

2.3.3 フォトニクス材料・デバイス・集積技術

(1) 研究開発領域の定義

光の多様な現象・機能を利用して高性能/高機能な光学材料や光デバイスを創出し、エレクトロニクス技術との融合と様々なデバイスの集積により、新たな機能を有するチップ・モジュール・装置を実現する。光の技術は通信、情報処理、医療・バイオ、加工、分析・計測、映像、照明、発電などの幅広い応用分野への適用が期待されており、光の多様な波長や物理現象の利用、用いる材料の高品質化、デバイスの高性能化・小型化・低消費電力化・高信頼化、異種材料・多様なデバイスのヘテロ集積による高機能化、計測における高感度化・高分解能化・高精度化などの研究開発課題がある。

(2) キーワード

光集積回路、ハイブリッド集積、光ニューラルネット、光コンピューティング、光配線、LiDAR、テラヘルツ技術、光トランシーバ、光インターポーザ、シリコンフォトニクス、光電子融合、ナノフォトニクス、量子フォトニクス、トポロジカルフォトニクス、フォトニック結晶、プラズモニクス、メタマテリアル、ナノカーボン、二次元物質、トポロジカル物質、量子欠陥、LiNbO₃

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

光の技術（フォトニクス技術）は、高速・大容量の光通信、照明・表示機器、太陽光発電など日々の生活、加工技術や測量技術を活用した製造業、農業、漁業などの産業分野、光コヒーレンストモグラフィー（OCT）や内視鏡など医療の現場での利用が進められている。最近ではSociety 5.0の実現に向けて現実世界の様々なものの形や位置情報などのセンシング・イメージングデータの取得、ビッグデータの高速・低消費電力な高度情報処理といったIoT/ AI分野や、新型ウイルス感染症などの人類に対する新たな脅威に対して深紫外光源技術による殺菌・滅菌への期待も高まっている。このように、フォトニクス技術は、健康で快適な生活、安心・安全な社会を実現するうえで欠くことのできない基幹技術の一つである。

これらの高度で多様な機能は、単体の光デバイスだけでは実現することは不可能であり、複数の光デバイス、さらには電子デバイスとともに活用することではじめて実現されるものである。様々な光機能を有する各種コンポーネントを高度に集積することにより、小型化だけでなく、それにとまなう高速化、低消費電力化、さらには新機能の発現などが期待される。一方、既存の光デバイスを集積化するだけでは性能向上はいずれ頭打ちになるため、それを打破するための素子の小型・高性能化や新機能光デバイスの創製、それらを支える物理や材料、プロセス技術に関する継続的な研究が必要である。フォトニクス技術の連続的進展および不連続な進化は、フォトニクス材料、デバイス、集積技術の研究開発が三位一体となってはじめて可能となるものであり、本領域ではこれらについて記載する。

[研究開発の動向]

• 光技術の応用

近年のIoT（Internet of things）やビッグデータ解析等の普及により、データセンタ等のシステムで処理される情報は今後も爆発的に増大すると予測され、大規模な並列化・分散化が進められている。しかし、大規模な並列化・分散化システムでは、プロセッサ間のインターコネクトの帯域幅や遅延時間がシステム全体の性能を律速してしまうことが多く、電気配線の限界が顕在化しつつある中で、シリコンフォトニクスなどの光電子融合集積化技術を用いた光配線による広帯域化・低遅延化・小型化・低消費電力化・低コスト化が望まれている。また、AIの計算量が今後急激に増加することなどが予想されるなか、コンピューティング技術の革新も求められている。光集積回路のAIアクセラレータ、ニューラルネットワーク、ニューロモルフィッ

クコンピューティングなどのコンピューティング技術への応用は、学術、産業、社会のいずれにおいても注目されている。機械学習を加速するAIアクセラレータとして、シリコンフォトニクス集積回路をベースとした光ニューラルネットワーク回路、時系列データ処理に適したリザーバコンピューティングへのフォトニクス技術の適用などが報告されている。また、2017年に設立された関連ベンチャー企業（Lightmatter、Lightelligenceなど）も大きく成長している。

集積化技術を活用したLiDAR（Light Detection and Ranging、Laser Imaging Detection and Ranging）も注目を集めている。シリコンフォトニクスの通信用デバイスの設計変更によりLiDARが実現可能なことから、例えば、米国MITでシリコンフォトニクスチップとICをワンチップ化したもの、国内でもJSTのACCELプロジェクトでシリコンベースのフォトニック結晶を利用した高精度なLiDARの開発が報告されている。また、光アンテナの非冗長アレイ化により解像点数の増大、非古典光源の活用によるSN比の向上など、今後のシステム高性能化に資する新たな技術が芽生えつつある。

• 集積技術

シリコンフォトニクス技術が成熟してきており、400nm程度の幅のシリコン細線導波路をベースにして、電気光学変調器、電気光学スイッチ、受光器などを集積する技術が世界各地にあるファウンドリ拠点を通じて利用可能になりつつある。例えば、MITでは大規模な集積型フェーズドアレイを実現し、日本では産総研が位相変調器をマトリックス状に集積し32×32の光スイッチを実現している。近年、CMOSプロセッサの性能が飽和しつつあるため、光による演算が再び関心を集めるようになってきているが、その中でシリコンフォトニクス集積技術をベースとした光演算技術が活発に提案、実証されるようになってきている。

また、シリコンフォトニクス技術をベースにして、光回路と電気回路を同時集積する光電融合集積技術も進展しており、2018年にはMIT、UC Berkeleyを中心とした複数の大学連合チームにより、300mmウェハ上に65 nm CMOSトランジスタ回路と様々なシリコンフォトニクスの光部品が同時集積された光トランシーバが報告され、その後Ayar labsとして本格的な応用展開につながっている。シリコンフォトニクスによる光集積技術の進展と光電変換効率の向上に伴い、世界中の様々な企業が光電融合技術に取り組みを始めており、今後の情報通信技術において重要な研究開発の方向性と考えられる。

LiNbO₃をシリコンなどの異種基板上に形成したLNOI（LiNbO₃ on Insulator）が新たな集積フォトニクスプラットフォームとして普及してきた。LNOIでは大きな電気光学効果や非線形光学効果が利用できるため、シリコンでは実現できない多くの光機能が実現できる。最近では希土類ドーピングLNOIを用いたレーザや増幅器が実現されるとともに、希土類イオンの長いコヒーレンス時間を活かした量子情報への応用の検討も進むなど、さらに幅広い展開を見せている。また、集積フォトニクスで実現が期待されるオンチップ光アイソレータについてもいくつかの重要な進展がいくつか報告された。

• デバイス

様々なナノフォトニクス技術がデバイスに応用され、超小型化と低消費エネルギー化が実現している。発光デバイスとしては、フォトニック結晶ナノ共振器構造を用いたレーザで極低閾値での室温連続電流注入発振が達成され、またプラズモニクス構造のレーザへの適用により、波長よりもはるかに小さいサイズのレーザ発振動作が報告されている。受光器および電気光学変調器としては、シリコンフォトニクスをベースにした小型で集積化可能な素子が開発され、シリコンフォトニクスプラットフォームで使用できるようになっている。また、フォトニック結晶やプラズモニクスをベースとした様々な超小型受光器および電気光学変調器も実現されており、飛躍的な性能向上が達成されている。光非線形を利用した全光型のスイッチでは、フォトニック結晶ナノ共振器を利用した素子でアトジュール領域でのスイッチング動作が達成されている。光メモリでは、欧州で微小共振器を用いた双安定レーザ型、日本ではフォトニック結晶ナノ共振器を用いた光非線形双安定スイッチ型が研究されている。日本を中心に高性能なデバイスが開発されており商品化が行われている。例えば、京都

大学ではフォトニック結晶型の大面積高出力の面発光レーザーで10W以上の出力を取り出すことに成功し、浜松フォトニクスでこれを商品化している。また、フォトニクラティス社は東北大学の積層型3次元フォトニック結晶の技術を用いて、偏光素子など多彩な機能光部品を開発・商品化している。

最近では、薄膜ニオブ酸リチウム (LiNbO₃)、グラフェン等の2次元物質といった新しい材料や有機光学材料など従来の光回路では用いられてこなかった材料が、ナノフォトニクスプラットフォームと組み合わせられて、飛躍的な性能向上が実現されており、技術トレンドの一つとなっている。既に、有機電気光学ポリマー、薄膜LiNbO₃、グラフェンを用いたナノフォトニクス素子によって、光スイッチや光変調器として従来の成果を大幅に上回る性能が達成されており、光電変換効率のさらなる向上に寄与している。

• 材料

2次元物質やトポロジカル絶縁体、ワイル半金属、反強磁性体などの新奇物質に関する光物性研究も活発になっている。これらの材料はテラヘルツ (THz) 帯で顕著な光学応答を示すものが多く、次世代情報通信技術への応用も見据えて基礎研究の進展が期待される。また、新型太陽電池材料として期待されているペロブスカイト半導体の材料開発が進むとともに、レーザーも含めた様々な光エレクトロニクス応用を目指した研究が進んでいる。カーボンナノチューブや2次元物質を利用したフォトニクス研究では、分光などによりカイラリティや層数などを決定し、原子精度で構造を特定した物質をデバイスに組み込んで調査することが可能になっており、原子精度技術とも呼べるような段階に入りつつある。スタンプ転写法により積層したりデバイスへの組み込みが行われたりすることが多い。電界効果トランジスタをはじめとし、ゲート電極を有するデバイス構造により光電流や光起電力、電界発光、荷電励起子生成などの研究が行われている。また、フォトニック結晶やリング共振器、微小球共振器、トロイド共振器など、微小光共振器に組み込んでナノスケールの光・物質相互作用を増強し、レーザー発振や非線形光学効果、変調素子、などの研究が進められている。薄膜型の共振器では多数のカーボンナノチューブからなる薄膜を組み込んでポラリトンの物理の調査が進められている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 光技術の応用

機械学習やニューロモルフィックコンピューティングなどの新たな情報処理への光技術の適用は、その高速化、省電力化を実現する手法として注目されており、ここ数年間でも膨大な数の報告がある。そのなかでも、シリコンフォトニクスを用いた高速再帰型イジングマシン、毎秒10¹²回の積和演算を可能にする光Tensorコアなどの新しい方向性や大規模化に関する取り組みが注目される。一方、Princeton大学では、マイクロリング共振器 (MRR) を用いて波長多重信号に重みを載せたのち、受光器で和算することにより積和演算を実行する方式を提案し、4つのMRRを集積した回路で基本演算部の動作実証に成功している。Munster大学では、MRRによる光積和演算器に相変化材料 (GeSbTe) を集積して活性化動作を組合せ、4入力のスパイクニューロンとして動作する実証が行われている。実用化開発も進んでおり、MIT発の2つのベンチャー企業のうちLightmatterは、MEMSベースのMZIマトリックスを用いた光積和演算器の開発を2021年に公表し、もう一つのLightelligenceは組み合わせ最適化問題のソルバーに向けた開発を行っている。また、Princeton大学発のベンチャーLuminous computingはマイクロリング共振器をベースとした光積和演算器の研究開発を行っている。光の幅広い自由度を活用する方向も見られ、光周波数コムを応用した波長多重ニューラルネットワークや、波長多重に時間分割多重を組み合わせた方式でConvolutional Neural Network動作の実証などが発表されている。

センシング応用においては、LiDARがその代表的システムとしてここ数年でも大きく進展しており、フラッシュ方式、MEMS方式、OPA (optical phased array) 方式があるが、集積フォトニクス技術を活用したLiDARで注目されるのはその大規模化である。2021年には光アンテナを電氣的に切り替えることで32 × 16

(512) ピクセルでの3次元計測、2022年には1cm角程度のシリコンフォトニクスチップにおいて、MEMSを用いた光アンテナ切り替え方式による視野角70度×70度、ピクセル数128×128(16,384)での計測が報告されている。また、量子技術を適用したQuantum enhanced LiDARの研究も進んでおり、量子もつれ光源を用いることでレーザを用いる場合と比較して36dB程度のSN比の改善を達成したとの報告もある。

次世代通信応用も注目される。NTTでは、2030年における新たなコミュニケーション基盤の実現を目指して、IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) 構想を立ち上げている。この構想は、様々なレベルの光電融合技術を開発して、電気による処理の限界を突破するオールフォトニックネットワークの実現を目指すものであり、インテル、ソニー等の企業を巻き込んだ研究開発をスタートさせている。デバイスレベルの光電融合技術としては、光トランシーバ、光伝送モジュールの研究が世界的にもさらに進展が進みつつあり、米国のAyarLabsではシリコンフォトニクスの技術を駆使した高性能多チャンネル伝送モジュールの開発を発表している。テラヘルツ (THz)、サブテラヘルツの電磁波はBeyond 5G、6Gにおけるキャリアとして重要な役割を担うと考えられている。THz波はバルク光学系を用いた発生が一般的であったが、近年ではチップベースでの発生技術が進展している。その中心はカスケードレーザを用いたTHz波生成であるが、シリコンとの集積化は必ずしも容易ではない。一方、GeSnを用いた光伝導型テラヘルツエミッターなどはシリコン上に形成可能で将来の集積THz回路に向けた技術の一つになり得ると期待される。また、新たな物質群を活用したTHz波の生成についても興味深い進展が見られる。グラフェンを用いたTHz増幅が確認されたほか、3次元Dirac半金属Cd₃As₂における非線形光学効果を用いた光からTHz波への高効率変換 (LNの効率を超える) が実現されている。

• 集積技術

最近のシリコンフォトニクスに関連する国際学会等での動向として、光トランシーバの基本構成要素である光変調器や受光器の基本構造や高速化に関する発表は減少している。マツハツェンダ型変調器やゲルマニウムのPIN型受光器を用いた50Gbps程度までの2値振幅変調に関しては、実用化レベルに達しており、現在の開発ターゲットは800Gbpsに移っている。100Gbpsをアナログ2値振幅変調で行うことは主に駆動電子回路の高速化の観点で困難だと予想され、多値変調、波長多重、マルチコアファイバを用いた空間多重、フューモードファイバを用いたモード多重等のいずれかと組み合わせるものと予想される。OIF国際標準化委員会では、64Gbpsあるいは128Gbps光トランシーバの標準化がなされており、これに適用する薄膜ニオブ酸リチウムや電気光学ポリマー材料とシリコンフォトニクスをハイブリッド化した高速光変調器、またInP系高速光変調器の研究開発・製品化開発が非常に盛んになってきている。データセンタにおける高速ASICのインターフェースとしてシリコンフォトニクスを利用したコパッケージング技術 (光電子集積技術) も標準化が進められている。リング共振器型シリコン光変調器を用いた100Gbaud以上の高速・低電力・高集積可能な光変調器をASIC-LSIの周囲に配置することがIntelなどから提案されている。レーザ光源の実装技術に関しては、外部光源とする方向が主流となってきているが、PETRAが行っているフリップチップ実装やIntelが行っているヘテロ集積技術もコパッケージング技術として提案がなされてきている。

異種材料集積の一つで近年大きく進展しているのがLiNbO₃ on Insulator (LNOI) である。もともとはスマートカット技術を用いてLN基板上にSiO₂を介して薄膜状LNを形成する技術として誕生したが、近年ではSiO₂/シリコンやサファイヤなどの基板に展開され、集積フォトニックデバイス研究の重要なプラットフォームの一つとして進展している。LNは大きな一次の電気光学効果や二次の非線形光学効果をもち各種の光機能を提供できるのが大きな魅力であるが、低損失化が重要な課題である。作製後の熱処理やCMP処理の最適化などにより導波路損失が0.2-0.3 dB/mと材料損失で決まる0.1dB/mに迫る値になってきている。また、LNが持たない光機能の一つが発光であるが、希土類イオンをドープしたLNを用いた研究が進み、ErイオンをドープしたLNを用いたLNOIにおいて、通信波長帯でのレーザや光増幅器が実現されている。また、希土類は量子メモリとしても期待されており、LIONが量子集積フォトニクスのプラットフォームとして今後さらに

注目されると予想される。一方LNでは電流注入によるレーザは実現できないため、III-V半導体レーザをLNOIに集積する研究も進んでいる。

• デバイス

最近、グラフェンをシリコンスロット導波路によるマイクロリング共振器と組み合わせた電気光学変調器が実現され、変調器として変調効率が最も高い性能が達成されている。また、グラフェンは光非線形材料としても高いポテンシャルを持っているが、グラフェンを強い光閉じ込め作用を持つMIM型プラズモニック導波路に装荷したデバイスにより、光非線形性を利用した全光スイッチが実現し、超高速 (260 fs) かつ低消費エネルギー (35 fJ) での動作が達成されている。

戻り光を遮断する光アイソレータは多くの光システムで利用されているが、光集積回路においても、システムを不安定化させる戻り光の抑制が課題であり、光アイソレータに用いられる磁気光学材料の集積化の検討が進んでいる。磁気光学材料YIGをシリコン光回路上に貼り合わせることで偏光無依存型オンチップアイソレータが報告されている。YIGを用いた機能性フォトニックデバイスの研究については、国内では東工大のグループが精力的に取り組んでおり、YIG上に形成したアモルファスシリコン導波路を用いた光スイッチなどを実現している。一方、光通信波長帯で利用できる材料における磁気光学効果は小さいため、その他の方式を活用したオンチップ光アイソレータの実現を目指した研究も進んでいる。SiNマイクロリング共振器上にピエゾ効果を持つAlNを分割して集積し、分割されたAlNに位相の異なる電圧を印加することでリング内に進行波型弾性波を誘起し、これと光の相互作用を用いることで10dBのアイソレーション機能を実現している。また、リング共振器を電氣的に直接変調することによるオンチップアイソレータの検討も進んでおり、LiNbO₃ on Insulator技術を活用したサーキュレータも報告されている。複数のリング共振器の時間変調を活用することで、人工次元と呼ばれるトポロジカルフォトリクス概念の一つを用いたアイソレータが実現できることが知られているが、これに向けたシリコンリング共振器やLiNbO₃リング共振器を用いた人工次元に関する研究も進んでいる。これらの方式では、外部からの変調信号が必要であるが、非線形光学効果を用いることで受動デバイスとして機能するオンチップアイソレータの開発も進んでいる。

メタマテリアルの一種であるメタサーフェスと呼ばれる構造が実用化に向けて研究が加速している。メタサーフェスは、2011年にHarvard大学のCapasso等が、サブ波長の光アンテナアレイを用いて、光散乱の際の位相ずれに人為的な勾配を作ることによって、数10nm程度の薄膜を光が通過または反射する際に任意の波面制御が可能となることを示し、その後、高効率化、低損失化、多機能化の研究が進み、特にスマートフォン等の小型携帯機器への適用を目指して、薄膜レンズとしての応用研究も活発化している。ベンチャーのMetalenzでは、3Dセンシングや偏光による結像レンズ、ドットプロジェクタなどを商品化している。この分野ではアジアも強く、台湾国立大では、機械学習を用いた設計法などを開発し、紫外域も含む幅広い波長域の高性能なメタレンズを開発しており、バイオセンサなどの新しい応用に展開している。韓国のPOSTECHは、メタサーフェスをベースにしたOVD (Optical Variable Device) を提案し、セキュリティ応用をめざした研究開発を行っている。また、日本では2022年にメタマテリアル研究革新拠点が東北大に設立されている。

• 材料

グラフェンを中心に、h-BN、MoSe₂、MoS₂、WSe₂等の単原子層2次元物質やカーボンナノチューブ、半導体ナノワイヤなど様々な新しい性質をもつナノスケール材料をナノフォトリクスと組み合わせデバイス動作させる試みが引き続き増加している。グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドなどの原子層物質におけるモアレ超格子の研究が大きく進展している。原子層物質を積層する際に、同一物質であれば積層角度、また、異種物質であれば積層角度に加え格子定数の違いに由来するモアレ模様が形成される。モアレ模様の周期性によりモアレ超格子が形成され、想像を超える劇的な物性の変化が報告されている。グラフェンでは積層角度によって生じるモアレ超格子により超伝導が発現し、MoS₂/WSe₂のヘテロ構造では格子定数の違いに由来

するモアレ超格子が作り出すポテンシャルによりモアレ励起子が発現する。また、単一光子源となる量子欠陥の研究が発展している。カーボンナノチューブでは分子修飾により局在した励起子状態が実現され、室温かつ通信波長帯での単一光子発生が報告されて以来、注目が集まっている。六方晶窒化ホウ素や遷移金属ダイカルコゲナイドなどの二次元物質では、歪みによるバンドギャップの変調で励起子を閉じ込めることで単一光子源となることが分かってきており、歪みを意図的に導入するためにピラー構造を基板上に加工し、その上に二次元物質を転写して量子欠陥をトップダウンで作製できることが報告されている。

相変化材料とナノフォトニクスとの組み合わせが様々な系で使用される傾向が高まっている。相変化にあたって大きな屈折率変化が得られるGeSbTeが最も例が多いが、シリコンフォトニクスによるナノデバイスと組み合わせる超小型の不揮発性光メモリの実現や、GeSbTeを光ニューラルネットワークにおけるアナログ重みとして用いた例などがある。最近では、通信波長帯で光吸収がより少ない相変化材料として、Ge-Sb-Se-Teや、Sb₂Te₃、Sb₂S₃といった材料が注目を集め、光部品や光デバイスへの適用が報告されている。

高次のトポロジカル状態についても研究が進展しており、コーナー状態の観測等が行われている。最近、光トポロジカル絶縁体のエッジモードを用いたリング共振器による周波数コムが実現され、トポロジカルな性質を反映した特異な特性が報告されている。光のベクトル自由度を反映した光特有のトポロジカルな性質にも興味が高まっている。その代表例として、フォトニック結晶のバンド構造によって生じるトポロジカル偏光特異点が注目を集めている。特にBound states In the Continuum (BIC)と呼ばれる、通常なら結晶の面外に漏れ出る周波数領域にあるモードが、トポロジカルな性質により束縛状態になる特異点の研究が進展している。BICを含むトポロジカル偏光特異点は、構造の対称性を変えることで制御が可能で、波数空間内の移動、トポロジカルチャージ保存則に従った分裂、合体などの現象が次々と提案され実証されている。応用に関連する研究展開として、複数のBICの重ね合わせにより超高Q状態を実現する手法が提案され、この現象を用いたレーザ発振が報告されている。また、BICを用いて光渦を発生する手法が提案・実証され、トポロジカル特異点を用いた応用研究が進みつつある。また、これらの研究では、中国や韓国の研究グループの動きが活発である。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

米国では、集積フォトニクスに関してシリコンフォトニクスの設計・製造・組み立て・パッケージング・検査等のエコシステムを確立するために2015年に始まったコンソーシアムAIM Photonics (American Institute for Manufacturing Integrated Photonics) での取り組みや、2017年に始まったデータセンターのエネルギー効率化を目指すENLITENED (ENergy-efficient Light-wave Integrated Technology Enabling Networks that Enhance Dataprocessing) プログラム、DARPAのもとで2019年からパッケージ総バンド幅100Tbps、エネルギーコスト1 pJ/bitを目指すPIPES (Photonics in the Package for Extreme Scalability)、2020年からLUMOS (Lasers for Universal Microscale Optical Systems)、光技術を用いて低ノイズRF生成を目指すGRYPHON (Generating RF with Photonic Oscillators for Low Noise) などの大型プロジェクトが立ち上がっている。量子集積フォトニクスやダイヤモンド量子フォトニクスについてはNSF、EFRI、ACQUIRE プログラムやMITRE Quantum Moonshot プログラムなどの支援の下で活発な研究活動が行われており、世界をリードしている。

欧州では、Horizon2020の枠組みでフォトニクス集積に関する大型プロジェクト(7-9億円/4年)が進んでいるほか、コンピューティング応用についても4年で5億円規模のプロプロジェクトが複数動いている。LNOI関係でも2022年9月に2つの大型プロジェクトが開始されることになっている。また、大型プロジェクトとして、2013年からGraphene Flagshipがあるが、類似のプロジェクトとしてQuantum Flagshipが2018年に立ち上がり、5000名以上の研究者が参画するテーマに10億ユーロを10年超に渡って支出する計画となっている。

国内においては、光集積技術の大型プロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス」が2022年3月に

終了した。一方、異種材料集積フォトニクスの研究開発を推進するNEDOプロジェクト「異種材料集積光エレクトロニクスを用いた高効率・高速処理分散コンピューティングシステム技術開発」が2021年より開始された。コンピューティング応用に関しては、JST-CREST「最先端光科学技術を駆使した革新的基盤技術の創成」および「情報担体を活用した集積デバイス・システム」において、それぞれ1課題採択され研究が進んでいる。また、2022年度より、科研費・学術変革A「光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成」が立ち上がった。光を用いた量子技術については、JSTムーンショットプログラムや内閣府Q-LEAPなどの多くのプロジェクトで研究が進んでいるが、集積フォトニクスとの融合を目指す大型プロジェクトやLNOIのようなフォトニクスのプラットフォームに挑戦するプロジェクトはまだない。

(5) 科学技術的課題

集積化による高度な機能が次々と実現されているが、集積回路におけるムーアの法則のようなスケーリング則はフォトニクスでは成立しないため、どこまでの集積化が可能なのか、物理的・実用的視点から議論する必要がある。エレクトロニクスにおけるマルチチップ、マルチコアと同様なコンセプトの提供もありうるが、ここでは実装技術が重要な役割を担うと考えられ、3次元フォトニクス実装などの研究が必要になる。また集積化が進むにつれて、個別の素子に求められる一様性、信頼性への要求が高まってくるため、その要求にどう応えていくかも課題である。

シリコンフォトニクスにとって最も重要な適用領域は光インターコネクトであり、この領域で重要な主な指標は、高帯域密度(単位例:Tbps/cm²、Tbps/cm)、低消費電力(単位例:mW/Gbps、pJ/bit)、低コスト(単位例:\$/Gbps)の3つである。高帯域密度化のためには、高速化と高密度化が必要であり、前者は前記の400Gbps実現に向けた取り組みが行われているが、後者は特に光トランシーバに接続する光ファイバのピッチによって制限されていることが多く、この部分の研究開発を加速する必要がある。消費電力は主にLSIと光変調器/受光器間の電気配線の静電容量と電圧振幅で決まるため、低消費電力化の鍵は、この電気配線を短縮する実装構造・方法を電子デバイスの実装構造・方法と整合させることにある。低コスト化のためには、シリコンフォトニクス製品のエコシステムを既存のエレクトロニクスのエコシステムに整合させる必要がある。シリコンフォトニクス技術に他の技術をいかに融合していくかも重要である。現状のシリコンフォトニクスプラットフォームに、本格的なナノフォトニクス技術を一部導入する技術や、化合物半導体や薄膜LiNbO₃、二次元物質などを集積する技術が今後重要となっていくと考えられる。

単一素子の更なる小型化にはナノフォトニクスの活用が欠かせない。波長による制限を超える可能性としてプラズモニクスの利用が考えられる。損失が大きな問題だが一部だけに使用するのであれば大きな問題にならないとの議論もある。プラズモニクス素子とその他の誘電体ベースの光素子の間の高効率接続なども課題になるであろう。一方、同じ機能をより少ない素子数で実現するための新しいアイデアも重要である。その他、トポロジカルフォトニクスや非エルミート光学などの新しい発想で、新機能の発現や高機能化が実現できれば貢献が期待できる。

次世代情報通信での利用が予想されるテラヘルツ帯の利用については、エネルギーコストを抑えながら伝送容量や多接続性などの求められる要求を実現するかが重要である。エネルギーコストを抑えるためには、新原理デバイスやトポロジカル材料などのエマージング材料の積極的活用が重要となると考えられる。

以上のような今後の展開を支えるコア技術は異種材料集積技術となることが予想される。すでに様々な取り組みや研究開発が進んでいるが、これまでのデバイスや材料の枠を超えて新たな集積技術とその活用が求められる。

(6) その他の課題

大規模光電集積によって、光をチップの中に導入することが技術的に可能となるが、それを活用するシステム開発が今後重要となる。現在、光集積を前提とした光演算器の開発が非常に活発に研究開発されているが、

そのような光による演算を活用するためには光電融合情報処理システムのシステムアーキテクチャを新たに構築していく必要があり、そのためには従来の光と電気の枠組みを取っ払った分野融合の研究開発体制が必須となっていくことが考えられる。

シリコンフォトニクスを試作に関して、EUにはEuropractice (imec, LETI, IHP) やSTMicronics、米国にはAIM Photonicsのファウンドリ(シャトル) サービス、シンガポールのIME (Institute of microelectronics) などがある。日本では産総研を主体としたシリコンフォトニクス・コンソーシアムがシャトルサービスを開始し、産総研のスーパークリーンルームでウェハ・プロセスが行える体制が構築されてきている。このようなファブは世界中の人、金、技術、情報等が集まるハブとして機能を持つため、ファブを国内に持つことは、シリコンフォトニクスに限らず、ナノフォトニクス、さらにはナノテク全般で国の競争力を強化するために重要である。このような共同利用の仕組みを構築し、持続可能な形で運営していくには、少なくともファブの維持費を賄える程度の多数の参加者を国内外の多様な分野から集める必要があり、そのためには継続的な国・学会・業界等のリーダーシップやサポートが重要である。

ナノフォトニクスに関して近年中国の研究レベルが急速に伸長してきている。国家から潤沢な資金がナノフォトニクス研究に投入され、最新の作製設備が導入されており、すでに設備的には日本の研究レベルを上回りつつある。一方、日本ではこれまで高い作製技術を持っていた企業における研究開発が縮小してきていることや、大学における博士課程進学率の減少に伴って、マンパワーを投入する研究よりもアイデア勝負のニッチな分野に移行しており、長期的な視点での対策が必要と考えられる。対策の一つは研究者の参画を促す環境整備であり、産総研でのMWP試作のような大規模なものだけでなく、大学クリーンルーム施設などを積極的に活用して萌芽的研究に活用できる小規模で自由度の高い試作プラットフォームを整備することが考えられる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 東大、東工大、NTTを中心にシリコンと化合物半導体や磁性材料等の接合技術、京大、横国大を中心にフォトニック結晶を用いた高性能光デバイス等の研究開発で世界をリードしている。 コンピューティング応用はNTT、東大などで進んでいるが、全体にプレイヤーが少ない。 光物性研究も盛んである。トポロジカルフォトニクス分野の研究も近年増加している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> フォトニック結晶レーザやNEDOプロジェクトで開発された光I/Oコアなど、いくつかの成功事例が見られる。 THz関係は、情報通信技術への応用を意識した研究展開が期待される。 PETRA等の産学共同の研究プロジェクトも比較的初期から走っており、光電融合技術、ナノフォトニクス技術を利用した実用化が進んでいる。 欧米や中国において多額の投資を受けたベンチャーの開発状況と比べると遅れを取り始めている。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> MIT,UCSB等の大学を中心に幅広い研究が行われており、集積化やデバイス関連では圧倒的に世界をリードしている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 複数の関連ベンチャー企業が現れ成長しており、資金と人的リソースの双方で好循環が生まれ始めている。 AIM Photonicsで他国に先んじたシリコンフォトニクスのエコシステムが構築されている。IBM、Intel、Ayar Labsでは本格的な光電融合集積に向けた研究開発が行われている。 CISCO,等が光トランシーバを販売中で、Intelも製品リリースを発表している。

2.3 俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ・ベルギーのGhent大,IMEC、英国のSouthampton大、フランスのLETI等を中心に幅広い研究が行われており、フォトニクス全般で基礎研究が着実に進められている。 ・Imperial College等でメタマテリアル、プラズモニクス関連の純粋基礎研究に関しては伝統的に強く、理論研究者が指導的な立場を果たしている。 ・ナノチューブ分野ではドイツを中心に基礎物性研究が強い。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・IMEC, Eindhoven工科大、CNRS/LETI等にナノファブリケーションの技術が結集され、シリコンフォトニクスと化合物半導体ナノフォトニクスの融合をベースとしたデバイス応用研究、ナノフォトニクスを支えるファウンドリとして重要な役割を果たしている。 ・Horizon2020の中で総額20M€程度がシリコンフォトニクス関係であり、TERABOARD, ICT-STREAMS等、ボードレベル、システムレベルの実用化を意識したものが多い。 ・プロジェクトの支援もあり、コンピューティング応用の研究者も日本に比べて非常に多い。 ・超伝導検出器やファイバーレーザーなど研究用途の装置は欧州製が多く、ほとんどは大学からのスピノフによる。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・フォトニクス材料やメタ表面、トポロジカルフォトニクスなどの分野で多くの質の高い基礎研究が報告されるようになった。 ・LNOIでは米国と並んで重要な拠点となっている。 ・拠点大学には最先端の加工技術装置が導入されており、作製技術も急速に立ち上がりつつある。 ・2次元物質を用いたナノフォトニクスや、トポロジカルフォトニクスなどの新しい分野で、世界を牽引する成果を出している。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・光子技術を中心に顕著な成果を出しており、今後のBeyond 5G/6G関連分野でも活発な技術開発が予想される。 ・集積化については他国に遅れをとっている。 ・国からも応用を目指した研究に多額の資金援助が行われている。特にクリーンルームや製造設備に関しては、最新の設備が導入されて進展が目覚ましい。 ・SMICにシリコンフォトニクス用の製造ラインを構築している。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)では古くからシリコンフォトニクスの基礎研究が行われているが、目立つ成果や産業化に繋がるような成果は見られない。 ・メタマテリアルの一部の分野を除き近年若干陰りが見えるように見える。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ・SamsungがCPUとメモリ間をシリコンフォトニクスで繋ぐ開発を行っているが、全体として目立つ成果・取り組みは見られない

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・光通信（システム・情報分野 2.6.1）
- ・脳型コンピューティングデバイス（ナノテク・材料分野 2.3.2）
- ・量子マテリアル（ナノテク・材料分野 2.5.5）

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

参考・引用文献

- 1) Hailong Zhou, et al., “Photonic matrix multiplication lights up photonic accelerator and beyond,” *Light: Science & Applications* 11 (2022) : 30., <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00717-8>.
- 2) Mihika Prabhu, et al., “Accelerating recurrent Ising machines in photonic integrated circuits,” *Optica* 7, no.5 (2020) : 551-558., <https://doi.org/10.1364/OPTICA.386613>.
- 3) J. Feldmann, et al., “Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core,” *Nature* 589, no. 7840 (2021) : 52-58., <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03070-1>.
- 4) Shuhei Ohno, et al., “Si Microring Resonator Crossbar Array for On-Chip Inference and Training of the Optical Neural Network,” *ACS Photonics* 9, no. 8 (2022) : 2614-2622., <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c01777>.
- 5) Nanxi Li, et al., “A Progress Review on Solid-State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors,” *Laser & Photonics Reviews* 16, no. 11 (2022) : 2100511., <https://doi.org/10.1002/lpor.202100511>.
- 6) Phillip Blakey, et al., “STu5O.4 Quantum Enhanced LIDAR Using Nonlocal Dispersion,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2022), <https://www.cleoconference.org/home/schedule/>, (2022年12月27日アクセス).
- 7) Rui Ma, et al., “Integrated polarization-independent optical isolators and circulators on an InP membrane on silicon platform,” *Optica* 8, no. 12 (2021) : 1654-1661., <https://doi.org/10.1364/OPTICA.443097>.
- 8) Toshiya Murai, et al., “Nonvolatile magneto-optical switches integrated with a magnet stripe array,” *Optica Express* 28, no. 21 (2020) : 31675-31685., <https://doi.org/10.1364/OE.403129>.
- 9) Tomoki Ozawa, et al., “Synthetic dimensions in integrated photonics: From optical isolation to four-dimensional quantum Hall physics,” *Physical Review A* 93, no. 4 (2016) : 043827., <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.043827>.
- 10) Qiushi Guo, et al., “Femtojoule femtosecond all-optical switching in lithium niobate nanophotonics,” *Nature Photonics* 16 (2022) 625-631., <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01044-5>.
- 11) Zhe Wang, et al., “On-chip tunable microdisk laser fabricated on Er³⁺-doped lithium niobate on insulator,” *Optics Letters* 46, no. 2 (2021) : 380-383., <https://doi.org/10.1364/OL.410608>.
- 12) Kazuue Fujita, et al., “Sub-terahertz and terahertz generation in long-wavelength quantum cascade lasers,” *Nanophotonics* 8, no. 12 (2019) : 2235-2241., <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0238>.
- 13) Stephane Boubanga-Tombet, et al., “Room-Temperature Amplification of Terahertz Radiation by Grating-Gate Graphene Structures,” *Physical Review X* 10, no. 3 (2020) : 031004., <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.10.031004>.
- 14) Lu Wang, Jeremy Lim, and Liang Jie Wong, “Highly Efficient Terahertz Generation Using 3D Dirac Semimetals,” *Laser & Photonics Reviews* 16, no. 10 (2022) : 2100279., <https://doi.org/10.1002/lpor.202100279>.
- 15) Mitsuru Takenaka, et al., “High-efficiency, Low-loss Optical Phase Modulator based on III-V/Si Hybrid MOS Capacitor,” *Optical Fiber Communication Conference 2018 (OFC2018)*

- (Optica Publishing Group, 2018), paper Tu3K.3., <https://doi.org/10.1364/OFC.2018.Tu3K.3>.
- 16) Takuma Tsurugaya, et al., “Cross-gain modulation-based photonic reservoir computing using low-power-consumption membrane SOA on Si,” *Optics Express* 30, no. 13 (2022) : 22871-22884., <https://doi.org/10.1364/OE.458264>.
 - 17) Satoshi Sunada and Atsushi Uchida, “Photonic neural field on a silicon chip: large-scale high-speed neuro-inspired computing and sensing,” *Optica* 8, no. 11 (2021) : 1388-1396., <https://doi.org/10.1364/OPTICA.434918>.
 - 18) Bhavin J. Shastri, et al., “Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing,” *Nature Photonics* 15 (2021) : 102-114., <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00754-y>.
 - 19) Kha Tran, et al., “Evidence for moiré excitons in van der Waals heterostructures,” *Nature* 567, no. 7746 (2019) : 71-75., <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0975-z>.
 - 20) Chenhao Jin, et al., “Observation of moiré excitons in WSe₂/WS₂ heterostructure superlattices,” *Nature* 567, no. 7746 (2019) : 76-80., <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0976-y>.
 - 21) Huan Zhao, et al., “Site-controlled telecom-wavelength single-photon emitters in atomically-thin MoTe₂,” *Nature Communications* 12 (2021) : 6753., <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27033-w>.
 - 22) Zhiwei Lin, et al., “DNA-guided lattice remodeling of carbon nanotubes,” *Science* 377, no. 6605 (2022) : 535-539., <https://doi.org/10.1126/science.abo4628>.
 - 23) Masaaki Ono, et al., “Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides,” *Nature Photonics* 14 (2020) : 37-43., <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0547-7>.
 - 24) Ryoichi Sakata, et al., “Dually modulated photonic crystals enabling high-power high-beam-quality two-dimensional beam scanning lasers,” *Nature Communications* 11 (2020) : 3487., <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17092-w>.
 - 25) Toshihiko Baba et al., “Silicon Photonics FMCW LiDAR Chip With Slow-Light Grating Beam Scanner,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron* 28, no. 5 (2022) : 8300208., <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2022.3157824>.
 - 26) Amir H. Atabaki, et al., “Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip,” *Nature* 556, no. 7701 (2018) : 349-354., <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0028-z>.
 - 27) Francesco Testa, et al., “Optical Interconnects for Future Advanced Antenna Systems: Architectures, Requirements and Technologies,” *Journal of Lightwave Technology* 40, no. 2 (2022) : 393-403., <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3113999>.
 - 28) Wei Ting Chen, et al., “A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible,” *Nature Nanotechnology* 13, no. 3 (2018) : 220-226., <https://doi.org/10.1038/s41565-017-0034-6>.
 - 29) Chunghwan Jung, et al., “Metasurface-Driven Optically Variable Devices,” *Chemical Reviews* 121, no. 21 (2021) : 13013-13050., <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00294>.
 - 30) Chaoran Huang, et al., “Demonstration of scalable microring weight bank control for large-scale photonic integrated circuits,” *APL Photonics* 5, no. 4 (2020) : 040803., <https://doi.org/10.1063/1.5144121>.
 - 31) J. Feldman, et al., “All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning

- capabilities,” *Nature* 569, no. 7755 (2019) : 208-214., <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1157-8>.
- 32) Farshid Ashtiani, Alexander J. Geers and Firooz Aflatouni, “An on-chip photonic deep neural networks for image classification,” *Nature* 606, no. 7914 (2022) : 501-506., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04714-0>.
- 33) Cheng Wang, et al., “Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages,” *Nature* 562, no. 7725 (2018) : 101-104., <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0551-y>.
- 34) Katsumasa Yoshioka, et al. “Ultrafast intrinsic optical-to-electrical conversion dynamics in a graphene photodetector,” *Nature Photonics* 16 (2022) : 718-723., <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01058-z>.
- 35) Ipshita Datta, et al., “Low-loss composite photonic platform based on 2D semiconductor monolayers,” *Nature Photonics* 14 (2020) : 256-262., <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0590-4>.
- 36) Chenghao Wan, et al., “Switchable Induced-Transmission Filters Enabled by Vanadium Dioxide,” *Nano Letters* 22, no. 1 (2022) : 6-13., <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02296>.
- 37) Taiki Yoda and Masaya Notomi, “Generation and Annihilation of Topologically Protected Bound States in the Continuum and Circularly Polarized States by Symmetry Breaking,” *Physical Review Letters* 125, no. 5 (2020) : 053902., <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.053902>.
- 38) Bo Wang, et al., “Generating optical vortex beams by momentum-space polarization vortices centred at bound states in the continuum,” *Nature Photonics* 14 (2020) : 623-628., <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0658-1>.
- 39) Kenta Takata, et al., “Observing exceptional point degeneracy of radiation with electrically pumped photonic crystal coupled-nanocavity lasers,” *Optica* 8, no. 2 (2021) : 184-192., <https://doi.org/10.1364/OPTICA.412596>.
- 40) 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター「無線・光融合基盤技術の研究開発 ～次世代通信技術の高度化に向けて～」(令和4年3月) <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/SP/CRDS-FY2021-SP-07.pdf> (2023年1月20日アクセス)

2.3

俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用