

## 2.3.2 集積フォトニクス

### (1) 研究開発領域の定義

光の持つ多様な機能を利用して、高性能/高機能な光デバイスやそれらを集積化したモジュール・装置・システムを実現することにより、光の持つ高速性と低遅延性、低消費電力性を最大限に活かすとともにコストの低減を実現し、新たな機能と価値の創造をめざす研究開発領域である。光の技術は情報通信、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、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、多様なデバイスの集積による高機能化・多機能化、多様な材料・デバイスの集積化技術などの研究開発課題がある。

### (2) キーワード

光配線、光電子融合、光集積回路、ハイブリッド集積、シリコンフォトニクス、ナノフォトニクス、量子フォトニクス、プラズモニクス、フォトニック結晶、メタマテリアル、微小共振器、トポロジカルフォトニクス、光ニューラルネット、光コンピューティング、フォトニックアクセラレータ、オンチップ光コム、光スキミング、光相変化材料、薄膜強誘電体、ナノカーボン、二次元材料

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

光・フォトニクス技術は、光通信、照明や表示機器のほか太陽光発電など日々の生活で広く利用されているだけでなく、加工技術や測量技術を活用した製造業、農業、漁業の分野、光コヒーレンストモグラフィ（OCT）や内視鏡など医療の現場などにも浸透している。また、最近では高度なサイバーフィジカルシステム（CPS）による 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分野への光・フォトニクス技術の期待も高まりつつある。このように、光・フォトニクス技術は、現在および将来における安全・健康・快適な生活を実現するうえで欠くことのできない基幹技術の1つである。集積フォトニクス技術はこの光・フォトニクス技術の一領域であり、各種光デバイスを高度に集積化することにより、光のもつ高速性と低遅延性、低消費電力性を最大限に活かすとともにコストの低減を実現し、新たな機能と価値の創造をめざすものである。ここでは、主に光通信・光配線、光コンピューティング、光センシングなどの光デバイスの高度な集積化が必須になる応用領域と、その基盤となるシリコンフォトニクス、ナノフォトニクス、ナノ材料、ハイブリッド集積技術などについて記載する。

近年のIoTやビッグデータ解析等の普及により、通信の主体は従来の人と人の中から機械と機械の間に移っており、さらにAIの普及により機械学習・深層学習による膨大な学習データを処理する必要から、データセンター等のシステムで処理される情報量のニーズは今後も爆発的に増大すると予測される。これらの莫大なデータを解析して新たな価値を創出するためには、これまで以上に高速かつエネルギー効率の高い情報処理技術が不可欠である。また、自動運転など実時間性が重要な応用では、低遅延な情報伝送・処理が必須である。これらの要求を満たすために重要な役割を担うのが、光配線や光の特性を活かした新たなコンピューティング技術であり、それらを実現するシリコンフォトニクスやナノフォトニクスなど集積フォトニクスへの期待が高まっている。また、量子情報分野においては、量子情報の媒体である光子に対する量子演算をスケールアップで安定して実現するプラットフォームとして、集積量子フォトニクスの発展が期待されており、計測や分

光技術においても、システムの小型化・安定化などを可能にする集積フォトニクス技術が注目されている。そのなかでも、シリコンフォトニクスは、設計・製造・組み立て・検査等の全ての段階で、既存のシリコン電子デバイスとの互換性を図ることにより、既存のシリコン・エレクトロニクスの膨大なリソースを活用することが可能になり、チップ間やチップ内光配線に適用できるほど小型化・低コスト化ができる技術として期待されている。

### 【研究開発の動向】

集積フォトニクスの主要ターゲットの1つが、光配線・光インターコネクトであり、将来的にはチップ内への導入も期待されている。この光配線の実現に向けた研究開発は国内外で継続的に進められており、シリコンフォトニクス技術を用いた多チャンネル光送受信機や光モジュールなど、各国で多くの取り組みが進んでいる。また、最近の動向として、ニューラルネットワーク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コンピューティング技術への応用をめざした研究が進められている。集積フォトニクス技術で実現されたこれらの専用プロセッサ（フォトニックアクセラレータ）に関連する研究が欧米を中心に盛り上がっている。国内でもJST-CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術」で光パルスゲートコンピューティングなどの研究が進んでいる。量子情報の分野でも集積フォトニクスの活用が進んでいる。シリコン光回路を用いた光量子状態の生成や量子テレポーテーションの実現など多くの進展がみられ、化合物半導体量子ドットやダイヤモンド色中心を用いた高性能単一光子源や超伝導体単一光子検出器をシリコン/SiNの光回路に集積して量子集積光回路を実現しようとする試みがある。

集積フォトニクスは情報処理分野以外への応用も広がりを見せている。自動運転における測距・センサ技術として重要なLiDAR（Light Detection and Ranging, Laser Imaging Detection and Ranging）については、大規模光集積回路の実現が可能なシリコンフォトニクスを活用した非機械式ビームスキニングによる高精度・小型化・低コスト化の実現が期待されている。ここでは、比較的高パワーなレーザダイオードが必要であるが、人間の目に損傷を与えないアイセーフの観点から、従来の通信波長帯で使用されていた近赤外あるいは中赤外領域の光が適している。集積フォトニクスを活用したオンチップ光コムも注目を集めつつあり、計測や分光のほかマイクロ波フォトニクスへの応用に関する研究が多く報告されている。さらに、オンチップ加速器やオンチップ光ジャイロスコープ、光集積回路を用いた超解像イメージングなど、欧米を中心に集積フォトニクスの新たな応用研究も進んでいる。

超小型化と低消費エネルギー化をめざして、さまざまなナノフォトニクス技術がデバイスに応用され始めている。発光デバイスとしては、ミクロンスケールまたはそれ以下の超小型のレーザがさまざまなシステムで実現されている。フォトニック結晶ナノ共振器構造を用いたレーザでは、極低しきい値での室温連続電流注入発振が達成されている。受光器としては、フォトニック結晶をベースとしたさまざまな超小型受光器が研究されており、プラズモニクスによる光アンテナ効果を利用した小型化も図られている。光変調器、スイッチ関連では、シリコンフォトニクスを中心にさまざまな電気光学変調器が開発されているが、近年プラズモニクス構造をベースとして非線形ポリマーを組み合わせた素子が開発され、性能が飛躍的に向上しつつある。光メモリとしては、微小共振器を用いた双安定レーザ型が欧州で研究され、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。

シリコンフォトニクスを中心に発展してきた集積フォトニクスの更なる高機能化・高性能化を実現するため、各種光素子をそれぞれに適した材料で実現し集積化する異種材料集積（ハイブリッド集積）技術への注目・期待がこれまで以上に高まっている。基板貼り合わせ技術や転写プリント法などの新たな集積化技術、シリコ

## 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用

ン基板上への直接成長技術など、1つのチップ上へのハイブリッド集積技術が大きく進展している。また、個々のチップを集積化する実装技術においても光ワイヤリングと呼ばれる手法などで進展がみられる。さらに、強誘電体を含むさまざまな材料のシリコン基板へのハイブリッド集積とその光機能実証が報告されるなど、集積フォトリソの可能性が広がりつつある。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### ○光配線・光電子融合

光配線では伝送容量の増加をめざしたシリコンフォトリソ集積回路の多チャンネル化に関する研究が各国で進んでいる。国内ではPETRA（技術研究組合光電子融合基盤技術研究所）が25 mm<sup>2</sup>に12チャンネルが集積された300 Gbps光送受信機を実現しており、2020年にはインテルから総バンド幅1.6 Tbpsのシリコンフォトリソ集積回路が報告されている。また、波長多重技術による大容量化の検討も進んでおり、PETRAは小型16波長多重光回路を実現し、世界に先駆けて1波長あたり32 Gbpsの高速信号伝送に成功している。光電子融合技術については、MITを中心とした米国のグループがポリシリコン層を光学層に用いてバルクCMOSやFinFETとの一括集積が可能なプラットフォームを開発し、CMOS集積WDM光チップの作製と動作実証を報告するなどの進展がみられる。

##### ○光演算技術、不揮発光メモリ

光を用いたアナログ演算、特にニューラルネットワーク演算の研究開発が急速に活発化している。ニューラルネットワーク演算においてもっとも負荷が大きい演算はベクトル行列積演算（積和演算）であるが、光を用いると積和演算を高速、低消費電力に実行できる点をもっとも注目されている。Mach-Zehnder干渉器（MZI）をマトリクス状に集積した回路で任意のユニタリ行列演算ができることが従来から知られていたが、MITのグループは特異値分解を用いてこの回路で任意の行列演算ができることを利用したニューラルネットワーク演算器を提案し、シリコンフォトリソを用いて作製した集積回路で5入力信号について原理実証している。彼らはこの方式を、Recurrent neural network（RNN）やConvolutional neural network（CNN）に用いることを提案している。Stanford大学のグループは、逆発展による学習も光で行う回路を提案している。この方式では、上述のMZIによるマトリクス回路において各MZIに受光器を配置し、この測定データを用いて光を伝搬させながら学習を行う。

オンチップ光メモリとして最近注目を集めているのが、相変化材料を用いた不揮発性光メモリである。これはGe<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te（GST）を導波路上に装荷した構造で、GSTが結晶相とアモルファス相で大きく異なる光学特性を示すことを利用したものである。2019年には、この構造を活かしたニューロモルフィックコンピューティングの光アクセラレータが報告された。これは、SiN光導波路およびリング共振器からなる光回路であるが、一部にGSTが装荷されており光強度に応じて応答が変化するように工夫されており、4ニューロンの光回路で文字認識などに成功している。

##### ○LiDARとオンチップ光コム

LiDAR応用では、光フェーズドアレイアンテナ方式と日本発のスローライト方式の検討が進んでいる。前者については、3次元集積技術を用いた光フェーズドアレイと駆動CMOSの単一チップ集積と、それを用いたコヒーレントLiDARのデモンストレーションなどの進展がみられる。また、スローライト方式はJST-ACCELプ

プロジェクトで研究開発が進んでおり、フォトニック結晶スローライト導波路を用いて高い解像度で広角なビームスキャンニングが報告されるなど進展をみせている。オンチップ光コムはSiNマイクロリング共振器などにおける非線形光学効果を利用した光コム発生技術である。化合物半導体光増幅器とSiNチップに形成されたループミラーで構成された励起用レーザと、同じSiNチップ上に形成された高Q値リング共振器を用いた乾電池駆動のオンチップ光コムなども報告されており、実応用が近づきつつある。

### ○シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクスによる光トランシーバの開発ターゲットは800 Gbpsに移っている。100 Gbpsをアナログ2値振幅変調で行うことは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など、いずれかと組み合わせるものと予想される。また、LSIからの電気信号インターフェースとしてQSFP (quad small formfactor pluggable) やon-board opticsを用いる標準化も進められてきており、高速コンピューティングにおける光インターコネクットの重要性が益々重要となってきた。

シリコンフォトニクスにおいて重要課題の1つであるレーザ光源の実装技術に関しては、PETRAが行っているフリップチップ実装が主流となりつつあるが、従来の化合物半導体レーザの貼り合せ技術に代わって、量子ドットをSi上に直接成長する技術が目覚ましく進歩してきており、実用レベルの光出力と閾値が達成されている。また、最近では所定位置にレーザ素子を貼り合わせるトランスファー・プリンティング技術も完成度を増しており、光集積回路への機能デバイスの表面実装技術も今後注目される。

光スイッチの研究開発が活発化している。これは、現在データセンターなどで用いられている電気のパケットスイッチが帯域・遅延時間・消費電力などの観点でシステム全体のボトルネックになりつつあり、その解決手段として光サーキットスイッチに対する期待が高まっているためである。2次元MEMSとシリコン導波路を組み合わせた構成で、従来に比べて約1桁低損失な光スイッチが報告されており、小型・低価格・大規模化を同時に実現できる方式として注目されている。

### ○量子集積フォトニクス

シリコンフォトニクスを利用した量子光回路が進展している。シリコンモノリシック光集積回路では、オンデマンドで決定論的に単一光子の生成が可能な単一光子源の集積化が困難なため、ハイブリッド集積技術を用いた量子光回路の実現を目指す研究が加速している。化合物半導体量子ドットからなる量子光源を用いたハイブリッド集積量子光回路の研究が欧米を中心に進んでいる。国内では転写プリント法(後述)を用いて量子ドット単一光子源をCMOSファウンドリで作製した光回路に集積する研究などがある。最近の成果として注目されるのは、MITのグループによるAlN光回路にダイヤモンド色中心を用いた単一光子源128チャンネルを集積した量子光回路の報告である。この報告は量子光源の集積にとどまるものであるが、今後量子中継器や量子演算チップへの展開が期待されている。ダイヤモンドを用いた量子情報技術はさまざまな形で進展しており、日本はダイヤモンドに関する高い材料技術を有するものの、その集積化をめざした取り組みでは海外グループが大きくリードしている。

### ○ナノフォトニクス

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。2011年にHarvard大学のCapassoらがサブ波長の光アンテナアレイを用いて、数十nm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たのが研究の出発点になり、高効率化、低損失化、多機能化の研究が進んできたが、近年は薄膜レンズとしての研究が活発化している。スマートフォン等の小型携帯機器への適用をめざして、波長収差が補正され広帯域な白色光に対して像を結ぶアクロマティックレンズが開発されつつある。

プラズモニクスによるナノスケールの閉じ込めサイズを持つ導波路にさまざまな機能材料を組み合わせ、電気光学変調器や受光器を実現する研究が加速しており、光電変換器の小型化、超高速化が進展している。変調器としては、スイス連邦工科大学 (ETH) の Leuthold の研究グループでは、MIM (金属・絶縁体・金属) 構造の導波路の 100 nm 程度のギャップに電気光学ポリマーを埋め込み、短尺で超高速の Mach-Zehnder 型電気光学変調器を実現している。その性能は年々向上し、近年は 100 GHz を超える周波数で動作しており、またリング共振器と組み合わせることによって、低ロス化 (挿入損失 2.5 dB) にも成功している。ナノフォトニクス変調器の材料は近年さまざまなものが用いられるようになってきている。薄膜 LiNbO<sub>3</sub> を用いたメンブレン型の電気光学変調器は、非常に低い電圧で超高速動作を達成している。また、プラズモニクスに ITO を組み合わせた構成で超小型の電気光学変調器も報告されている。モード体積が立方ナノメートルを下回るピコ共振器が注目されている。金ナノ粒子と金基板の間に形成されるプラズモニック共振器で実現され、室温で単一分子との強結合を実現するなどこれまで難しいと考えられてきた条件下での量子電気力学効果の活用にも道を拓いた。最近では遷移金属ダイカルコゲナイドとの組み合わせも報告されるなど展開を見せている。

### ○トポロジカルフォトニクス、非エルミート光学

「物質におけるトポロジカル理論」(2016年のノーベル物理学賞) の概念が光学の分野に導入され、トポロジカルフォトニクスと呼ばれる研究が活発化している。フォトニック結晶やメタマテリアルなどの人工ナノ構造を用いて、さまざまな興味深いトポロジカルな性質が見つかり、活発な研究が世界中で行われている。当初は理論研究やマイクロ波領域での原理検証実験が主であったが、近年、光学領域における実験実証が急速に進みつつあり、光トポロジカル絶縁体の作製や、光トポロジカル絶縁体のエッジモードによるレーザ発振などが報告されている。また、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特異点が近年注目を集めており、トポロジカル特異点の重ね合わせにより超高 Q 状態を実現する手法や、一方向性の束縛状態の形成等が報告されている。これらの分野では特に中国の研究者の動きが活発である。

トポロジカルフォトニクスと並行して近年活発化しているのは、非エルミート光学と呼ばれる分野である。これは元々、利得と損失がある PT 対称性と呼ばれる対称性をもって配置される場合に、例外点 (Exceptional Point: EP) と呼ばれる状態を境にして、光が複素固有値状態から実固有値状態に転移する現象に興味を持たれて研究が始まったものである。その後、この EP 付近でさまざまな興味深い現象が発現することがわかり、幅広い研究に展開しつつある。また、基礎研究の段階であるが、EP 付近でのセンサの感度向上、非対称的なモード変換器、光の軌道角運動量を持ったレーザ発振、屈折率虚部を用いたレーザビームのステアリング技術などの興味深いデバイスが実現されており、今後の研究の進展が期待されている。

### ○ナノマテリアル

近年グラフェンを中心に、h-BN、MoSe<sub>2</sub>、MoS<sub>2</sub>、WSe<sub>2</sub>等の単原子層二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さまざまな新しい性質を持つナノスケール材料をナノフォトニ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。グラフェンに関しては、特に受光器、変調器の研究が進展している。MIM 型のプラズモニック導波路にグラフェンを結合させた構造において、photo-bolometric 効果を用

いて110 GHzの帯域で0.5 A/Wという高い受信感度が報告されている。また、グラフェンの上に絶縁体を挟んで分離電極を設けることにより、プラズモニックな増強効果と同時にPIN接合を形成する構造で、photo-thermoelectric効果を利用して12.2 V/Wという高い外部変換効率も報告されている。電気光学変調器に加えて、最近では位相変調器としての動作も報告されている。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おり、MIM型導波路にグラフェンを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報告されており、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。

MoSe<sub>2</sub>などの遷移金属カルコゲナイドは、大きな光非線形性や励起子効果、強い発光などグラフェンにはない顕著な光学的性質を持つため、デバイス応用をめざした研究が進行している。例えば、Columbia大学のグループによりWS<sub>2</sub>を装荷したSiNマイクロリング共振器を用いた電気光学変調器の実現が報告されている。またこれらの物質はVan der Waals結合により多彩な材料を多層化してヘテロ接合を作ることができるため、新しい物性制御の可能性を持つ材料としても注目されている。MoTe<sub>2</sub>とグラフェンのヘテロ構造をSi細線導波路上に装荷した光通信波長の受光器が最近実現されており、50 GHzの動作帯域、0.2 A/Wの感度が報告されている。

### ○強誘電体材料の集積フォトニクス応用

電気光学効果が大きいニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>:LN)の薄膜化技術がここ数年で大きく発展し、集積フォトニクスに応用しようとする試みが進んでいる。光通信の高速光変調器として利用されてきたLNを利用することで、集積フォトニクスにおける変調速度の更なる向上が期待できる。Harvard大学のグループは、CMOSで駆動できる1.4 Vの動作電圧で3 dB帯域45 Gbpsを超える薄膜LN変調器を実現し、CMOS直接駆動による75 Gbpsの信号変調などを実証している。また、中国の研究グループからはシリコン導波路とのハイブリッド集積を実現し、100 Gbpsを超える変調も報告されている。LNのナノ加工技術の発展により高品質なオプトメカニクス結晶の実現も可能になっており、量子情報分野におけるトランスデューサへの展開も期待されている。優れた電気光学特性を有するチタン酸バリウム(BaTiO<sub>3</sub>:BTO)薄膜の作製と集積フォトニクス応用に関する研究も欧州で進んでおり、シリコン光導波路をハイブリッド集積した変調器が報告されている。さらに、シリコン基板上に集積されたBTO光変調器において、半導体光変調器では実現が難しい極低温(4 K)高速変調(20 Gbps)動作も報告されており、量子集積フォトニクスへの応用も期待されている。

### ○ハイブリッド集積技術

ハイブリッド実装およびハイブリッド集積に関する研究はこれまでもその重要性は認識されてきたが、モノリシック集積の限界を打破し集積フォトニクスの可能性をさらに広げるため、その重要性がますます高まっている。リップチップ実装など個々のチップを集積・実装する技術はすでに広く利用されているが、最近の話題として光硬化で形成したポリマー導波路を用いたチップ間の光接合技術(光ワイヤリング)の進展があげられる。隣接して配置された半導体レーザアレイとシリコン導波路チップの接続、シリコン導波路から光ファイバへの接続が0.4~0.7 dB程度の損失で実現されている。

基板貼り合わせ技術は、シリコン基板上に大面積一括で化合物半導体薄膜などの異種材料を接合できる技術であり、広く利用されている。国内では東京工業大学のグループなどで光集積をめざした貼り合わせ技術の研究が進んでいる。また、NTTグループは、InP系薄膜の貼り合わせと再成長技術を用いてメンブレンレーザの研究を進めている。最近ではエバネッセント結合によりレーザ出力のシリコン導波路への結合にも成功し、集積フォトニクスの光源技術の1つとして注目されている。さらに、この技術を適用できる材料系が拡大して

おり、高速光変調器への応用が可能な強誘電体や、オンチップ光非線形素子への応用をめざしたGaPのシリコン基板上への貼り合わせなどが報告されている。

転写プリント法は、デバイス加工を施した後に光回路上に集積することができる技術である。集積化したい光素子にゴムを押しつけ急速に引き剥がすことで素子をピックアップする。その後、光回路上の所望の場所に配置し、ゆっくりとゴムを引き剥がすことで光素子が光回路上に集積される。一連の作業は光学顕微鏡下で行われるが、研究室レベルではかなり高精度（位置合わせ誤差100 nm以下）が実現されており、本手法を用いたシリコン光回路への化合物半導体光素子や量子光源の集積が報告されている。個々のデバイスを集積する技術としてマイクロプローブを用いた手法も知られており、ダイヤモンド量子光回路をはじめ量子フォトンクス分野を中心に利用されている。これらの手法は、スループット向上の課題があるが、材料を選ばない集積技術であるとともに、良質なデバイスを選別し導入することができるのが魅力である。

シリコン基板上への化合物半導体の直接成長に関する研究の歴史は長い。シリコンでは実現が困難な高効率光源をシリコン基板上に直接形成できる魅力は大きい。近年、応用上重要な温度安定性や反射光耐性に優れた量子ドットレーザをシリコン基板上に直接形成する技術が大きく進展しており、米国、欧州、中国、国内では東京大学のグループからシリコン上直接成長による量子ドットレーザの発振が報告されている。UCSBのグループからは、Si基板上への直接成長で形成した受動モードロック量子ドットレーザとそれを用いたテラビット超の伝送容量実験などが報告されている。

### [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2015年に始まったAIM Photonics (American Institute for Manufacturing Integrated Photonics) での取り組みに加え、2017年からはデータセンターのエネルギー効率化をめざすENLITENED (ENergy-efficient Light-wave Integrated Technology Enabling Networks that Enhance Dataprocessing) プログラムがスタートしている。また 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をめざすPIPES (Photonics in the Package for Extreme Scalability)、2020年からLUMOS (Lasers for Universal Microscale Optical Systems) などの大型プロジェクトが続々と立ち上がっている。LUMOSはシリコンなどの光集積回路に光利得を有する化合物半導体を集積するハイブリッド集積をめざすもので、集積ハイパワーレーザや可視域への応用も視野に計画されている。量子集積フォトニクスやダイヤモンド量子フォトンクスについては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Horizon 2020のなかで、集積フォトニクスに関するプロジェクトが多く進行している。シリコンフォトニクスを含む光エレクトロニクス関連のプロジェクトは、2015～2020年の間で42.4 Mユーロで12プロジェクトが登録されており、STMicroelectronicsをファブとして利用して、伝送容量2 Tbps、消費電力2 mW/Gbps、コスト0.2 ユーロ/Gbpsが目標値となっている。ハイブリッド集積に関するプロジェクトとして、Southampton大学などを中心にIII-V半導体のSOI基板への集積や量子ドットレーザの直接成長技術を対象としたPICTURE (Photonic Integrated Circuits using a Thin and UnifoRm Bonding LayEr) プロジェクトが2020年末まで予定されている。また、2019年には、転写プリント法を用いた異種材料集積・光電集積により高速光トランシーバの実現をめざすCALADANプロジェクトがIMECやGent大学(ともにベルギー)などが参加してスタートした。このプロジェクトではコスト目標0.1 ユーロ/Gbpsが掲げられている。その他、S2QUIP (Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics) など、量子集積フォトニクス

## 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用

に関するプロジェクトも進行中である。

日本においては、2022年3月まで技術組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）をベースに、総バンド幅10 Tbpsを目標としたNEDOプロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス」が進行中である。2017年には同技術をベースにして光トランシーバの製造、販売を司る会社（アイオーコア）が設立されている。また、2019年度からNEDO先導研究プログラムで「異種材料集積による10テラビット級低消費電力光伝送デバイス技術開発」が開始されている。さらに、2020年度にはJST未来社会創造事業大規模プロジェクト型「トリリオンセンサ時代の超高度情報処理を実現する革新的デバイス技術」の公募が行われて「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」が採択され、新たな展開が開始されると期待される。

### (5) 科学技術的課題

当面、シリコンフォトニクスにとってもっとも重要な適用領域は光インターコネクタであり、この領域で重要な主な指標は、高帯域密度（単位列：Tbps/cm<sup>2</sup>、Tbps/cm）、低消費電力（単位列：mW/Gbps、pJ/bit）、低コスト（単位列：ドル/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400 Gbps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。前述の米国のAIM Photonicsは、これをめざした動きである。

ナノフォトニクス分野全体で見ると、引き続き新奇な現象や従来の常識を打ち破るような特性が達成され続けており、アカデミックな成果は出続けていくものと思われる。一方、ナノフォトニクスの根幹を支えるナノ加工技術に関しては、依然、研究室レベルの技術に頼るところが多い。今後は大規模集積化と大量生産が可能なナノフォトニクス作製技術の開発が重要なポイントになる。シリコンフォトニクスのなかにどれほどナノフォトニクスに関連した作製技術を導入できるか、または、既存のシリコンフォトニクス技術で作製可能なナノフォトニクス構造の範囲を広げていくかが鍵となると思われる。

集積フォトニクスでは、高性能光素子を実現する物理と高度な加工・プロセス技術、それらの特性を劣化させることなく大規模集積化する技術が必要である。単体素子で高性能な素子も集積化には適さないことも少なくない。デバイス開発においても性能の追求とともに集積化を意識した研究開発が今後重要になってくる。集積化技術においては、プロセス整合性やスループット、更には歩留まりやコストも考慮して、個々のデバイス性能を最大限に引き出す技術の開発が求められる。特に光子1つひとつを扱う量子集積光回路では、個々のデバイスに極限的性能が求められるため、古典光を用いる集積フォトニクス以上に高度な技術開発や新たな発想が求められることが予想される。また、一般に集積化技術は既存デバイスに対応して技術開発が行われるが、集積フォトニクスのパラダイムシフトをもたらすデバイスや材料の革新に対して柔軟に対応できる手法の開発も期待される。その観点から、研究開発が活発となっているハイブリッド集積技術の更なる高度化に対する期待は大きい。一方、量子応用を含む集積光回路の一層の高機能化・高性能化をめざし、今後はナノフォトニクスデバイスの導入も進むことが予想される。そのため、シリコンフォトニクス作製技術を含め加工技術の一層の微細化・高精度化も重要になると考えられる。



### (6) その他の課題

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STMicroelectronics、米国にはAIM Photonicsのファウンドリ (シャトル) サービスがある。また、シンガポールの科学技術庁がIME (Institute of microelectoronics) のシリコンフォトニクス部門を法人化することを決定し、少量・多品種生産ができるアドバンスド・マイクロ・ファウンドリ (AMF) が発足した。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いる。独自ファブを持たない日本の大学・企業は個別にシンガポールのIMEを利用することが多かったが、研究開発としては産総研のシリコンフォトニクス・コンソーシアムのシャトルサービスを利用する動きや、また商用としてはジャパンセミコンダクター (JSC) を生産ファブとして利用する動きも出てきている。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になると考えられる。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まかな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が求められる。

集積フォトニクスやナノフォトニクスの研究には高度な技術が要求されるため、研究者や企業にとって新たに参入することは必ずしも容易ではない。産総研でのMWP (Multi Project Wafer) 試作が利用できるようになったことは、今後の国内関係研究の活性化に大きく貢献すると期待できる。一方、今後重要となる化合物半導体の加工・集積についても同様な取り組みが実施されることが望まれる。企業が請け負うことも考えられるが、設備投資や運転経費などを考えると、国の施策としての検討も必要と考えられる。集積フォトニクスはさまざまな技術が必要とされる領域融合研究であり、異なった分野を専門とする研究者間の共同研究が本質的に重要である。異分野の研究者間の連携・融合をより強力に推し進めるための、大型プロジェクトやその他の枠組みの積極的な活用が望まれる。

### (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"> <li>東大、東工大、NTTなどでハイブリッド集積技術の研究が進んでいる。また、JST-CRESTではNTTの光パスゲートコンピューティングなど、フォトニクスを活用した新たな光情報処理技術の研究が複数進行している。</li> <li>オンチップ光コムの研究は国内では慶大が孤軍奮闘状態。</li> <li>ダイヤモンドを用いた量子情報技術、量子センサ技術に関する研究は、東工大、横国大、慶大、京大、阪大などで進んでいるが、その集積化研究は未着手。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEDOプロジェクトで開発された「光I/Oコア」を用いたオンボード光モジュールやAOCなどが開発されている。また、産総研でもMPWサービスが始まり国内研究機関や企業で活用され始めている。</li> <li>複数企業が参加するNEDO先導研究プログラムにおいて、ハイブリッド集積技術の開発とその低消費電力高速光伝送デバイス技術への応用をめざした取り組みが開始されている。</li> <li>JST-ACCELではスローライトを利用したオンチップLiDARの研究開発も進んでいる。</li> </ul>

米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>シリコンフォトニクスでは、MIT、UCSB等の大学を中心に幅広い研究が行われており、世界をリードしている。</li> <li>ナノフォトニクスの基礎研究に関しては、MIT、Stanford大などに各分野において世界をリードする研究者がおり、活発な研究を行っている。</li> <li>多くの大学、研究機関で集積フォトニクス関連の研究が活発に行われている。大規模光回路関連ではMITが強力。UCSBは量子ドットレーザ直接成長技術で顕著な業績を挙げている。</li> <li>量子集積フォトニクスでは、MIT、Harvard大、Maryland大、NISTなどが中心となっている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>AIM Photonicsの設立に続いて、多くの関連プロジェクトが始動している。</li> <li>2020年に入ってからIntelやIBMから最新の成果が発表されるなど、企業の研究が堅調。</li> <li>Harvard大の薄膜LN技術を基礎にスタートアップ会社が設立された。</li> <li>集積フォトニクスを利用したニューラルネットワークに関するスタートアップ会社からは光AIチップのプロトタイプが発表されている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>フォトニクス全般で基礎研究が着実に進められている。</li> <li>集積フォトニクスでは、Southampton大、Bristol大(英)、Gent大、IMEC(ベルギー)、KIT(独)、Leti(仏)などが、量子集積フォトニクスについては、Bristol大(英)、KTH(スウェーデン)、Copenhagen大(デンマーク)、CNRS(仏)、Würzburg大(独)などが中心。</li> <li>オンチップ光コム分野ではEPFL(スイス)が世界をリードしている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>集積フォトニクスに関係する多くの研究プロジェクトが走っており活発である。</li> <li>IMECは欧州の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。</li> <li>ごく最近IMECと英国・CST globalの連携が発表されるなど、特にハイブリッド光集積分野での応用研究・開発が進んでいる。</li> <li>IBMチューリッヒでも光メモリを用いたインメモリコンピューティングなどの研究が進んでいる。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>ナノフォトニクスなどの分野では、欧米からの帰国組を中心に多くの発表があり、存在感を高めている。</li> <li>薄膜LN技術などの注目に値する成果もある一方、集積化技術、集積フォトニクスという点では目立った成果は多くはない。</li> <li>量子情報技術・量子集積フォトニクスについては、中国科学技術大学や北京大学などのグループが世界レベルで活躍している。</li> <li>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。</li> <li>近年、遷移金属カルコゲナイド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に、優秀な研究者が多数参入し、国から潤沢な資金を受けて顕著な研究成果を上げつつあり、成長が著しい。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>HuaweiやHiSiliconなどでシリコンフォトニクスチップの研究開発が行われており、今後大きく進展する可能性がある。</li> <li>HiSiliconからはシリコンフォトニクスチップを用いた量子鍵配送に関する発表もあり、量子技術への進出も予想される。</li> <li>SMICにシリコンフォトニクス用の製造ラインを構築中。</li> </ul>

韓国	基礎研究	△	→	・ソウル大学、KAIST、KISTや延世大学などでナノフォトニクス、シリコンフォトニクスやトポロジカルフォトニクスの基礎研究が行われているが、集積化技術、集積フォトニクスという点での顕著な動向は見られない。
	応用研究・開発	△	→	・Samsungでシリコンフォトニクスやハイブリッド集積の研究活動が進んでいるが、学会や論文での発表は少ない。一方、集積光回路や光送受信機など関連技術に関する特許は積極的に申請されている。

(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

### 参考・引用文献

- 1) K. Kitayama et al., “Novel frontier of photonics for data processing-Photonic accelerator”, *APL Photon.* 4, no. 9 (2019) : 090901. doi : 10.1063/1.5108912
- 2) A. W. Elshaari et al., “Hybrid integrated quantum photonic circuits”, *Nat. Photonics* 14, no.5 (2020) : 285-298. doi : <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0609-x>
- 3) A. L. Gaeta, M. Lipson and T. J. Kippenberg, “Photonic-chip-based frequency combs”, *Nat. Photon.* 13, no. 3 (2019) : 158-169 . doi : 10.1126/science.aad4811
- 4) P. P. Khial, A. D. White and A. Hajimiri., “A Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement”, *Nat. Photonics* 12, no. 11 (2018) : 671-675. doi : <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0266-5>
- 5) S. Fatholouloum et al., “1.6Tbps Silicon Photonics Integrated Circuit for Co-Packaged Optical-IO Switch Applications”, *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020* (2020) : T3H.1. doi : <https://doi.org/10.1364/OFC.2020.T3H.1>
- 6) S. -H. Jeong et al., “Polarization Diversified 16 λ Demultiplexer Based on Silicon Wire Delayed Interferometers and Arrayed Waveguide Gratings”, *J. Light. Technol.* 38, no. 9 (2020) : 2680-2687. doi : 10.1109/JLT.2020.2969240
- 7) P. Bhargave et al., “Fully Integrated Coherent LiDAR in 3D-Integrated Silicon Photonics/65nm CMOS”, *2019 Symposium on VLSI Circuits* (2019) : C21-5. doi : 10.23919/VLSIC.2019.8778154
- 8) M. Blaiche et al., “Hybrid multi-chip assembly of optical communication engines by in situ 3D nano-lithography”, *Light Sci. Appl.* 9, no. 1 (2020) : 71-81. doi : 10.1038/s41377-020-0272-5
- 9) S. Liu et al., “High-channel-count 20 GHz passively mode-locked quantum dot laser directly grown on Si with 4.1 Tbit/s transmission capacity”, *Optica* 6, no. 2 : 128-134. doi : <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2019.200128>

doi.org/10.1364/OPTICA.6.000128

- 10) C. Wang et al., “Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages”, *Nature* 562, no. 7725 (2018) : 101-104. doi : 10.1038/s41586-018-0551-y
- 11) K. Takeda et al., “Few-fj/bit data transmissions using directly modulated lambda-scale embedded active region photonic-crystal lasers”, *Nature Photonics* 7, no. 7 (2013) : 569-575. doi : 10.1038/nphoton.2013.110
- 12) M. W. Knight et al., “Photodetection with Active Optical Antennas”, *Science* 332, no. 6030 (2012) : 702-704. doi : 10.1126/science.1203056
- 13) A. Melikyan et al., “High-speed plasmonic phase modulators”, *Nature Photonics* 8, no. 3 (2014) : 229-233. doi : https://hdl.handle.net/1854/LU-4367368
- 14) E. Kuramochi et al., “Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip”, *Nature Photonics* 8, no. 6 (2014) : 474-481. doi : 10.1038/nphoton.2014.93
- 15) Y. Shen et al., “Deep learning with coherent nanophotonics circuits”, *Nature Photonics* 11, no. 93 (2017) : 441-446. doi : 10.1038/nphoton.2017.93
- 16) T. W. Hughes et al., “Training of photonic neural networks through in-situ backward propagation and gradient measurement”, *Optica* 5, no. 7 (2018) : 864-871. doi : https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000864
- 17) M. Takenaka et al., “High-efficiency, low-loss optical phase modulator based on III-V/Si hybrid MOS capacitor”, *Optical Fiber Communication Conference (OFC2018)* , (2018) : Tu3K.3. doi : https://doi.org/10.1364/OFC.2018.Tu3K.3
- 18) Shuming Wang et al., “Broadband achromatic optical metasurface devices”, *Nature Communications* 8, no. 1 (2017) : 187. doi : 10.1038/s41467-017-00166-7
- 19) C. Haffner et al., “Low-loss plasmon-assisted electro-optic modulator”, *Nature* 556, no. 7702 (2018) : 483-486. doi : 10.1038/s41586-018-0031-4
- 20) S. Barik et al., “A topological quantum optics interface”, *Science* 359, no. 6376 (2018) : 666-668. doi : 10.1126/science.aag0327
- 21) S. K. Ozdemir et al., “Parity-time symmetry and exceptional points in photonics”, *Nature Materials* 18, no. 8 (2019) : 783-798. doi : 10.1038/s41563-019-0304-9
- 22) M. Ono et al., “Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides”, *Nature Photonics* 14, no. 1 (2020) : 37-43. doi : 10.1038/s41566-019-0547-7
- 23) I. Datta et al., “Low-loss composite photonic platform based on 2D semiconductor monolayers”, *Nature Photonics* 14, no. 4 (2020) : 256-262. doi : 10.1038/s41566-020-0590-4