

総論

我が国におけるシリコンフォトリソグラフィ技術開発プロジェクト

Silicon Photonics Technology Development Project in Japan : An Overview

荒川泰彦 田原修一

abstract

データセンターやスーパーコンピュータのCPUの更なる能力向上を目指して、LSIの微細化のみならず、新たな並列プロセッサアーキテクチャや三次元集積技術の開発が進んでいる。しかしながら、チップ間情報伝送においては、電気配線では10 Tbit/s程度に限界が存在し、消費電力も重大な課題となっている。このため、帯域制限や消費電力の壁の突破に向けて、光信号と電気信号を不可分にする光電融合への期待が高まっている。この光電融合の進展の中心的役割を担うのがシリコンフォトリソグラフィであり、現在研究開発が世界中でしのぎを削って活発に進められている。本稿では、シリコンフォトリソグラフィの発展に向けて推進されてきた我が国の研究開発プロジェクトを概観する。

キーワード：量子ドットレーザー、シリコンフォトリソグラフィ、直接成長技術、貼合せ技術

1. はじめに

クラウドエッジコンピューティングやAIの著しい進歩は、デジタルトランスフォーメーションの展開を可能にした。しかし同時に、この進展により、データの処理速度や伝送量に対する要求が著しく高まり、更に大きなコンピューティングパワーを必要とするようになってきている。実際、スーパーコンピュータの性能はこの10年で1,000倍に迫る成長を遂げたが、データセンターの消費電力量も年々増えており、2030年には2010年に比べて15倍程度の消費電力量の増加が見込まれている。消費電力量の問題は、カーボンニュートラルに向けたグリーンイノベーションの観点からも緊喫の課題である。

コンピュータの性能向上にはLSIの処理速度の向上が不可欠だが、単なる微細化・高集積化には限界があるため、並列プロセッサアーキテクチャや、三次元集積回路構造の開発が重要となっている。こうした技術の発展は、チップ間に要求される情報伝送帯域幅の増大をもたらし、2025~2030年には、10 Tbit/s超の帯域が必要となると予想されている。しかし、電気配線では10 Tbit/s近辺に限界があり、また消費電力も重大な課題である。この帯域制限や消費電力の壁を突破するために、今、光信号と電気信号を不可分にする光電融合への期待が高まっている。光電融合は、サーバ内のCPUを結ぶ配線や、CPUと回路を接続するI/O、更にはCPU内部の配線まで展開されることが期待されている。図1はこのトレンドの一例として電気配線と光配線の消費電力の伝送距離依存性を示している。短距離といえども伝送帯域が増大すると、光配線が有利になることが分かる。

光電融合では、シリコンフォトリソグラフィが中核的役割を担う。シリコンフォトリソグラフィとは、半導体産業を支えるCMOSプロセス技術を活用して、シリコン基板上に受光素子、光変調器、光導波路、電子回路などの素子を集

荒川泰彦 正員：フェロー 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構

E-mail arakawa@iis.u-tokyo.ac.jp

田原修一 正員 アイオーコア株式会社

E-mail s-tahara@aiocore.com

Yasuhiko ARAKAWA, Fellow (Institute for Nano Quantum Information Electronics, The University of Tokyo, Tokyo, 153-8505 Japan) and Shuichi TAHARA, Member (AIO Core Co., Ltd., Tokyo, 112-0014 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.105 No.11 pp.1284-1290 2022年11月

©電子情報通信学会 2022

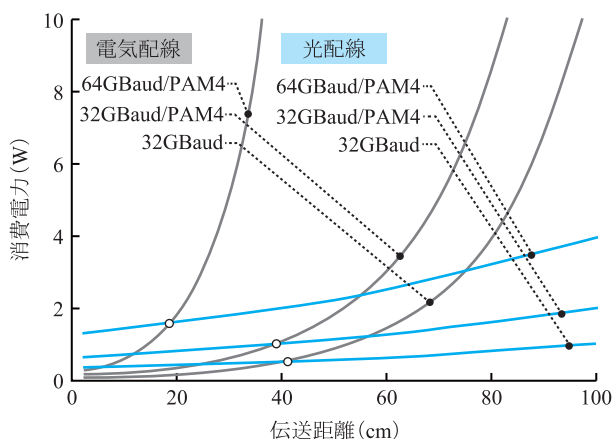


図1 電気配線と光配線の消費電力の伝送距離依存性

積化する技術である。今、光と電気信号の変換機能を担う光トランシーバとLSIチップのハイブリッド化は、Near-Package Optics 更には Co-packaged optics に進化しつつある。究極の光電融合は、三次元集積である 3D Co-packaged optics である。シリコンフォトニクスによる光電融合は、将来のコンピュータシステムや情報ネットワークへの展開に向けたキーテクノロジーとって過言ではない。NTT の IOWN 構想の実現においてもこの光電融合は要の技術の一つとなっている。

本特集は、シリコンフォトニクスについて、2012 年度から 10 年間、経済産業省と NEDO により実施された未来開拓研究プロジェクト「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」^{(1), (2)} に従事した研究者による記事で構成されている。テクニカルな議論は各記事でなされるので、本総論では、この 20 年のシリコンフォトニクスに関する国家プロジェクトを紹介する。また、海外の国家プロジェクトの動向等についても簡単に触れることにしたい。

2. 2000 年代におけるシリコンフォトニクスの国家プロジェクト

光電融合は、我が国では、林巖雄博士が早い時期にその重要性を説き、学界や産業界をリードしていた。林は、東大原子核研究所で助教授としてマイクロ波検出器の研究をした後に、米国ベル研究所において半導体レーザーの室温連続発振を達成した著名な研究者である。1971 年に帰国し、NEC で半導体レーザーの長寿命化の研究開発を進める一方、光エレクトロニクス全般に関心をもち、深い見識に基づいて指導力を発揮した。その中の一つが光電融合であり、林は、多くの若手研究者を育成・啓発した。

国家プロジェクトとして、その一部に光電融合の技術開発を含めたのは、2001 年から 10 年間続いた次世代半

導体材料・プロセス基盤 (MIRAI) プロジェクトである。このプロジェクトでは、テーマの一つである「新構造極限 CMOS トランジスタ関連技術開発」の中にサブテーマとして「波長多重によるオンチップ光配線技術開発」が盛り込まれた。オンチップ光配線は野心的テーマであったが、このような技術自体が成熟しておらず、産業的価値も当時十分には提示できなかったため、MIRAI プロジェクトの実施期間の途中でこのテーマは終了になった。しかし、2000 年初めに光バブルがはじけた状況下で、国家プロジェクトの枠組みで光電融合の研究開発を推進し、フォトニクス分野で優秀な人材を数多く維持・確保できたことは、今から見ると非常に意義があったと言える。

内閣府は、2009 年に産業、安全保障等の分野における我が国の中長期的な国際的競争力、底力の強化を図ることを目的として「最先端研究開発支援プログラム (FIRST プログラム: Funding Program for World-Leading Innovative R & D on Science and Technology)」を創設した。当初 3,000 億円の総予算と言われたが、政権の交代に伴い見直しが行われ、約 3 分の 1 の規模となった。同じ年の 9 月には、約 500 件の提案の中から、30 の研究課題及び中心研究者が決定されたが、その一つが筆者の一人である荒川が中心研究者を務めた「フォトニクス・エレクトロニクス融合量子システム基盤技術開発」プロジェクトであった⁽³⁾。このプロジェクトでは、「オンチップデータセンター」の目標ビジョンを掲げ、その実現に向けた光電融合集積回路システムの可能性を示すとともに、その産業化への見通しを明らかにすることを目指した。プロジェクトの英文名は、Photonics and Electronics Convergence System Technology (PECST) とした。“融合”をどう訳すか、いい英語が見つからず相当迷ったが、最終的に“convergence”とした。PECST プロジェクトは、シリコンフォトニクスシステムの研究開発を、目標として明確に設定した国家プロジェクトの第一号として位置付けることができる。

FIRST プログラムでは、応募段階で代表研究者を支援する「研究支援機関」を設定する必要があった。PECST では、新たに産業界の主要電機系企業が組合員として参画した技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 (PETRA: Photonics Electronics Technology Research Association) を設立して、この要請に対応した。PETRA は、PECST プロジェクトの支援機関の機能のみならず、多くの優れた研究者が集結する PECST の産業界側の中核組織となった。2016 年から筆者の一人である田原が 2 代目の専務理事となり、本年 5 月まで務めた。このようにして、東京大学、PETRA、産業技術総合研究所の 3 機関が連携して研究開発を遂行した。PETRA は、組合員企業の研究者を集結させることにより、集中研の役割を果たした。PETRA には、日立製作所、

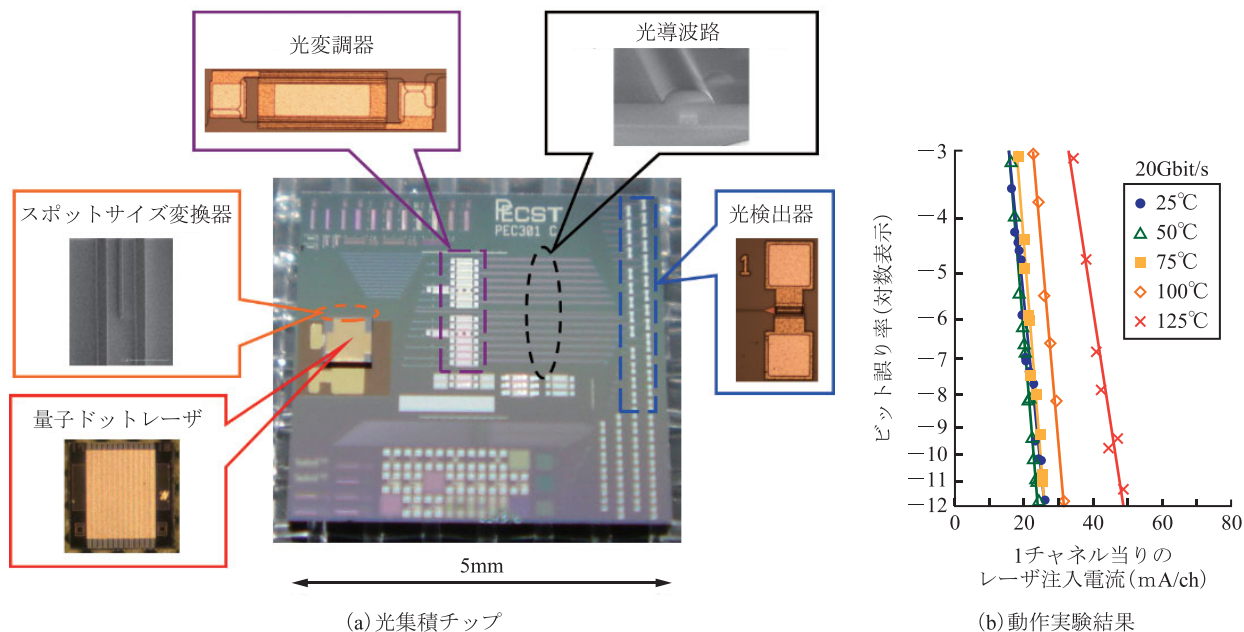


図2 世界初の量子ドットレーザー搭載のシリコン光集積チップと、25°Cから125°Cまでの温度領域における20 Gbit/sの動作実験の結果⁽⁴⁾

NEC, 富士通, 沖電気工業, NTTが, 大学からは, 京都大学, 東京工業大学, 横浜国立大学が参画した。

PECSTにおける研究開発の推進により, レーザ搭載型の光電融合集積回路システム技術について, 当時として世界のトップの成果を達成した。プロジェクト2年目以降毎年シリコン集積チップのプロトタイプを作製した。特に, 最終年度において, 図2に示すように, 量子ドットレーザーを搭載した5mm角のシリコン光集積チップを実現し, 25~125°Cの広い温度範囲において, レーザ光源, 変調器, 受光器, 光配線導波路をバイアス等無調整で, 20 Gbit/sのエラーフリー伝送を達成することに成功した⁽⁴⁾。量子ドットレーザーを搭載した世界初のシリコン光集積チップである。この成果により, 高熱を発生するLSIに近接若しくはLSI自体を集積するシリコンフォトニクスチップの実現に向けて, 量子ドットレーザーの意義が広く認識・共有された。PETRAに企業研究者が集まって集積システム構築に邁進したことにより, 企業間の垣根を実質的に取り払うことができたことは, 国家プロジェクト遂行の意義の一つとして強調しておきたい。もちろん, これは, フォトニクスが, 組織の枠を超えて研究者が自由闊達に交流する伝統を有する研究分野であったことも一因である。

3. 経済産業省/NEDOプロジェクトによるシリコンフォトニクス研究開発

PECSTプロジェクトの成功を踏まえて, 経済産業省は, 新設された経済産業省未来開拓プロジェクトの一つ

として, シリコンフォトニクス技術開発の本格的な実用化を目指すプロジェクトを実施することを決断した。その結果, 2012年9月から2022年2月(総額225億円)の大型国家プロジェクトとして, 「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」プロジェクト(以下, 光エレ実装PJ)が, 荒川をプロジェクトリーダーにしてPETRAが受託することで発足した。2012年度は経済産業省直執行プロジェクトとして実施したが, 2013年度以降はNEDOの管理の下で実施された。同一年にほかに2件のプロジェクトもこの未来開拓プロジェクトとして始まったが, 結果として, 10年間プロジェクトとして完遂したのは, 筆者らの光エレ実装PJのみであった。

光エレ実装PJの目的は, 光電融合技術を活用し, 信頼性の高い設計・プロセス技術を構築することで, 光と電気の変換回路(光トランシーバ)等を中心に開発し, それらを搭載したシステムの低消費電力化の実現や, 更にこれらを社会実装することにより, 幅広いエレクトロニクス産業の活性化に貢献することである。光エレ実装PJは, 2013年から開始し, 3期に分けて実施された。第2期終了時にステージゲートの評価を受けたが, 幸い非常に高い評価を得ることができた。

光エレ実装PJに参加したPETRAの組合員企業は, 沖電気工業, 産業技術総合研究所, NEC, 光産業技術振興協会, 富士通, 古河電気工業, 三菱電機, 東芝, NTT, NELである。このプロジェクトにおいても, 組合員企業の研究者が集中研に集結して, 基盤技術であるデバイス・実装技術の開発に取り組んだ。また, 組合員

年度	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
項目	METIプロ		経済産業省未来開拓研究プロジェクト(10年間)				NEDOプロジェクト				
		第1期			第2期			第3期			
①光エレクトロニクス 実装基盤技術 1. 基盤要素技術 2. 革新的デバイス技術		革新的デバイス技術					革新的デバイス技術				
②光エレクトロニクス 実装システム化技術 1. システム化技術 2. 国際標準化		基盤要素技術開発 ・光配線基本技術, 光接続構造 ・素子駆動技術, 回路技術等		大規模実装要素技術開発 (高集積・高密度・大面積化)			光電子集積インタポーザ技術開発 ・インタポーザデバイス ・実装技術開発 ・インタポーザシステム化技術開発				
		システム化技術: 光電子集積サーバシステム システム最適アーキテクチャ, 統合化技術, ボード間・ きょう体間接続技術(省電力, 高信頼性, CPU間光接続方式等)					システム化技術: 光電子集積光通信システム ・一芯双方向光トランシーバ技術(PON向けONU) ・低消費電力100Gbit/sデジタルコヒーレント技術(~2016)				
		国際標準化					国際標準化				
集積システム		光I/Oコア					光電子集積インタポーザ				
				光入出力LSI基盤							

図3 光エレ実装PJの研究開発の工程表

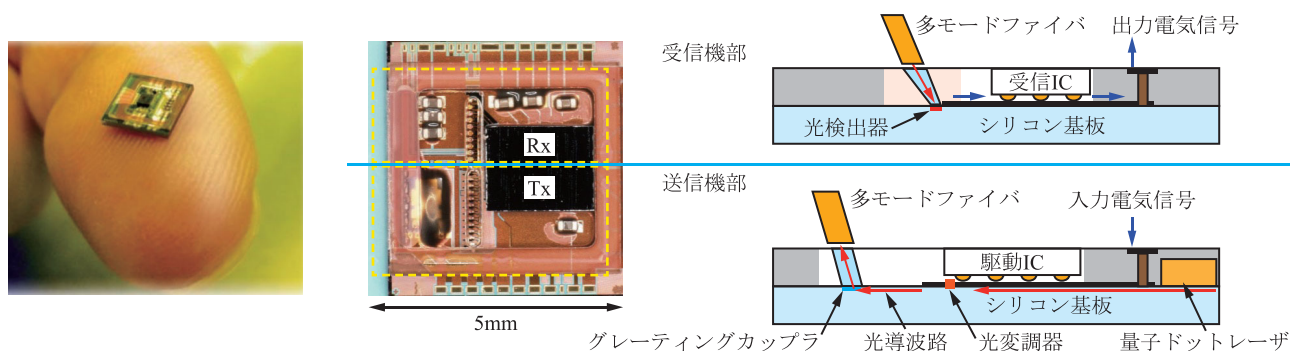


図4 光I/Oコアチップの構成

光ピンと量子ドットレーザの搭載により、アイソレータフリーの超小形・低消費電力の光トランシーバが実現された⁽⁵⁾。

企業の分室で実用化・事業化に向けたシステム化技術の開発を行った。更に、革新的デバイス開発を担う東京大学、京都大学、東京工業大学、横浜国立大学、早稲田大学が、共同研究実施機関として参画した。

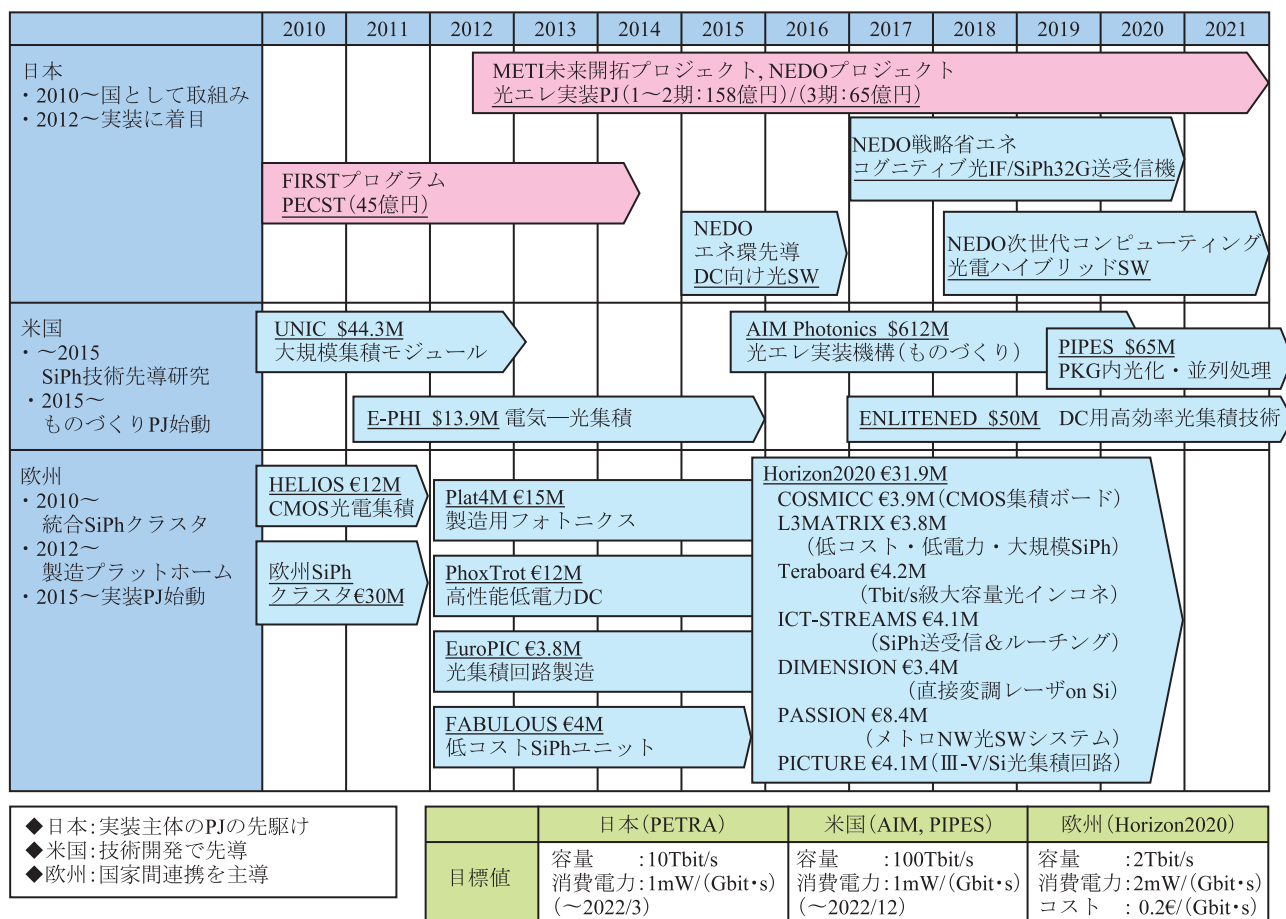
技術開発としては、図3に示すとおり、次の2大項目を柱として研究開発を推進した。

- ① 光エレクトロニクス実装基盤技術
- ② 光エレクトロニクス実装システム化技術

第1, 2期の代表的な成果は、光I/Oコアチップの実現である。光I/Oコアは、FIRSTにおける量子ドットレーザを搭載した光集積チップの技術開発がベースとな

り、開発がなされた世界最小の光トランシーバである⁽⁵⁾。基本構成を図4に示すが、全ての送受信機能を5mm角のシリコンチップに三次元集積している、超小形・高密度パッケージである。光源として量子ドットレーザを搭載しており、高温動作、高信頼性動作が可能である。更に、光ピンの採用により高トレランスなパッケージ実装を可能にし、高い生産性、低コスト、1W以下の低消費電力動作を実現した。この光I/Oコアチップは、世界最高速1.6Tbit/sの入出力を実装したFPGAアクセラレータボードに展開された。

光I/Oコアチップ技術は、プロジェクトの第2期が終了した2017年4月に、知財等も含めアイオーコア株式会社会社に引き継がれた。1961年に技術研究組合法が制



SiPh:シリコンフォトニクス

図5 シリコンフォトニクス関連の国家プロジェクトの世界動向

定されたが、このベンチャー企業は、同法の分割による権利義務一部承継の規定が適用された第一号の株式会社となった。半世紀以上もこのような事例がなかったことにやや驚きの念を持つが、ともかく画期的なことであった。現在、同社は、内外の多くの有力企業にサンプル出荷をするとともに、新たな国家プロジェクトにも参画することにより、研究開発資金を調達しながら、活発に研究開発と市場開拓活動を行っている。アイオーコア株式会社の活動の詳細については、本特集の蔵田和彦氏の記事を参照されたい。

第3期では、光電子集積インタポーザ技術開発に注力し、デバイス・実装技術開発とシステム化技術開発の2本柱でプロジェクトを推進した。デバイス・実装技術開発では、具体的には、10 Tbit/s/ノードの高速 I/O 動作を実現するための要素技術として、光変調器、受光器、光入出力素子、合分波器など光電子集積インタポーザの構成要素となるデバイスの小形化、高速化、低消費電力化技術を開発した。また、単一モードファイバとの接続に適した異種導波路接続構造の実現可能性を検討し、試作評価を行った。更に、大容量信号伝送技術として光信

号の波長多重化、多値化について研究開発を行い、多くの重要な成果を達成した。これについては、本特集の中村隆宏氏の記事で詳しく論じられる。

システム化技術開発においては、情報処理システム化技術として、スーパーコンピュータである“富岳”に採用されているCPUを搭載した光電子融合サーバボードを実装し、100 Gbit/s (25 Gbit/s×4ch) 伝送を確認し、波長多重技術と組み合わせることで10 Tbit/s/ノードの技術開発に成功した。次世代のスーパーコンピュータへの搭載が期待されるとともに、データセンターにおけるシリコンフォトニクス技術の優位性を明らかにしたと言える。また、波長多重や波長ルーチングなどの光接続技術を用いて、全サーバボード間を結合した光電子融合ラックサーバシステムを開発し、電気スイッチを介した従来のデータ伝送方式と比べ、計算速度を一桁以上高速化し、電力量30%以上の削減を実証することができた。

革新的基盤技術開発においては、革新的光源技術を東京大学と早稲田大学、革新的光検出器・光変調器技術を東京大学と横浜国立大学、革新的光配線技術を京都大学、革新的光エレクトロニクス技術を東京工業大学が担

当し、それぞれ重要な成果を達成した。詳細については、本特集の各記事を参照されたい。

4. 国家プロジェクトの世界動向

図5にシリコンフォトリクス関連の国家プロジェクトの世界動向を示す。米国は、2015年に予算規模が5年で6億ドル規模(約700億円)の超大型プロジェクトである American Institute for Manufacturing Integrated Photonics Advanced Integration Manufacturing (AIM Photonics) を発足させた。AIM Photonics は、基盤技術から、民生用及び防衛用システム等の製造技術への本格的移行を加速するためのプロジェクトである。実は、AIM Photonics は光エレ実装PJに刺激されて発足したと言われる。これは、プロジェクトの推進者の一人である Tomas Koch 教授(アリゾナ大学)が発足当時筆者に教えてくれた。このほか、データセンター用高効率光集積技術を推進する ENLITENED やパッケージ内光化・並列処理を目指した PIPES が現在も走っている。

欧州においても、2010年頃から欧州シリコンフォトリクスクラスタが発足し、2012年からは、製造プラットフォームのプロジェクトが並行して実施された。これらを経て、Horizon2020で実装プロジェクトが本格的に始動した。日米欧のいずれの国家プロジェクトも、2022年末に達成する消費電力の目標を $1\text{ mW}/(\text{Gbit}\cdot\text{s})$ に設定している点は興味深いと言える。

なお、我が国では、2021年度半ば以降に、二つの大きなプロジェクトが発足した。まず、NEDO「高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発研究開発項目②次世代コンピューティング技術の開発」において、「分散コンピューティングに向けた超高速低消費電力・異種材料集積光エレクトロニクス技術の開発」を PETRA が受託して、既に活動している。東京工業大学の西山伸彦教授がプロジェクトリーダーを務めている。もう一つは、「2050年カーボンニュートラル」の目標達成に向け、長期にわたり、研究開発・実証から社会実装までを支援する NEDO のグリーンイノベーション基金事業である。この基金により「次世代デジタルインフラの構築」に係る大型プロジェクトが2021年度末に発足した。このプロジェクトは二大テーマを有するがその一つが「次世代グリーンデータセンター技術開発」である。その一プロジェクトとして、アイオーコア株式会社は光電融合デバイスの開発を受託した。なお、量子ドットレーザーの基盤研究については東京大学に再委託をしている。以上のように、新たな国家プロジェクトが発足することにより、光エレ実装PJの成果が発展的に活用されていることは喜ばしいことである。

5. む す び

本稿では、我が国におけるシリコンフォトリクス技術開発プロジェクトについて、特に10年間にわたり大型国家プロジェクトとして遂行されてきた光エレ実装PJを中心に紹介してきた。このプロジェクトでは、実用化を目指した技術開発の推進により、光トランシーバの分野において、研究開発フェーズから事業フェーズへの橋渡しを実現し、シリコンフォトリクスの社会実装に向けた基盤技術の開発を当初の目標どおり若しくは目標を上回る成果を達成した。

この20年で、シリコンフォトリクスの光源技術に関わるベンチャー企業である QD レーザ株式会社とアイオーコア株式会社が立ち上がり、特に、前者は株式上場を果たした。これらの企業の発展に対して、国家プロジェクトによる支援と産学連携が果たした貢献は多大であったと考えている。

今2030年に向けて Beyond 5G が議論されているが、更に、その先においては、スーパーコンピュータと量子コンピュータのハイブリッド化や量子ネットワークの実現が期待されている。シリコンフォトリクスにおいても、いわゆる“古典”的な光電融合にとどまらず、量子配線への展開が求められており、電子・量子回路とともに単一光子源や量子もつれ光子対源などを搭載した量子融合集積システムの開発が重要になる。将来、量子シリコンフォトリクスが、量子古典融合コンピューティング社会を支える基盤技術の一つとなることを夢見ている。

謝辞 経済産業省/NEDO 超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発プロジェクトをはじめとするシリコンフォトリクスに関わる国家プロジェクトの推進に貢献された全ての皆様に感謝します。

文 献

- (1) 荒川泰彦, “超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発プロジェクト概要一,” NEDO 超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発プロジェクト最終成果報告会, 川崎, 2022.
- (2) Y. Arakawa, T. Nakamura, and K. Kurata, “Highlights of 10-years of research in a Japanese Si photonics project,” Optical Fiber Communication Conference, Th3C, OSA, San Diego, California, 2022.
- (3) <https://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/followup/15.pdf>
- (4) Y. Urino, N. Hatori, K. Mizutani, T. Usuki, J. Fujikata, K. Yamada, T. Horikawa, T. Nakamura, and Y. Arakawa, “First demonstration of athermal silicon optical interspersers with quantum dot lasers operating up to 125°C,” J. Lightwave Technol., vol. 33, pp. 1223-1229, 2015.
- (5) K. Yashiki, Y. Suzuki, Y. Hagihara, M. Kurihara, M. Tokushima, J. Fujikata, A. Ukita, K. Takemura, T. Shimizu, D. Okamoto, J. Ushida, S. Takahashi, T. Uemura, M. Okano, J. Tsuchida, T. Nedachi, M. Fushimi, I. Ogura, J. Inasaka, and K. Kurata, “5 mW/Gbps hybrid-integrated Si-photonics-based optical I/O cores and their 25-Gbps/ch error-free operation with over 300-m MMF,” Optical Fiber Communication Conference, Th1G. 1.1, OSA, Los Angeles, California, 2019.

(2022年6月24日受付 2022年7月5日最終受付)



あらかわ やすひこ
荒川 泰彦 (正員：フェロー)

1975 東大・工・電子卒。1980 東大大学院了。工博。同年東大・生研講師。1981 同助教授。1993 同教授。1998 東大・先端研教授。東大・ナノ量子機構長を経て、2018 同機構特任教授及び東大名誉教授。日本学士院賞、紫綬褒章、江崎玲於奈賞、藤原賞、C & C 賞、内閣総理大臣賞、IEEE David Sarnoff 賞、IEEE Jun-ichi Nishizawa メダル、IEEE/LEOS William Streifer 賞、Welker 賞、OSA Nick Holonyak 賞などを各受賞。全米工学アカデミー外国人会員。IEEE ライフフェロー、Optica フェロー、応用物理学会フェロー。



たはら しゅういち
田原 修一 (正員)

1981 九大・工・電子卒。同年 NEC 入社。2007 NEC ナノエレクトロニクス研究所所長。2012 中央研究所理事。2016 から PETRA 専務理事。光電融合技術の開発に注力。NEDO 光エレ実装PJにおいて高い評価を得る。2017 アイオーコア株式会社の新設分割に貢献。2022 から同社取締役 CFO。1988~1989 スタンフォード大客員研究員。IEEE フェロー。応用物理学会フェロー。工博。

