

プロジェクト研究開発成果詳細説明

革新的デバイス技術

2022年5月17日

技術研究組合光電子融合基盤技術研究所

1-2 革新的デバイス技術

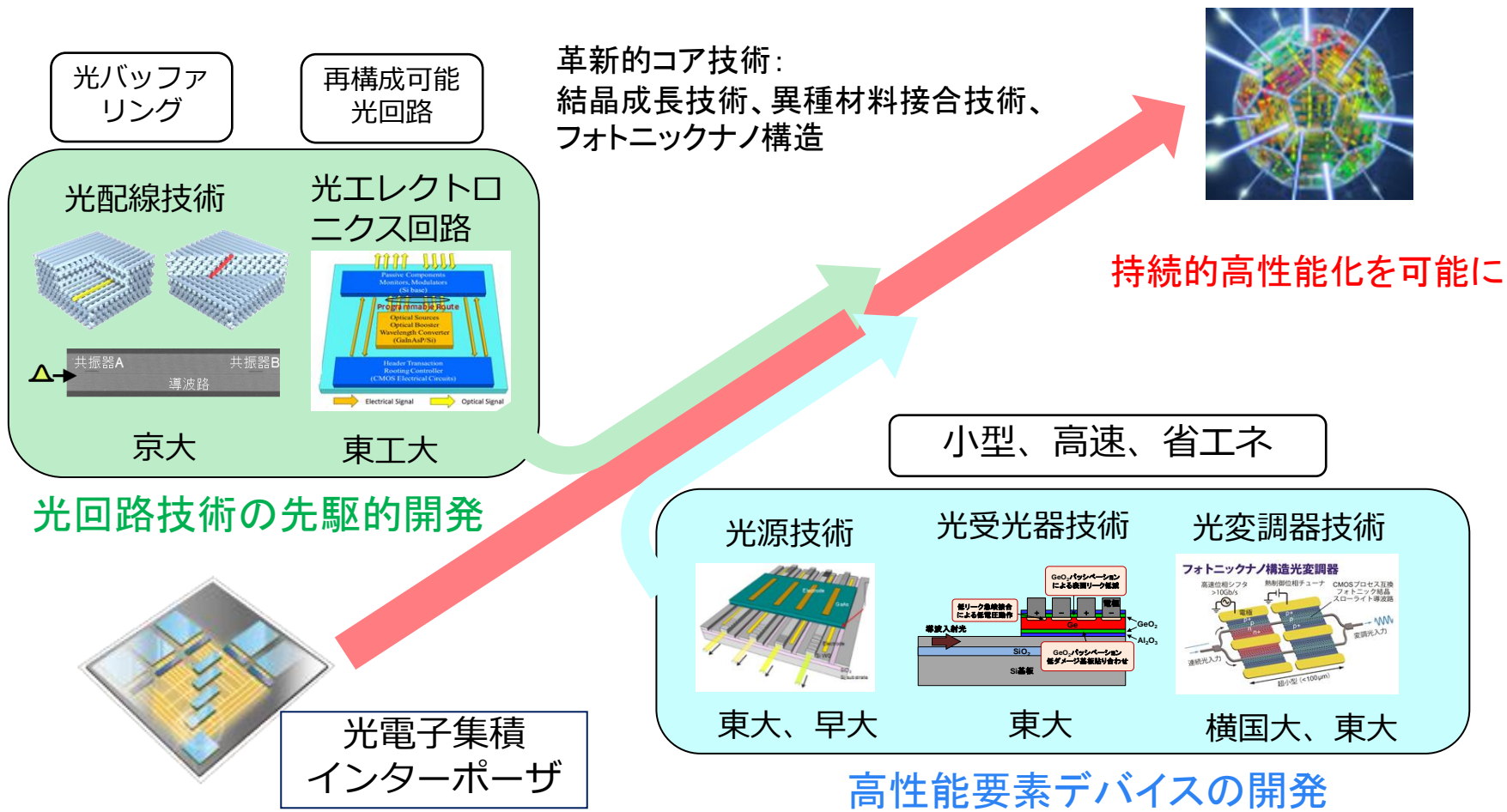
1. 革新的光源技術 (東京大学・荒川Gr)
2. 革新的光源技術 (早稲田大学)
3. 革新的光検出器・光変調器技術 (東京大学・竹中Gr)
4. 革新的光変調器技術 (横浜国立大学)
5. 革新的光配線技術 (京都大学)
6. 革新的光エレクトロニクス技術 (東京工業大学)

革新的デバイス技術開発: その位置付け

公開

革新的構造・技術や新概念の導入により不連続な技術進化を可能とするための技術開発

- ✓ 次世代、次次世代の光電子集積回路基盤技術の確立
- ✓ 成果のPETRA研究開発への展開



光電子集積サーバの継続的高性能化に資する内容と目標

1. 革新的光源技術(東京大学・荒川Gr)

光電子集積インターポーザ用集積化光源に向け、シリコン光回路上ハイブリッド量子ドットレーザの集積技術を実証するとともに1.4 μm 以上の長波長帯のシリコン基板上量子ドットレーザの実現可能性を示す。

2. 革新的光源技術(早稲田大学)

Si基板上InAs量子ドット及び量子ドット組成混合技術による波長可変レーザと変調器集積光源の要素技術実現

3. 革新的光検出器・変調器技術(東京大学・竹中Gr)

高速応答可能で省電力化が可能なGe, III-V薄膜導波路型受光器を実証

ハイブリッドMOS変調器、歪みSiGe光変調器等に対し、多重化・多値変調等伝送方式の実現可能性実証

4. 革新的光変調器技術(横浜国立大学)

スローライト効果を利用してSiマツハツエンダー光変調器を大幅に小型化、64 GbpsのOOK動作を実証、PAM4、WDMによる100 Gbps以上の動作の可能性を確認

5. 革新的光配線技術(京都大学)

フォトリソナノ構造の高度な最適化手法、損失補償手法、光バッファ機能等の革新的導波路技術の可能性実証

6. 革新的光エレクトロニクス技術(東京工業大学)

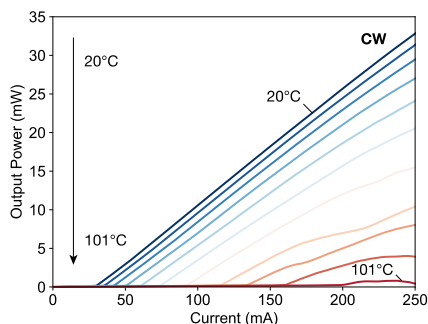
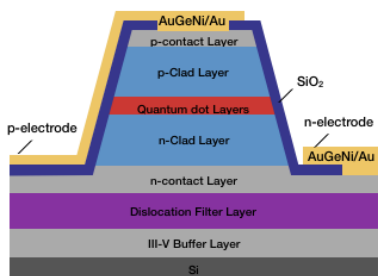
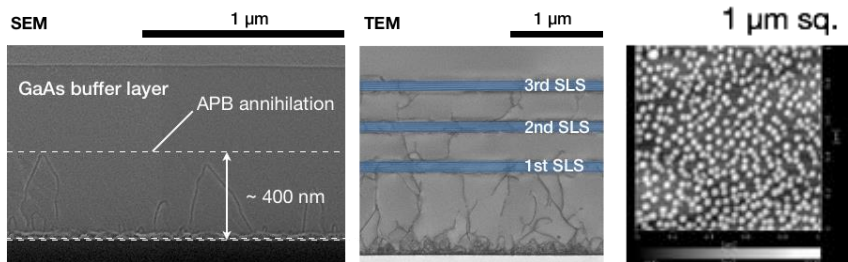
光機能回路の同一ハイブリッド回路基板上への集積を実現し、光回路の再構成を可能とする光FPGAのコンセプト実証

上記目標をすべて達成

各グループにおける研究成果

シリコン基板上直接成長量子ドットレーザの実現

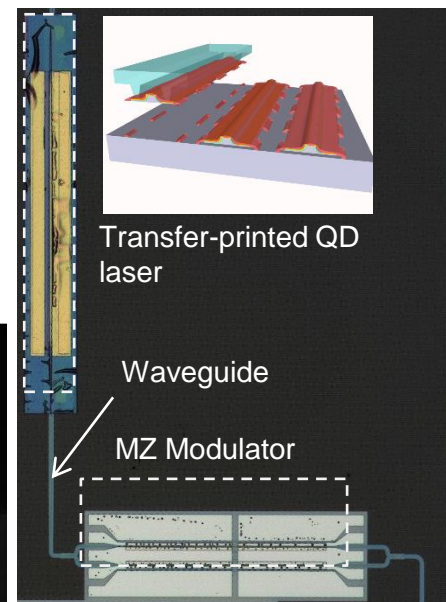
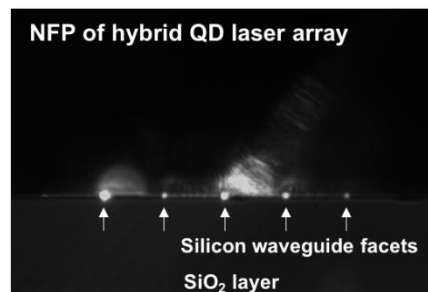
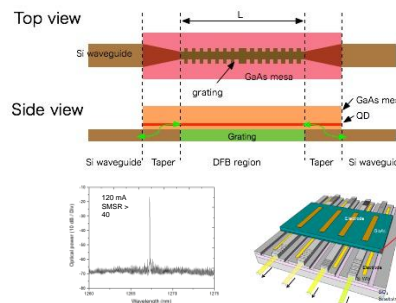
- シリコン(100)基板上に全MBEによる**直接成長量子ドットレーザの実現**に成功
- 100 °C 以上**の高温連続波動作を実現



J. Kwoen et al. Opt. Express **26** 9 11568 (2018)
 J. Kwoen et al. Opt. Express **27** 3 2681 (2019)
 J. Kwoen et al. Opt. Express **29** 18 29378 (2021)
 J. Kwoen et al. Electron. Lett. **57** 14 567 (2021)

シリコン導波路上量子ドットレーザの実現

- シリコン導波路結合型量子ドットレーザの**5chアレイ**実現に成功
- 転写プリント**によるシリコン上量子ドットレーザ構造集積実現



B. Jang et al. Appl. Phys. Express **9** 092102 (2016)
 Y. Arakawa et al. Semiconductors and Semimetals **101** 91 (2019)
 N. Morais et al. (in preparation)

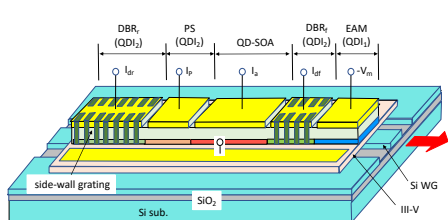
将来の光電子集積サーバ搭載用光源技術を確立

研究開発成果: 革新的光源技術(早稲田大学)

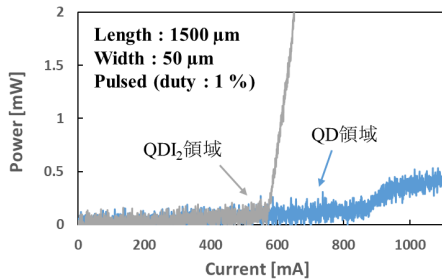
公開

量子ドット組成混合技術による集積レーザの実現

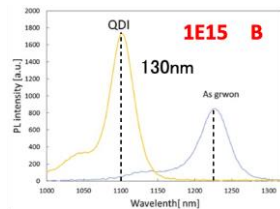
- マスク厚変調による量子ドット組成混合(QDI)の領域制御技術の確立
- モノリシック集積波長可変光源の実現が可能



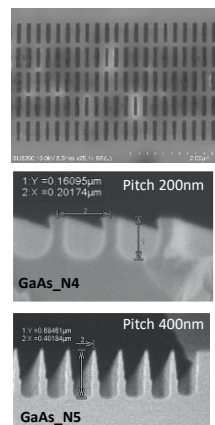
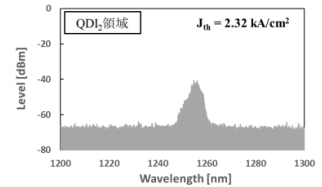
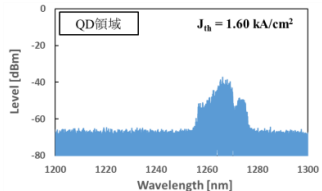
Si 基板上EAM集積QD-DBRレーザ



QD-QDI集積リッジレーザの発振特性



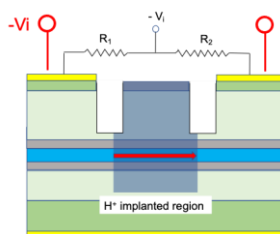
QDI PLスペクトル



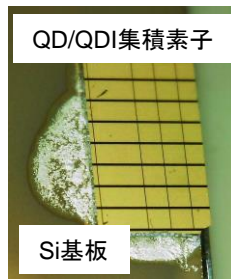
DBR LD用回折格子

横電界超高速電界吸収型変調器の提案

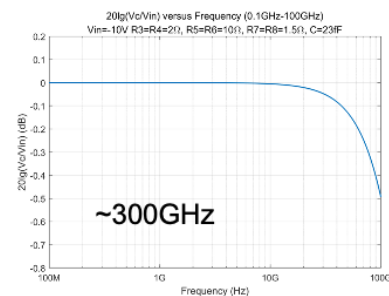
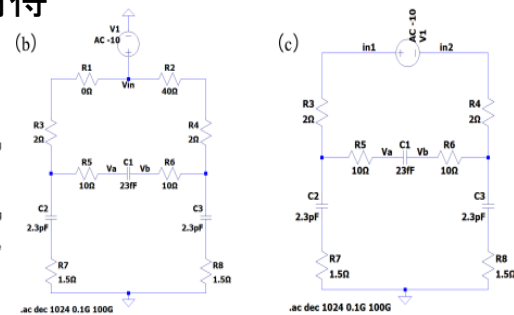
- H⁺イオン注入による簡易な方法による超高速電界吸収型変調器(EAM)の実現が可能
- 平面電界印加(PEF)構造により約300GHzの広帯域動作が期待



PEF-EAM断面構造



Si基板上QD/QDI集積素子



等価回路と変調帯域解析

- Y. Hiraishi, et al., Physica Status Solidi A, vol.217, 1900851, 2020.
- S. Isawa, et al., Physica Status Solidi A, vol.217, 1900521, 2020.

※東大荒川研究室との共同研究

- P. Yu, et al., 70th JSAP Spring Meeting, 2022.

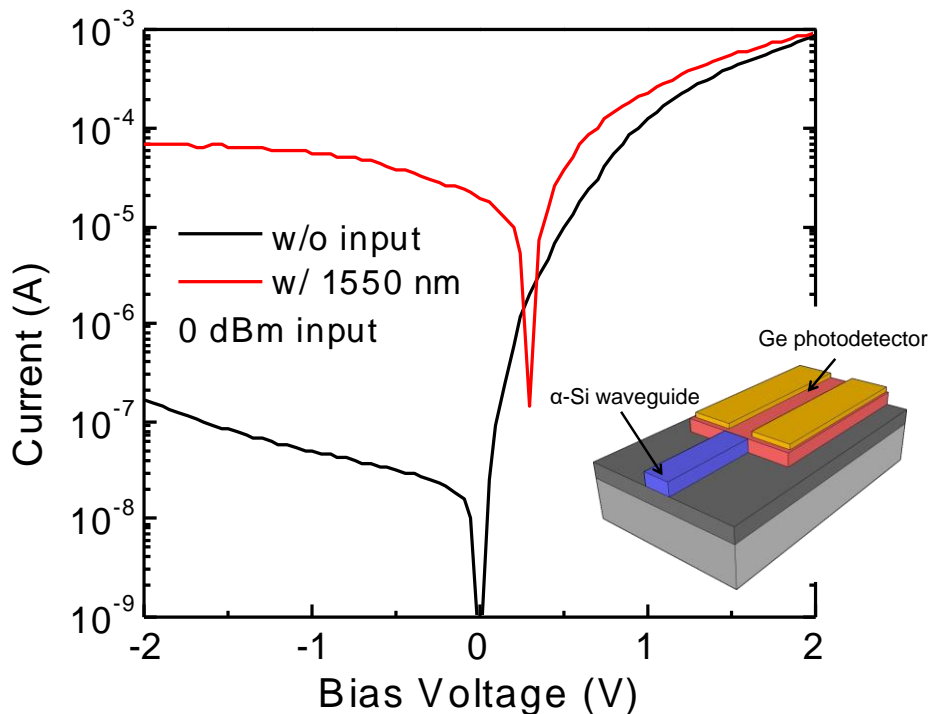
将来の光電子集積サーバ搭載用超高速変調光源のための基礎技術を確立

研究開発成果:革新的光検出器 (東大・竹中Gr)

公開

Ge-on-insulator (GeOI) 基板を用いた低暗電流導波路受光器を実現

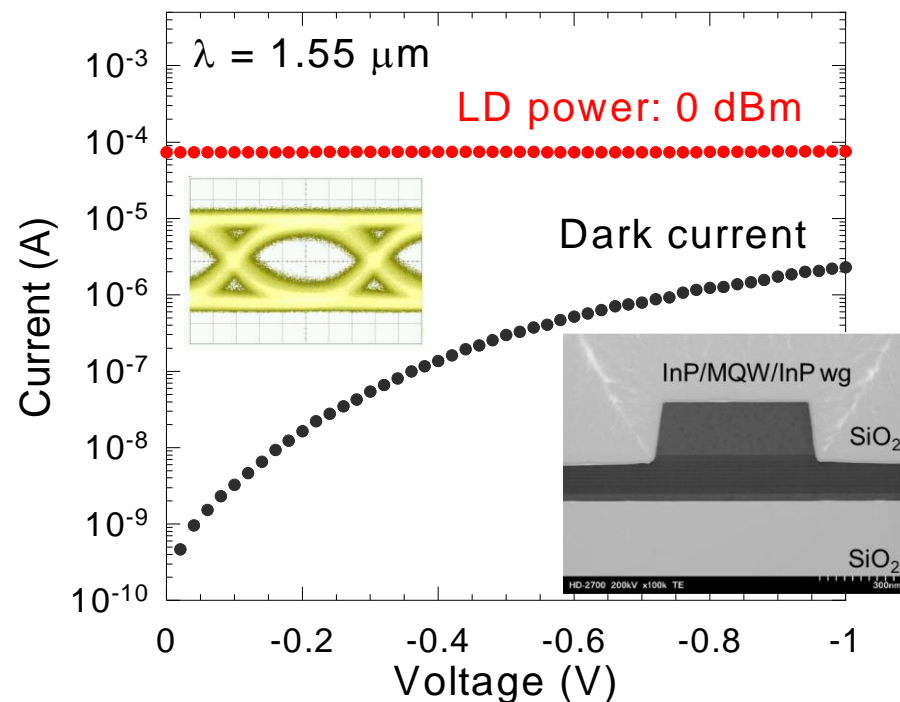
- 基板貼り合わせにより高品位GeOI基板を実現
- Ge酸化膜パッシベーションによる暗電流低減
- アモルファスSi導波路との集積化



Optics Express, vol. 26, no. 23, pp. 30546–30555, Nov. 2018.

III-V-OI基板を用いた導波路型受光器のモノリシック集積を実現

- P分子イオン注入による量子井戸インターミキシングを用いた能動・受動素子集積
- 横方向PIN接合を用いた導波路型受光器実証



VLSI Symposium, JFS3-6, 13–19 June 2021.

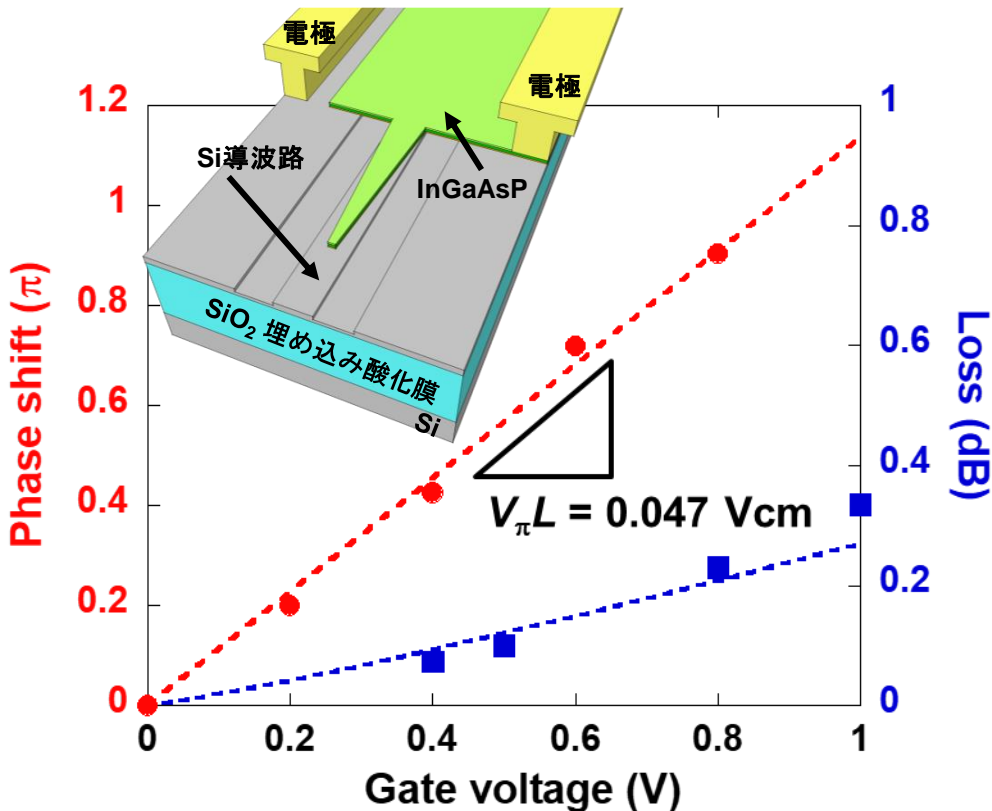
将来の光電子集積サーバ搭載用受光器技術を確立

研究開発成果:革新的変調器技術 (東大・竹中Gr)

公開

III-V/SiハイブリッドMOSキャパシタを用いた超
高効率光変調器を実現

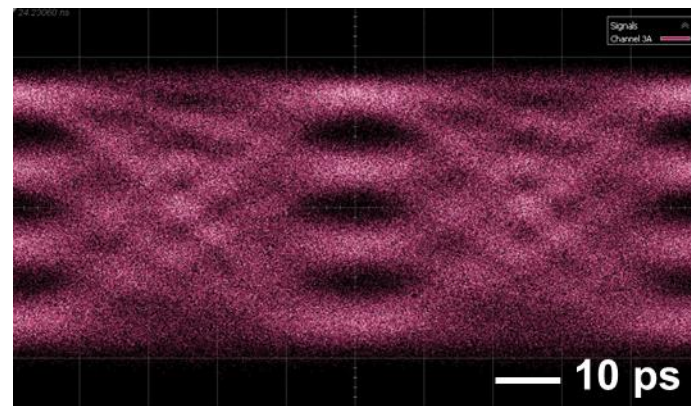
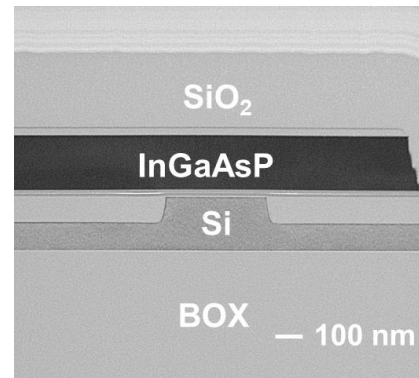
- III-V層への電子蓄積による光変調を世界初実証
- Si変調器の10倍の効率、1/10の光損失を実現



Nature Photonics, vol. 11, no. 8, pp. 486–490, Jul. 2017

III-V/SiハイブリッドMOS光変調器
でPAM-4変調を世界初実証

- PETRAと共同で、低寄生容量化に成功
- 40 Gbps PAM-4変調を実証



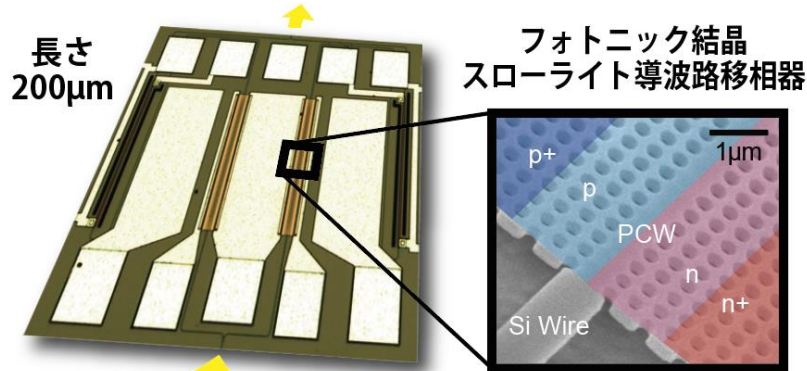
OFC, Th2A.16, San Diego, 8–12 March 2020.

将来の光電子集積サーバ搭載用光変調器技術を確立

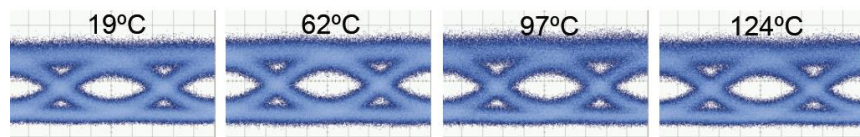
フォトニック結晶のスローライト効果による 超小型マッハツェンダー変調器の実現

- 汎用プロセスで製作可, **サイズは従来の1/10**
- 広い波長範囲, 温度範囲で動作

フォトニック結晶導波路(PCW)変調器の製作



広い温度範囲での動作

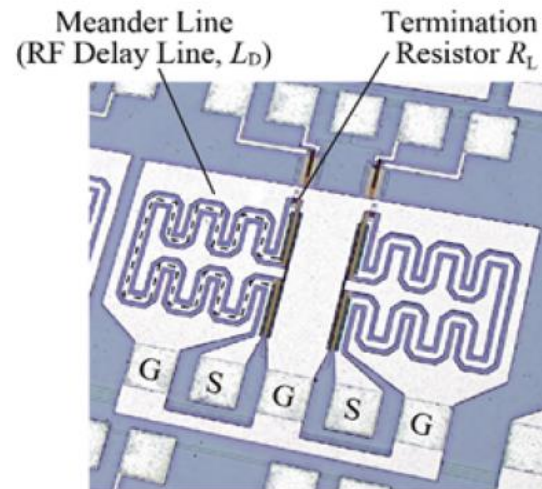


H. C. Nguyen, et al., IEEE JSTQE.19, 3400811 (2013, Invited)
T. Baba, et al., Sci. Technol. Adv. Mat. 15, 024602, (2014, Invited).

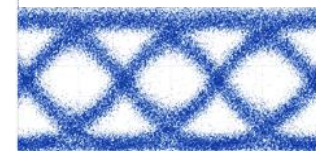
位相整合による世界最高レベルの 高速動作実現

- OOK変調で50~64 Gbps動作を達成
- PAM4で56~100 Gbps, WDMで200 Gbps

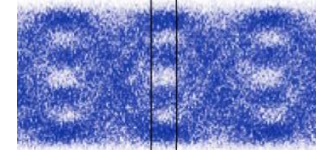
メアンダライン電極で 光-電気位相不整合を解消



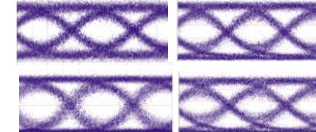
OOK 64 Gbps



PAM4 100 Gbps



WDM 200 Gbps



Y. Hinakura, et al., Opt. Express 27, 14321 (2019)
Y. Hinakura, et al., IEEE JSTQE 27, 4900108 (2020, Invited)

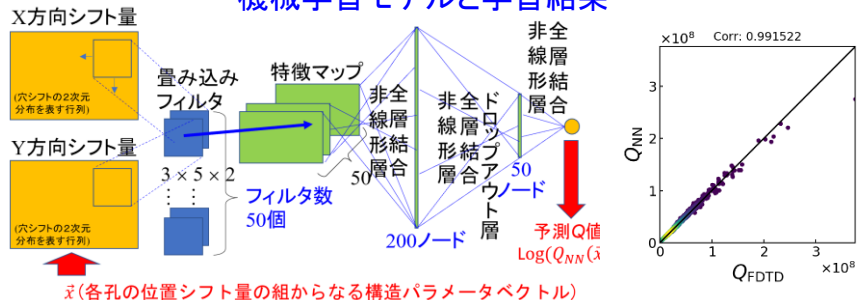
将来の超小型モジュール規格や高密度インターポータ技術に貢献

複雑な性能を実現できる

汎用性が高い設計手法の開発

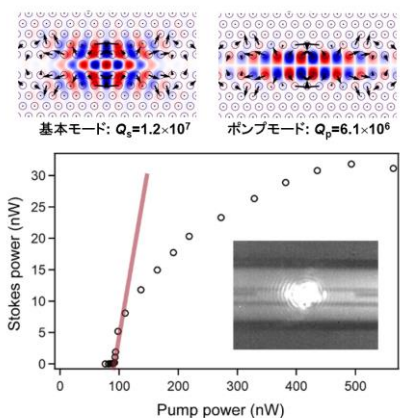
機械学習を活用したフォトニック結晶設計

機械学習モデルと学習結果

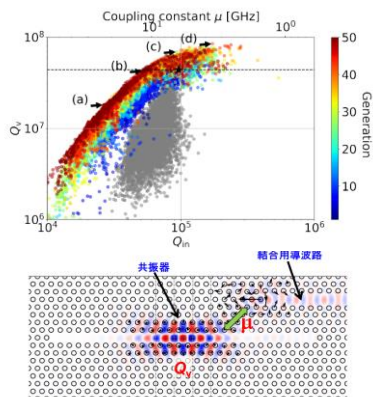


T. Asano, S. Noda, *Opt. Express* **26**, 32704 (2018).
T. Asano, S. Noda, *Nanophotonics* **8**, 2243 (2019).

損失補償用ラマンゲインと光保持Q値の同時最適化



共振器間結合とQ値の同時最適化



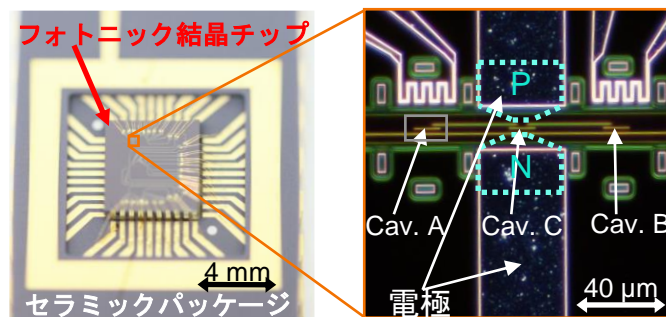
T. Kawakatsu, T. Asano, S. Noda, Y. Takahashi, *Opt. Express* **29**, 17053 (2021).

この他にも、自在な光3次元配線、低損失SiCフォトニック結晶、Q値1100万の光ナノ共振器、光の時間反転操作等を実現

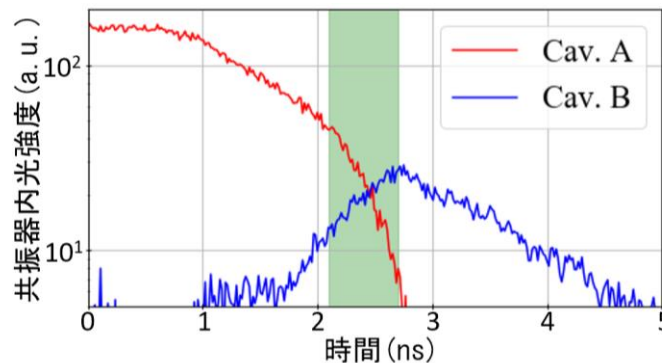
将来の光電子集積サーバにおける高度な光配線技術を確立

世界初の電気パルス制御による共振器間光転送の実現

- 低損失化と電気制御の両立を達成
 - 光バッファメモリの基礎技術を確立
- ### 超低損失フォトニック結晶光電子融合チップ



光転送実験結果

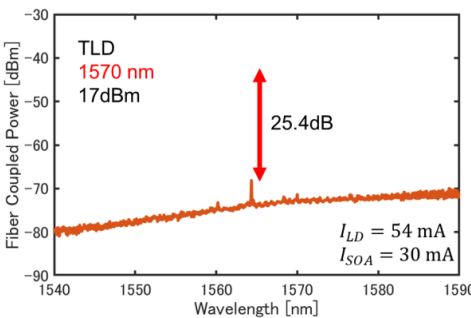
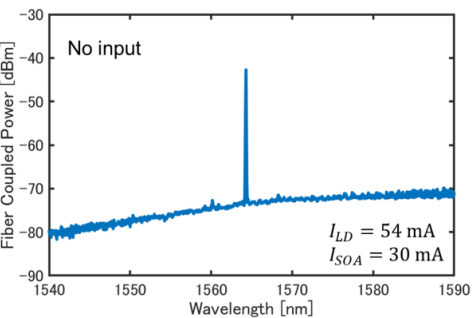
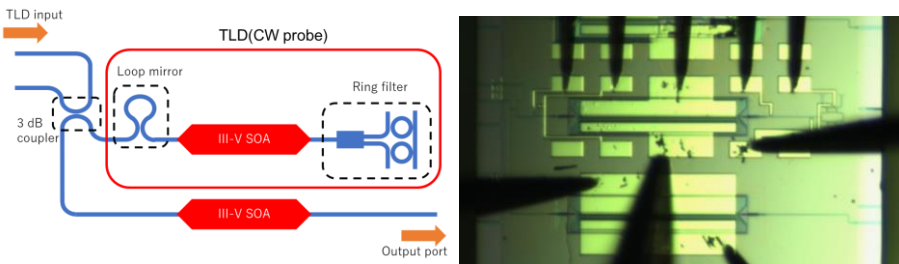


M. Nakadai, T. Asano, and S. Noda, *Nature Photonics* **16**, 113 (2022).
(Published online 2021, <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00910-y>).

研究開発成果: 革新的光エレクトロニクス技術(東工大) 公開

光源・増幅器一体集積型波長変換器の実現

- 世界初室温異種材料集積技術により光源を実現
- 増幅器との一体集積により波長変換機能を実現

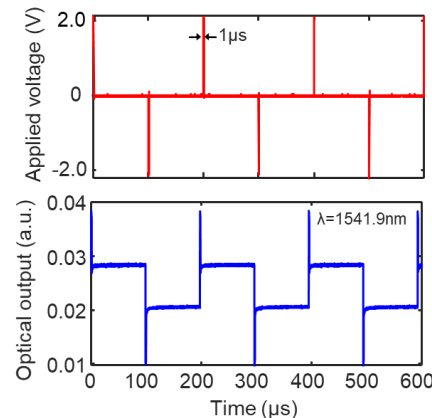
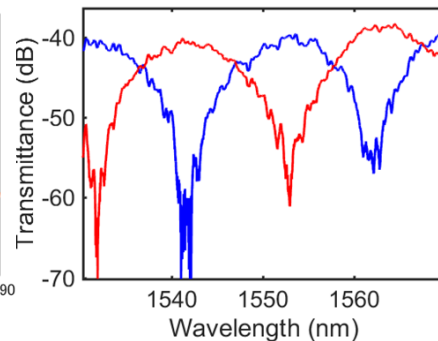
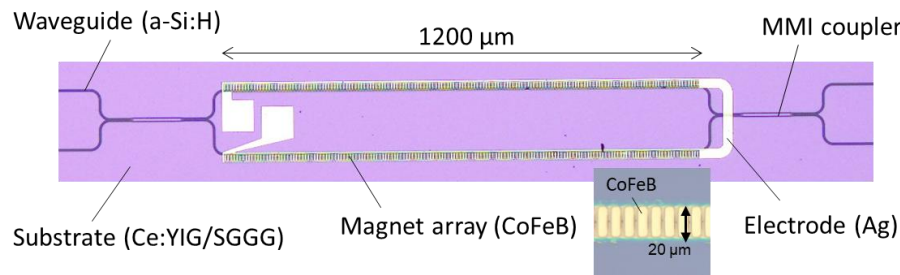


入力信号のOn/Offを異なる波長のOff/Onに変換

榎原他、2021春応物、16p-Z10-9

磁性体を利用した不揮発性光スイッチ 世界初の実現

- 磁性材料の磁化方向を電流で制御することにより光スイッチ動作を実現
- 磁気保持動作により無電力でその状態を保持



T. Murai, et al., Opt. Express **28**, 31675 (2020)

将来の光電子集積サーバ搭載用
光源・増幅器集積型機能可変光回路技術の基礎を確立

革新的デバイス技術研究からの展開

革新的デバイス技術研究からの展開

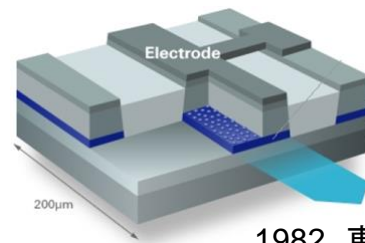
公開

量子ドットレーザ技術: 光IOコアを可能に!

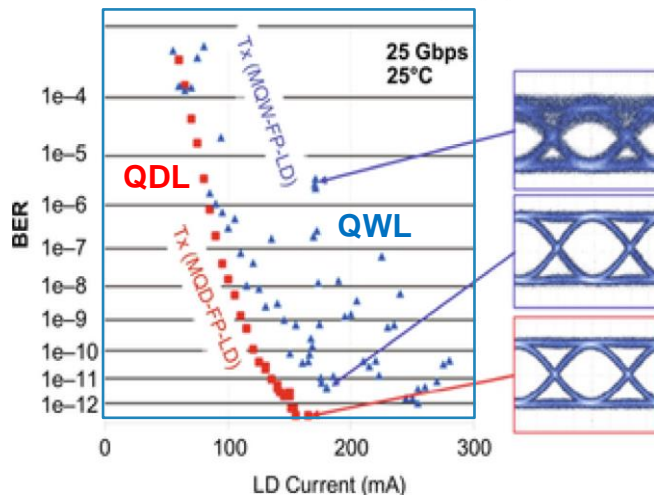
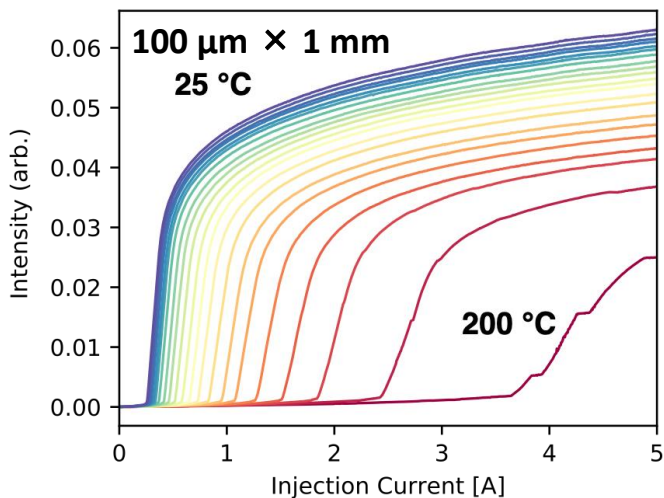
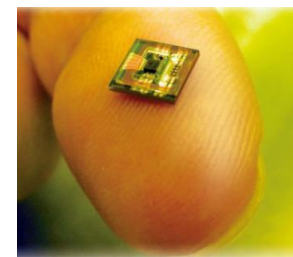
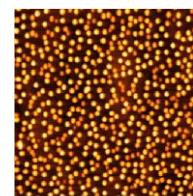
アイソレータフリーの超小型シリコン集積チップ実現に貢献

温度安定性・高温動作の実証

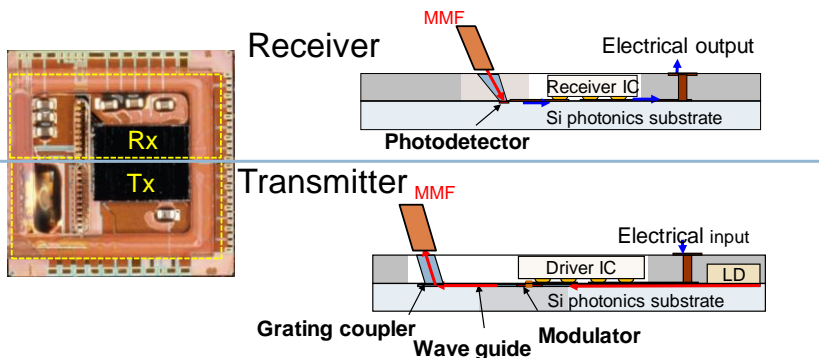
光フィードバック高耐性の実証



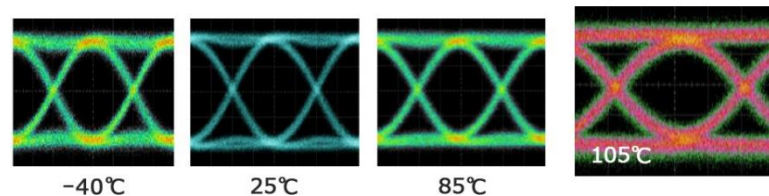
1982 東大



PETRAによる光I/Oコアの技術開発とアイオーコア社による実用化

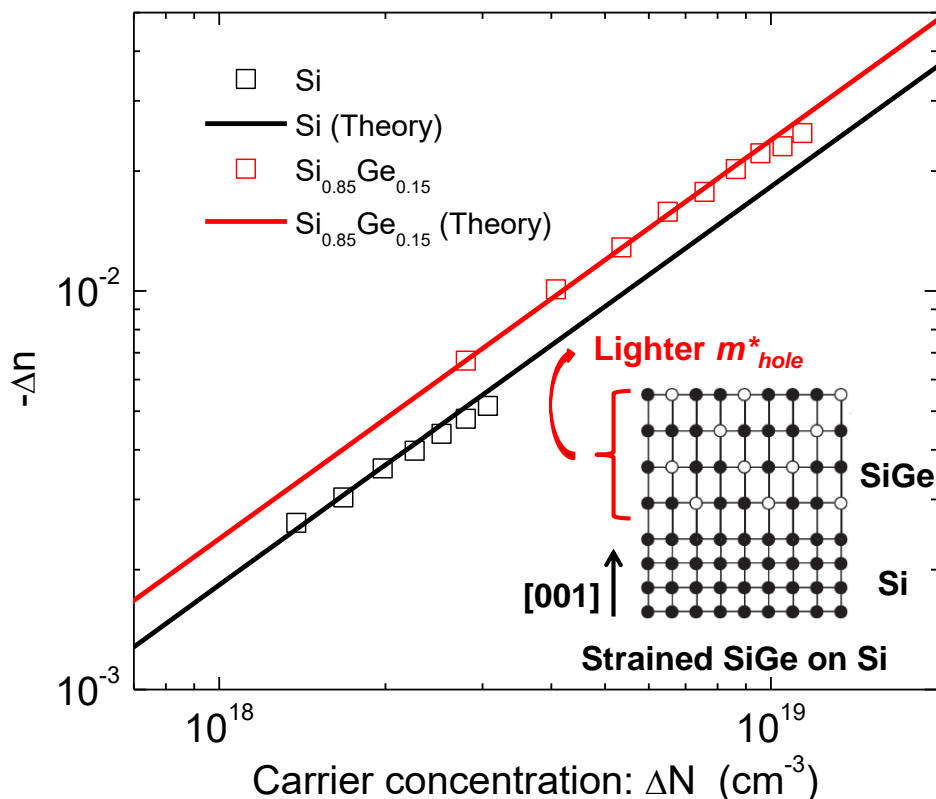


25Gbpsトランシーバーの広温度領域動作



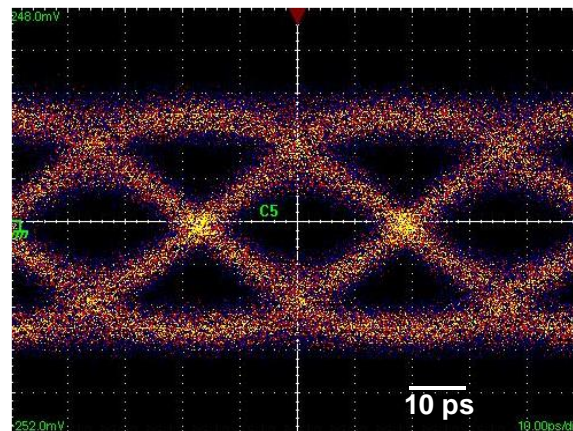
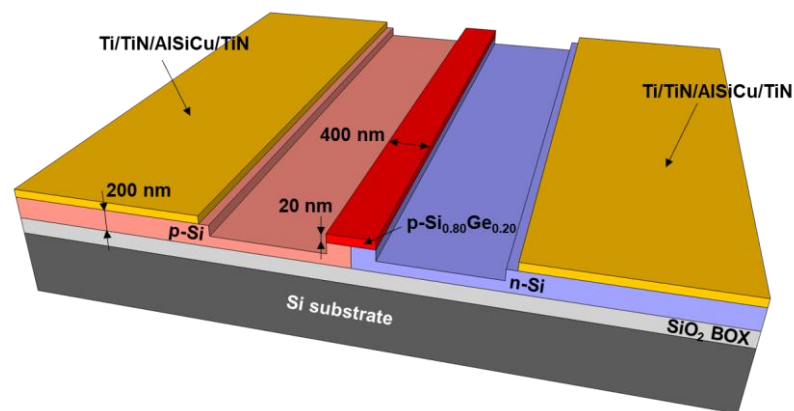
SiGe変調器技術: PETRA光回路への導入!

歪みSiGe中におけるプラズマ分散効果



Appl. Phys. Express, Vol. 11, 032201, 2018.

SiGe光変調器の素子構造および変調特性



- ✓ 歪みSiGe中の軽い正孔により、プラズマ分散効果を増大。
- ✓ PETRAと共同でCMOSファブでの量産が可能なSiGe光変調器を考案・実証
- ✓ 空乏型として世界最高レベルの変調効率を実現

世界初、世界最高性能を実現する多くの成果

論文 190件

学会発表 1,193件

国内会議 605件

国際会議 588件

特許 4件

受賞 35件

- ✓ 国内外で高い評価
 - 高インパクト誌への論文掲載多数
 - トップ国際会議での採択、招待講演多数
- ✓ 学生の受賞も含む多くの受賞
 - 次世代人材の育成にも大きく貢献

最終目標と達成状況

公開

テーマ名	最終目標	主な成果	達成度
革新的光源技術 (東京大学)	集積シリコン光回路上ハイブリッド量子ドットレーザの基本動作を実証試作および長波長帯のシリコン基板上量子ドットレーザの実現可能性の検討	シリコン導波路結合型量子ドットレーザを、転写プリント法を用いて実証した。1.4 μm 以上長波長帯量子ドットレーザの実現に成功し、シリコン基板上形成も実現した。	○
革新的光源技術 (早稲田大学)	Si基板上III-V電気吸収型光変調器集積量子ドット波長可変レーザの要素技術の開発	GaAs基板上QD集積レーザの実現、Si基板上への搭載、DBRレーザ用高品質回折格子開発、超高速変調器などの要素技術を開発した	○
革新的光検出器技術 (東京大学)	光電子集積インターポーザ用集積化受光器に向け、高速応答可能で省電力化が可能な導波路型受光器を実証することにより、光電子集積インターポーザへの技術展開の見通しを示すと共に、事業化に対する課題を明確化する。	GeOI基板上にGe導波路を形成し、横方向PIN接合を形成した導波路受光器を作製して良好な受光特性を得た。またIII-V-OI基板上においては量子井戸インターミキシングにより、横方向PIN接合を形成した導波路型受光器をモノリシック集積することに成功した。	○
革新的光変調器技術 (横浜国立大)	光電子集積インターポーザ用光変調器に向け、位相整合対策が施された移相器長200μm程度のスローライト変調器において、30Gbps以上のOOK変調動作を実証する。また、同様の50Gbps以上の動作、ならびに波長多重化、ならびにQPSK、PAM等の多値化による100Gbps以上の動作の実現可能性を明らかにする。	移相器長200μm以下のスローライト変調器にメアンダライン電極を導入し、64GbpsまでのOOK動作、50Gbps×2 = 100GbaudのPAM4動作、50Gbaud×4 = 200Gbpsの多波長動作の初期的な実証に成功し、当初目標を達成した。	○
革新的光変調器技術 (東京大学)	光電子集積インターポーザ用の集積化光変調器への展開に向け、ハイブリッドMOS型変調器等に対し、多重化・多値変調等の伝送方式を実現する可能性を実証することにより、光電子集積インターポーザへの技術展開の見通しと事業化に対する課題を明確化する。	SiO ₂ 埋め込みSi導波路を用いることで、ハイブリッドMOS型光変調器の寄生容量を大幅に低減することに成功し、40 Gbps PAM-4変調に初めて成功した。III-V族半導体薄膜を用いたEA変調器の作製プロセスも確立し、高速変調の可能性を示した。	○
革新的光配線技術(京都大学)	光電子集積インターポーザへの展開に向け、フォトニックナノ構造等による光損失補償機能や光バッファ機能を統合することなどにより高度な光配線技術を開発し、光電子融合サーバ技術の革新的展開へ寄与する。	共振器による光信号保持と電気信号制御による共振器間光転送が可能な光パルスバッファリング機能の基礎技術を実証した。また機械学習設計と高度な光損失低減プロセス等の統合により、転送効率90%以上、光保持時間3ns以上を得る見通しを得た。	○
革新的光エレクトロニクス回路技術 (東京工業大学)	光電子集積インターポーザへの展開に向け、シリコンインターポーザ上で機能可変型光エレクトロニクス回路の基本機能を実証して光FPGA実現の見通しを明らかにすることにより、光電子集積サーバ技術の革新的展開へ寄与する。	光FPGAの基本構成であるハイブリッド光利得素子、特性可変ミラー、不揮発性スイッチを実現するとともに、光利得素子をつなぎ合わせワンチップ上で波長変換機能を実現することで、光FPGA実現の見通しを明らかにした。	○

光電子集積サーバの継続的高性能化を可能にする技術の不連続な進展を目指した研究開発を推進

世界をリードする世界初・世界最高など、技術的にも学術的にも価値の高い成果を多く達成し、設定目標をすべて達成

研究活動を通じた次世代人材の育成にも貢献

将来の光電子集積サーバの要素基盤を確立

③「成果普及活動」(東京大学): 目標・計画・成果・達成度 公開

- [目標]** 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構において、
- 大学院生向け講義「ナノ量子情報エレクトロニクス特論」
 - 学生・社会人向けセミナー「フォトンクス・イノベーションセミナー」
 - 国際会議ISPEC(International Symposium on Photonics and Electronics Convergence)を継続開催し、プロジェクト成果の普及のための人材育成並びに成果普及を図る。

[最終目標] 上記に加え、最終シンポジウム等により、プロジェクトの成果を広く一般に普及させる。



- [成果]**
- ナノ量子情報エレクトロニクス特論開講(夏学期)
 - フォトンクス・イノベーションセミナー開催(年3~4回)
 - 国際会議ISPEC開催(毎年11~12月: 参加者例年250~300名)
- } 2020,21年度は
全てオンライン

活動実績一覧 (2018年4月以降、講義を除く)

セミナー・国際会議 名称	講演者	参加者数	活動風景写真
フォトンクス・イノベーションセミナー 第12回~第21回 (計 10回) うち 3回 地方開催 (京都 2回、仙台 1回) 3回 オンライン	小芦雅斗 (東京大学)、美濃島薫 (電気通信大学)、 L. C. Kimerling (MIT)、松田信幸 (東北大学)、 五十嵐浩司 (大阪大学) 他	34~166名	
International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC) 第8回~第11回 (計 4回) うち 2回 オンライン	E. Tournié (Université de Montpellier), P. De Dobbelaere (Luxtera), M. Pantouvaki (IMEC), J. Bowers (UCSB) 他	248~318名	

[達成度] ○ [目標達成]

以下、「革新的デバイス技術」の詳細資料

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

1) シリコン基板上集積量子ドットレーザの開発

光電子集積サーバ用の集積化光源への展開として、シリコン上量子ドットレーザの性能向上を目指すとともに、それらを光変調器などの機能が集積化された光チップ上に集積しその基本動作を実証する。また、シリコン基板上の高品質1.3 μm 帯量子ドット形成技術を基礎に更なる結晶成長技術の深化と波長制御技術の確立を図り、次世代集積化用光源技術として1.4 μm 以上の長波長帯のシリコン基板上量子ドットレーザの技術開発を行う。

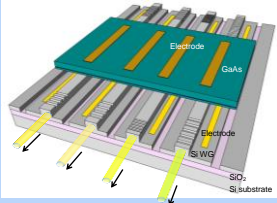
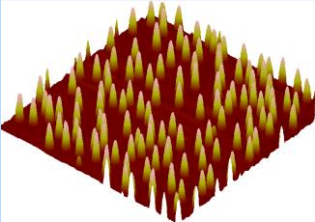
最終目標:

- (1) 1.4 μm 以上の長波長帯のシリコン基板上量子ドットレーザの実現可能性の実証
- (2) 集積シリコン光回路上ハイブリッド量子ドットレーザの基本動作を実証試作

(2) 開発計画

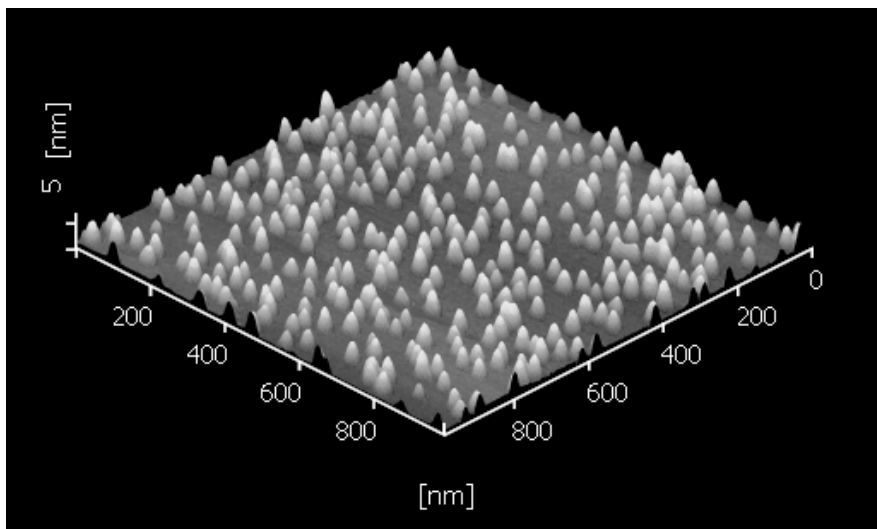
公開

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

開発項目	2018	2019	2020	2021上期	2021下期
<p>光回路上QDレーザ 集積化技術開発</p> 	<p>多チャンネル 導波路結合型 QDレーザ試作</p>	<p>変調器集積型 光回路上 素子設計</p>	<p>ウエハ融着法・ MZ変調器試作</p> <p>集積型 光回路上 素子試作・評価</p>	<p>転写プリント法での量子 ドットレーザ形成実証</p> <p>集積型光回路上 素子集積・動作実証</p>	
<p>Si上長波長帯 QDレーザ技術開発</p> 	<p>長波長帯量子 ドット結晶成長 技術開発</p> <p>Si 基板上直接 成長QDレーザ 技術開発</p>	<p>長波長帯QD 構造設計成長 評価</p> <p>Si 基板上直接成長 QDレーザ高性能化</p>	<p>長波長帯 QD形成</p> <p>長波長帯QD 高密度 高品質化</p>	<p>長波長帯(1.4 μm帯) QDレーザ実証</p> <p>Si基板上1.4 μm帯 量子ドットレーザ試作</p>	
	<p>直接成長 QDレーザ実証</p>	<p>100℃以上 高温動作実証</p>		<p>Si上長波長帯 QDレーザ試作</p>	

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

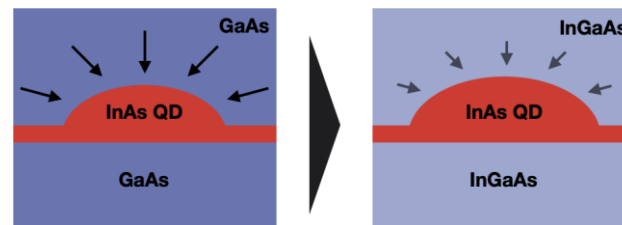
量子ドットレーザ



量子ドットレーザは、低閾値電流密度、高温動作特性、温度安定動作や高速変調特性などの特徴を有しており、特に低閾値動作、高温・温度安定動作は光電子融合システムの基本光源に求められる要求を満たすものである。革新的光源技術では、この量子ドットレーザをシリコン光回路上に実現する。

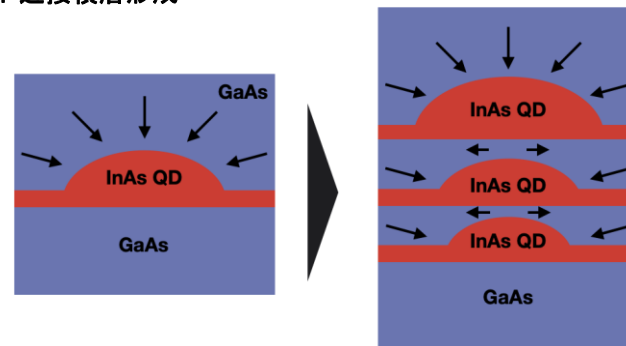
長波長量子ドット形成技術

InGaAsメタモルフィック層成長



- InAs 量子ドットのマトリクス材料を GaAs から InGaAs に
- 量子ドットへの応力減少、量子ドットサイズ増大
- ポテンシャル障壁の減少で長波長化

量子ドット近接積層形成

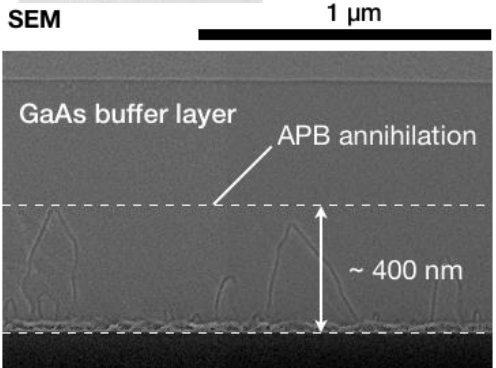
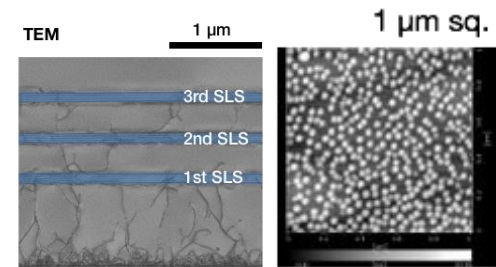


- InAs 量子ドットを近接積層
- 下地の量子ドットによる歪緩和で上層の量子ドットサイズ増大
- エネルギー準位の低い上部量子ドットから発光

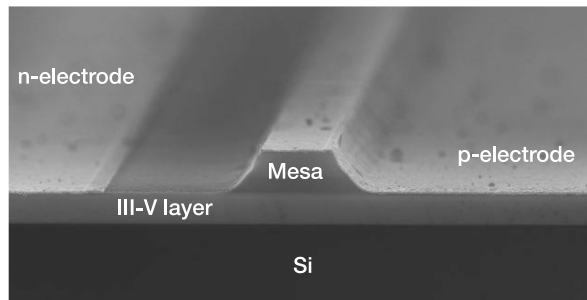
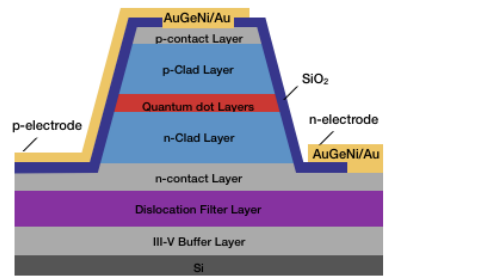
1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

シリコン(001)基板上直接成長型量子ドットレーザの実現

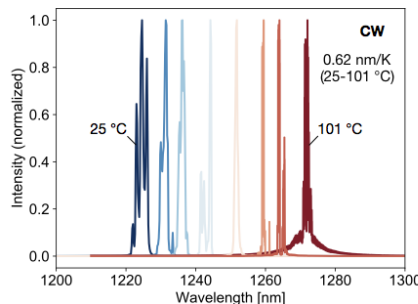
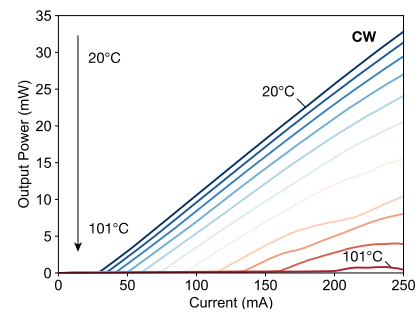
シリコン基板上III-V半導体層における欠陥拡張抑制や形成された量子ドット



シリコン基板上量子ドットレーザの構造図と断面 SEM 図



シリコン基板上量子ドットレーザのデバイス特性



- Si 基板上にAlGaAs種結晶層などを導入し、良質なIII-V属半導体層および量子ドットの形成に成功
- 高温環境(>100° C)での連続発振に成功

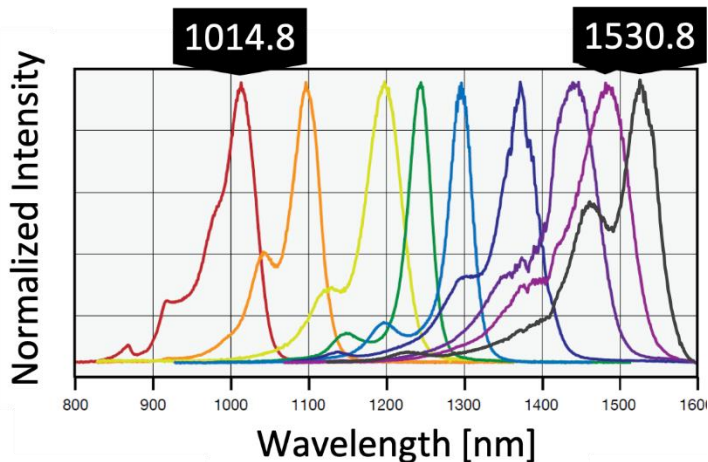
J. Kwoen et al. Opt. Express 26 9 11568 (2018)
J. Kwoen et al. Opt. Express 27 3 2681 (2019)

全 MBE法を用いたシリコン(100)基板上量子ドットレーザ

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

メタモルフィック層上長波長帯量子ドットレーザの実現

TバンドからCバンドまで実現

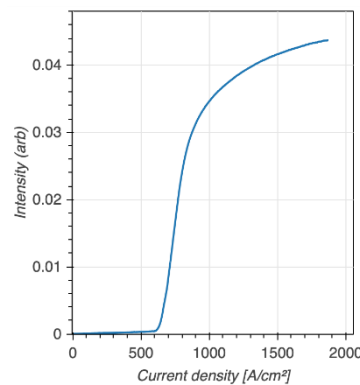


GaAs 基板上 InAs/(In)GaAs系
量子ドットの広帯域 PL 発光

400 nm In _{0.23} Ga _{0.42} As
1500 nm In _{0.23} Al _{0.35} Ga _{0.42} As
QD Active
600 nm In _{0.23} Al _{0.35} Ga _{0.42} As
300 nm In _{0.23} Al _{0.35} Ga _{0.42} As w/SLS
300 nm In _{0.20} Al _{0.35} Ga _{0.45} As w/SLS
300 nm In _{0.15} Al _{0.35} Ga _{0.50} As w/SLS
GaAs

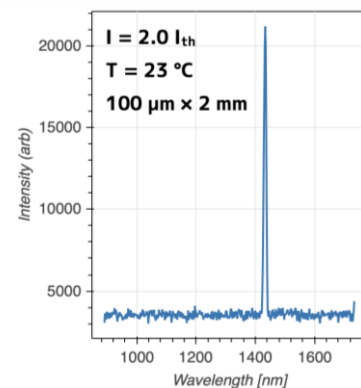
多機能メタモルフィック
バッファ (MFMB) 層を有する
量子ドットレーザ構造

既存より、約1 μm薄い長波長量子ドットレーザを実現



MFMB層上量子ドットレーザの
L-I特性

発振波長 : 1432 nm



MFMB層上量子ドットレーザの
スペクトル

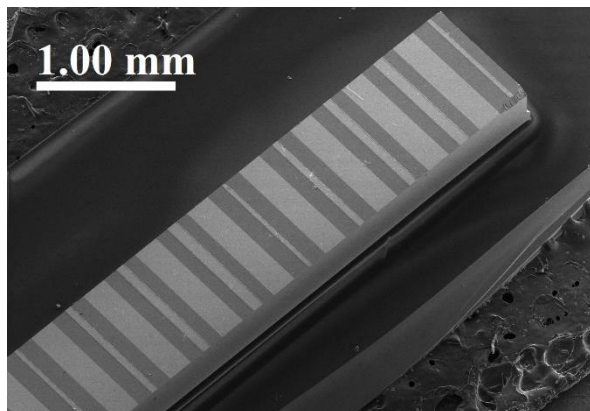
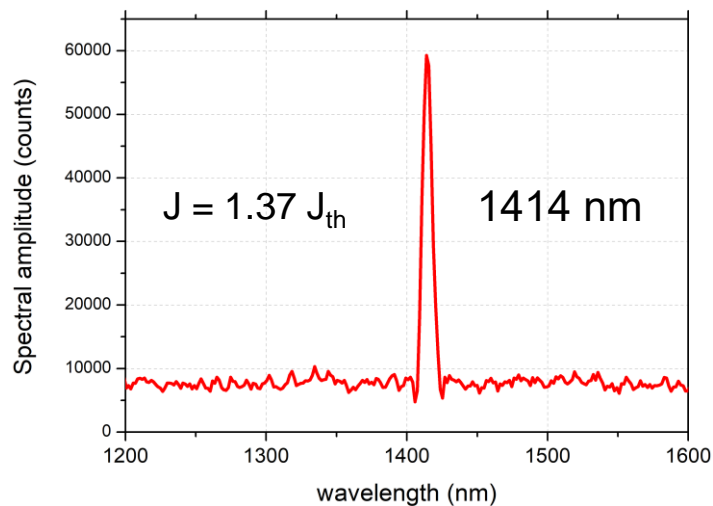
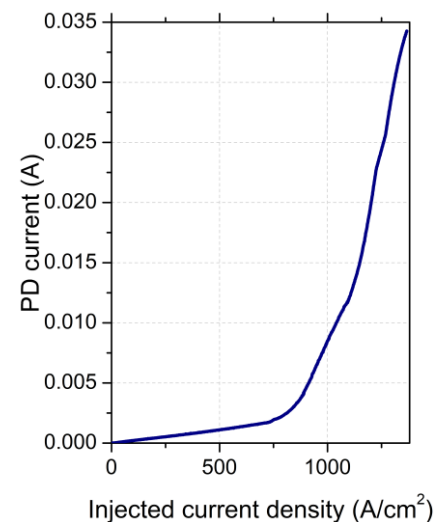
- GaAs 基板上にメタモルフィック層などを導入し、ヒ素系量子ドットでTバンドからSバンドまでの発光を確認
- 多機能(格子拡張・レーザクラッド・転位フィルター)メタモルフィックバッファ層を有する
Eバンド量子ドットレーザを実現

J. Kwoen et al. Opt. Express 29 18 29378 (2021)
J. Kwoen et al. Electron. Lett. 57 14 567 (2021)

メタモルフィックバッファ層上量子ドットで1.4 μm帯でのレーザ発振を実証

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

シリコン基板上長波長量子ドットレーザ形成技術

シリコン基板上BCBで融着された
量子ドットレーザの上面図シリコン基板上1.4 μm帯
量子ドットレーザ スペクトルシリコン基板上1.4 μm帯
量子ドットレーザ L-I 特性

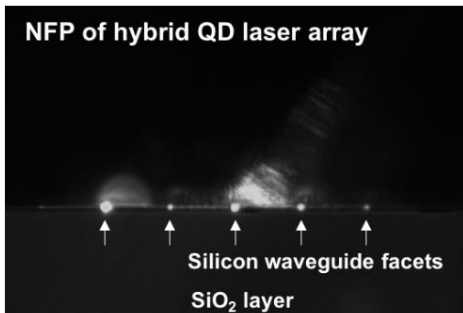
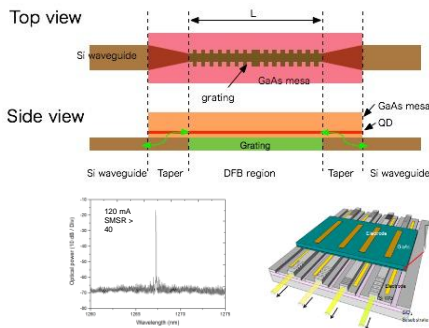
- 量子ドット素子をBCBで融着することで、シリコン基板上 1.4 μm 以上量子ドットレーザの実証に成功

シリコン基板上 1.4 μm 帯量子ドットレーザの動作実証

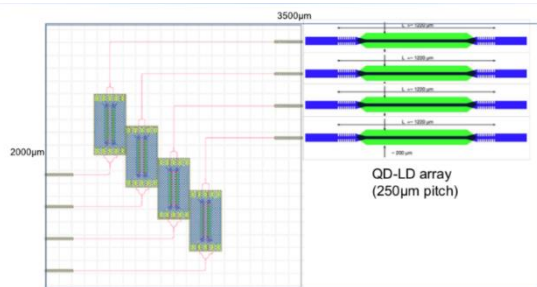
1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

シリコン光回路基板上量子ドット集積化の要素技術開発

光集積回路上
多チャンネル量子ドットレーザ

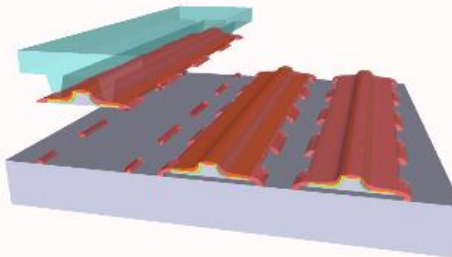


光集積回路設計

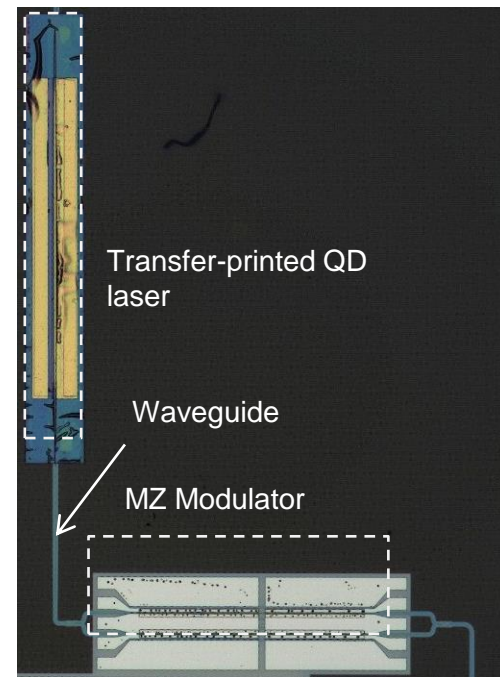


4ch Si optical modulator of 250µm phase shift length

転写プリント法



光集積回路上に形成された
量子ドットレーザ



- 直接融着法・転写プリント法の要素技術開発及び多チャンネル化に成功
- 光集積回路上量子ドットレーザ形成実証

B. Jang et al. Appl. Phys. Express **9** 092102 (2016)
Y. Arakawa et al. Semiconductors and Semimetals **101** 91 (2019)
N. Morais et al. (in preparation)

シリコン光回路上量子ドットレーザのハイブリッド集積化技術を開発

(5) 目標の達成度

1-2 革新的デバイス技術 革新的光源技術

最終目標(2021年度)：

- (1) 1.4 μm 以上の長波長帯のシリコン基板上量子ドットレーザの実現可能性の実証：達成
- (2) 集積シリコン光回路上ハイブリッド量子ドットレーザの素子集積・動作実証
- 光回路上量子ドットレーザ集積化技術の開発：達成

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

シリコン導波路上集積量子ドットレーザ

研究グループ	東京大学	HP	imec (Ghent)	Intel (UCSB)	LETI
活性層	量子ドット	量子ドット	量子ドット	量子井戸	量子井戸
集積方法	Direct Bonding	Direct Bonding	DVS-BCB Bonding	O ₂ Plasma 活性化 Bonding	O ₂ Plasma 活性化 ボンディング
レーザタイプ	DBR レーザ	cleaved waveguide レーザ	DFB レーザ	DBR レーザ	波長可変 DBR レーザ
J _{th}	250 A/cm ²	271 A/cm ²	205 A/cm ²	2.2 kA/cm ²	1.4 kA/cm ²
発振波長	1.3 μm	1.3 μm	1.3 μm	1.3 μm	1.3 μm

- 量子ドットレーザは量子井戸レーザと比較し高い優位性を有する。
- DBR 共振器結合型の量子ドットレーザで低しきい値電流密度を実現した。

シリコン基板上長波長帯量子ドットレーザ

研究グループ	東京大学	UCSB	HKUST
結晶成長	MBE	MOCVD+MBE	MOCVD
形成手法	直接成長	直接成長	直接成長
基板	Si	Si	Si加工基板
量子ドット材料	InAs	InAs	InAs
中間層材料	GaAs (P-free)	GaAs/GaP	GaAs/InP
発振波長	1.3 μm (O-band)	1.3 μm (O-band)	1.5 μm (S-band)
注入電流タイプ	CW	CW	Pulse
しきい値電流密度	370 A/cm ²	163 A/cm ²	1.6 kA/cm ²

- 全MBE直接成長法でシリコン基板上量子ドットレーザを実現した。
- GaAs基板上・As系積層材料のみからのアプローチで作製コストなどに優位性を有する。

1-2 革新的デバイス技術

1. 革新的光源技術 (東京大学・荒川Gr)
2. 革新的光源技術 (早稲田大学)
3. 革新的光検出器・光変調器技術 (東京大学・竹中Gr)
4. 革新的光変調器技術 (横浜国立大学)
5. 革新的光配線技術 (京都大学)
6. 革新的光エレクトロニクス技術 (東京工業大学)

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術**Si基板上III-V電気吸収型光変調器集積量子ドット波長可変レーザー
実現のための要素技術の開発**

光電子集積サーバ用の集積化光源への展開を目的とし、GaAs基板上InAs量子ドットへのイオン注入技術を駆使して、変調器集積波長可変レーザー実現のための要素技術を開発する。任意領域任意禁制帯幅を与える組成混合技術による量子ドット集積レーザーの実現、波長可変レーザー用高品質回折格子作製技術の確立、超広帯域変調器の提案と作製技術の確立、Si基板上搭載などにより、Si基板上変調器集積量子ドット波長可変レーザー実現のための要素技術を確立する。

2020年度目標:

- ・GaAs基板上QDレーザーとQDI導波路のモノリシック集積レーザーの実現
- ・QDI導波路による電界吸収(EA)の動作解析を行い、実現の見通し確認

最終目標:

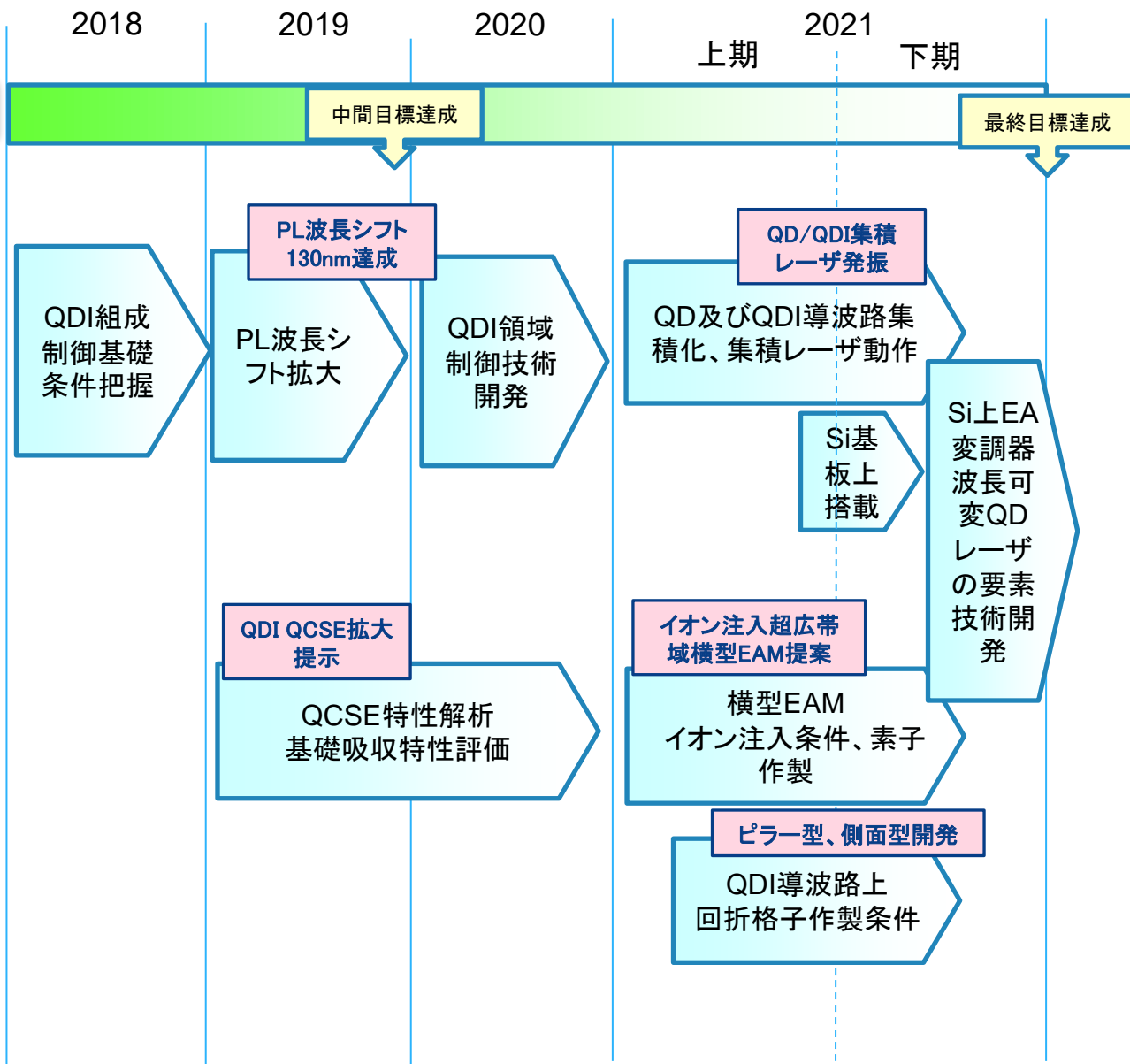
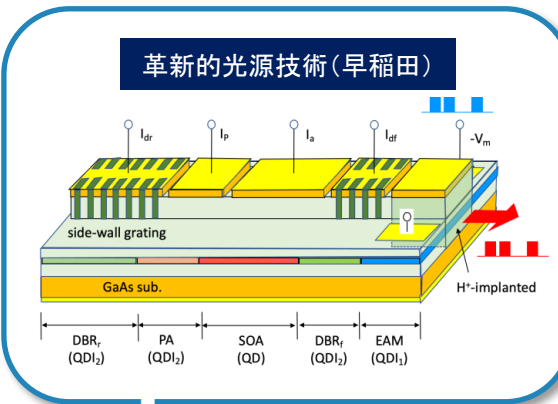
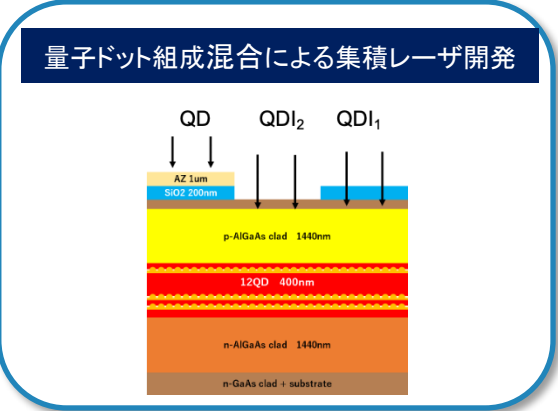
Si基板上電界吸収型光変調器集積量子ドット波長可変レーザーの実現のための要素技術の開発

(2) 開発計画

公開

1-2 革新的デバイス技術 革新的光源技術

開発項目



1-2 革新的デバイス技術 革新的光源技術

<アプローチ>

・イオン注入技術による1550nm帯量子ドット組成混合(QDI)技術(右図)

⇒1250nm帯QDへの適用性の確認

・禁制帯幅波長シフト範囲の拡大

目標:PLピーク波長シフト量100nm以上

・領域制御QDI技術

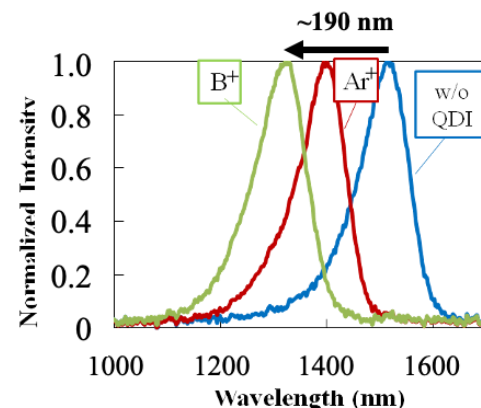
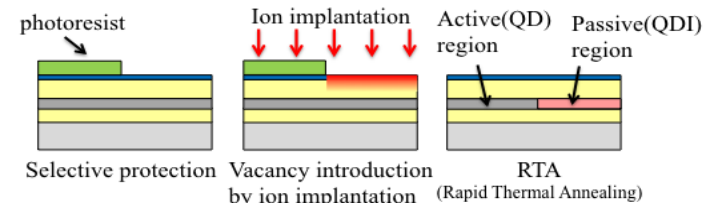
QD利得領域、導波路領域、変調領域

・波長可変化への展開、回折格子作製技術

・モノリシック集積EA変調器の高速化

目標:~50Gbps以上

・Si基板上への搭載

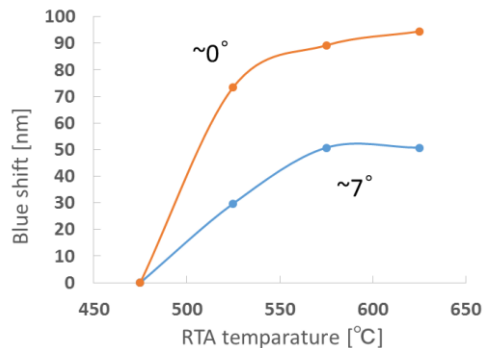
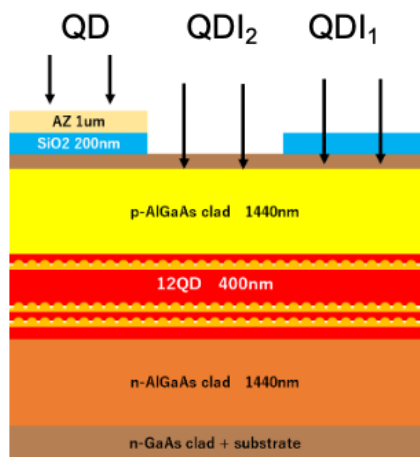


<特徴技術>

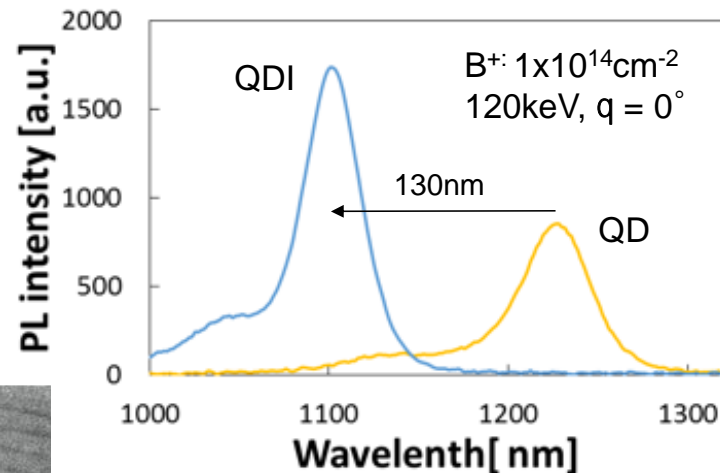
- ・イオン注入を用いたQDI技術により任意位置任意組成のウエハ内一括形成が可能
- ・1250nm帯量子ドットへのQDI技術によるIII-V多機能素子のモノリシック集積が可能
- ・回折格子/位相制御素子集積による波長可変分布ブラッグ反射型(DBR)レーザ
- ・イオン注入技術による低コスト超広帯域EA変調器の実現
- ・DBRレーザアレーによる波長多重素子
- ・Si基板上搭載量子ドット多機能化素子の実現

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

GaAs基板上InAs量子ドットの3領域禁制帯幅制御組成混合技術

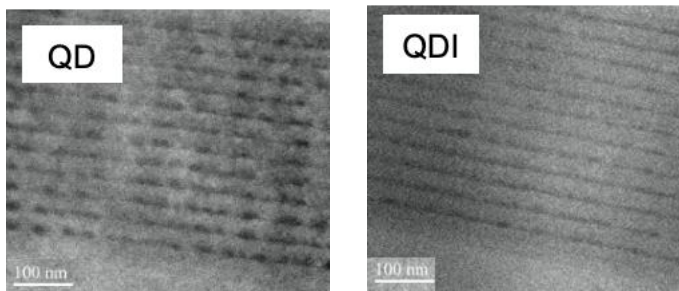


イオン注入角度とPLシフト量



最大PLシフト量 ($\Delta\lambda \sim 130\text{nm}$)

3領域組成混合制御QD
ウエハ断面
禁制帯幅: $QD < QDI_1 < QDI_2$



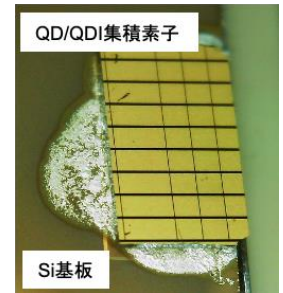
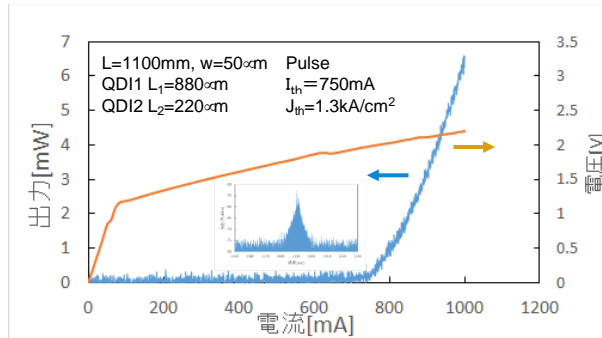
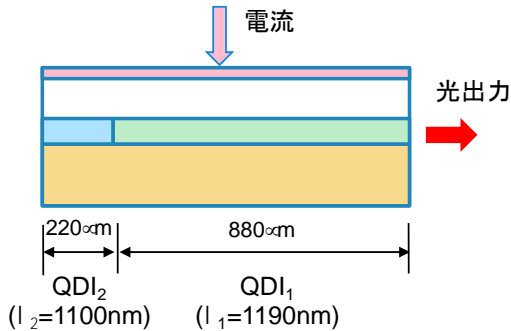
TEM像

■ GaAs基板上InAs QDの任意禁制帯幅を任意領域に形成する組成混合(QDI)技術条件を確立。
=>最大PL波長シフト: $\sim 130\text{nm}$ 、低損失導波路、EAM適用可能な任意禁制帯幅制御の実現

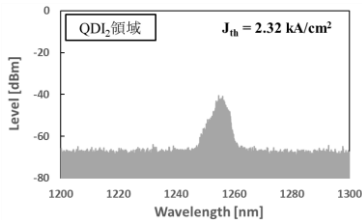
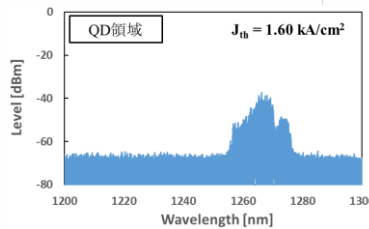
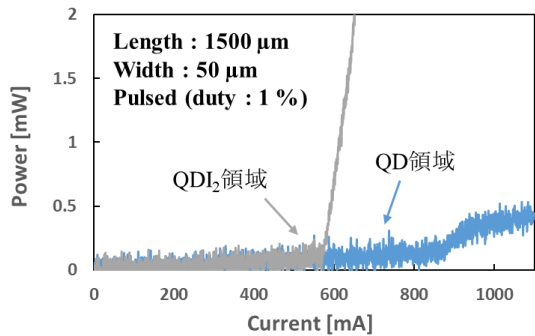
GaAs基板上InAs量子ドットのモノリシック多機能化が可能

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

GaAs基板上InAs量子ドット組成混合による集積レーザの実現



QDI集積構造のレーザ構造



QDI1/QDI2集積レーザの発振特性

- QD組成混合によるGaAs基板上InAsモノリシック集積レーザ発振
禁制帯幅: QD < QDI1 (EAM用) < QDI2 (導波路用)
- 機能集積レーザへの展開の見通し

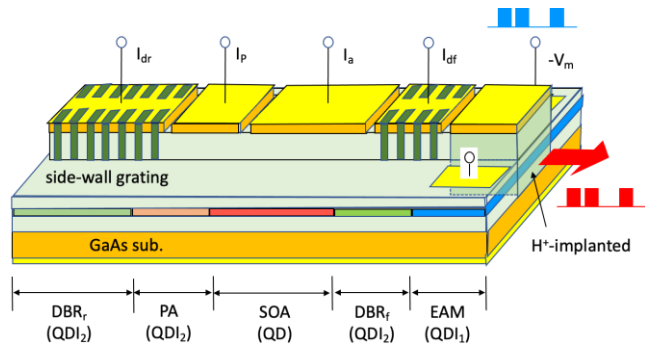
Si基板上搭載
3領域QD/QDI
集積レーザ

QDI/QDI2集積レーザの発振特性

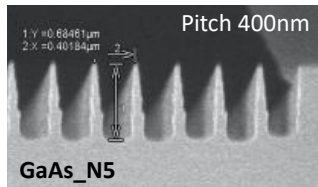
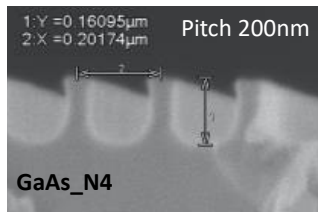
GaAs基板上InAs量子ドットの光集積レーザへの展開が可能

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

GaAs基板上InA量子ドット波長可変レーザのための微細回折格子の作製



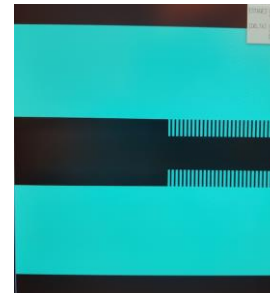
EAM集積波長可変QD-DBRレーザの素子構造



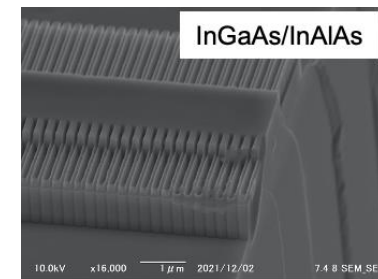
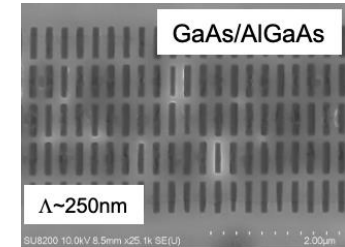
GaAs基板上(上)1次及び(下)2次回折格子



GaAs基板上スロット回折格子



導波路両側壁回折格子

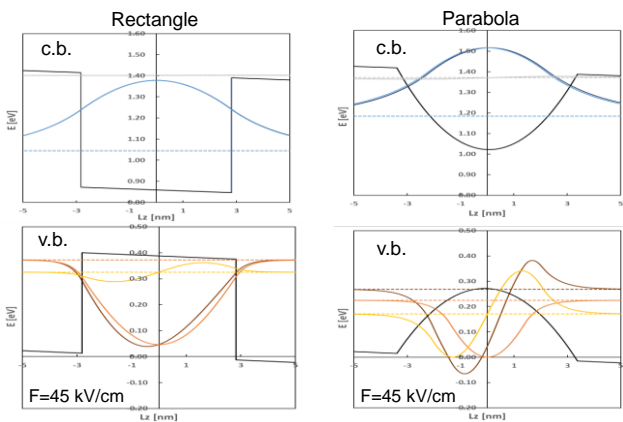


- GaAs基板上QD-DBRレーザ用高品質1次回折格子の作製条件の確立
- 2種の回折格子: 導波路上スロット回折格子(高効率光結合、安定)及び導波路両側壁回折格子(作製容易)

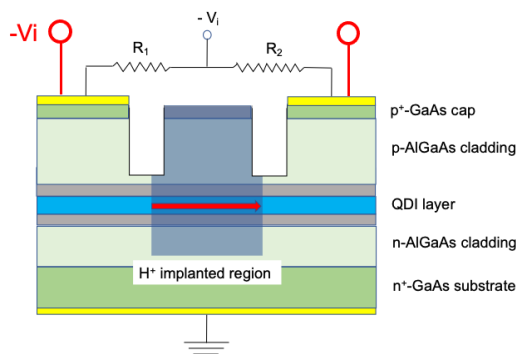
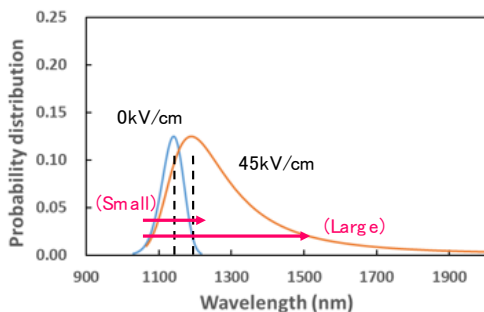
GaAs基板上量子ドット分布ブラッグ反射型(DBR)レーザ実現への目処

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

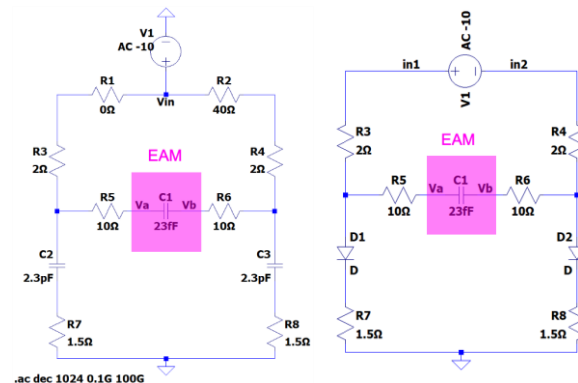
QDI導波路の電界吸収(EA)特性の解析とイオン注入による超高速EA変調の提案



箱型(QW)及び放物線型(QDI)ポテンシャルのQCSE効果

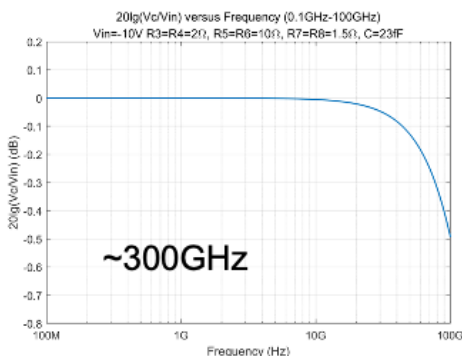


イオン注入による横型EAMの断面模式図



横型EAMの等価回路:

左: 上下方向電圧印加型
右: 横方向電圧印加型



- H⁺イオン注入による簡易な方法による超高速電界吸収型変調器(EAM)の実現が可能
- 横方法電界印加(PEF)構造により約300GHzの広帯域動作が期待

QDI構造のQCSE効果スペクトル 横型電界印加EAMの変調周波数特性

イオン注入による横型EAMの提案と約300GHzの広帯域変調特性の期待

1-2 革新的デバイス技術
革新的光源技術

最終目標(2021年度)：

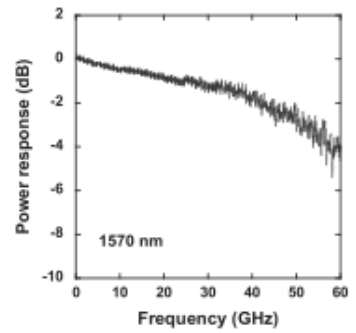
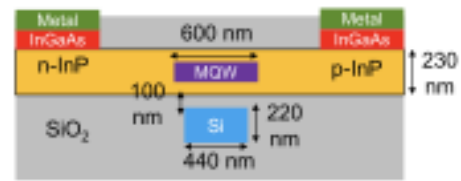
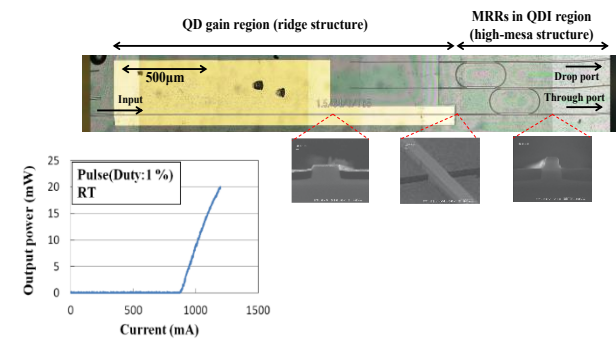
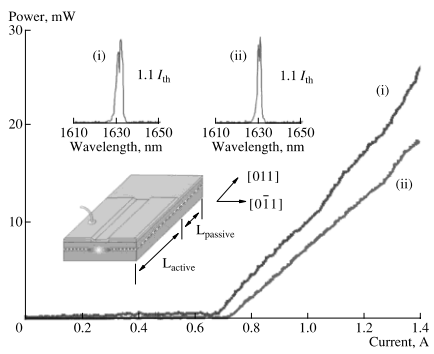
Si基板上EA変調器集積量子ドット波長可変レーザー実現への要素技術の開発：達成

- (1) GaAs基板上QD任意位置任意組成混合技術の開発
- (2) GaAs基板上QDレーザーとQDI導波路の3領域モノリシック集積レーザーの実現
- (3) Si基板上に量子ドットとQDI導波路集積レーザー搭載
- (4) 波長可変レーザー用高品質回折格子の作製条件の確立
- (5) 超広帯域横型電界印加EA変調器実現可能性の実証

1-2 革新的デバイス技術 革新的光源技術

1) 量子ドット組成混合集積レーザ

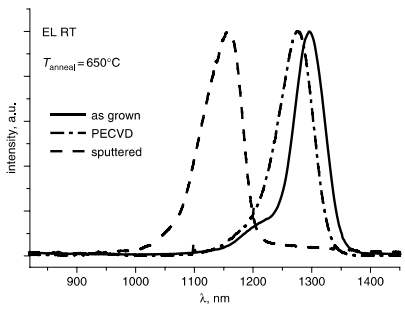
2) 横電界印加型EAM



InAs/InAlGaAs Q-dash InP(100)
 N^+ , $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$, 1MeV, 700°C, 120s
 $\Delta\lambda \sim 128 \text{nm}$
 $L_a/L_p = 1/0.2 \text{mm}$, $w = 30 \mu\text{m}$
 $J_{th} \sim 2.3 \text{kA/cm}^2$, $\lambda = 1630 \text{nm}$ (pulse)
 Y.Wang, et al., Lehigh U., 2008

InAs/InAlGaAs QD InP(311)B
 B^+ , $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$, 120keV, 620°C, 60s
 $\Delta\lambda \sim 190 \text{nm}$
 $L_a/L_p = 1/1 \text{mm}$, $w = 3.6 \mu\text{m}$, double-MMRs
 $J_{th} \sim 17 \text{kA/cm}^2$, $\lambda = 1550 \text{nm}$ (pulse)
 S.Matsui, et al., Waseda U., 2016

InGaAsP/InP MQW on Si WG
 wafer bonding on SOI + 2回再成長
 50 GHz, 112 Gbps PAM4
 T.Hiraki, et al., NTT, 2021



InAs/GaAs QD GaAs(100)
 PECVD, 650°C, 60s
 $\Delta\lambda \sim 135 \text{nm}$
 $L_a/L_p = 3/0.15 \text{mm}$, $w = 100 \mu\text{m}$
 $J_{th} \sim 2.9 \text{kA/cm}^2$, $\lambda = 1280 \text{nm}$ (pulse)
 N. Yu, et al., Ioffe Institute., 2006

- 1) QDI集積レーザ
 - QDIによる波長シフト量としてGaAs系ではほぼ最大値である約130nmが得られた。
 - QDI集積レーザとして最低のしきい値電流密度である約1.3kA/cm²が得られた。
- 2) 横型EAM
 - イオン注入による簡易作成横型EAMが可能

1-2 革新的デバイス技術

1. 革新的光源技術 (東京大学・荒川Gr)
2. 革新的光源技術 (早稲田大学)
3. 革新的光検出器・光変調器技術 (東京大学・竹中Gr)
4. 革新的光変調器技術 (横浜国立大学)
5. 革新的光配線技術 (京都大学)
6. 革新的光エレクトロニクス技術 (東京工業大学)

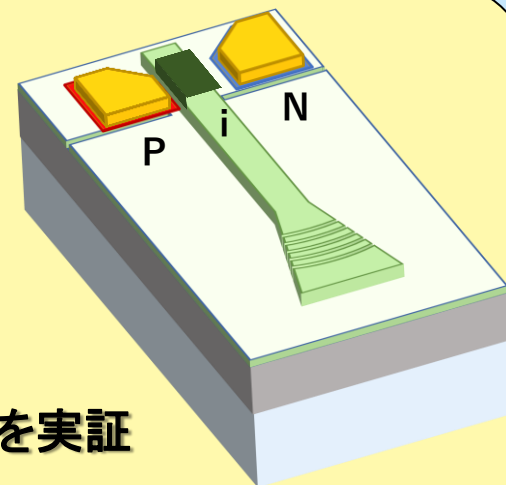
革新的光検出器技術
革新的光変調器技術

1) 高感度導波路型受光器の開発

GeやⅢ-V族半導体等をSi基板の上に貼り合わせた構造等を用いた高感度受光器に関する技術開発をすすめ、高速応答可能で省電力化が可能な導波路型受光器の実現を目指した研究開発を推進する。

最終目標:

高速応答可能で省電力化が可能な導波路型受光器を実証

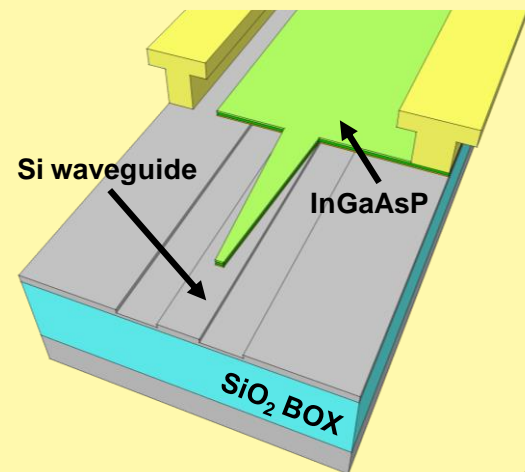


2) MOS型光変調器の開発

Si基板上に異種半導体を、絶縁膜を介して貼り合わせたハイブリッドMOS構造を用いた光変調器の高効率化・低損失化・省電力化・高速化を目指した研究開発を進める。

最終目標:

ハイブリッド MOS 型変調器等に対し、多重化・多値変調等の伝送方式を実現する可能性を実証



(2) 開発計画

公開

革新的光検出器技術
革新的光変調器技術

2018

2019

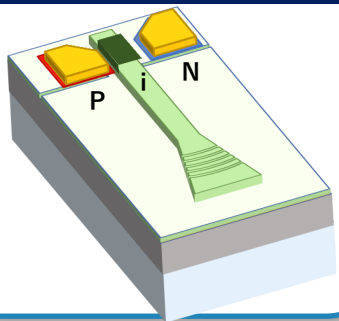
2020

2021上期

2021下期

開発項目

高感度導波路型受光器



能動・受動素子集積プロセス開発

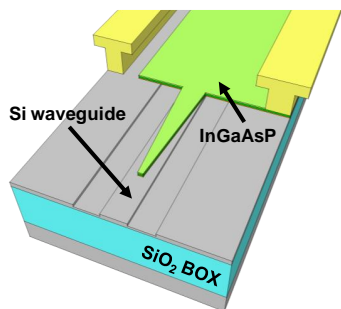
導波路受光器動作実証

高速動作実証

導波路型受光器
基本動作実証

動特性評価

MOS型光変調器



低寄生容量素子作製プロセス開発

低寄生容量変調器実証

高速変調実証

素子
作製・評価

変調帯域検証

多値変調
動作検証

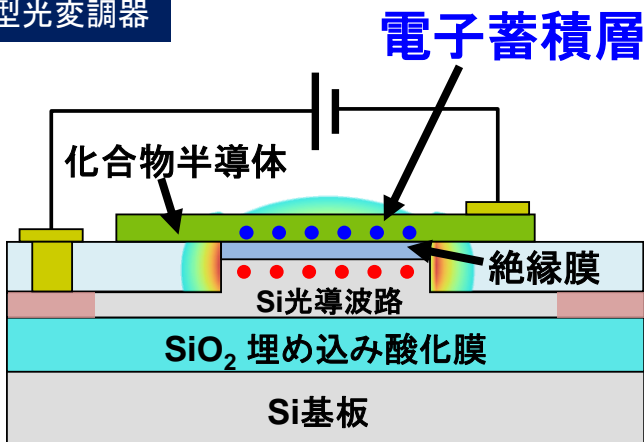
(3) アプローチ、特徴技術

革新的光検出器技術
革新的光変調器技術

高感度導波路型受光器



MOS型光変調器



- III-V薄膜をSi導波路上に貼り合わせたMOS構造
- 化合物半導体／絶縁膜界面に電子、絶縁膜／Si界面に正孔を蓄積

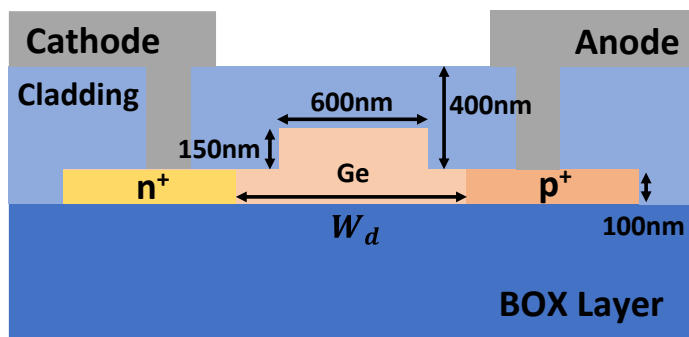
化合物半導体の大きな電子誘起屈折率変化による光位相変調

高効率・低損失光変調器

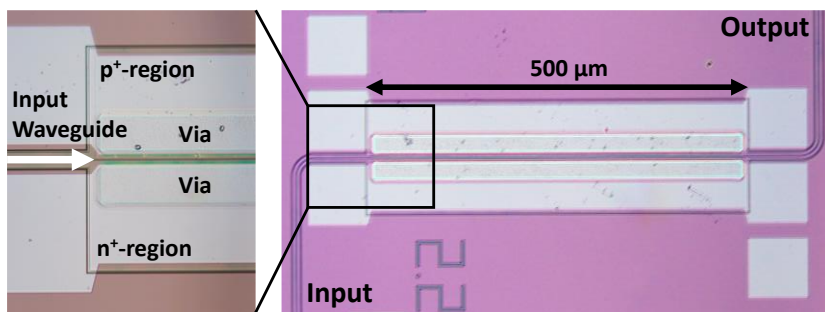
Nat. Photonics, 11, 486, 2017.

革新的光検出器技術
革新的光変調器技術

GeOI基板上での導波路型受光器の実現と雪崩増幅動作

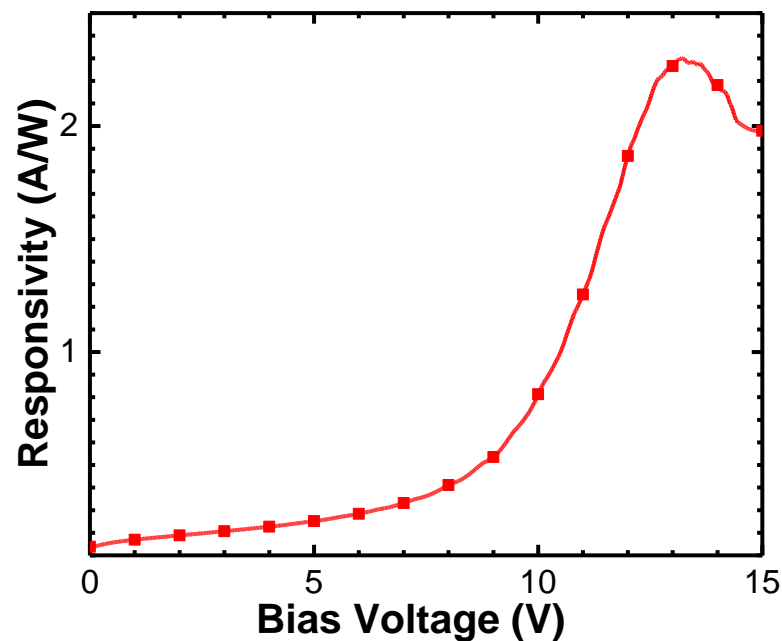


GeOI基板上導波路型受光器の断面図



GeOI基板上導波路型受光器の上面写真

- GeOI基板上に作製したGe導波路中での欠陥準位型受光器を初めて実証
- 動作波長帯域を2 μm帯まで広げることに成功
- 雪崩増幅動作も確認



Z. Zhao et al., J. of Lightwave Tech., **38**, 4808 (2020)
ECOC2019, OFC2020

光電子集積サーバ搭載用の受光器としての有用性を実証

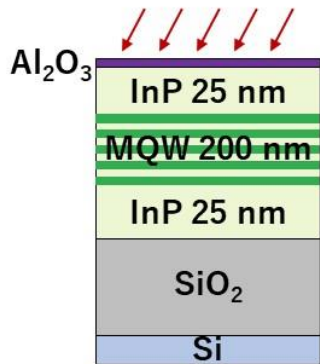
(4) 成果 II (III-V-OI基板を用いた受光器)

公開

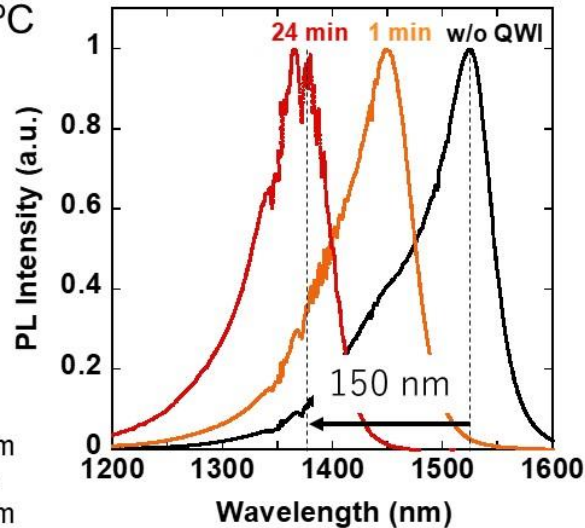
革新的光検出器技術
革新的光変調器技術

III-V-OI基板上で量子井戸ミキシングを用いた導波路型受光器の実現

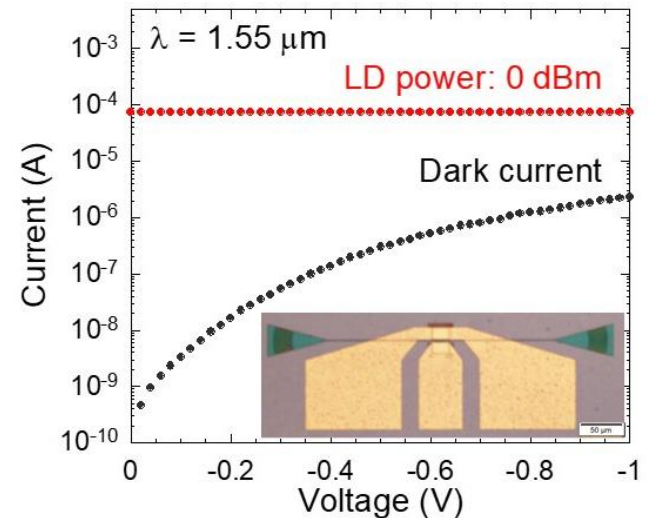
P₂ 10 keV, 5 × 10¹⁴ cm⁻² at 200°C



MQW { SCH: In_{0.41}Ga_{0.59}As_{0.21}P_{0.79} 39nm
7 × Well: In_{0.86}Ga_{0.14}As_{0.38}P_{0.62} 6nm
8 × Barrier: In_{0.48}Ga_{0.52}As_{0.25}P_{0.75} 10nm



量子井戸ミキシングを用いたマルチバンドギャップ集積



CLEO2020
VLSI symposium 2021

- III-V-OI基板上で量子井戸ミキシングを用いたマルチバンドギャップ集積を実現
- 導波路型受光器の動作実証に成功

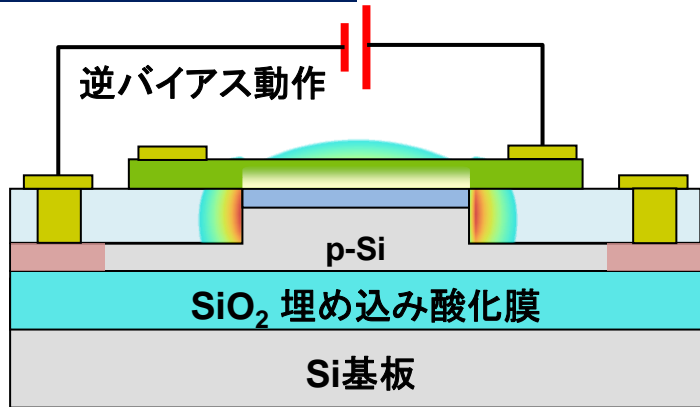
光電子集積サーバ搭載用の受光器としての有用性を実証

(4) 成果Ⅲ (MOS型光変調器)

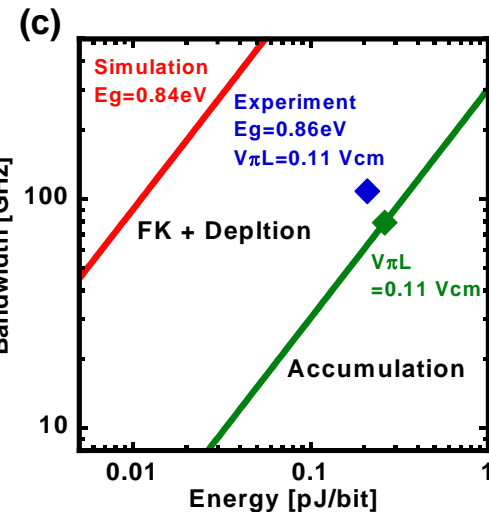
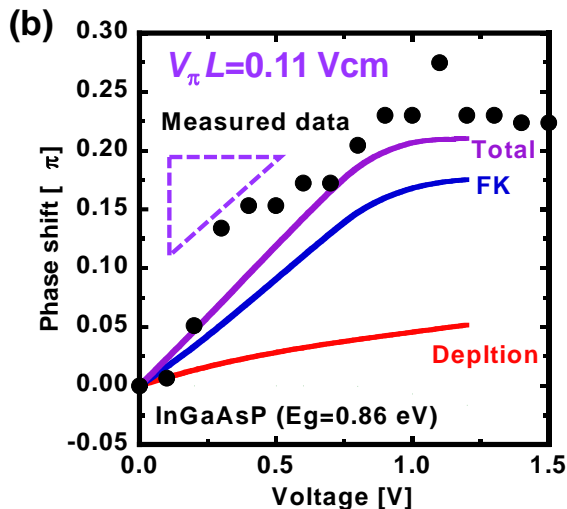
革新的光検出器技術
革新的光変調器技術

MOS構造を用いた様々な光変調を実証

FK効果を用いた光変調

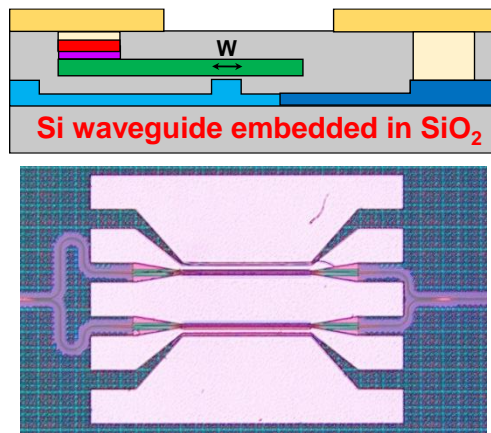
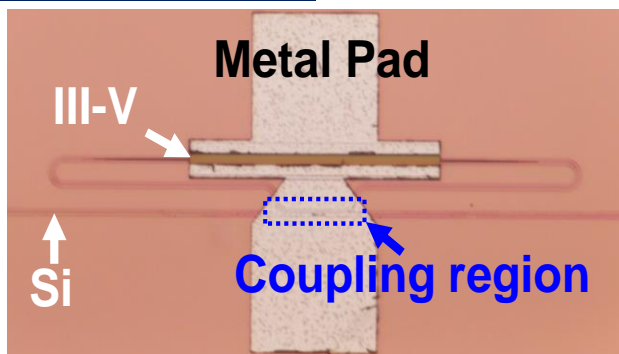


Q. Li et al. Photon. Tech. Lett., **32**, 345 (2020) OFC2019

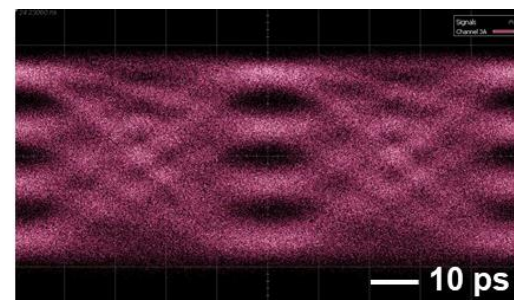


リング共振器との集積化

ECOC2019



低寄生容量構造による高速変調



OFC2020

光電子集積サーバ搭載用の光変調器としての有用性を実証

(5) 目標の達成度

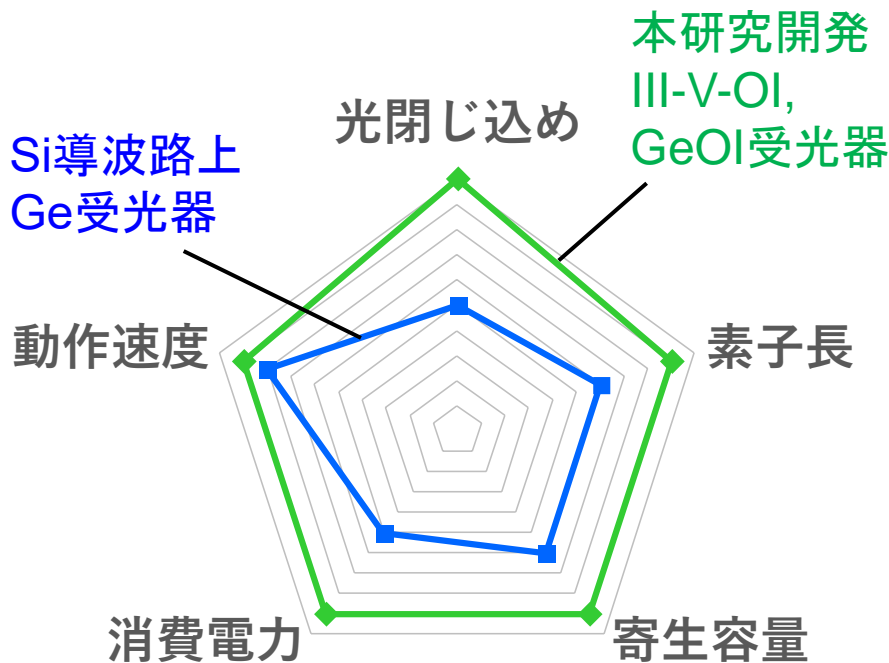
革新的光検出器技術
革新的光変調器技術

最終目標の達成度:

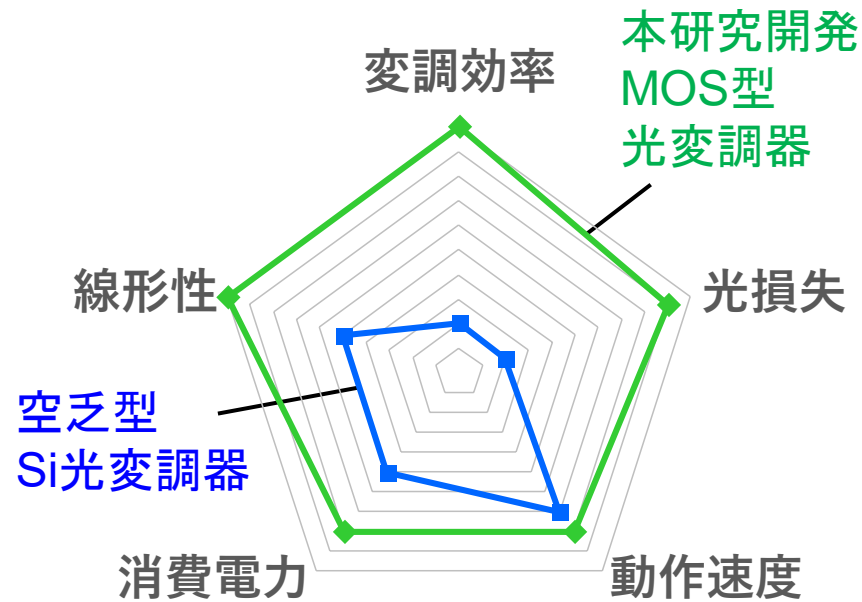
- (1) 高速応答可能で省電力化が可能な導波路型受光器を実証
 - ・III-V-OIやGeOI基板を用いた導波路型受光器の集積化を実現
 - ・高性能化に寄与する基本素子構造を実証
- (2) ハイブリッド MOS 型変調器等に対し、多重化・多値変調等の伝送方式を実現する可能性を実証
 - ・平坦化シリコン導波路への貼り合わせにより変調器作製に成功
 - ・低寄生容量化を実証し、多値変調動に成功

革新的光検出器技術
革新的光変調器技術

受光器



光変調器



- III-V-OI, GeOI構造により光閉じ込め最大
- 素子短尺化、寄生容量低減に有利
- 寄生容量低減により、省電力化、高速化に有利

- 高効率変調と低光損失を両立可能
- 光変調の線形性も高く、多値変調に有利
- 逆バイアス動作により、変調効率と変調速度をバランスよく両立することが可能

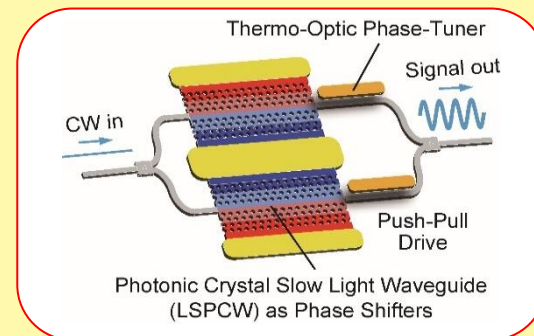
1-2 革新的デバイス技術

1. 革新的光源技術 (東京大学・荒川Gr)
2. 革新的光源技術 (早稲田大学)
3. 革新的光検出器・光変調器技術 (東京大学・竹中Gr)
4. 革新的光変調器技術 (横浜国立大学)
5. 革新的光配線技術 (京都大学)
6. 革新的光エレクトロニクス技術 (東京工業大学)

1-2 革新的デバイス技術
革新的変調器技術

1) フォトニック結晶スローライト変調器

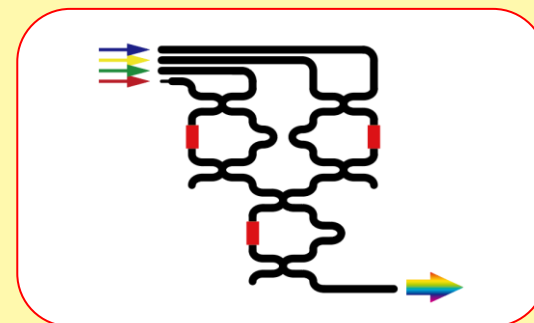
スローライト効果により光電子集積インターポージャー用の光変調器を大幅に小型化し、40 Gbps以上のOOK動作を実現する。



中間目標：遮断周波数20 GHz以上，25 Gbps以上の動作
最終目標：遮断周波数25 GHz以上，30 Gbps以上の動作，
40 Gbps以上の可能性調査

2) 多重化による高速変調動作

スローライト変調器にPAM-4や波長多重を適用し、100 Gbps以上の変調を調査する。



最終目標：32 Gbaud以上の動作

(2) 研究計画

公開

1-2 革新的デバイス技術
革新的変調器技術

2018

2019

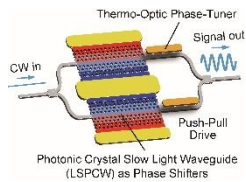
2020

2021上期

2021下期

開発項目

スローライト光変調器高速化



位相整合変調器の調査

- ・メアンダライン電極
- ・遮断周波数30GHz以上
- ・動作速度40Gbps以上

高速動作実証

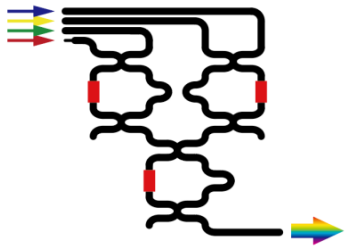
さらなる高速化

- ・遮断周波数38GHz
- ・動作速度64Gbps

使いやすさ向上のための最適化

- ・Cバンド全域を利用可能な構造
- ・損失0.1dBの接続構造

多重化による高速化



多重化による高速化の実証

PAM-4による高速化

- ・最大100Gbps

波長多重(WDM)による高速化

- ・4波長合波器の開発
- ・最大200Gbps

1-2 革新的デバイス技術
革新的変調器技術

- ・従来, スローライトと電気信号の位相不整合が著しかったため, 20 GHz 以上での周波数応答の低下が顕著であった. 本研究はこれを解消するメアンダライン電極と分割電極を検討し, 前者で大きな改善を得た.
- ・スローライト変調器もメアンダライン電極も汎用COS互換プロセスで製作が可能, かつドライバ電源の追加など付加設備が不要である. 電極のフットプリントは大きい, 電極パッドを考えたら, 大きな問題ではない.
- ・従来の典型的な遮断周波数 < 20 GHz を理論的には 50 GHz 以上に引き上げ, OOK 変調でも, 多重化においても, 50 Gbaud 以上のシンボルレートが可能になった.

(4) 成果

公開

1-2 革新的デバイス技術
革新的変調器技術

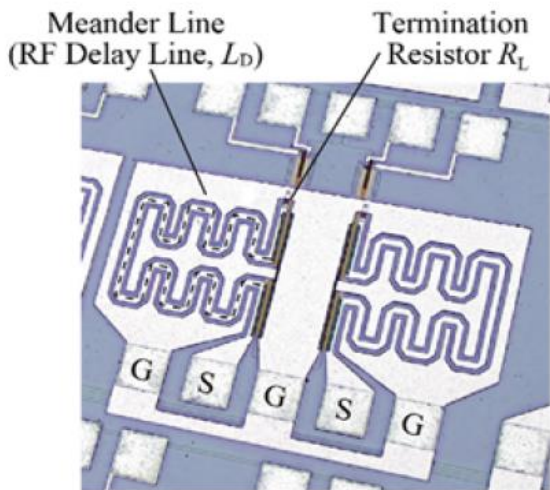
超小型フォトニック結晶スローライト変調器
における 50 Gbps以上の動作の実証

スローライト変調器の多値化, 波長多重化
などによる大容量化の可能性実証

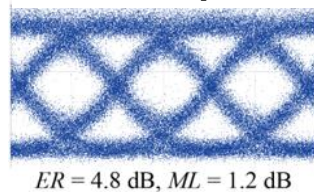
スローライトに電気信号を位相整合させるメアンダライン電極(高周波の遅延線)により周波数特性を大幅に改善, 長さ200μmのMZ変調器で, 遮断周波数38GHz, 駆動電圧3.5~5.5 V_{pp}で最高変調速度64Gbpsを実現

PAM-4変調では32Gbaud × 2 = 64Gbpsで明瞭なアイ開口. 50Gbaud × 2 = 100Gbpsでもかろうじて開口を確認. 波長多重では多段MZ波長合分波器との組合せで50Gbaud × 4波長 = 200Gbpsを実現

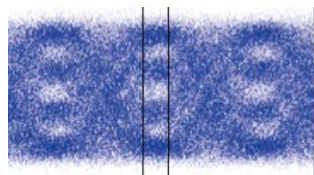
メアンダライン電極 デバイス



高速OOK変調 64 Gbps

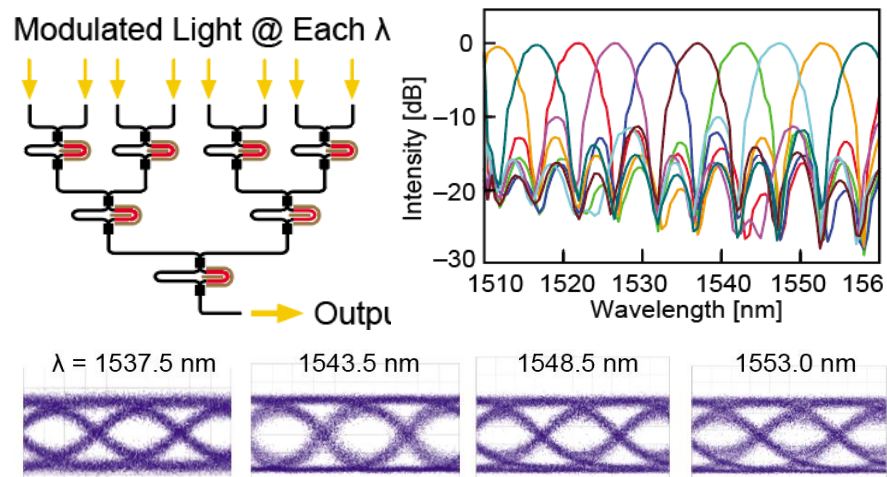


PAM-4変調 50 Gbaud (100 Gbps)



波長多重変調

50 Gbaud × 4波長 (200 Gbps)



光電子集積インターポーザ用の変調器としての有用性を実証

1-2 革新的デバイス技術
革新的変調器技術

最終目標の達成度:

(1) スローライト効果により光電子集積インターポーザー用の光変調器を大幅に小型化し, 40 Gbps以上のOOK動作を実現する.

高速化のために位相不整合の解消が重要なことを明らかにし, 200 μ mという超小型で64 Gbps OOK変調を達成した.

(2) スローライト変調器にPAM-4や波長多重を適用し, 100 Gbps以上の変調を調査する.

PAM-4では50 Gbaud \times 2 = 100 Gbps, 波長多重では50 Gbaud \times 4 波長 = 200 Gbpsのアイ開口を観測した.

最終目標の達成可能性:

(1) 40 Gbps以上のOOK動作

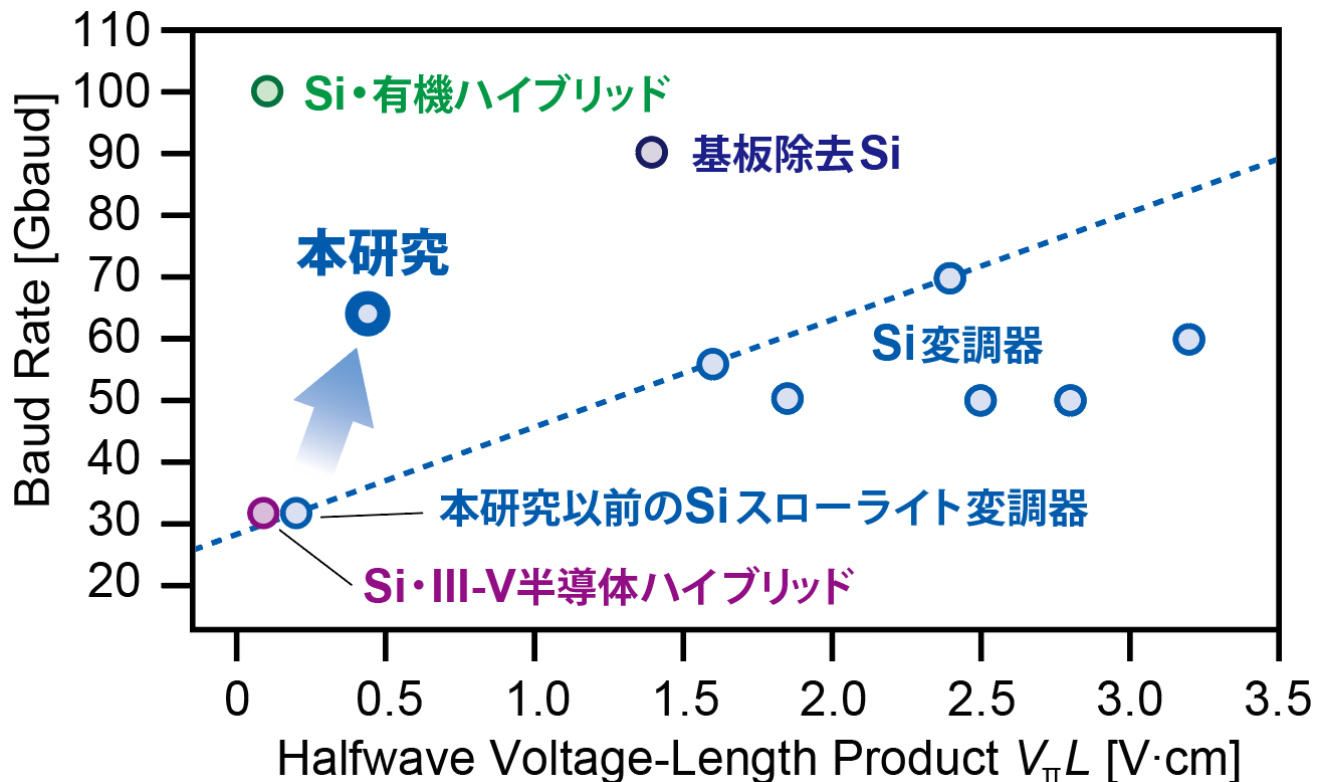
当初の最終目標を上回る性能を達成した.

(2) PAM-4, 波長多重で100Gbps以上

当初の最終目標を上回る性能を達成した.

1-2 革新的デバイス技術
革新的変調器技術

従来のSi変調器や関連する変調器と本研究の性能比較



一般にスローライトは変調効率を高め、変調器の短縮や低電圧化を実現する。従来はその状態で32 Gbps以下が限界であったが、本研究は大幅な高速化を実現した。材料としてSiのみを使った変調器としては最高性能である。

1-2 革新的デバイス技術

1. 革新的光源技術 (東京大学・荒川Gr)
2. 革新的光源技術 (早稲田大学)
3. 革新的光検出器・光変調器技術 (東京大学・竹中Gr)
4. 革新的光変調器技術 (横浜国立大学)
5. 革新的光配線技術 (京都大学)
6. 革新的光エレクトロニクス技術 (東京工業大学)

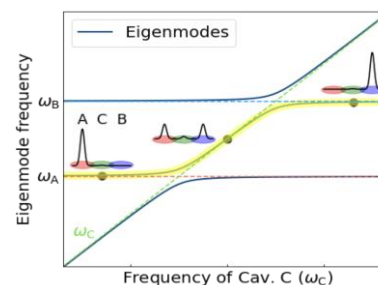
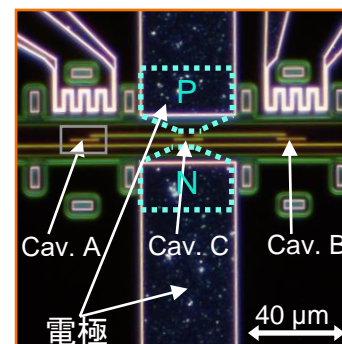
1-2 革新的デバイス技術
革新的光配線技術

1) 光電子集積フォトニックナノ構造による革新的導波路技術の開発

光電子集積インターポーザへの展開に向け、フォトニックナノ構造の大域的構造最適化手法、損失補償手法、光バッファ機能等の革新的導波路技術の可能性を示す。またこれらの統合についての検討をすすめる。

中間目標: フォトニックナノ構造等を用いた光損失補償機能や光バッファ機能など、革新的導波路技術の可能性を示す。

最終目標: フォトニックナノ構造等による光損失補償・低減機能や光バッファ機能を統合することなどにより高度な光配線技術を開発し、光電子融合サーバ技術の革新的展開へ寄与する。



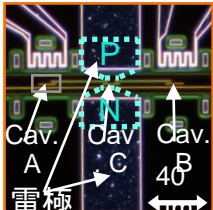
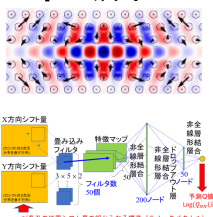
(2) 開発計画

公開

1-2 革新的デバイス技術
革新的光配線技術

中間評価

最終評価

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度上期	2021年度下期
<p>光バッファ</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 結合制御手法の検討 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 正弦波変調 ➢ 結合位相制御 ● 動的結合制御の検証 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 電気的制御機構の導入 ➢ 結合制御の実験検証 	<ul style="list-style-type: none"> ● 電気的制御による共振器間光転送の実証 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 共振器波長の高速制御 ➢ 光バッファの基礎実証 	<ul style="list-style-type: none"> ● 高度な光バッファ機能への発展 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 断熱過程と非断熱過程を併用した一方向光転送スキームの検討 ➢ 高い共振器間結合強度と低い放射損失を両立可能な構造設計 ➢ 電気的制御機構を導入しつつ光損失を低減する作製技術の開発 ➢ 光損失を増大させずに波長制御速度を向上させる手法の検討 		
<p>光損失低減</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 機械学習を活用した構造最適化 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 機械学習モデルを用いた勾配法 ➢ 大域的構造再手法の検討 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 最適化構造の実験的検証 ➢ 繰り返し探索法の検討 ➢ 複数性能の同時最適化 	<ul style="list-style-type: none"> ● 損失補償の検討 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 共振器中の2モードの同時低損失化手法の検討 ➢ 損失補償ゲイン向上の実証 			

(3) アプローチ、特徴技術

1-2 革新的デバイス技術 革新的光配線技術

【Q値1100万を超える超低損失フォトニック結晶共振器】

他に追従を許さない世界最高の実験Q値を示す超低損失フォトニック結晶共振器を作製する技術を持つ。この技術をコアに光バッファ実現を目指す。

この技術を基盤として、光学的に低損失な光電子集積回路を作製できる技術へと展開する。

【制御用共振器を介した共振器間結合制御手法】

導波路を介して離れた共振器同士を強く結合させる独自の技術を持ち、これにより光保持用の超低損失共振器と制御用共振器を空間的に分離して、制御に伴う損失の増加を抑制しつつ高度な光制御を行うアプローチをとる。

また制御用共振器を周波数変調することで、周波数の異なる光保持共振器同士を動的に接続するアプローチを展開する。

【機械学習に基づく高自由度構造の最適化技術】

機械学習を用いることで、光ナノ構造の高い構造自由度を十分に活用した設計を行える独自の高度な設計技術を開発する。

これを用いて光バッファに必要とされる複数の性能を同時に最適化し、これをもう一つの軸として光バッファ実現を目指す。

(4) 成果 I (光損失低減・補償)

公開

1-2 革新的デバイス技術
革新的光配線技術

機械学習設計による高Q値共振器の作製歩留まりの向上
設計した構造を多数作製し実験Q値を測定して統計的に評価(30個)

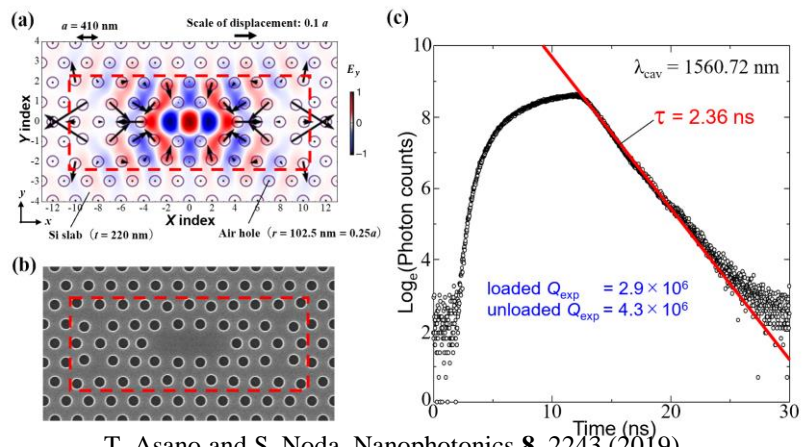
$Q_{\text{実験}} (\times 10^6)$	手動設計 $Q_{\text{設計}} = 2.8 \times 10^7$	機械学習設計 $Q_{\text{設計}} = 1.8 \times 10^8$
>10.0	4%	14%
>9.0	12%	28%
>8.0	28%	45%
>7.0	40%	62%
>6.0	84%	83%
>5.0	96%	97%
>4.0	100%	100%

設計Q値は導波路
込みの構造のもの

M. Nakadai,
T. Asano, S.
Noda et al.,
APEX 13,
012002 (2020).

機械学習を活用した高度な設計の最初の実証結果

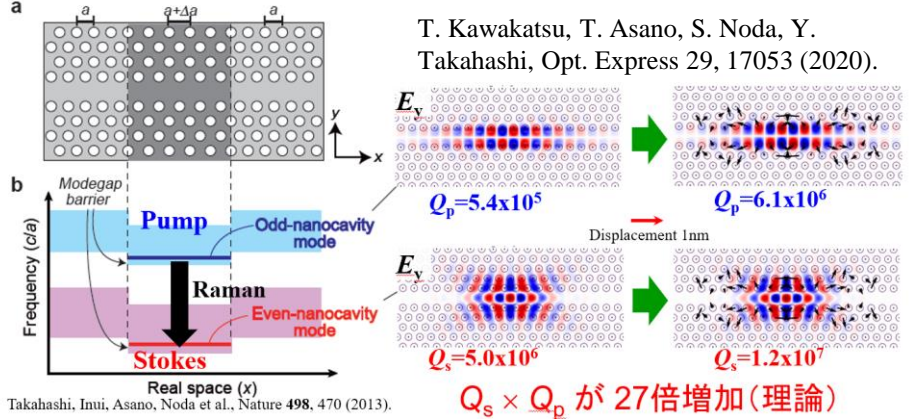
機械学習設計によるQ値400万のL3共振器の実現



T. Asano and S. Noda, Nanophotonics 8, 2243 (2019).
T. Shibata, T. Asano, S. Noda, APL Photonics 6, 036113 (2021).

より広いパラメータ空間を探索できる手法の提案・実証

機械学習設計による損失補償用のラマンゲインの増大の実証



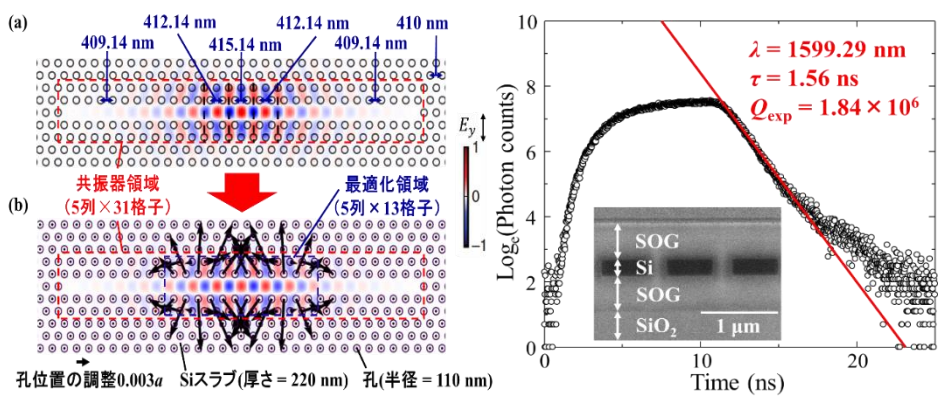
T. Kawakatsu, T. Asano, S. Noda, Y. Takahashi, Opt. Express 29, 17053 (2020).

Takahashi, Intui, Asano, Noda et al., Nature 498, 470 (2013).

Conventional Structure					New Structure 2				
No.	Q_p	Q_s	Δf	I_{th} [nW]	No.	Q_p	Q_s	Δf	I_{th} [nW]
1	386,000	1,700,000	15.601	700	1	1,260,000	2,700,000	15.604	23
2	615,000	2,420,000	15.600	460	2	539,000	2,000,000	15.600	378
3	334,000	1,360,000	15.600	1230	3	655,000	2,420,000	15.595	670
4	484,000	2,200,000	15.600	1000	4	1,000,000	2,200,000	15.600	1000
5	484,000	2,200,000	15.600	1000	5	1,200,000	2,200,000	15.600	1000

実験的にもラマンレーザの閾値の大幅低減に成功
損失補償に用いるラマンゲインの大幅増大

機械学習設計によるQ値~200万のSiO₂埋込み型共振器の実現



T. Shibata, T. Asano, S. Noda. JSAP Spring Conf 2021

光電子集積フォトニック結晶回路の高度化に必要な埋込み型構造の低損失化

(4) 成果Ⅱ (電気制御可能な高Q値共振器結合系)

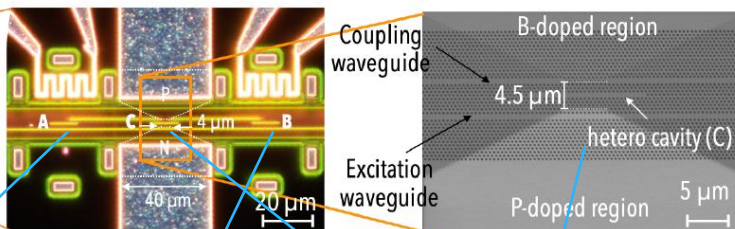
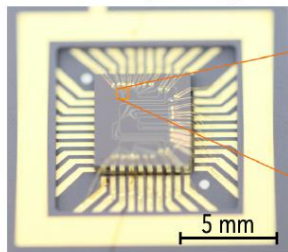
公開

マイクロヒーターによる静的波長制御とpin構造による高速波長制御が可能な高Q値3共振器結合系の実現

(a) Microscopic image

(b) Microscopic image (dark field)

(c) SEM image



高周波基板に実装した
フォトニック結晶チップ

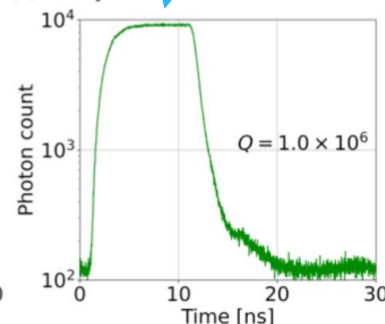
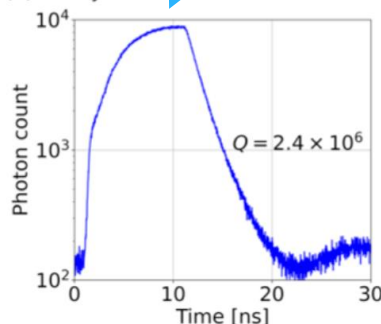
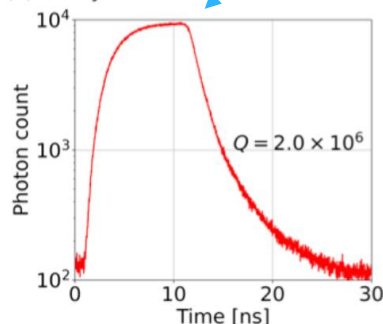
3共振器結合系部分の
拡大図

pin構造中に配置された
高速制御用共振器Cの拡大図

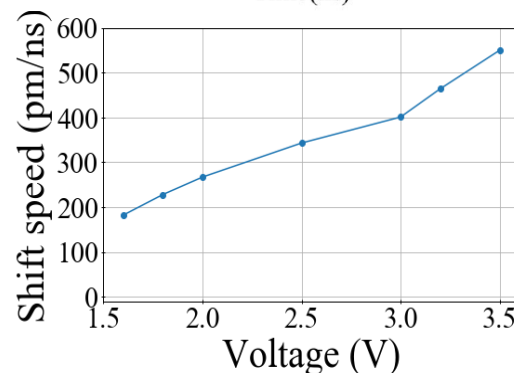
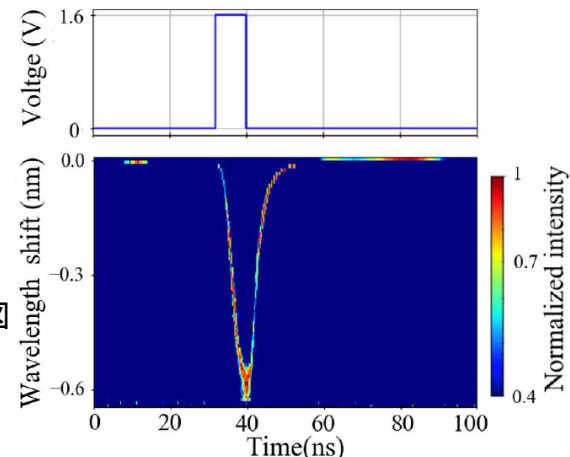
(a) Cavity A

(b) Cavity B

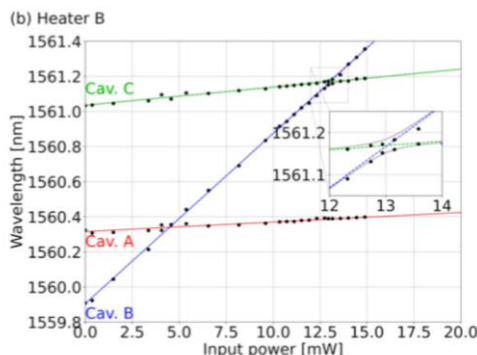
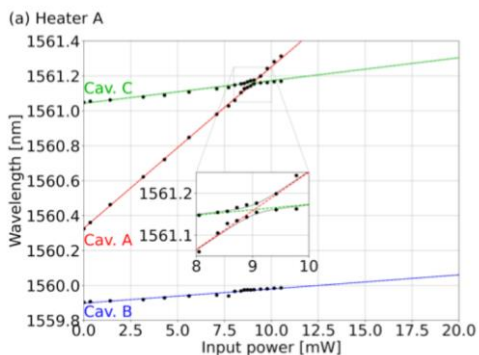
(c) Cavity C



光保持用共振器A、BのQ値は200万以上、高速制御用のCのQ値も100万以上を実現



pin構造を用いたキャリア注入による共振器Cの波長の高速制御結果
600pm/ns程度の変化速度を実現



マイクロヒーターによる共振器A、Bの静的な波長制御結果

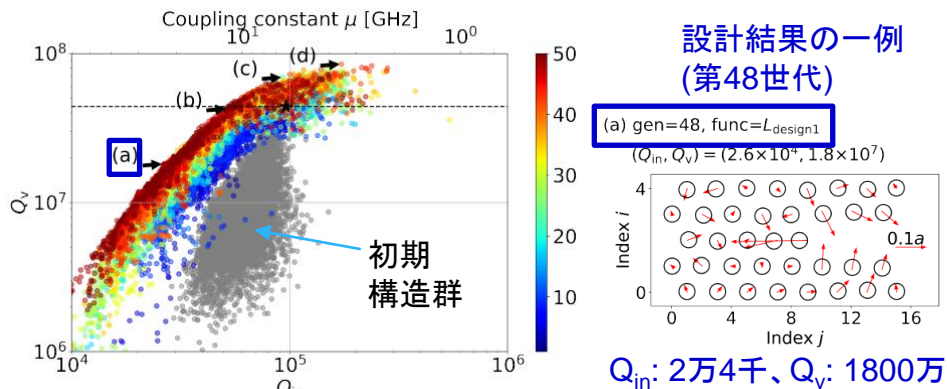
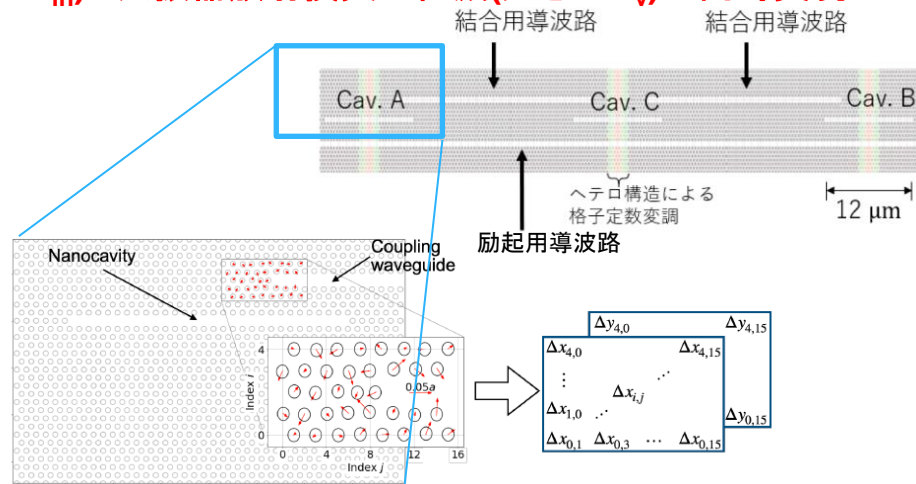
A-Cの結合およびB-Cの結合を確認

共振器光子寿命内に共振器を電氣的に動的制御できる光電子集積回路の実現

(4) 成果Ⅲ (電気制御光転送)

公開

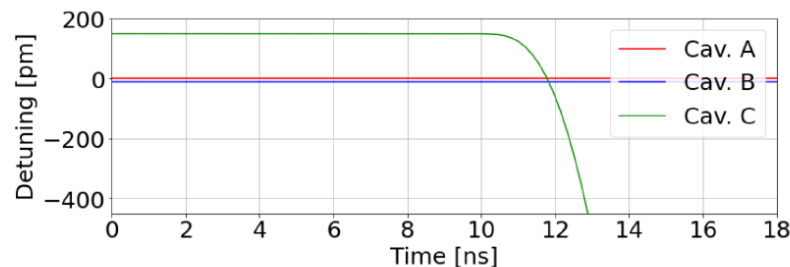
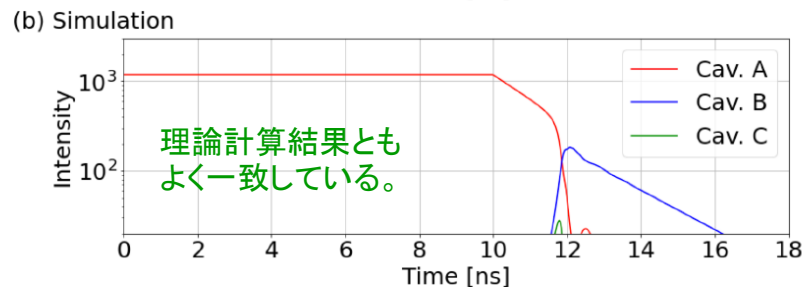
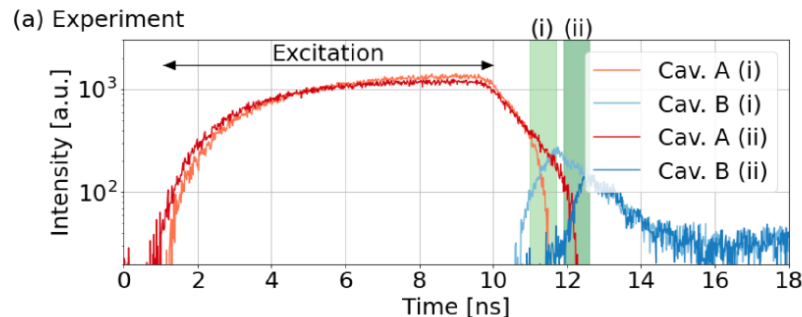
機械学習設計による導波路-共振器間結合の増大(小さい Q_{in})と共振器放射損失の低減(大きい Q_v)の同時実現



光バッファの実現には、強い共振器-導波路-共振器結合と、低い共振器放射損失の両方が必要とされるが、機械学習を活用することで同時最適化設計が初めて可能になった。

電気パルス制御による共振器間光転送の実現

電気パルス印加タイミング(i)および(ii)でそれぞれ共振器Aのエネルギーが減少して、Bのエネルギーが増大している。



転送前後のエネルギー実験値を比較すると、効率は最大で80%程度。

M. Nakadai, T. Asano, S. Noda, Nature Photonics 16, 113 (2022).

3共振器を用いる画期的な光転送原理を、機械学習による高度な設計と高度なナノ構造作製技術の総合化によって具現化し、電気パルス制御による共振器間光転送を実現して光パルスバッファリング技術の基礎実証に成功した。

(5) 目標の達成度

公開

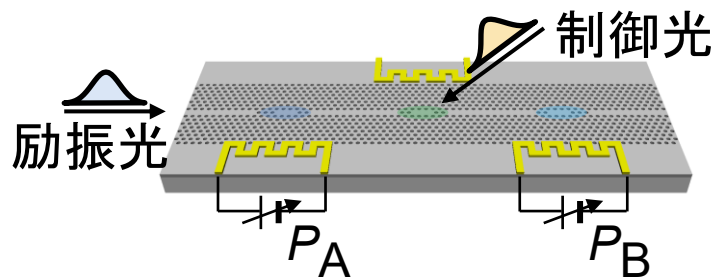
テーマ	最終目標	主な成果状況	達成度
2. 1. 2. (ii) 革新的デバイス技術 力) 革新的光配線技術	光電子集積インターポーザへの展開に向け、フォトニックナノ構造の大域的構造最適化手法や損失補償手法や光バッファ機能等の革新的導波路技術の可能性を示す。またこれらの統合についての検討を進める。	<ul style="list-style-type: none"> ・機械学習を活用した構造最適化技術により共振器中の2つのモードの損失を同時に低減し、損失補償に利用するラマンゲインを同一ポンプパワー条件で10倍以上増大させることに成功した。 ・機械学習を活用した構造最適化技術により、光バッファ機能の実現に不可欠なフォトニックナノ構造共振器の低損失化と、共振器間結合の増大の同時最適化を達成した。 ・3共振器結合系試料を用いて任意タイミングでの電気制御光転送を実証し、光電子集積チップによる動的光バッファリング技術の基礎実証に成功した。 ・静的および動的な電氣的制御機構を導入しつつ、Q値400万程度の共振器結合系を作製可能なプロセスを開発した。 ・以上により、システムの小型化とスケールアップが可能な電気制御光転送技術を実証し、光バッファメモリ実現の可能性を示すことができた。 	○

達成度：◎大幅達成、○達成(年度内達成見込みも含む)、△達成遅れ、×未達

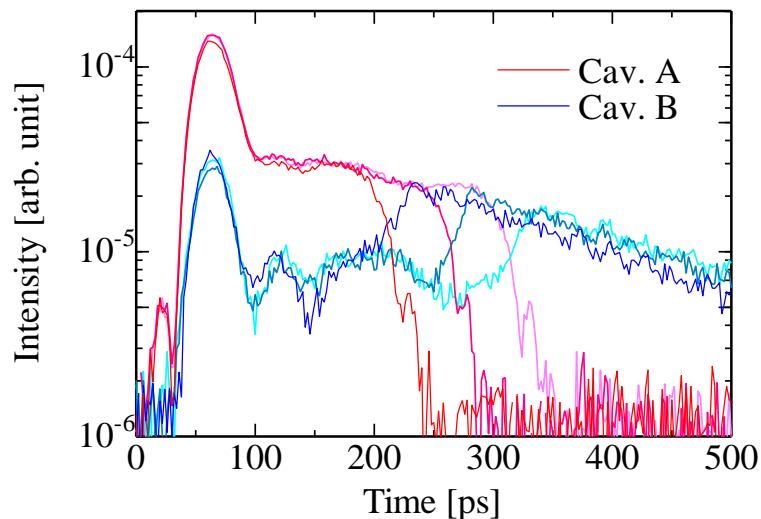
(6) ベンチマーク(光転送手法の比較)

公開

従来の制御光パルスによる共振器間光転送



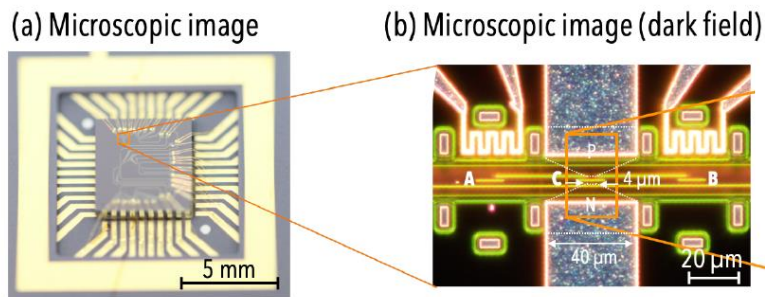
制御光生成に大型の超短パルスレーザーが必要。
 光路長制御によるタイミング合わせも複雑かつ不安定。
 制御系も含めたシステムの小型化・スケールアップが不可能。
 キャリア生成による一方向の屈折率制御しかできない。



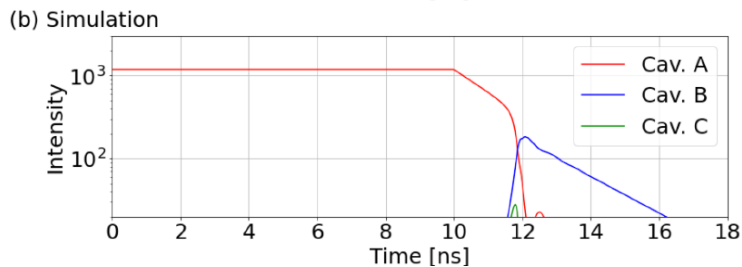
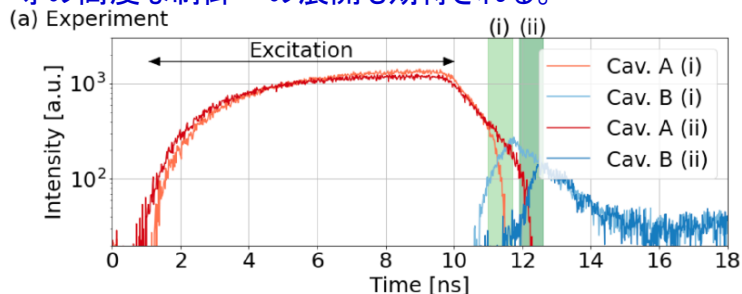
光保持共振器のQ値が数十万と低く、0.2ns程度の時間しか光保持ができなかった。

Science Advances **2**, e1501690 (2016).

今回の電気制御による共振器間光転送



電気パルス制御回路は将来的には集積可能。
 複数共振器へのスケールアップ、複雑なタイミング制御も可能。
 屈折率の増減の両方が可能で、正弦波変調や一方向光転送等の高度な制御への展開も期待される。



Nature Photonics **16**, 113 (2022).

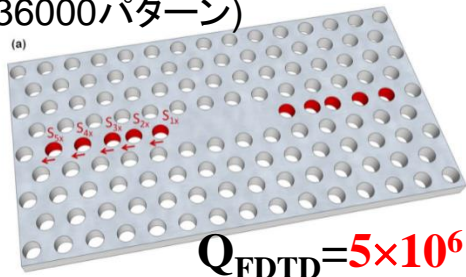
初期試作での光保持時間は1.3ns程度であり、その後の検討で少なくとも3ns以上の光保持が実現できる見通しを得ている。

(6) ベンチマーク(最適化手法の比較)

遺伝的アルゴリズム

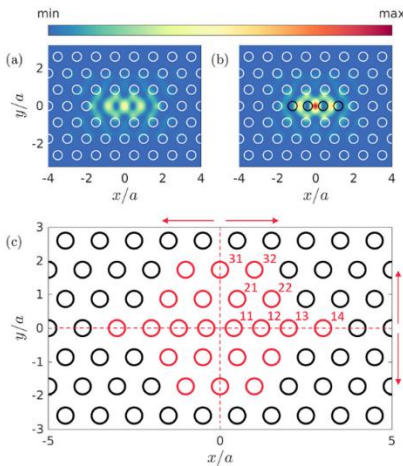
ランダム生成パターンからの突然変異と掛け合わせ
様々な構造に対応可能

3パラメータ: 20~30世代×80個体
7パラメータ: 300世代×120個体
(36000パターン)



$$Q_{\text{FDTD}} = 5 \times 10^6$$

Sci. Rep. 4, 5124 (2015).

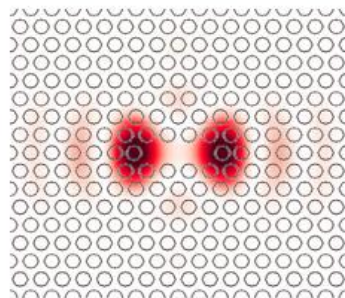


APL. 111, 131104 (2017).

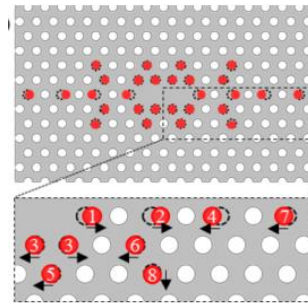
漏れモード可視化

ライトコーン内成分の逆フーリエ変換で漏れ位置を特定

様々な構造に対応可能
どのように構造を修正すれば良いかは非自明



Opt. Exp. 24, 9541 (2016).



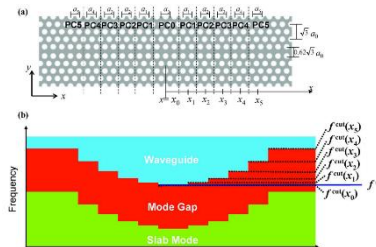
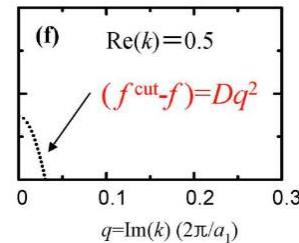
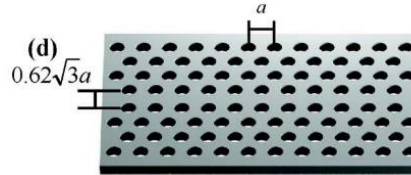
$$Q_{\text{FDTD}} = 5 \times 10^6$$

Opt. Exp. 25, 367 (2017).

導波モード解析

導波モードの分散線の解析接続により、ガウス包絡線となる格子定数分布を計算

他の構造には対応しにくい



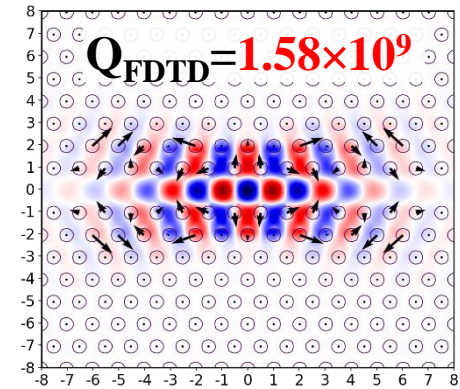
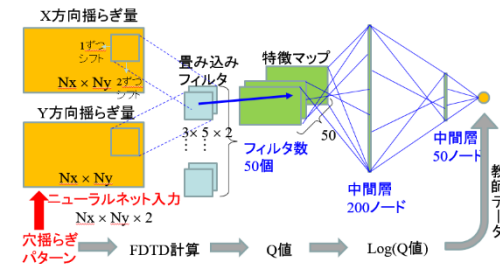
$$Q_{\text{FDTD}} = 7 \times 10^8$$

J. L. T. 26, 1532 (2008).

機械学習

ランダム生成パターンとQ値の関係を学習し、これを元に構造最適化

様々な構造に適応可能
1000パターンの学習で30~40パラメータの最適化が可能



Opt. Exp. 25, 341815 (2018).
Nanophotonics 8, 2243 (2019).

1-2 革新的デバイス技術

1. 革新的光源技術 (東京大学・荒川Gr)
2. 革新的光源技術 (早稲田大学)
3. 革新的光検出器・光変調器技術 (東京大学・竹中Gr)
4. 革新的光変調器技術 (横浜国立大学)
5. 革新的光配線技術 (京都大学)
6. 革新的光エレクトロニクス技術 (東京工業大学)

(1) 開発目標

1-2 革新的デバイス技術 革新的光エレクトロニクス技術

機能可変可能な革新的光回路プラットフォームの開発

光電子集積サーバシステムの機能向上には、搭載する光電子集積インターポーザの機能を用途に応じて可変することが望まれる。従来の光回路では、一度設計を行った場合、用途に応じた機能可変は不可能であり、上述の目的を達成することができない。これを解決するため、回路の再構成を後から行うことができる光素子を組み合わせ、機能を可変できる革新的回路プラットフォームを提案し、そのための基本素子の研究開発と、コンセプトの実証を最終目標に研究開発を推進する。

- 2020年末までの目標
 - 個別光デバイスの製作を開始し、作製特性評価とそのフィードバック結果を受けて再設計およびプロセス再検討を通して、光デバイスの特性向上を図る
- 最終目標
 - 機能可変の基本実証を行う。例としてSOAアレイチップから、ループミラーとの接続による半導体レーザを形成し、SOAと繋いだ波長変換チップへの可変などを想定する。また、不揮発性光スイッチを実現する

(2) 開発計画

1-2 革新的デバイス技術
革新的光エレクトロニクス技術

2018

2019

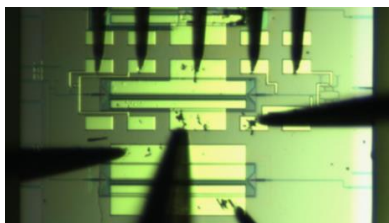
2020

2021上期

2021下期

開発項目

光FPGA



常温活性化接合技術の確立

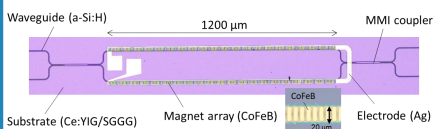
ハイブリッドLDの実証

シリコンフォトニクス機能可変素子の検討

基本集積回路の実証

プロセスシーケンスの検討

不揮発性スイッチ



薄膜磁石の特性向上

リング型不揮発性
スイッチの検討

MZI型不揮発性スイッチの検討

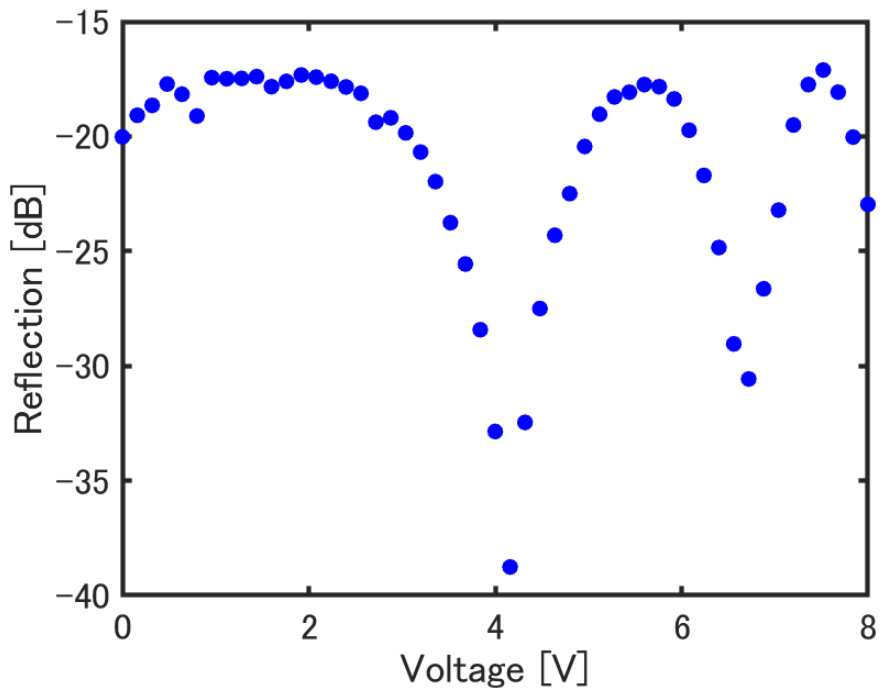
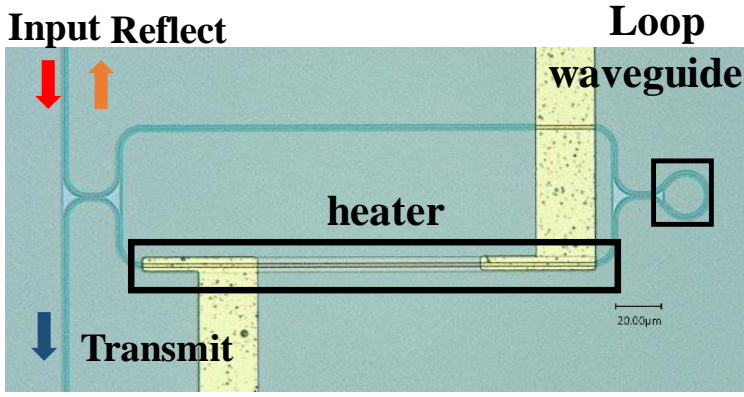
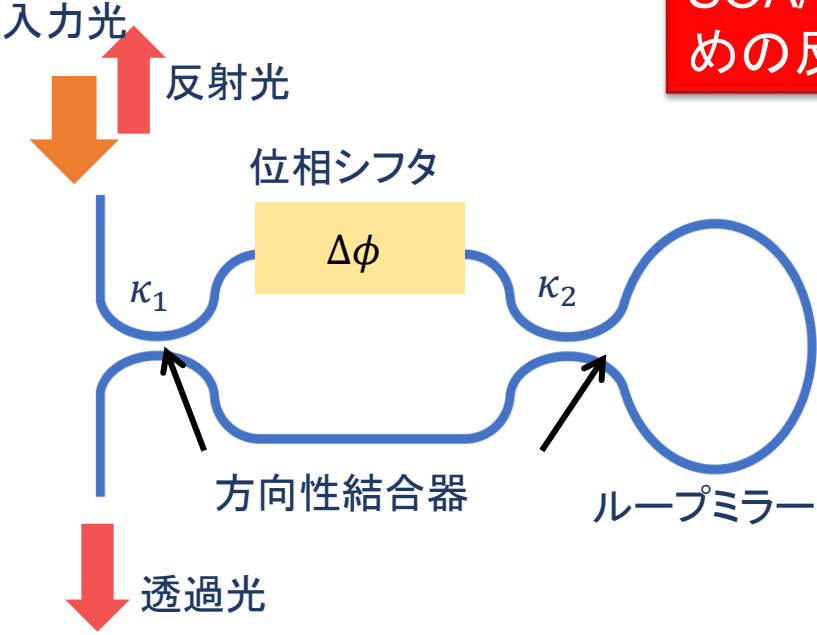
1-2 革新的デバイス技術
革新的光エレクトロニクス技術

- アプローチ
 - ハイブリッドデバイスと不揮発性スイッチを組み合わせ、導波ルートを切り替えることで機能を切り替える
 - ルートを変えることにより、それぞれのデバイスの役割を変えることが可能（増幅器、モニタ、光源など）。その役割の組み合わせを変えれば、達成できる機能も変化する
 - 不揮発性スイッチのため、回路変更後は電力を必要としない
- 特徴技術
 - ハイブリッドデバイスは常温でのウェハレベル直接接合で実現する
 - 不揮発性スイッチは、磁性体を利用することによって実現する

(3) 成果 I (反射率可変ミラー)

1-2 革新的デバイス技術
革新的光エレクトロニクス技術

SOA/LD切り替え、LD出力切り替えのための反射率可変ミラー



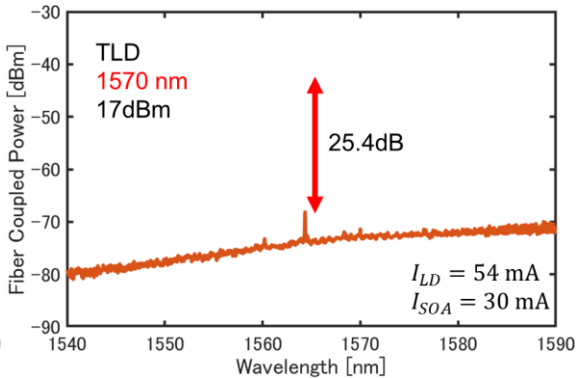
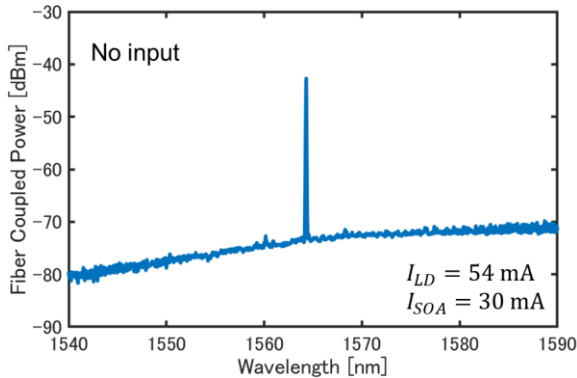
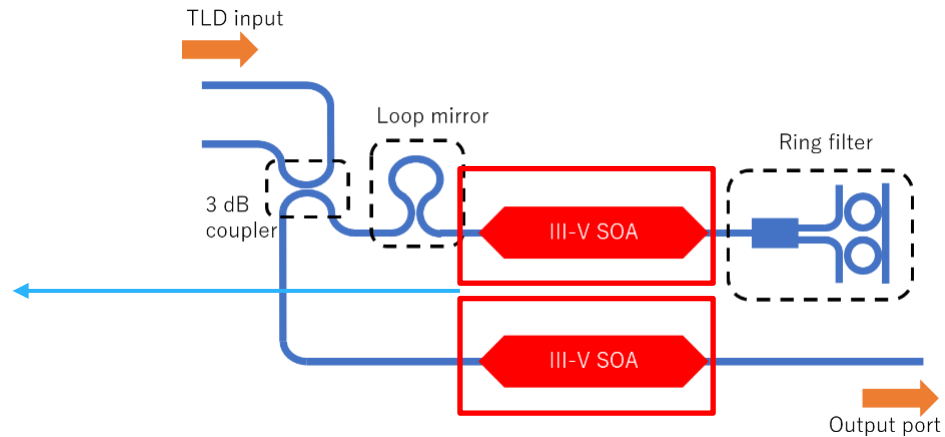
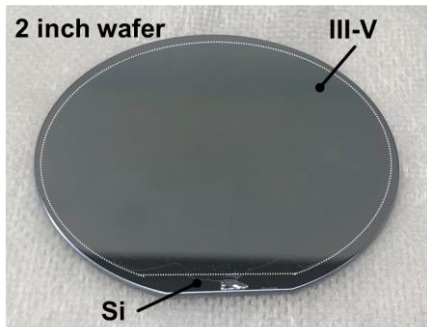
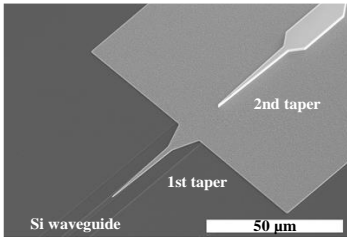
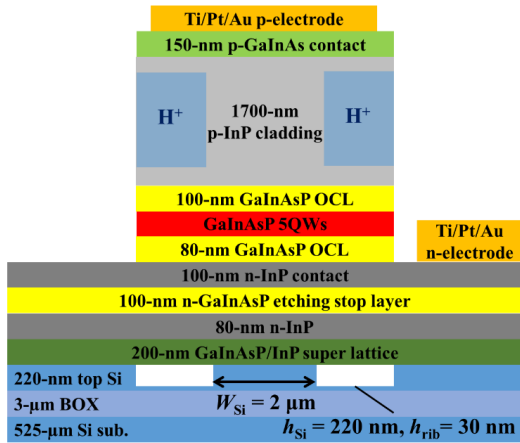
- マイクロヒータにより、ループミラーへ導入する位相を変化し、反射率を可変
- **20dB以上**の反射率可変を実現

(3) 成果Ⅱ (ハイブリッドSOAによる機能集積)

公開

1-2 革新的デバイス技術
革新的光エレクトロニクス技術

複数のSOAアレイの接続により、波長変換機能を実現、経路切り替えで複数の機能を実現できる一例



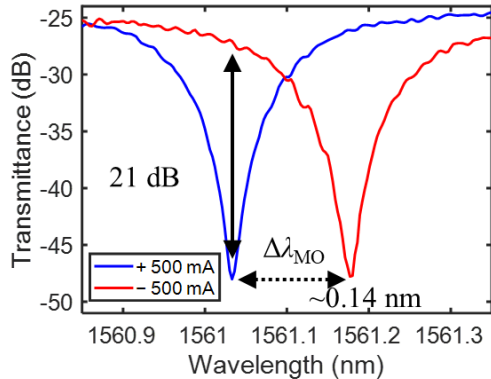
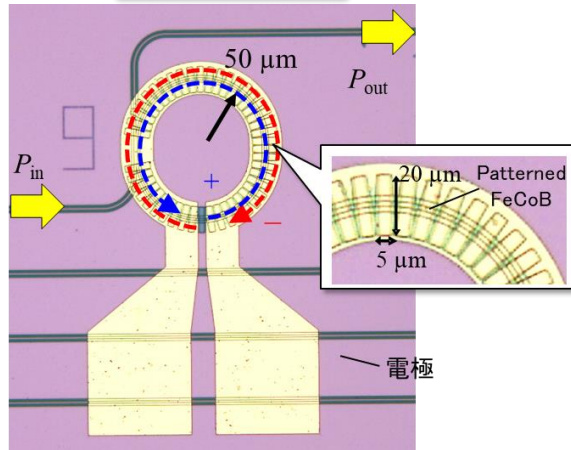
- 2つのSOAの一方にミラーを接続することで、LDとSOAとなる
- 外部入力とLDの光を同時にSOAに入射することで、外部入力の波長でのOn/Offを、LDの波長でのOff/Onに変更可能

(3) 成果Ⅲ (不揮発性スイッチ)

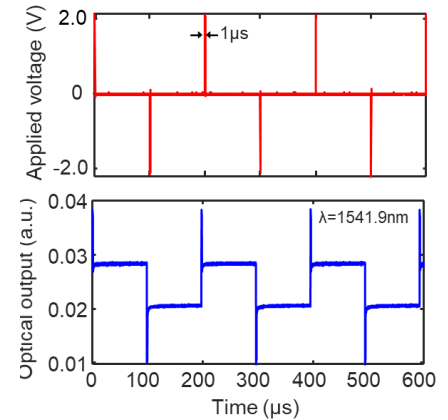
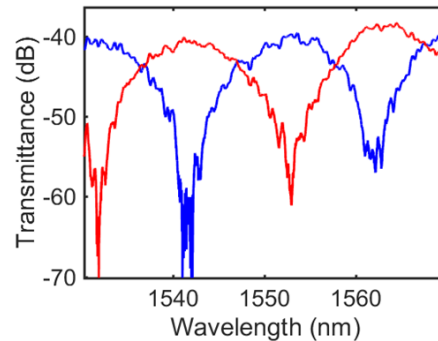
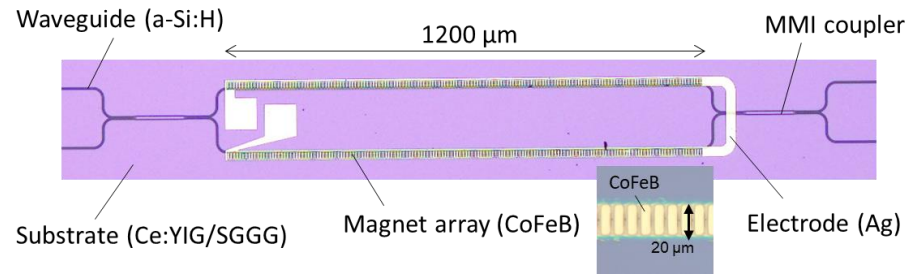
1-2 革新的デバイス技術
革新的光エレクトロニクス技術

不揮発スイッチを実現 (a-Si:H/Ce:YIG)

リング型



MZI型



- 磁性材料の磁化方向を電流で制御することにより光スイッチ動作を実現
- 磁気保持動作により**無電力でその状態を保持**
- リング型, MZI型の両方で実現

(4) 目標の達成度

公開

1-2 革新的デバイス技術
革新的光エレクトロニクス技術

最終目標(2021年度)：

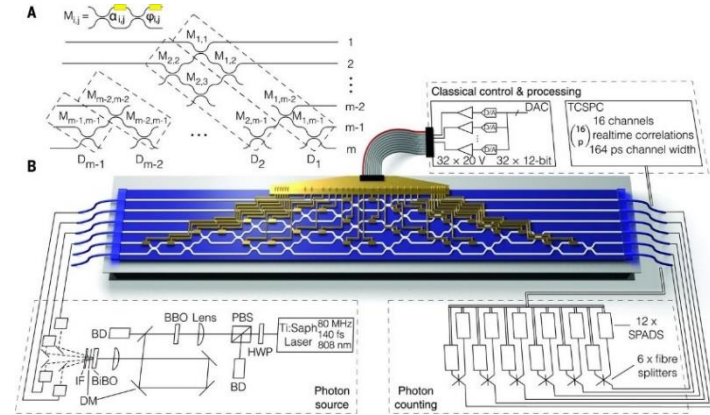
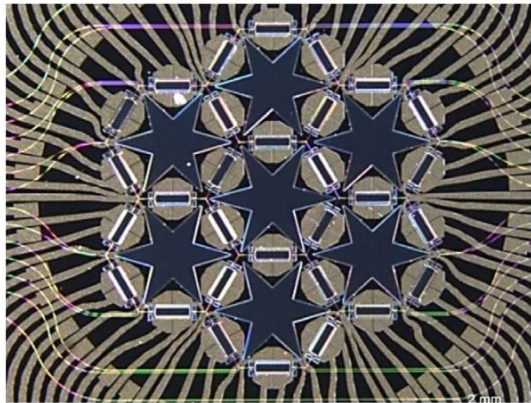
シリコンインターポーザ上で機能可変型光エレクトロニクス回路の基本機能
を実証：達成

(7) ベンチマーク

IV. 実用化、事業化に向けての
見通し及び取り組み

1-2 革新的デバイス技術 革新的光エレクトロニクス技術

光FPGA 他機関の取り組み



P. Daniel, et al., Optics Express Vol. 26, Issue 21, pp. 27265, (2018)

J. Carolan, et al, Science, Vol. 349, Issue 6249, pp. 711, (2015)

他機関においても光FPGAが提案されつつあるが(上記例)

- ・アクティブデバイス
- ・不揮発性スイッチ

まで含んだ提案、取り組みは、**本研究のみ**

これにより、**光源、増幅器、非線形素子まで含みより多くの機能を実現可能、**
および消費電力の低減が可能

以下、「成果普及・人材育成活動」の詳細資料

③「成果普及活動」(東京大学): 目標・計画・成果・達成度 公開

- [目標]** 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構において、
- 大学院生向け講義「ナノ量子情報エレクトロニクス特論」
 - 学生・社会人向けセミナー「フォトンクス・イノベーションセミナー」
 - 国際会議ISPEC(International Symposium on Photonics and Electronics Convergence)を継続開催し、プロジェクト成果の普及のための人材育成並びに成果普及を図る。
- [最終目標]** 上記に加え、最終シンポジウム等により、プロジェクトの成果を広く一般に普及させる。

[計画]

項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	
				上期	下期
学生向け講義	ナノ量子情報エレクトロニクス特論				
学生・社会人向け集中セミナー	フォトンクス・イノベーションセミナー				
シンポジウム	ISPEC	ISPEC	ISPEC	ISPEC	最終報告シンポジウム

- [成果]**
- ナノ量子情報エレクトロニクス特論開講(夏学期)
 - フォトンクス・イノベーションセミナー開催(年3~4回)
 - 国際会議ISPEC開催(毎年11~12月: 参加者例年250~300名)
- } 2020,21年度は
全てオンライン
- 活動実績一覧 (2018年4月以降、講義を除く)

セミナー・国際会議 名称	講演者	参加者数	活動風景写真
フォトンクス・イノベーションセミナー 第12回~第21回 (計 10回) うち 3回 地方開催 (京都 2回、仙台 1回) 3回 オンライン	小芦雅斗 (東京大学)、美濃島薫 (電気通信大学)、 L. C. Kimerling (MIT)、松田信幸 (東北大学)、 五十嵐浩司 (大阪大学) 他	34~166名	
International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC) 第8回~第11回 (計 4回) うち 2回 オンライン	E. Tournié (Université de Montpellier), P. De Dobbelaere (Luxtera), M. Pantouvaki (IMEC), J. Bowers (UCSB) 他	248~318名	

[達成度] ○ [目標達成]