

オンチップ光配線に向けたシリコン系集積光送受信デバイスの開発

Silicon-based integrated optical transmitter and receiver devices for on-chip interconnects



石川 靖彦 (Yasuhiko ISHIKAWA, Ph. D.)
豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 教授
(Professor, Toyohashi University of Technology, Department of
Electrical and Electronic Information Engineering)

応用物理学会 IEEE 他

著書: Integrated Photonics for Data Communication Applications,
4. High-speed photodetectors, ed. by M. Glick, L. Liao, and K.
Schmidtke (Elsevier, Amsterdam, 2023), pp. 123-158 他

研究専門分野: 半導体工学 シリコンフォトニクス

あらまし

集積回路チップ上で光通信を行うオンチップ光配線の実現を最終目標とし、光通信波長の $1.55\ \mu\text{m}$ 帯で動作する光送受信デバイスの検討を進めた。シリコンフォトニクスでデファクト標準となった Ge 受光器 (光-電気変換) の利用を前提とし、キーデバイスであるバルク Si ウェーハ上の光導波路 (光配線) と光変調器 (電気-光変換) には Si 系材料あるいは Si とプロセス親和性の高い材料に根ざす条件を課した。光導波路および光変調器を構成する材料 (堆積膜) の組み合わせはいくつか考えられるが、光導波路に SiN_x 、光変調器に AlN を利用する方法が有力と考えて検討を進めた。反応性スパッタ法による SiN_x 堆積膜が光導波路に応用できること、光変調器材料として反応性スパッタ法による自発配向 AlN の有効性を示唆する結果が得られたことを述べる。一方、 SiN_x 光導波路と Ge 受光器の間の光結合に難があり、さらに検討を行う必要がある。

1. 研究の目的

シリコン情報処理チップの高性能化において、チップ内の長距離情報伝送 (距離 $> \sim 1\ \text{mm}$) に高速・大

容量の光配線を利用することが有効である。本研究では、オンチップ光配線技術の実現を目標とし、光通信波長の $1.55\ \mu\text{m}$ 帯で動作する光送受信デバイスの検討を進めた。エレクトロニクス用の標準的なバルク Si ウェーハ上での光デバイス実現が鍵である。シリコンフォトニクスでデファクト標準となった Ge 受光器 (光-電気変換) の利用を前提とし、キーデバイスである光導波路 (光配線) と光変調器 (電気-光変換) には Si 系材料あるいは Si とプロセス親和性の高い材料に根ざす条件を課す必要がある。光導波路および光変調器を構成する材料 (堆積膜) の組み合わせとして、 SiN_x および AlN が有力と考え、検討を行った。

2. 研究の背景

光通信は情報伝達の遅延が小さく、大容量・低電力の特長も有する。シリコン情報処理回路において、チップ内の長距離情報伝送 ($> \sim 1\ \text{mm}$) が処理能力を制限する要因の一つとなっており、従来から光配線の利用がクロック分配やコア間通信の観点で議論されてきた[1-6]。近年は CPU、GPU、メモリ等の個別チップをインタポーザと呼ばれる基板上に載せてパッケージ化するチップレット技術の開発が活発化している。光配線でチップ間を繋ぐ光チップレット[7,8]や光通信デバイスをパッケージ化する CPO (co-packaged optics) [9,10]も注目されている。一方、チップ内配線に光を利用するオンチップ光配線は最終形態と言えるが技術的に容易でない。要因の一つである光源 (Si 系材料で実現困難) については、電子回路における「電源」同様、チップ外に配置すると一旦割り切るとする (あるいはチップ上に III-V 族レーザー光源をを貼り合わせる)。ところが、チップ内で光送受信を行うためのデバイス開発も進んでいない。シリコンフォトニクス*1 が過去四半世紀に渡って研究されてきており[11,12]、我々も Ge 集積受光器をはじめとするデバイス研究を精力的に行ってきた[13-16]。現状は光ファイバーの入出力端で利用される光送受信デバイス (光集積トランシーバ: 動作波長 $1.3\text{--}1.6\ \mu\text{m}$) への応用が主体である[17-20]。専用仕様の SOI (Si-on-insulator) ウェーハ*2 が利用されており、上部の単結晶 Si 層を微細加工することで、Si 光導波路や Si 合分波器といったパ

オンチップ光配線に向けたシリコン系集積光送受信デバイスの開発

Silicon-based integrated optical transmitter and receiver devices for on-chip interconnects

チップデバイスを作製できる。Si 光変調器や Ge 受光器を含めた光デバイスのモノリシック集積³が実現され、光送受信チップへ応用されている。一方、情報処理チップへの光配線導入には、エレクトロニクス用の標準的なバルクウェーハ上に光デバイスを作製する必要がある。すなわち、Si ウェーハ上の堆積膜に対して微細加工を行ってデバイスを集積する必要がある。

3. 研究の方法

Si 基板の上にエピタキシャル成長した Ge 層を用いた Si 上 Ge 受光器(光-電気変換:光通信波長帯で動作)[13-16]の利用を前提とし、キーデバイスである光配線(光導波路)と光変調器(電気-光変換)には Si 系材料あるいは Si とプロセス親和性の高い材料に根ざす条件を課すこととした。光導波路および光変調器を構成する材料(堆積膜)の組み合わせとして、SiN_xおよび AlN が有力と考え、検討を行った。

(1) SiN_x 光導波路

SOI ウェーハを利用せずに Si 光導波路を作製するには、SiO₂ 上の Si 堆積膜を用いる必要がある。Si の堆積温度は一般にバックエンド工程⁴の要求 (<~400°C) よりも高く、また多結晶となるため光導波路の散乱損失が高い(少なくとも数 dB/cm [21])。SiO₂ 上の非晶質 SiN_x 堆積膜をサブミクロン細線加工した低損失光導波路(波長 1.3-1.6 μm)を報告している[22,23]。独自の反応性スパッタ法⁵を用いて低損失化 (< 1 dB/cm)に成功している。200°C 以下の低温プロセスであり、バックエンド工程と互換性がある。低圧化学気相堆積(LP-CVD)法はプロセス温度が 800°C 程度と高くバックエンド工程と整合せず、プラズマ CVD (PE-CVD) 法では原料ガス由来の残留 N-H 結合に起因する光吸収が 1.5 μm 帯に発生する。図 1(a)の赤外吸収スペクトルに示したように、PE-CVD 法による SiN_x 膜(堆積温度 300°C)では約 3300 cm⁻¹に N-H 結合に由来する吸収ピークが見られる。一方、反応性スパッタ SiN_x 膜(200°C)では原料に水素が含まれないため N-H ピークは観測されない(反応性スパッタ AlN 膜の結果については後述)。屈折率の波長依存性の測定結果を図 1(b)に示す。反応性スパッタ SiN_x

膜の通信波長帯(1.3-1.6 μm)での屈折率は約 2.0 であり、Si₃N₄ に対する理想値とよく一致した。また測定に用いた PE-CVD 膜の約 1.9 に比べて高く、より密な膜となっていると考えられる。

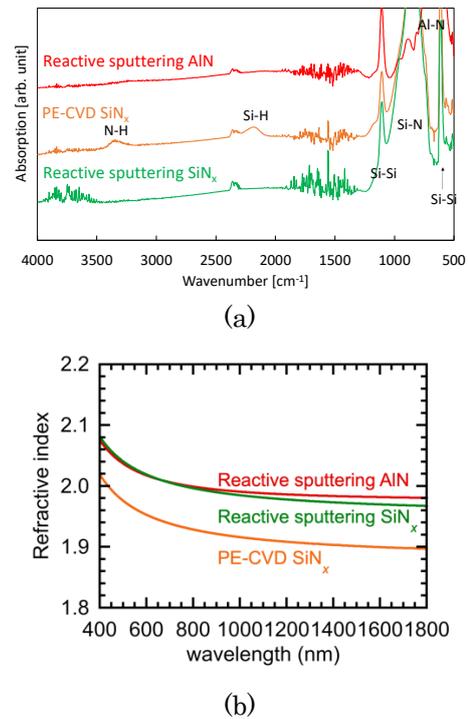


図 1 (a) 赤外吸収スペクトル および (b) 屈折率スペクトル:反応性スパッタ SiN_x膜(緑)、PE-CVD SiN_x膜(橙)、および反応性スパッタ AlN 膜(赤)

反応性スパッタ SiN_x 膜を用いて光導波路を作製した。まず、Si 基板の上に SiO₂ 膜(下部クラッド:膜厚 3 μm)を PE-CVD 法により堆積した。さらに SiN_x 膜(膜厚 560 nm)を反応性スパッタを用いて堆積した。Si ターゲット(99.999%)を用い、堆積温度は 200°C、チャンバ圧力は 0.5 Pa、ガス流量比は Ar : N₂ = 2 : 1、RF 電力は 600 W とした。サンプルからターゲットまでの距離は 100 mm とした。なお、図 1 の評価に用いたサンプルと同様な条件である。次に、i 線ステップおよび反応性イオンエッチングを利用して幅 1000 nm のチャンネル光導波路に加工した。最後に SiO₂ 層(上部クラッド)で埋め込んだ。図 2(a)は走査電子顕微鏡(SEM)による断面観察結果であり、想定通りの構造が得られていることがわかる。図 2(b)に SiN_x 光導波

オンチップ光配線に向けたシリコン系集積光送受信デバイスの開発

Silicon-based integrated optical transmitter and receiver devices for on-chip interconnects

路の光透過率を光導波路長に対してプロットした結果を示す。グラフの傾きから伝搬損失として 3.0 ± 1.0 dB/cm が得られた。高精度の電子線 (EB) リソグラフィを用いて作製した SiN_x 光導波路[23]の伝播損失 0.6 ± 0.3 dB/cm よりも大きい値であるが、実験室レベルで十分に利用可能である。

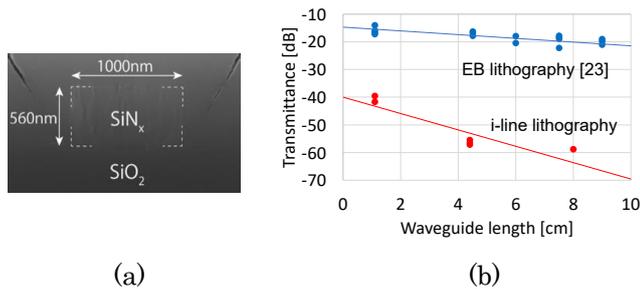


図 2 (a) SiN_x 光導波路の典型的な断面 SEM 像 および (b) 波長 $1.55 \mu\text{m}$ での光透過率の導波路長依存性

(2) 光変調器応用に向けた AlN 薄膜の堆積と評価

SiN_x は電氣的に屈折率や光吸収を制御できないため光変調器へ応用することは困難である。 SiN_x 導波路と集積可能な光変調器の材料として Si 堆積膜を利用すると、前述の Si 光導波路と同様、バックエンド工程との不整合 (堆積および pn 接合形成の温度) や散乱損失に課題がある。また、標準的な Mach-Zehnder 干渉計構造の Si 光変調器では、デバイス長が 1 mm 程度と長い点[24]も課題である*6。Si 以外の材料として、ここでは反応性スパッタ AlN 膜を検討した。AlN は紫外発光素子だけでなく、広いバンドギャップ (約 6.2 eV) を生かしたパワーデバイス、さらには圧電性を生かしたアクチュエータ応用が近年検討されている [25,26]。光変調器応用の報告もある [27,28]。結晶構造の非対称性により、AlN では電界印加による屈折率変化が生じる。電気光学 (EO) 係数として、 $r_{13} = 0.59$ pm/V、 $r_{33} = -0.67$ pm/V を有する [29]。Mach-Zehnder 干渉計等と組み合わせることで光変調器が実現できる。高い結晶性が重要であり、しばしば高温熱処理 (>800°C) が適用されてきた。導波損失は低減できるものの [30]、バックエンド工程と整合しない。そこで、まず 200°C で堆積した反応性スパッタ AlN 膜の基本物性を調査した。Al ターゲット (99.999%) を使用し、

Ar/N_2 混合ガスを用いて反応性スパッタリングを行った。基本的な堆積条件は SiN_x 堆積時と同様であるが、RF 電力を 300–600 W まで変化させた。堆積時間は 30 分とした。

RF 電力 600 W で堆積した反応性スパッタ AlN 膜の断面 SEM 像を図 3(a)に示す。一様な厚さの膜が形成できていることがわかる。原子間力顕微鏡による観察の結果、表面粗さの RMS 値は 0.4 nm であり、表面は原子レベルで平坦であった。図 3(b)に AlN 膜の屈折率 (633 nm) の RF 電力依存性を示す。RF 電力が高いほど屈折率が大きくなり、膜の密度が向上していると考えられる。得られた屈折率 2.05 は、理想値である 2.12 ($1.55 \mu\text{m}$) [30]に近い値となった。また、図 1(b)に示したように、 SiN_x と同様な屈折率であることから、 SiN_x 光導波路と同様なサイズの加工を行うことで光導波路として機能することがわかる。 SiN_x と AlN で屈折率差が小さい点は、両者のデバイス間の光結合の低損失化にも効果的である。なお、図 1(a)に示したように、反応性スパッタ SiN_x 膜と同様、N-H 結合に由来する $1.5 \mu\text{m}$ 帯での光吸収損失は除外できる。

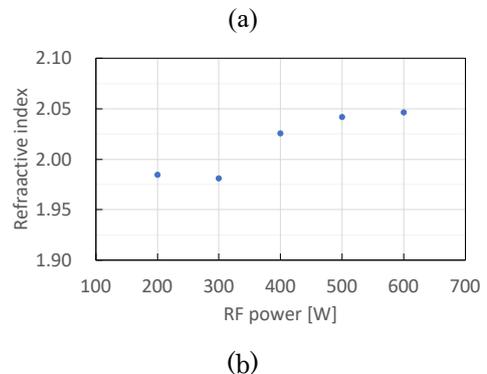
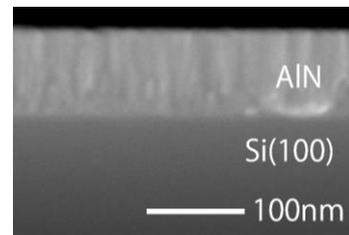


図 3 (a) 反応性スパッタ AlN 膜の典型的な断面 SEM 像 および (b) 波長 633 nm における屈折率の RF 電力依存性

オンチップ光配線に向けたシリコン系集積光送受信デバイスの開発

Silicon-based integrated optical transmitter and receiver devices for on-chip interconnects

結晶性に関しては、斜入射 X 線回折 (GI-XRD) 測定の結果、反応性スパッタ AIN 膜は多結晶であることがわかった。一方、下地 Si ウェーハの 004 回折ピークが現れる条件で単結晶 XRD 測定 (ω - 2θ スキャン) を行うと、AIN の 0002 回折が観測される。従来報告[25,27]と同様、 c 軸が膜厚方向に自発配向していることを示している。異方性を有していることは、EO 効果によって屈折率の電気的制御が可能であることを示唆しており、光変調器への応用が期待できる。今後、光導波路を作製するとともに、Mach-Zehnder 干渉計構造あるいはマイクロリング光共振器構造の光変調器を作製し、有効性を検証したい。

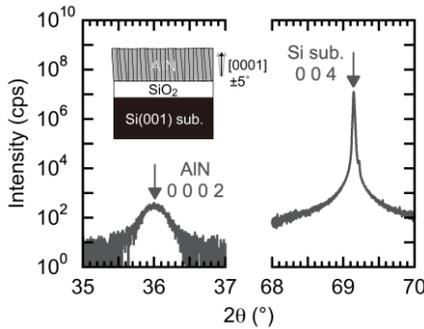


図 4 AIN 堆積膜の XRD ピーク

(3) SiN_x 光導波路と Ge 受光器の光結合

光-電気変換を行う上で、SiN_x 光導波路と Ge 受光器の光結合の高効率化が重要である。高受光効率かつ低リーク電流の受光器を実現するためには Ge 層は高品質である必要があり、Si ウェーハ表面上にエピタキシャル成長する必要がある。SiN_x 光導波路を伝播した光を Si 上 Ge 受光器へ入射する方法として、図 5(a)のように SiN_x 光導波路と Ge 層 (光吸収層) をウェーハの同一面上に作り込んで Butt 結合させることが考えられる。結合部での屈折率差によって、約 20%の反射・散乱損失が発生するものの、高効率な光結合を実現できる。しかし、SiN_x 導波路の下側の SiO₂ クラッド層は、Si 基板への放射損失をなくすために数 μm の膜厚が必要である[23]。数 μm の段差がある中で、SiN_x 光導波路と Ge 光吸収層をウェーハの同一面上に作り込むことは容易でない。

別の光結合の方法として、図 5(b)のように Ge 層上

に SiN_x 導波路を形成して、Ge へエバネッセント結合させる方法も考えられる (図 5(b)の計算例では、Ge 層上の Si 保護膜を考慮した計算を行っている)。Ge は約 4.2 の高い屈折率を有しており、SiN_x 導波路を伝播した光は Ge へ結合・入射する。しかし Ge へ結合した光は大きく屈折し、下地の Ge/Si 界面で内部全反射せず、Si 基板へ放射される成分が多い。高効率な光結合には、グレーティング結合などの他手法も検討する余地がある。

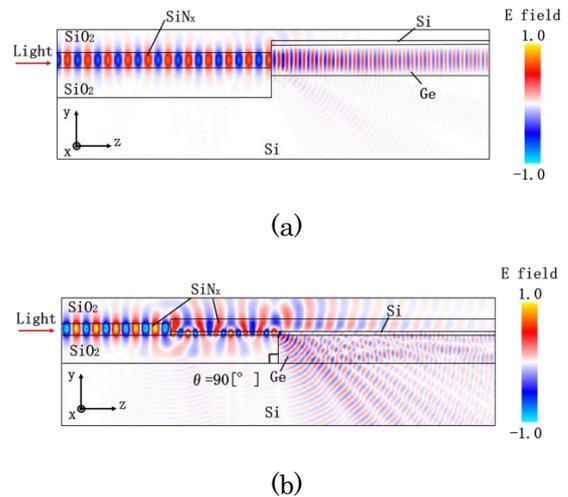


図 5 SiN_x 光導波路と Ge 受光器の光結合領域における光伝播のシミュレーション : (a) Butt 結合 および (b) エバネッセント結合

4. 将来展望

AIN に関しては、光導波路や Mach-Zehnder 干渉計、マイクロリング共振器を作製し、光変調器としての利用可能性を明確化する予定である。SiN_x 光導波路と Ge 受光器 (光-電気変換) の間の高効率光結合もさらに検討を進める予定である。

波及効果として、高強度の光を扱う導波路デバイスへの応用も考えられる。Si 光導波路は、光通信波長帯の近赤外光に対して基本的には光吸収を示さないが、1 mW 台以上の高強度光が入射されると、非線形な光吸収 (二光子吸収) が発生する。損失が大きく、利用が困難となる。一方、SiN_x や AIN を光導波路に用いると高強度光でも二光子吸収は無視できる。波長変換などの非線形光学現象の観測やデバイス応用にも有効である。デジタルコヒーレント通信の受信チップで

オンチップ光配線に向けたシリコン系集積光送受信デバイスの開発

Silicon-based integrated optical transmitter and receiver devices for on-chip interconnects

も高強度光（局発光）が利用される。この点においても優位性がある。

おわりに

集積回路チップ上で光通信を行うオンチップ光配線の実現を最終目標とし、光通信波長の 1.55 μm 帯で動作する光送受信デバイスの検討を進めた。反応性スパッタ法による SiN_x 堆積膜が光導波路（光配線）に有効であり、光変調器（電気-光変換）材料としては反応性スパッタ法による自発配向 AlN の有効性を示唆する結果が得られた。今後、 AlN の光デバイス化、 SiN_x 光導波路と Ge 受光器の間の光結合の高効率化を検討し、有効性を明らかにする予定である。

用語解説

- *1 Si 集積電子回路のプロセス技術を用いて Si 上に光デバイスを集積する技術である。
- *2 Si ウェーハ上に SiO_2 層を介して単結晶 Si 層が形成されたウェーハである。一般にウェーハ貼り合わせにより作製される。
- *3 膜堆積と微細加工（リソグラフィ、エッチングなど）を駆使して、1枚の半導体基板上にデバイスを集積することを指す。
- *4 半導体作製プロセスの第2工程（配線工程）を指す。
- *5 イオン化した希ガス（主に Ar）を堆積したい固体物質（ターゲット）に衝突させて、物質を気化させることにより基板上に薄膜を堆積する手法をスパッタ（スパッタリング）という。希ガスに加えて、ターゲット（例えば Si）と反応させたいガス（ O_2 や N_2 ）を導入することで化合物（ SiO_2 や SiN_x ）の薄膜を形成することもでき、反応性スパッタという。
- *6 Si 光変調器のデバイス長は、変調原理である電気光学（EO）効果（Si 中の屈折率がキャリア濃度で変化するキャリアプラズマ効果）により制限されている。

参考文献

[1] L. C. Kimerling, *Photonics to the Rescue: Microelectronics Becomes Microphotonics*,

Electrochem. Soc. Interface 9, 28 (2000).

- [2] K. Wada, *Electronics and Photonics Convergence on Si CMOS Platform*, Proc. SPIE 5357, 16 (2004).
- [3] D. A. B. Miller, *Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips*, Proc. IEEE 97, 1166 (2009).
- [4] K. Ohashi et al., *On-Chip Optical Interconnect*, Proc. IEEE 97, 1186 (2009).
- [5] L. C. Kimerling, D. -L. Kwong, and K. Wada, *Scaling computation with silicon photonics*, MRS Bull. 39, 687 (2014).
- [6] M. J. R. Heck and J. E. Bowers, *Energy Efficient and Energy Proportional Optical Interconnects for Multi-Core Processors: Driving the Need for On-Chip Sources*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20, 332 (2014).
- [7] M. Wade et al., *TeraPHY: A Chiplet Technology for Low-Power, High-Bandwidth In-Package Optical I/O*, IEEE Micro 40, 63 (2020).
- [8] N. Psaila et al., *Detachable Optical Chiplet Connector for Co-Packaged Photonics*, J. Lightwave Technol. 41, 6315 (2023).
- [9] C. Minkenberg et al., *Co-packaged datacenter optics: Opportunity and challenges*, IET Optoelectronics 15, 77 (2021).
- [10] R. Mahajan et al., *Co-Packaged Photonics For High Performance Computing: Status, Challenges And Opportunities*, J. Lightwave Technol. 40, 379-392 (2022).
- [11] 例えば、S. Y. Siew et al., *Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development*, J. Lightwave Technol. 39, 4374 (2021).
- [12] 例えば、S. Shekhar et al., *Roadmapping the next generation of silicon photonics*, Nat. Comm. 15, 751 (2024).
- [13] S. Park et al., *Monolithic integration and synchronous operation of germanium photodetectors and silicon variable optical*

オンチップ光配線に向けたシリコン系集積光送受信デバイスの開発

Silicon-based integrated optical transmitter and receiver devices for on-chip interconnects

- attenuators*, Opt. Express 18, 8412 (2010).
- [14] Y. Ishikawa and K. Wada, *Germanium for silicon photonics*, Thin Solid Films 518, S83 (2010).
- [15] H. Nishi et al., *Monolithic integration of a silica AWG and germanium photodiodes on silicon photonic platform for one-chip WDM receiver*, Opt. Express 20, 9312 (2012).
- [16] K. Yamada et al., *High-performance silicon photonics technology for telecommunications applications*, Sci. Technol. Adv. Mater. 15, 024603 (2014).
- [17] D. Thomson et al., *Roadmap on silicon photonics*, J. Opt. 8, 073003 (2016).
- [18] Q. Cheng et al., *Recent advances in optical technologies for data centers: a review*, Optica 5, 1354 (2018).
- [19] N. Margalit et al., *Perspective on the future of silicon photonics and electronics*, Appl. Phys. Lett. 118, 220501 (2021).
- [20] M. Glick, L. Liao, and K. Schmidtke, *Integrated Photonics for Data Communication Applications* (Elsevier, Amsterdam, 2023).
- [21] Q. Fang et al., *Low Loss (~6.45 dB/cm) Sub-Micron Polycrystalline Silicon Waveguide Integrated with Efficient SiON Waveguide Coupler*, Opt. Express 16, 6425 (2008).
- [22] Z. Zhang et al., *A New Material Platform of Si Photonics for Implementing Architecture of Dense Wavelength Division Multiplexing on Si Bulk Wafer*, Sci. Technol. Adv. Mater. 18, 283 (2017).
- [23] R. Tsuchiya et al., *Low-Loss Hydrogen-Free SiN_x Optical Waveguide Deposited by Reactive Sputtering on a Bulk Si Platform*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 28, 4400109 (2022).
- [24] K. Li et al., *An integrated CMOS-silicon photonics transmitter with a 112 gigabaud transmission and picojoule per bit energy efficiency*, Nat. Electron. 6, 910(2023).
- [25] C. Xiong et al., *Aluminum nitride as a new material for chip-scale optomechanics and nonlinear optics*, New J. Phys. 14, 095014 (2012).
- [26] M. Dong et al., *High-speed programmable photonic circuits in a cryogenically compatible, visible-near-infrared 200 mm CMOS architecture*, Nat. Photon. 16, 59 (2022).
- [27] C. Xiong et al., *Low-Loss, Silicon Integrated, Aluminum Nitride Photonic Circuits and Their Use for Electro-Optic Signal Processing*, Nano Lett. 12, 3562 (2012).
- [28] S. Zhu and G. Q. Lo, *Aluminum nitride electro-optic phase shifter for backend integration on silicon*, Opt. Express 24, 12501 (2016).
- [29] P. Graüpner et al., *Electro-optical effect in aluminum nitride waveguides*, J. Appl. Phys. 71, 4136 (1992).
- [30] X. Wu et al., *Effects of rapid thermal annealing on aluminum nitride waveguides*, Opt. Mater. Express 10, 3073 (2020).

この研究は、令和2年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和3～5年度に実施されたものです。