

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)

報告者： 岩本 敏 (東京大学)

革新的デバイス技術開発: その位置付け

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



革新的コア技術:
結晶成長技術、異種材料接合技術、
フォトニックナノ構造

持続的高性能化を可能に

光バッファ
リング

再構成可能
光回路

光配線技術

 共振器A 共振器B
導波路

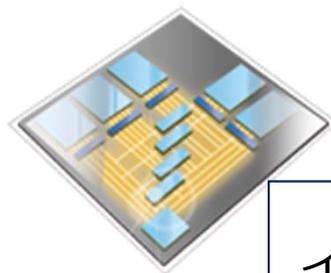
光エレクトロ
ニクス回路

 Electrical Signal → Optical Signal

京大

東工大

光回路技術の先駆的開発



光電子集積
インターポーザ

小型、高速、省エネ

光源技術

 東大、早大

光受光器技術

 東大

光変調器技術

 横国大、東大

高性能要素デバイスの開発

革新的デバイス技術開発: テーマと目標

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

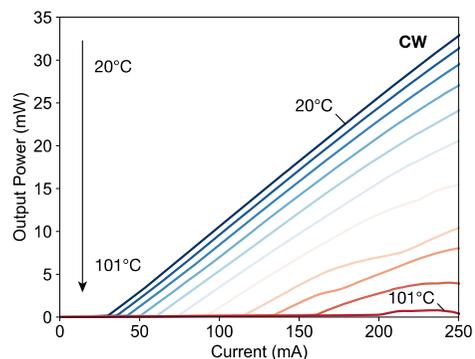
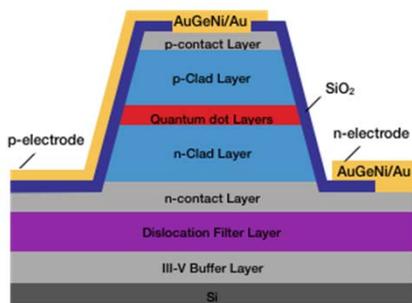
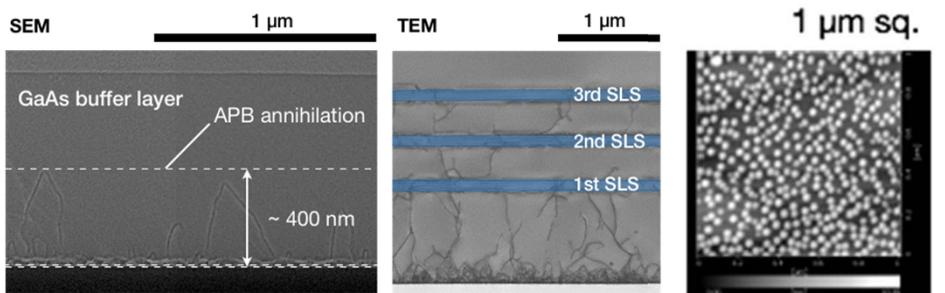
上記目標をすべて達成

各グループにおける研究成果

研究開発成果: 革新的光源技術(東大・荒川Gr)

シリコン基板上直接成長量子ドットレーザの実現

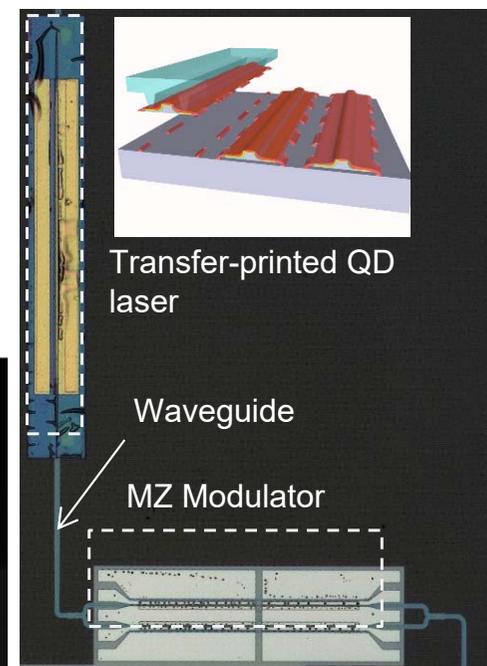
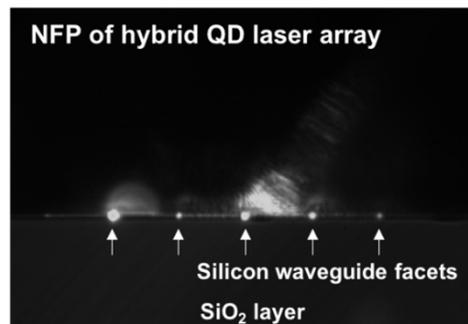
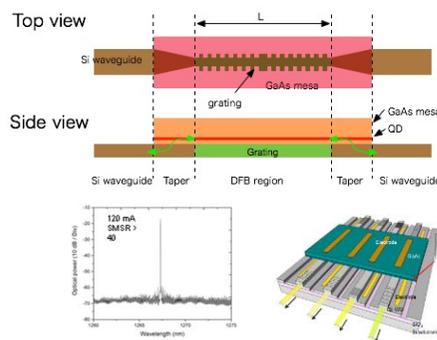
- シリコン(100)基板上に全MBEによる**直接成長量子ドットレーザの実現**に成功
- 100 °C 以上**の高温連続波動作を実現



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



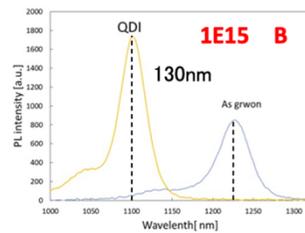
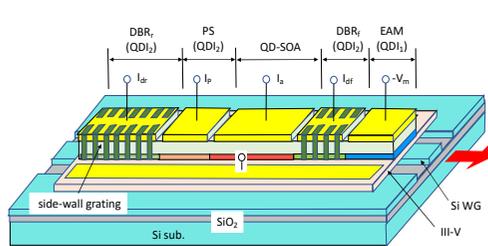
B. Jang et al. Appl. Phys. Express **9** 092102 (2016)
 Y. Arakawa et al. Semiconductors and Semimetals **101** 91 (2019)
 N. Morais et al. (in preparation)

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)

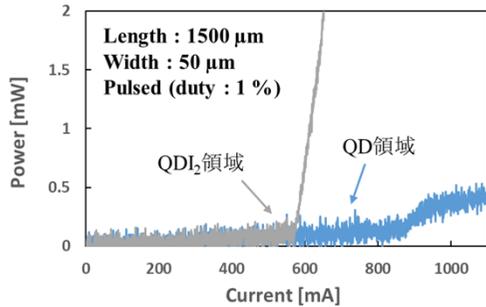
量子ドット組成混合技術による集積レーザの実現

- 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
- モリシック集積波長可変光源の実現が可能

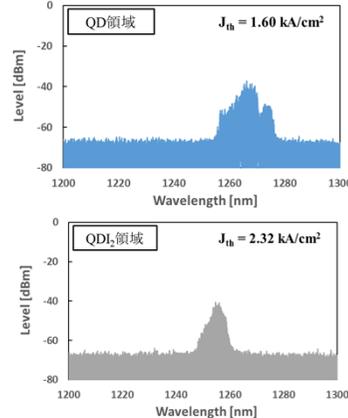


QDI PLスペクトル

Si 基板上EAM集積QD-DBRレーザ

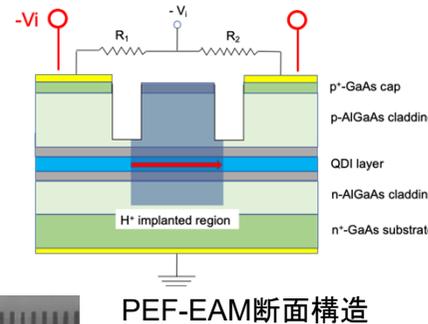


QD-QDI集積リッジレーザの発振特性

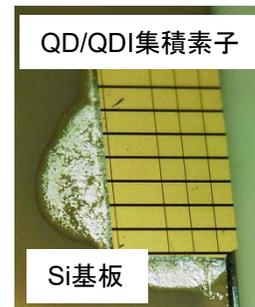
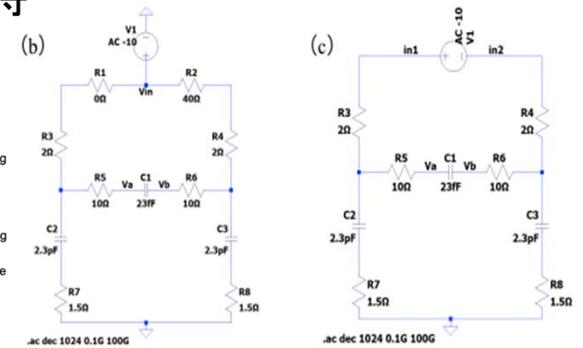


横電界超高速電界吸収型変調器の提案

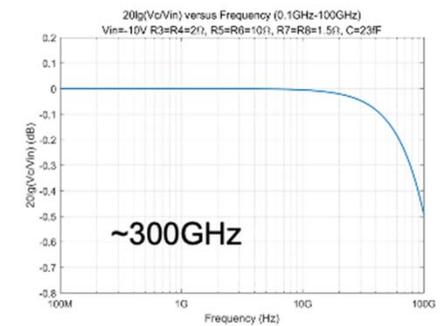
- H⁺イオン注入による簡易な方法による超高速電界吸収型変調器(EAM)の実現が可能
- 平面電界印加(PEF)構造により約300GHzの広帯域動作が期待



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

DBR LD用回折格子

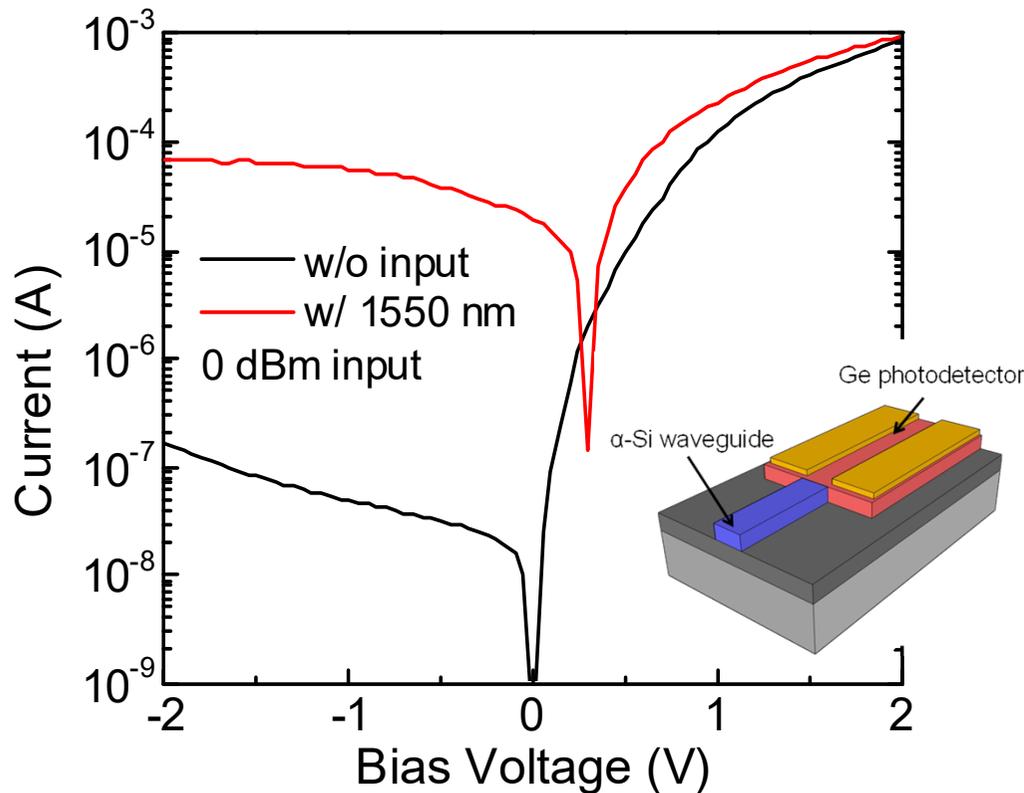
- P. Yu, et al., 70th JSAP Spring Meeting, 2022.

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)

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

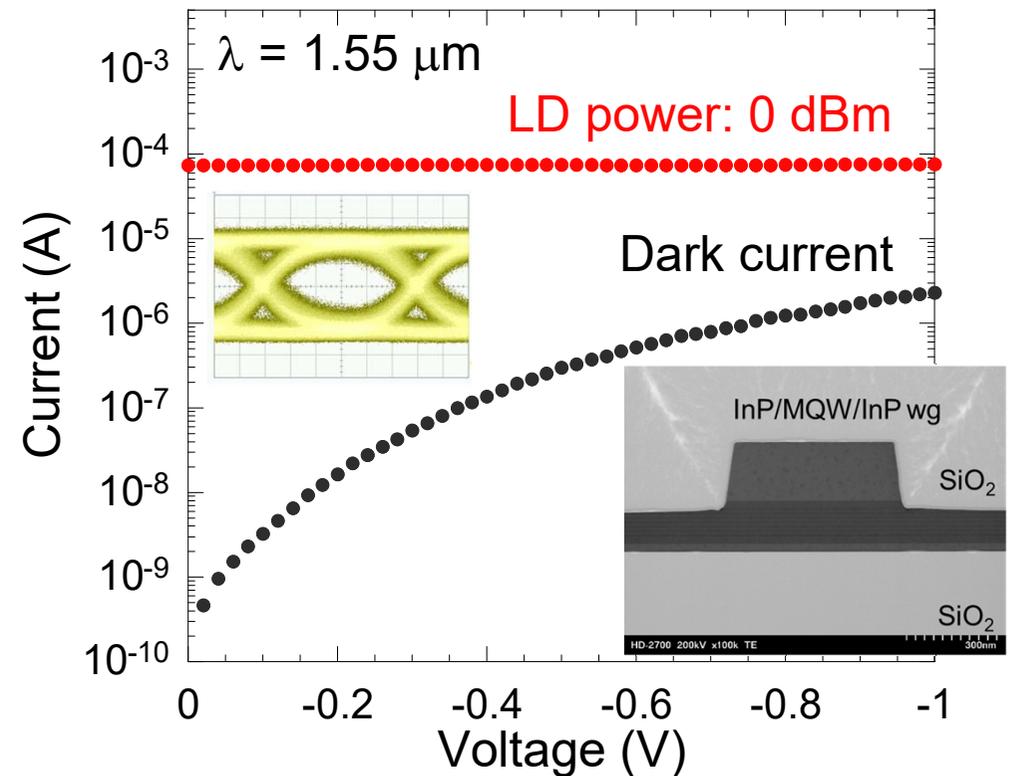
- 基板貼り合わせにより高品位GeOI基板を実現
- Ge酸化膜パッシベーションによる暗電流低減
- アモルファスSi導波路との集積化



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



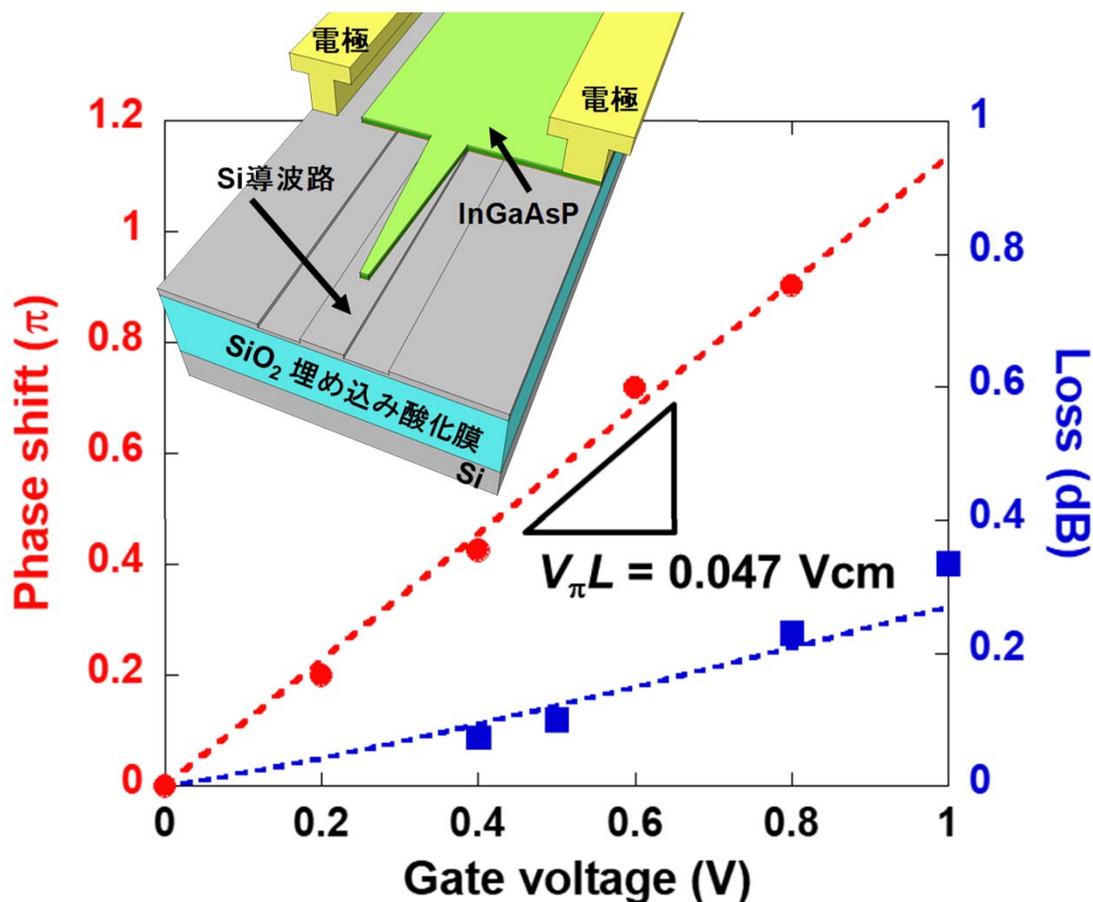
VLSI Symposium, JFS3-6, 13–19 June 2021.

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)

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

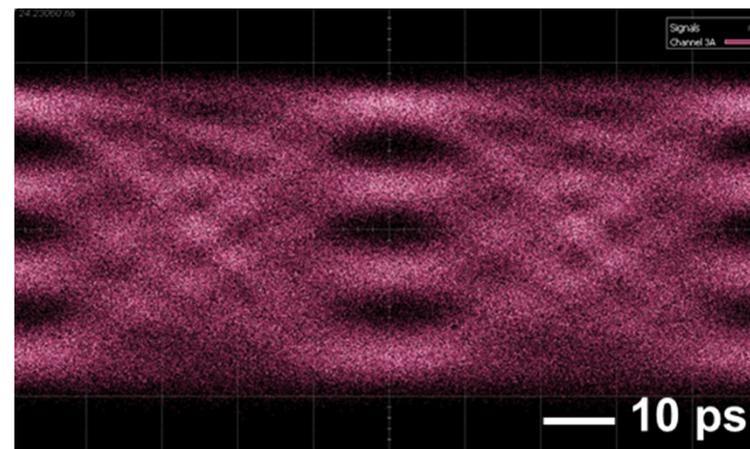
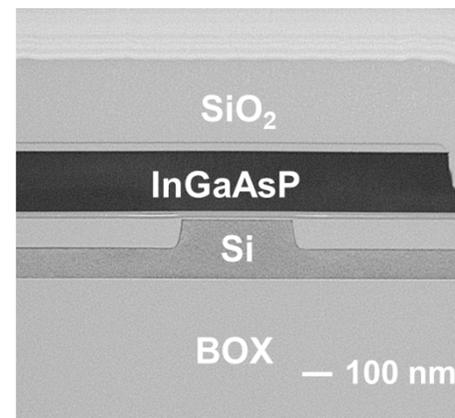
- III-V層への電子蓄積による光変調を世界初実証
- Si変調器の10倍の効率、1/10の光損失を実現



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.

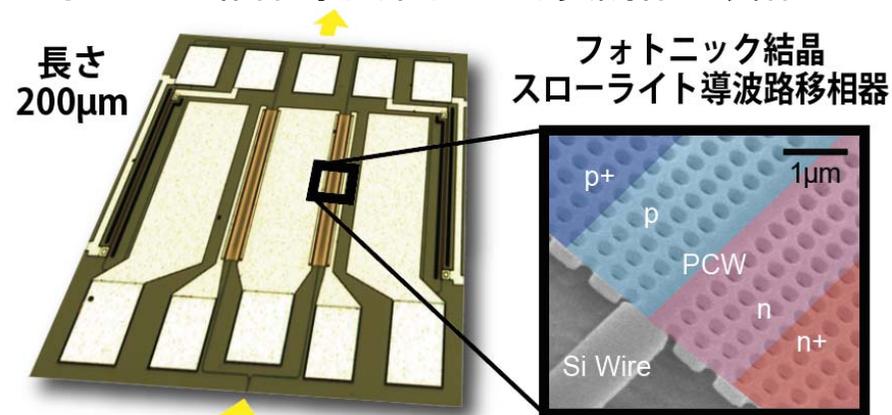
将来の光電子集積サーバ搭載用光変調器技術を確立

研究開発成果:革新的光変調器技術(横国大)

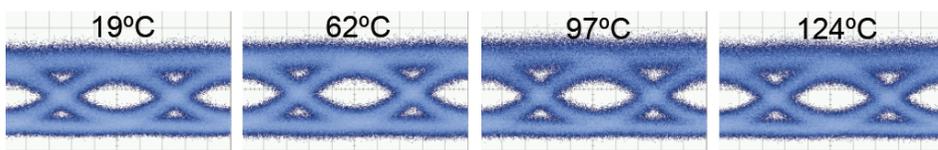
フォトニック結晶のスローライト効果による
超小型マツハツェンダー変調器の実現

- 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

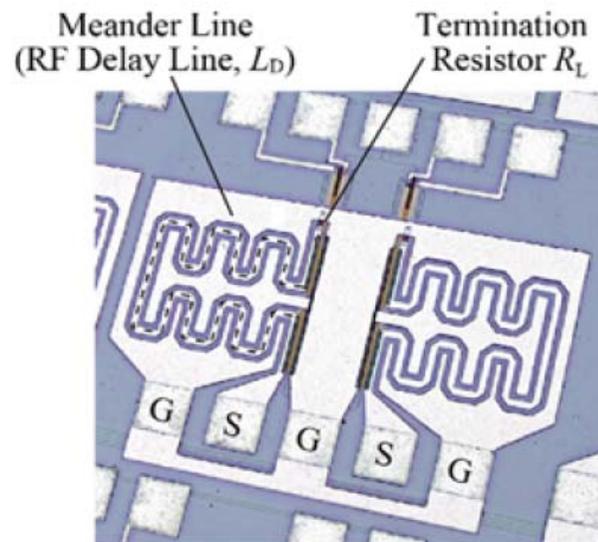


H. C. Nguyen, et al., IEEE JSTQE.19, 3400811 (2013, Invited)
T. Baba, et al., Sci. Technol. Adv. Mat. 15, 024602, (2014, Invited).

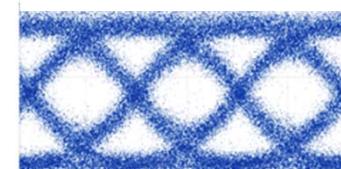
位相整合による世界最高レベルの
高速動作実現

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

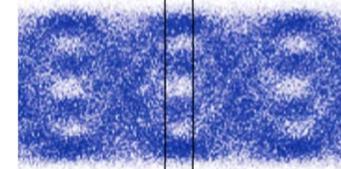
メアンダライン電極で
光-電気位相不整合を解消



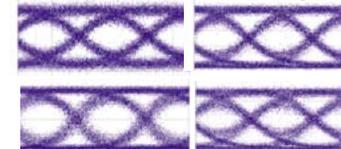
OOK 64 Gbps



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)

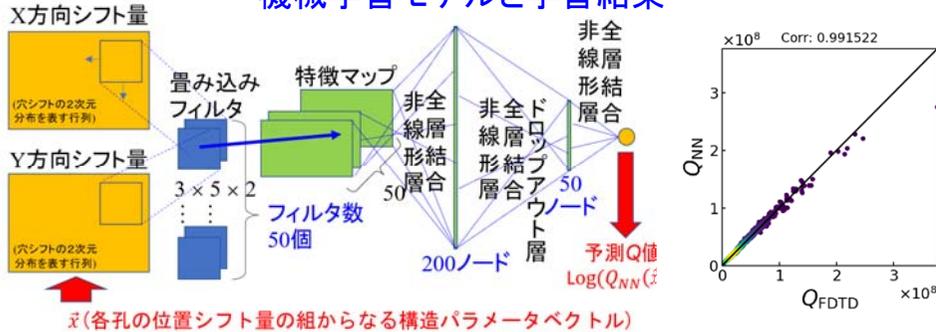
将来の超小型モジュール規格や高密度インターポーザ技術に貢献

研究開発成果:革新的光配線技術(京大)

複雑な性能を実現できる
汎用性が高い設計手法の開発

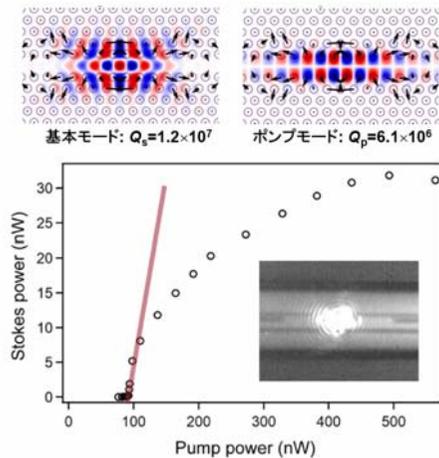
– 機械学習を活用したフォトニック結晶設計

機械学習モデルと学習結果



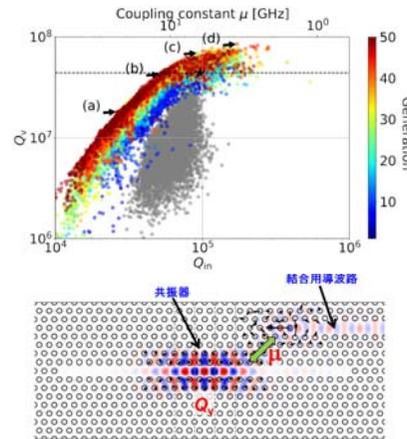
T. Asano, S. Noda, *Opt. Express* **26**, 32704 (2018).
T. Asano, S. Noda, *Nanophotonics* **8**, 2243 (2019).

損失補償用ラマンゲインと
光保持Q値の同時最適化



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

共振器間結合とQ値の同時最適化



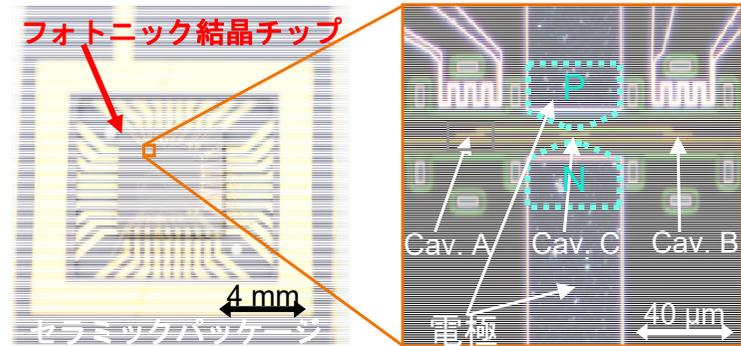
M. Nakadai, T. Asano, and S. Noda, *Nature Photonics* **16**, 113 (2022).
(Published online 2021, <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00910-y>).

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

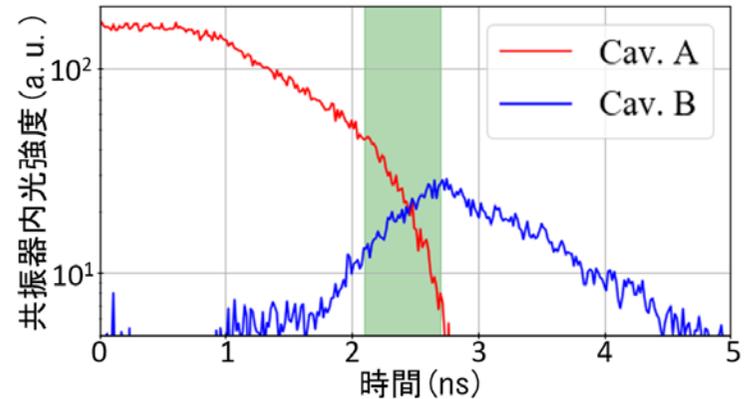
将来の光電子集積サーバにおける高度な光配線技術を確立

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



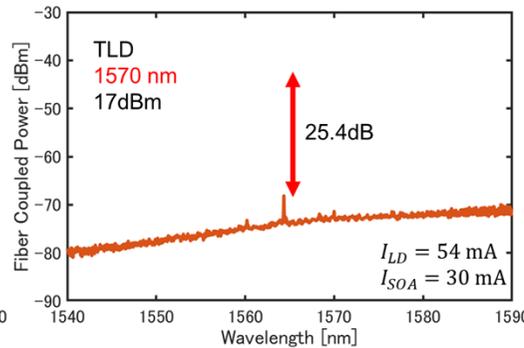
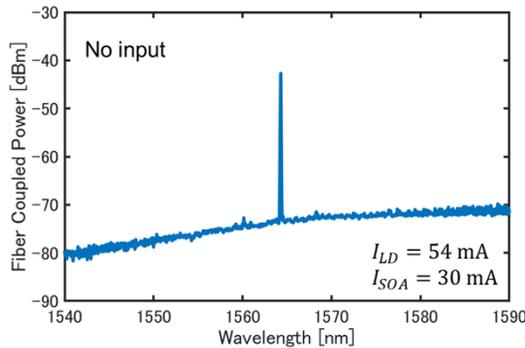
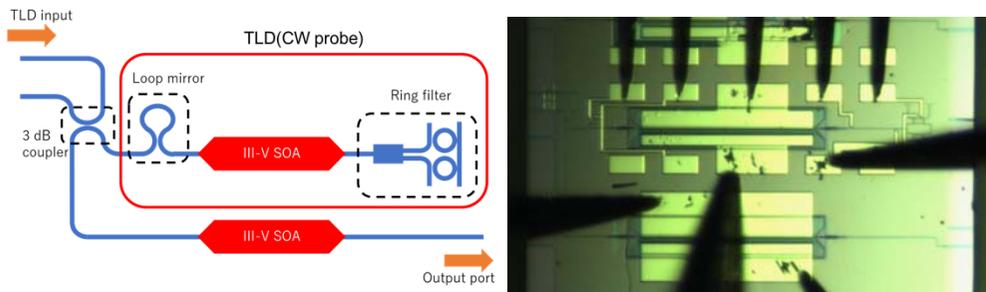
光転送実験結果



研究開発成果: 革新的光エレクトロニクス技術(東工大)

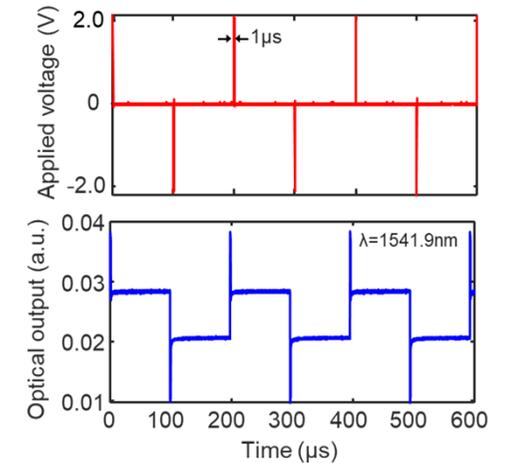
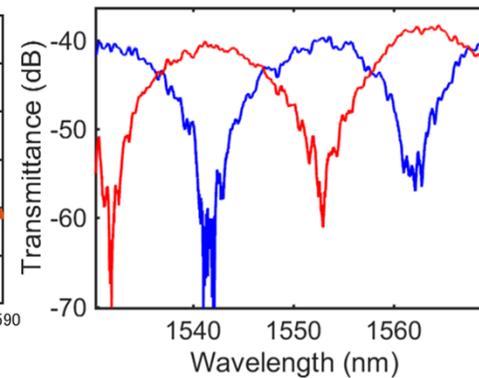
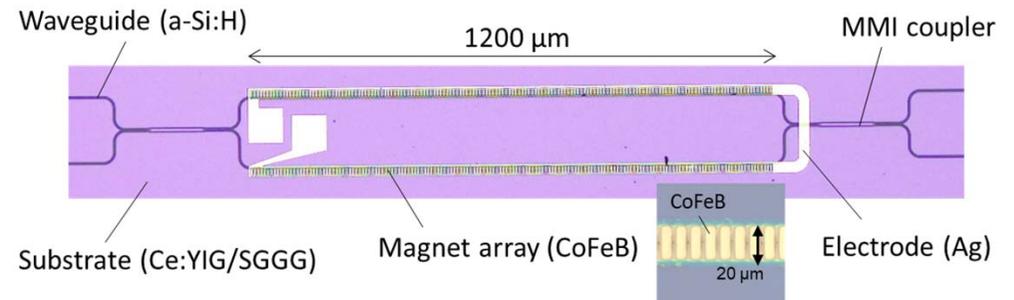
光源・増幅器一体集積型波長変換器の実現

- 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



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



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

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

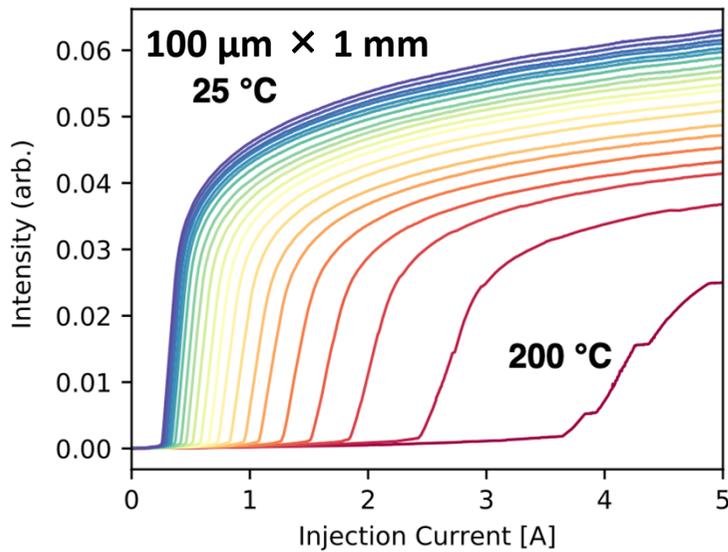
革新的デバイス技術研究からの展開

革新的デバイス技術研究からの展開

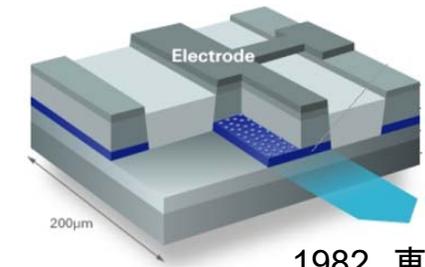
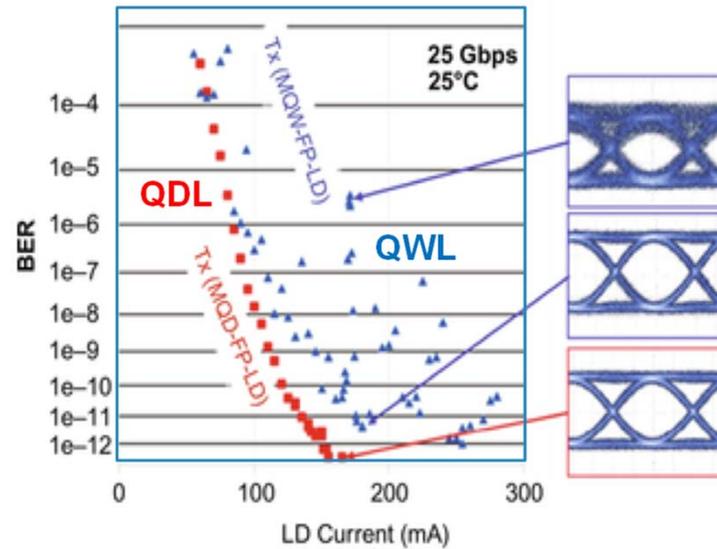
量子ドットレーザ技術: 光IOコアを可能に!

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

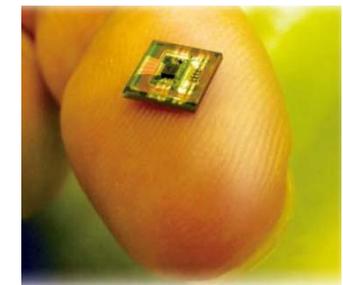
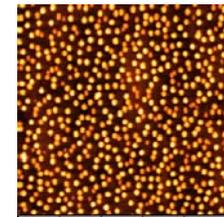
温度安定性・高温動作の実証



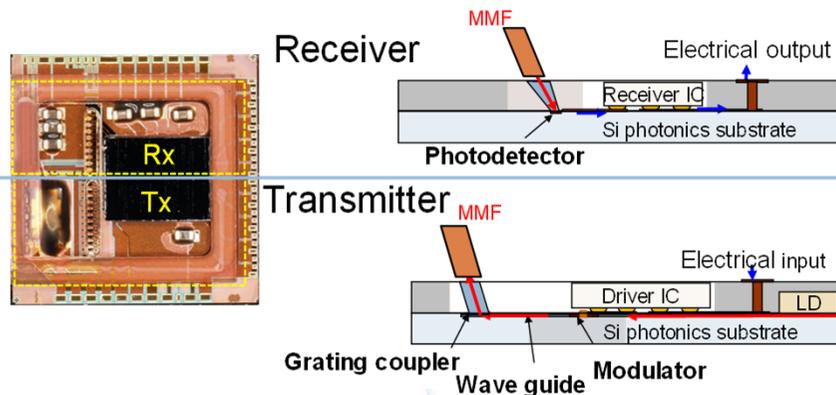
光フィードバック高耐性の実証



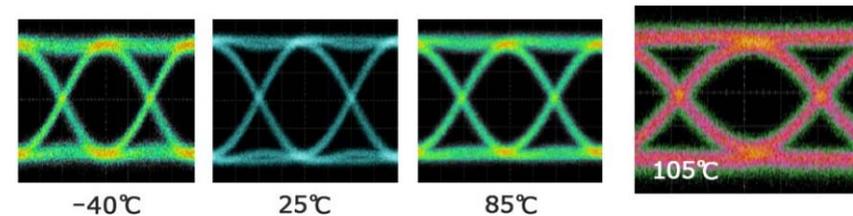
1982 東大



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



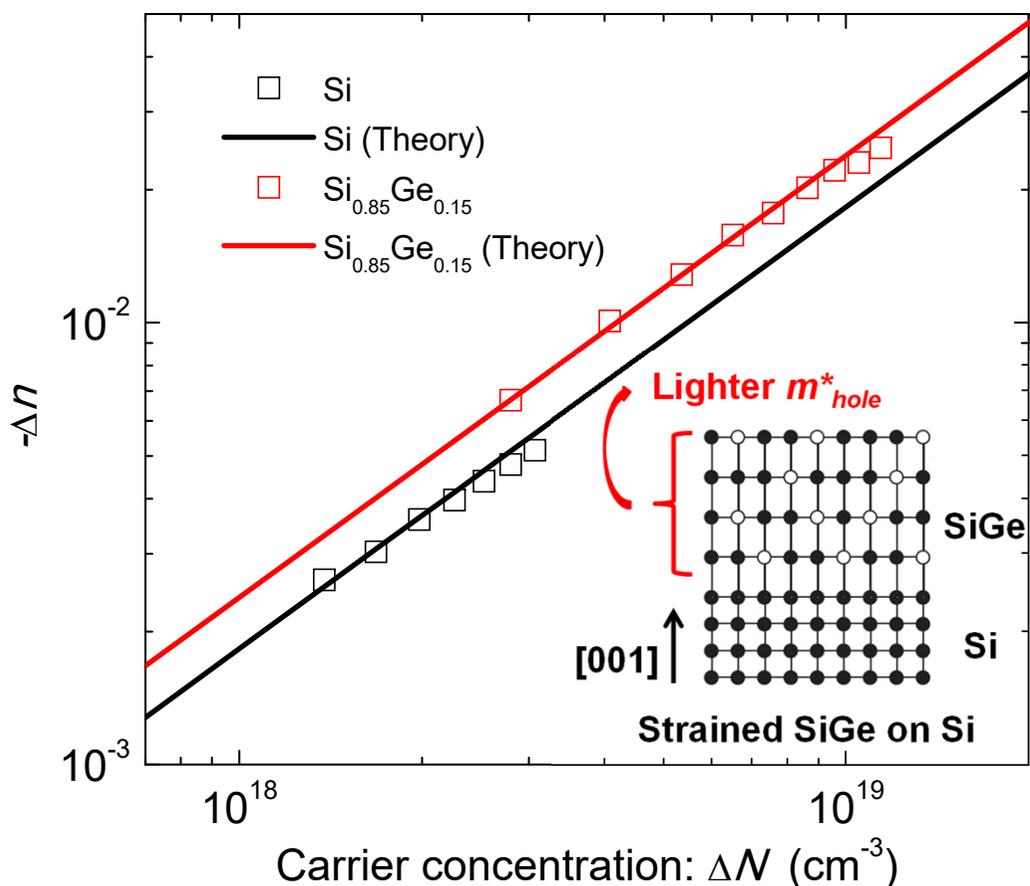
25Gbpsトランシーバの広温度領域動作



革新的デバイス技術研究からの展開

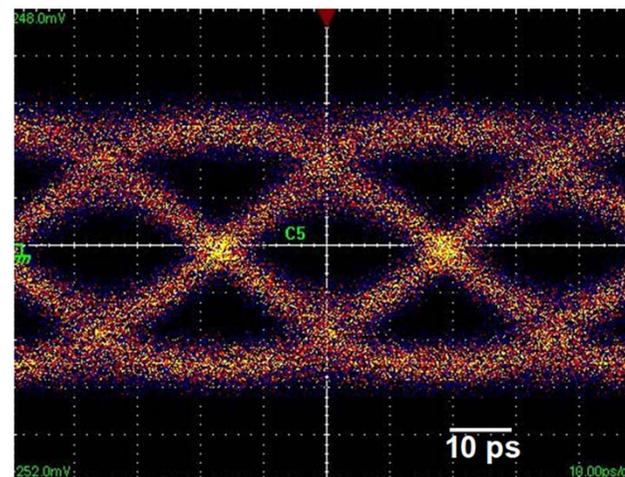
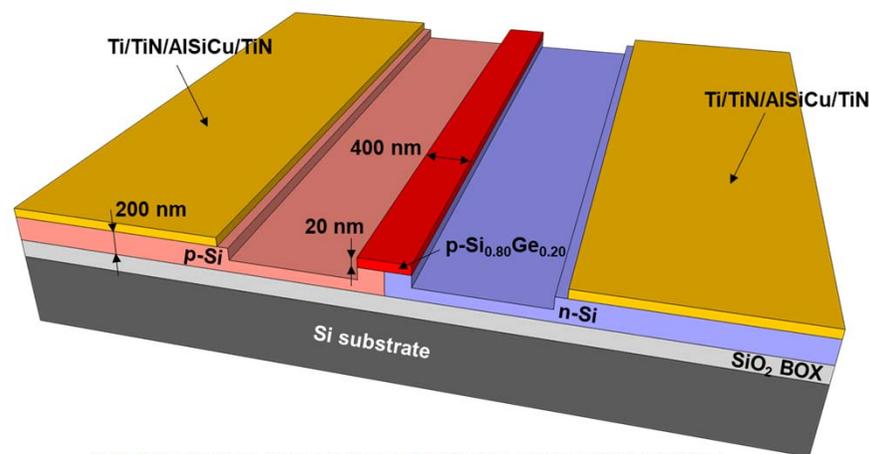
SiGe変調器技術: PETRA光回路への導入!

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

まとめ

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