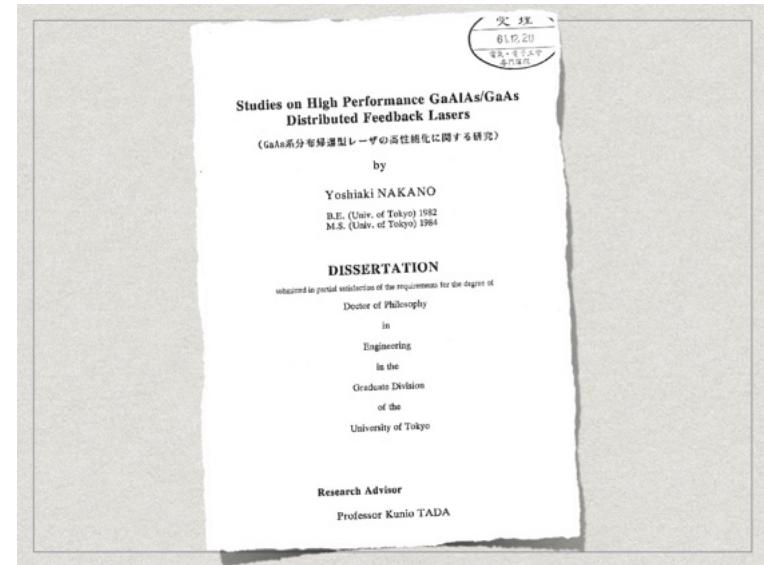
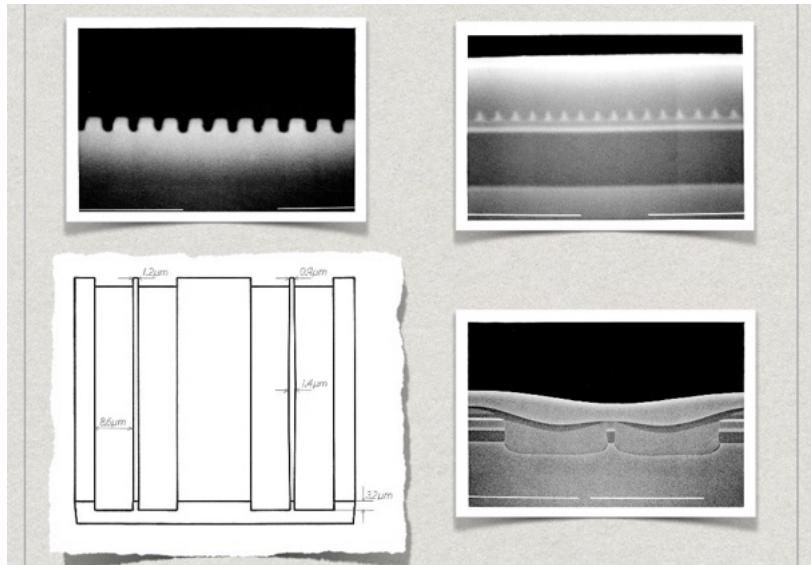
Throughout his career he has continued to inject new ideas and new approaches into the semiconductor laser field. He was one of the first people to work on distributed feedback lasers, and contributed to the development of injection lasers and interference lasers. In the past few years he expanded his research activities into semiconductor laser arrays.





1986年頃の多田研半導体レーザ測定室



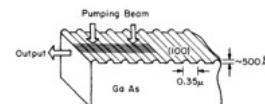


分布帰還型レーザとは？

- 内蔵する回折格子による分布プラグ反射を光帰還に用いるレーザ
- プラグ反射の波長選択性により単一縦モードによる発振が可能
- 温度変化や直接変調に対し安定して単一モードを維持する
- 回折格子周期により予め発振波長が決定できる
- 劈開端面を必要としないため、集積化に適す
- 英語では、distributed feedback (DFB) laser
- 今日の光情報通信は、DFB構造を有する半導体レーザが支えている



II-VI/Finisar 1300 nm 28Gb/s
NRZ DFB laser diode chip for
5G wireless front-haul datalinks



分布帰還型レーザの誕生

STIMULATED EMISSION IN A PERIODIC STRUCTURE

H. Kogelnik and C. V. Shank
Bell Telephone Laboratories, Holmdel, New Jersey 07733
(Received 23 November 1970)

We have investigated laser oscillation in periodic structures in which feedback is provided by backward Bragg scattering. These new laser devices are very compact and stable as the feedback mechanism is distributed throughout and integrated with the gain medium. Intrinsic to these structures is also a gratinglike spectral filtering action. We discuss periodic variations of the refractive index and of the gain and give the expression for threshold and bandwidth. Experimentally we have induced index periodicities in gelatin films into which rhodamine 6G was dissolved. The observed characteristics of laser action in these devices near 0.63 μ m are reported.

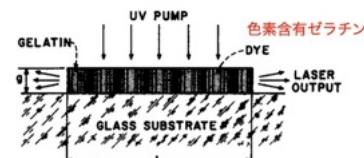


FIG. 2. Cross section of distributed feedback device consisting of dyed gelatin on a glass substrate.

APL 18, 152 (1971)

分布帰還型レーザの進展

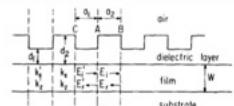
黎明期 - 分布帰還型半導体レーザの提案

Proposal of periodic layered waveguide structures for distributed lasers^{*†}

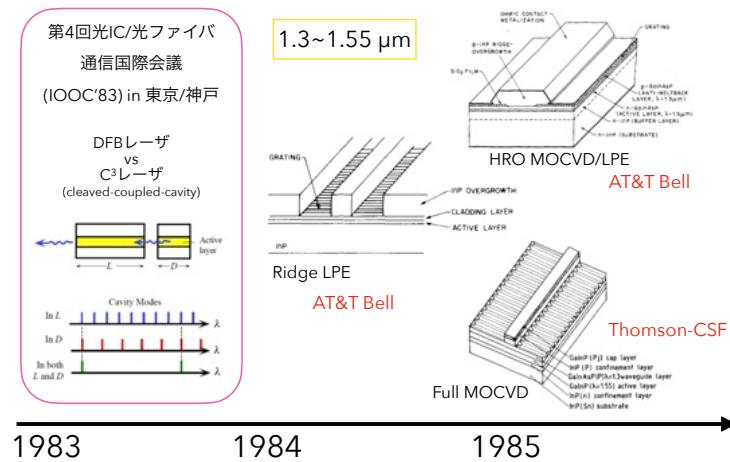
Shyh Wang

Department of Electrical Engineering and Computer Sciences and the Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720
(Received 3 July 1972; in final form 5 October 1972)

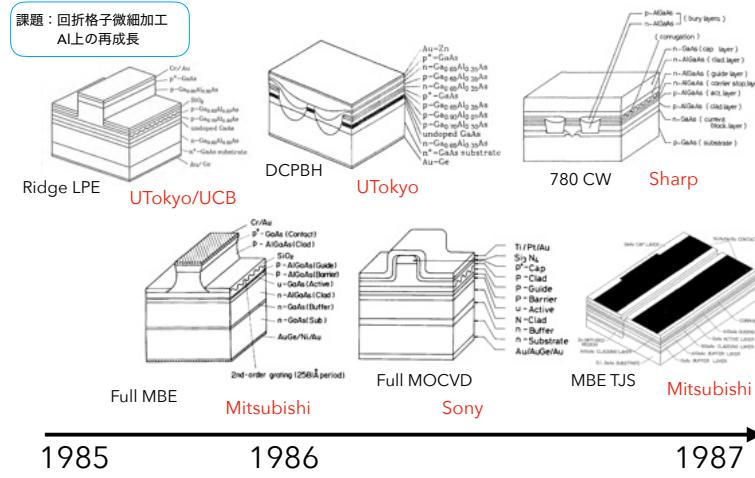
Here new periodic structures are proposed for distributed lasers, utilizing the thickness variation introduced in a multilayer thin-film optical waveguide. Wave propagation in such structures is analyzed. Expressions are derived for the amount of distributed feedback and possible scattering losses. From the coupled-wave equations, the laser-oscillation conditions are set up. Computational results for the GaAs-Ga_xAl_{1-x}As and dye lasers are presented. The applicability of the proposed scheme for distributed feedback to semiconductor, dye, and solid-state lasers is discussed.



分布帰還型レーザの進展



分布帰還型レーザの進展



分布帰還型レーザの問題点

Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers

H. Kogelnik and C. V. Shank
Bell Telephone Laboratories, Holmdel, New Jersey 07733
(Received 13 September 1971)

An analysis of laser action in a periodic structure is presented. A model of two counter-running waves coupled by backward Bragg scattering is used. The resonant frequencies and threshold criteria for the modes of oscillation have been determined for both index and gain periodicities. Analytical approximations are given for both the high- and low-gain cases, and computational results for the intermediate regimes.

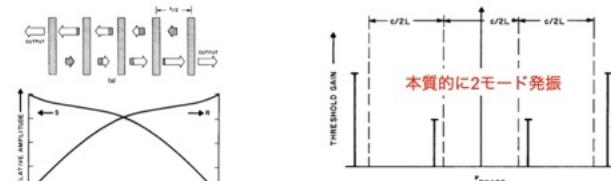
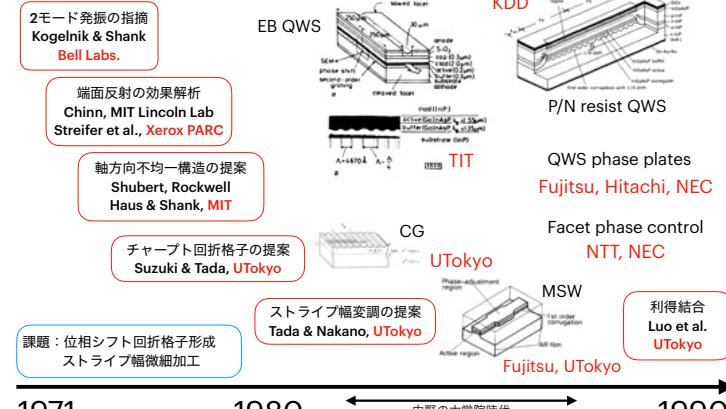


FIG. 1. Schematic illustrating distributed feedback laser oscillation in a periodic structure. FIG. 2. Plot of the amplitude of left traveling wave S vs distance z .

JAP 43, 2327 (1972)

分布帰還型レーザの進展

完全単一縦モード化



分布帰還型レーザの進展

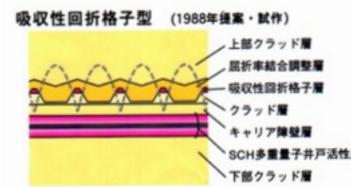
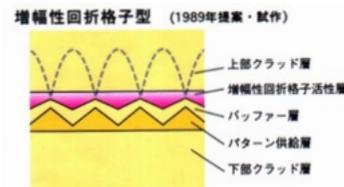
利得結合DFBレーザ



FIG. 6. Diagram illustrating the mode spectrum and required threshold gain for a gain periodicity.

Kogelnik & Shank, JAP 43, 2327 (1972)

半導体レーザとしての最初の実証
Luo, Nakano & Tada, SSDM, 1988
UTokyo



Absorptive-Grating Gain-Coupled Distributed-Feedback MQW Lasers with Low Threshold Current and High Single-Longitudinal-Mode Yield

Yoshiaki NAKANO, Hong-Li CAO, Kunio TADA, Yi LUO^{1,*},
Machio DOBASHI¹ and Haruo HOSOMATSU¹

¹Department of Electronic Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

²Devices Laboratory, Yokogawa Electric Co., Ltd., 2-11-13 Naka-machi, Musashino-shi, Tokyo 180

(Received October 27, 1992; accepted for publication December 9, 1992)

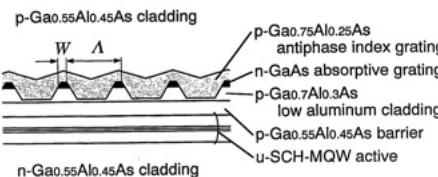


Fig. 1. Schematic drawing of the GaAs/GaAlAs MQW GC DFB laser with an absorptive grating.

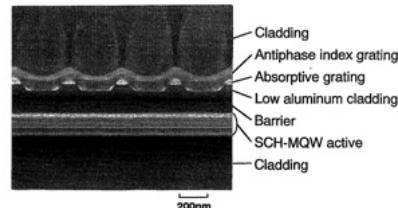


Fig. 2. Scanning electron micrograph showing a cross section of the epitaxial layers and grating.

Fabrication and Characteristics of Gain-Coupled Distributed Feedback Semiconductor Lasers with a Corrugated Active Layer

Yi Luo, Yoshiaki Nakano, Member, IEEE, Kunio Tada, Fellow IEEE, Takeshi Inoue, Haruo Hosomatsu, Member, IEEE, and Hideto Iwaoka, Member, IEEE

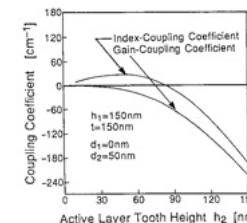


Fig. 5. Gain- and index-coupling coefficients for a second-order symmetric triangular grating and 12% Al composition in the pattern-providing layer.

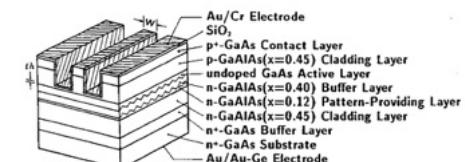
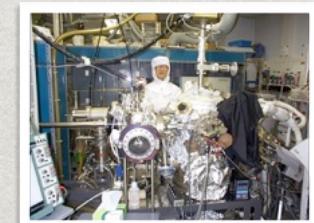


Fig. 6. Schematic drawing of the ridge-waveguide laser structure where h denotes the height of the ridge shoulder and W the width of the ridge.

* 1987年4月 東京大学工学部助手
多田教授研究室に職員として勤務。学生実験。

* 1988年4月 東京大学工学部講師
卒論生の指導(連名)開始。教育・運営に対する責任も負い始める。いやでも深い理解が必要に。

* 分子線エピタキシー装置
(MBE)を半自作。量子効果を光デバイスに応用する研究を開始。



放物線量子井戸、結合量子井戸

アウトライン

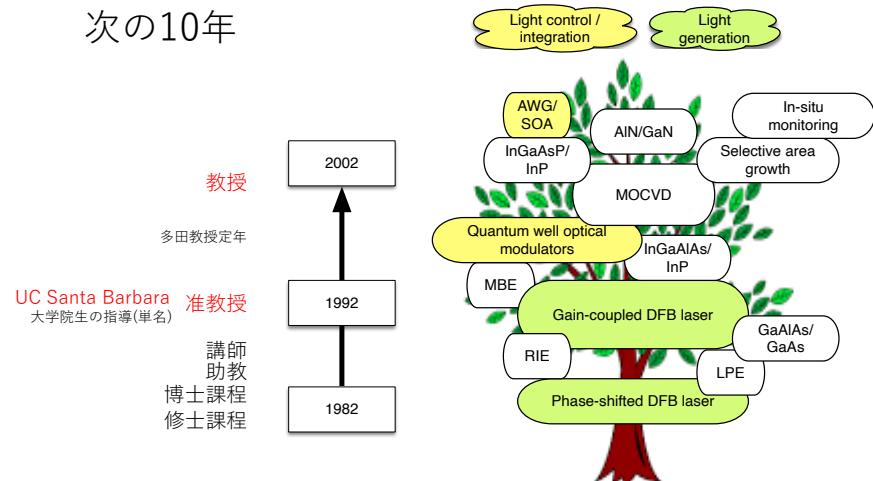
- 1982年以前
- 1982年からの10年
- **1992年からの10年**
- 2002年からの10年
- 2012年からの10年
- これから

■1992年4月 東京大学工学部 助教授、大学院生指導(単名)開始

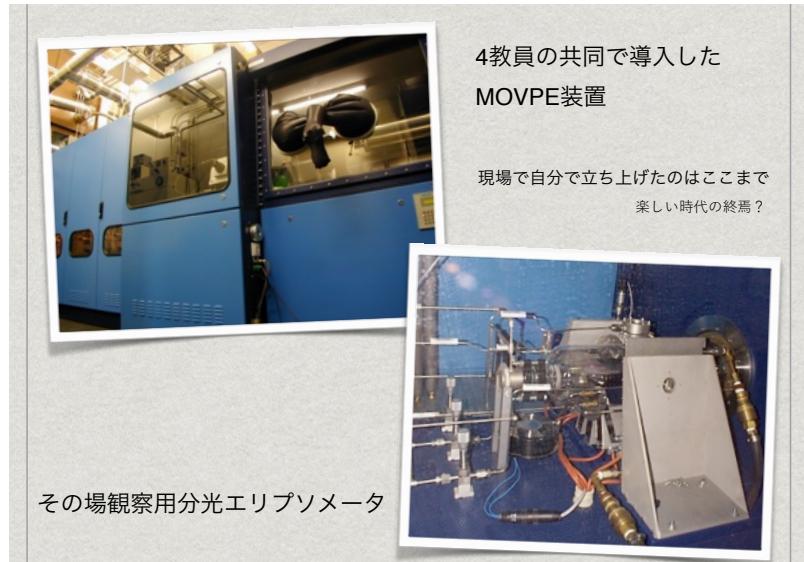
■この頃、化学分野の現マテリアル工学専攻 霜垣幸浩教授と共同研究開始。CVDとの出会い。領域横断研究の始まり

■UC Santa Barbara校へサバーティカルリーブ

次の10年



■1994年 有機金属気相エピタキシャル成長装置(MOCVD, MOVPE)導入。InP系半導体を本格的に研究し始める。以後、2台追加し、研究室を特徴付ける主力装置に。よいことも、悪いこともあります



Analysis, Fabrication, and Characterization of Tunable DFB Lasers with Chirped Gratings

Nong Chen, Member, IEEE, Yoshiaki Nakano, Member, IEEE, Kazuya Okamoto, Kunio Tada, Fellow, IEEE,
Geert I. Morthier, Member, IEEE, and Roel G. Baets, Senior Member, IEEE

最後のLPEデバイス

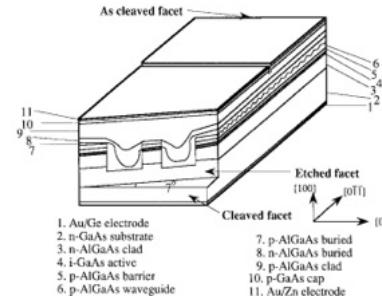
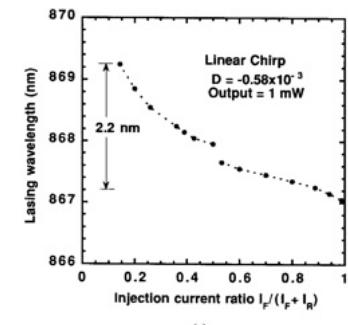


Fig. 5. Structure of the fabricated two-electrode CGT DFB laser.

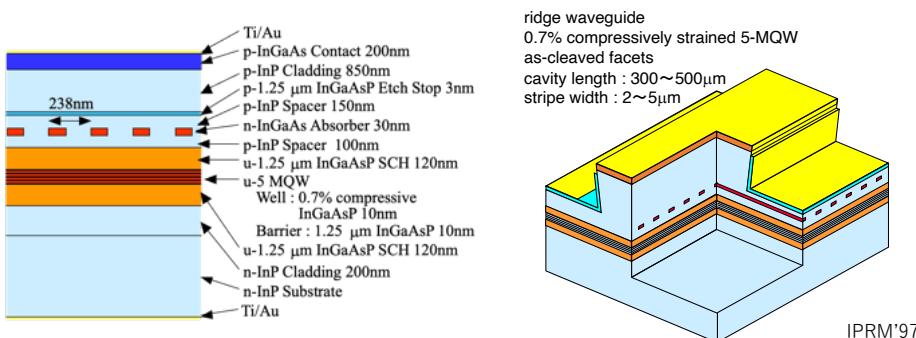


(a)

TuP6 COMPARISON OF InGaAs ABSORPTIVE GRATING STRUCTURES IN 1.55μm InGaAsP/InP STRAINED MQW GAIN-COUPLED DFB LASERS

Masaki Funabashi, Hidekazu Kawanishi, Tsurugi K. Sudoh, Toru Nakura,
Dietmar Schmitz†, Frank Schulte†, Yoshiaki Nakano, and Kunio Tada

Department of Electronic Engineering, University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113, Japan
†AIXTRON Semiconductor Technologies GmbH, D-52072 Aachen, Germany



Wavelength Trimming by Photoabsorption-Induced Disordering for Multiple-Wavelength Distributed-Feedback Laser Arrays

Tsurugi K. Sudoh, Student Member, IEEE, Mitsutaka Kumano,
Yoshiaki Nakano, Member, IEEE, and Kunio Tada, Fellow, IEEE

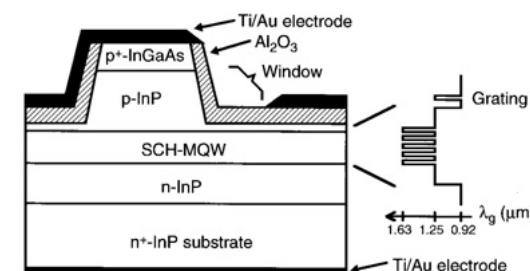


Fig. 1. Schematic lateral cross section of the ridge waveguide DFB laser and the MQW band diagram.

MBEによる量子構造光変調器の研究

日付	種別	氏名	論文題目
1995.3	博士	山口 武治	半導体量子井戸を用いた導波路型偏光無依存光変調器
1996.3	博士	梁 吉鎬	変形ポテンシャル量子井戸構造を用いた自己電気光学効果素子(SEED)
1998.3	博士	彭 家鵬	多重量子井戸進行波型光変調器に関する研究
1999.3	博士	加藤 正樹	高性能電界吸収型光変調器のためのInGaAs/InAlAs/InP変調ポテンシャル量子井戸に関する研究

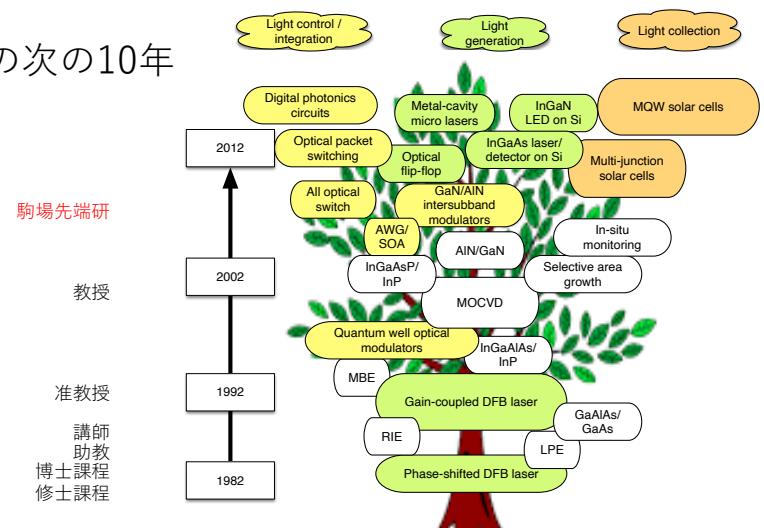
MOVPEとそのデバイス応用の研究

日付	種別	氏名	論文題目
1997.3	博士	Martin Bouda	Selective-area MOVPE technology for monolithically integrated devices as a key to photonic switching
1998.3	博士	須藤 信也	分光エリプソメトリによる有機金属気相エピタキシーのその場観察と量子構造成長への応用
1999.3	博士	戸田 知朗	V溝基板を用いた分布帰還型量子細線半導体レーザに関する研究
1999.9	博士	馬 炳眞	All-optical wavelength converters based on optical nonlinearity in semiconductor active waveguides

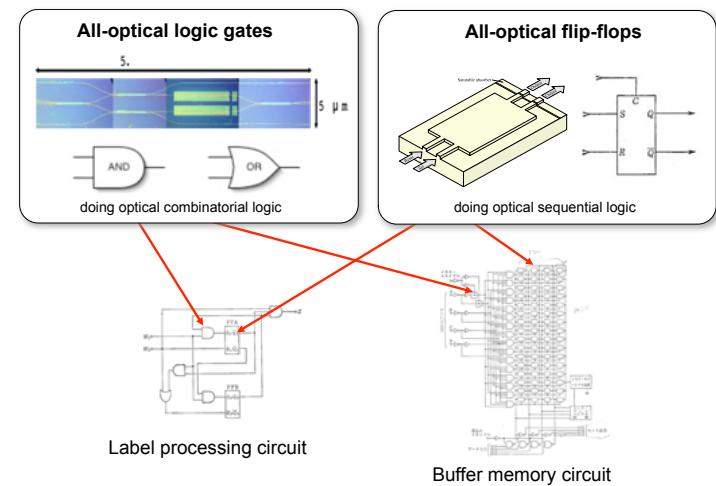
アウトライン

- 1982年以前
- 1982年からの10年
- 1992年からの10年
- **2002年からの10年**
- 2012年からの10年
- これから

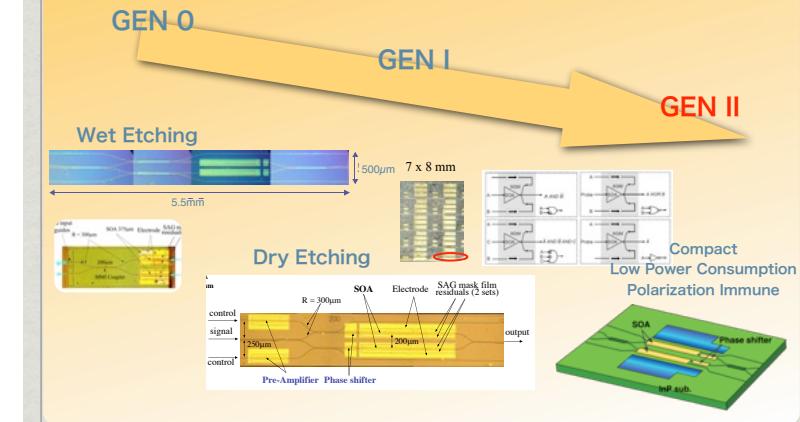
その次の10年



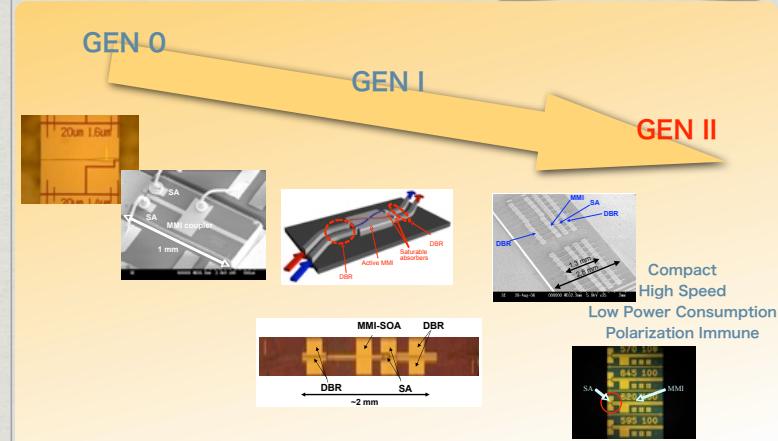
Digital Photonic Devices and Circuits



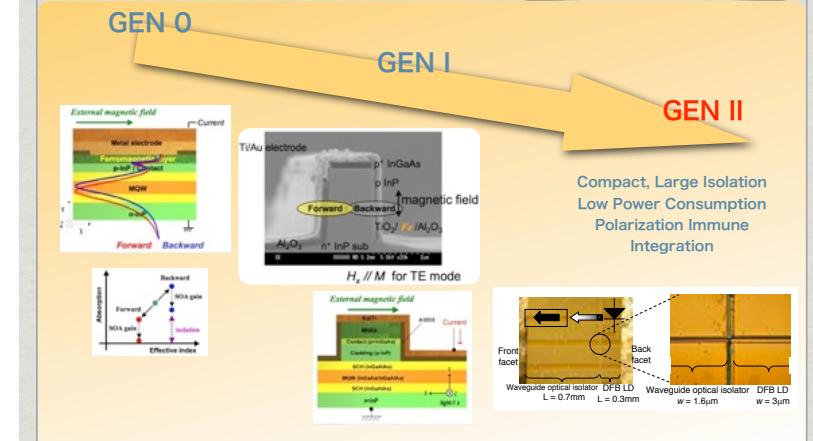
All Optical Logic Gate

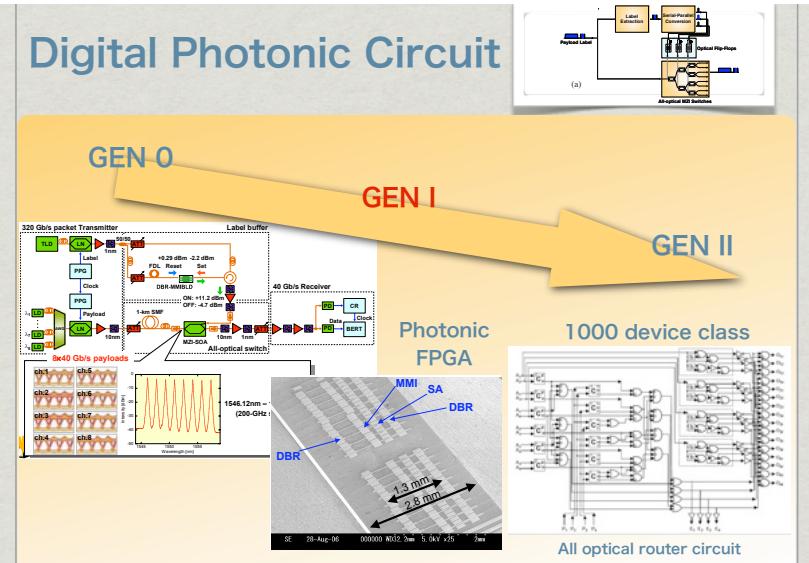


All Optical Flip-Flop

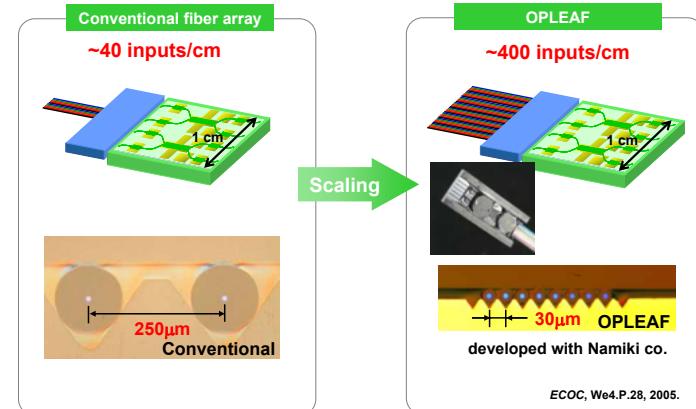


Non-Reciprocal Device



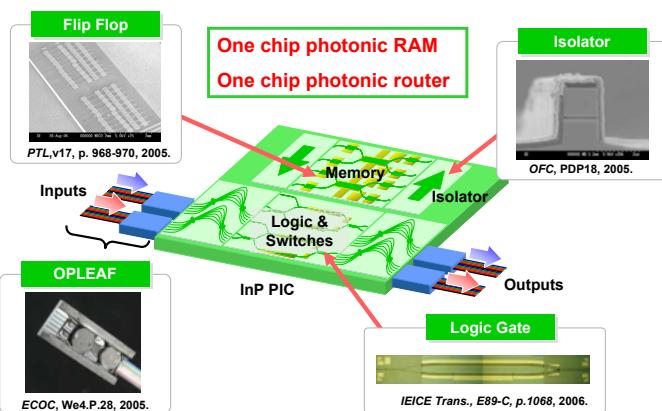


Scaling of Interface



THE UNIVERSITY OF TOKYO

Large Scale Digital Photonic Integrated Circuit (PLSI)

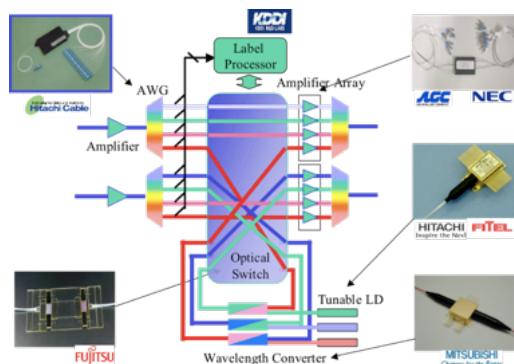


THE UNIVERSITY OF TOKYO

国プロをPLとしてプロデュース

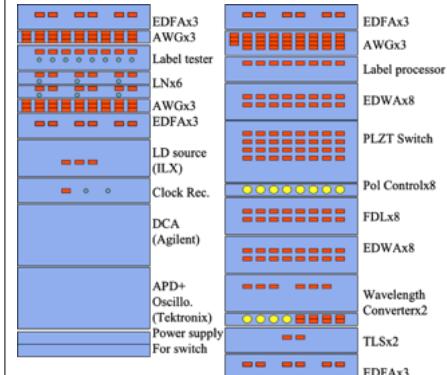
- * 経済産業省/NEDO
「フォトニックネットワーク技術開発事業」
(2002~2006年度)
- * 10社4大学
- * 全光ネットワーク実現のための光デバイス開発、サブシステム実証

共同開発したコアノードプロトタイプ



- 320 Gb/s (40Gb/s×8ポート) 光バースルータを單一ラックに収納
- 消費電力<1kW
- 波長変換による自律型衝突回避機能
- ビットレート無依存(10Gb/s,40Gb/s)

新開発光部品を応用した光ルータ実証機の開発



- ❖ エッジノードとコアノードはそれぞれ1ラックに収納、1kW以下の消費電力
❖ 3日連続動作にも問題なく安定動作、停電にも強いことが実証された

33

3 Node OBS Network Testbed at Univ. Tokyo



米国アナハイムOFC 2007での動態展示

- 仏カンヌ ECOC 2006
■幕張メッセ インターオプト2006
において動態展示し注目を集めた



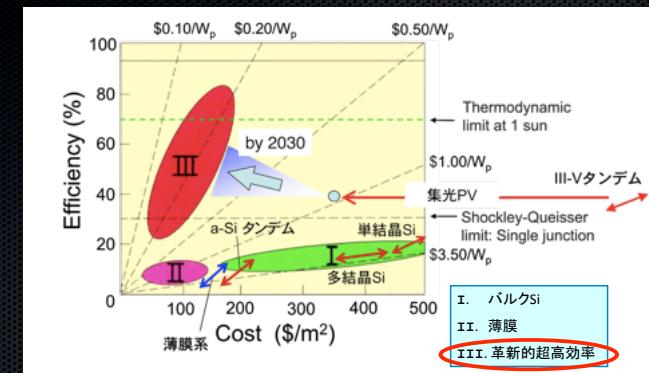
CITDA

エネルギーデバイス分野へ進出

- * 超高効率・大電力 太陽電池の開発と
それに基づく新エネルギー循環システムの開拓
- * 先端研に研究拠点(SolarQuest)を設立
- * NEDO研究開発事業を受託
「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」
2007~2013年度, 4社8大学



本拠点のターゲット：第三世代太陽電池

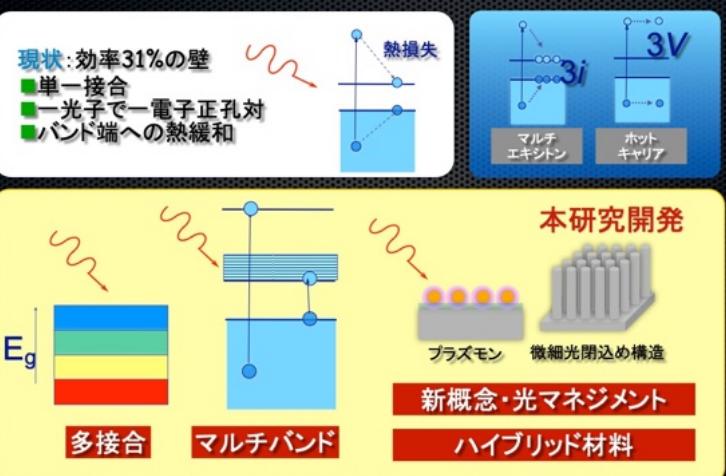


第一世代：結晶、アモルファスSi太陽電池

第二世代：薄膜太陽電池 (CIGS, 有機, 薄膜Si)

第三世代：量子ナノ構造、多接合タンドム太陽電池

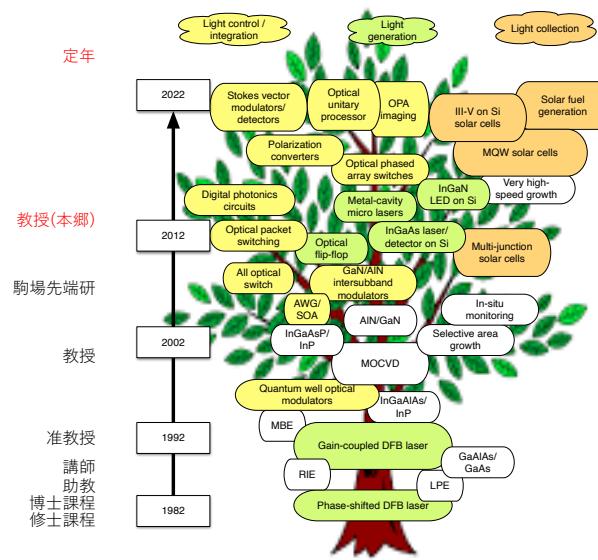
効率50%超の革新的太陽電池技術



アウトライン

- 1982年以前
- 1982年からの10年
- 1992年からの10年
- 2002年からの10年
- 2012年からの10年
- これから

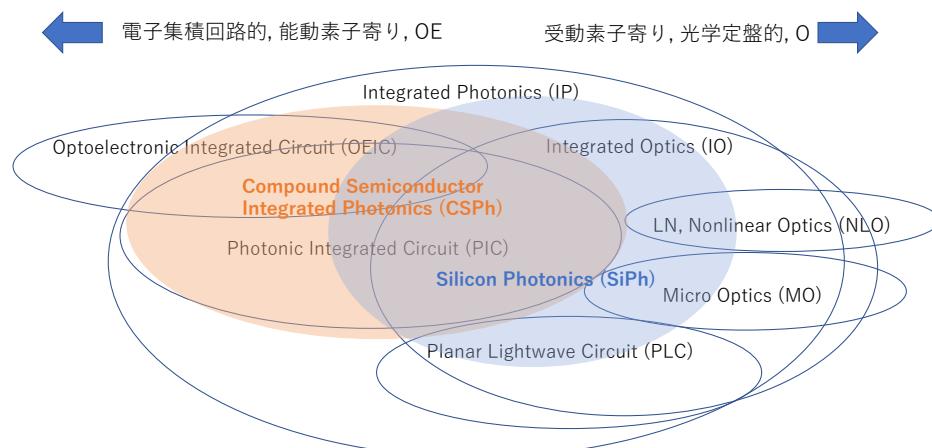
最近の10年



光集積回路: 40年間の呼び方の変遷

略称	名称(英語)	日本語	備考
IO	Integrated Optics	集積光学(光集積回路)	1969年当初からの古典的呼び方
OEIC	Optoelectronic Integrated Circuit	光電子集積回路	1979年の光大プロで提唱?
PLC	Planar Lightwave Circuit	平面光波回路	石英ガラス系光回路の総称、1990年頃から、NTT発?
IP	Integrated Photonics	集積フォトニクス	能動素子集積を意識したIOの拡張
PIC	Photonic Integrated Circuit	光集積回路	半導体光集積回路の総称
SiPh	Silicon Photonics	シリコンフォトニクス	シリコン光集積回路の総称
CSPh	Compound Semiconductor Integrated Photonics	化合物半導体集積フォトニクス	化合物半導体光集積回路の総称

こんな感じか



化合物半導体集積フォトニクス(CSPh)の利点

- 能動素子(発光/增幅/受光/変調), 受動素子, 導波路の全てがモノリシックに可能. 特に発光, 増幅は他アプローチでは難.

	能動機能					受動機能				集積性			
	発光	増幅	受光	吸収 変調	屈折率 変調	共振器, 合分波器	線路	ファイ バ結合	高集積 度	CADツー ル・ファ ウンドリ	チップ サイズ	基板 コスト	
CSPh	◎	◎	◎	◎	◎	○	△	△	○	○	○	×	
SiPh	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
PLC	×	×	×	×	○	○	○	○	○	△	×	○	
LN	×	×	×	×	◎	○	○	○	×	×	×	×	

化合物半導体集積フォトニクス(CSPh)の難点

- 以下に加えて、「能動素子と受動素子の集積化プロセス・歩留り」が未だに大きな課題。

	能動機能				受動機能				集積性			
	発光	增幅	受光	吸収変調	屈折率変調	共振器、合分波器	線路	ファイバ結合	高集積度	CADツール・ファウンダリ	チップサイズ	基板コスト
CSPh	◎	◎	◎	◎	◎	○	△	△	○	○	○	×
SiPh	×	×	○	○	○	○	○	×	◎	◎	○	◎
PLC	×	×	×	×	○	◎	◎	◎	○	△	×	○
LN	×	×	×	×	◎	○	○	◎	×	×	×	×

化合物光集積回路の現在地:用途

- データコム用低成本・小型・大容量トランシーバのキーコンポーネント
- テレコム用超大容量コヒーレント光トランスマッタ、レシーバのキーコンポーネント

化合物半導体光集積回路の現在地:課題

- 能動／受動集積技術は未だに課題
- 化合物半導体基板の大型化
- 結晶成長技術の生産性向上
- ボンディング技術の生産性向上と基板再利用

半導体光集積デバイス・回路の将来

- 光通信応用は、WDMやコヒーレントが一段落し、偏波やモードの制御に展開
- 光コアノード（全光ネットワーク）への展開
- LiDARなどのセンシング・イメージング応用への展開
- 深層学習やリザバーコンピューティングへの展開
- 量子コンピューティングへの展開
- 新たな応用に向けた短波長化、長波長化

半導体光集積デバイス・回路の将来

- 化合物半導体とシリコンフォトニクスは相補的に共存.
- テレコム・データコム用にはさらなる進化を遂げる.
- 適度な集積度が存在. LSIのムーアの法則とは別の進化.
- 光回路は多並列アナログ処理に強み. デジタル処理に強い電子回路とも相補的に共存.
- 今後はイメージングや3D多並列・空間回路に向けた面型デバイス開発が重要に.

40年の研究樹

