

光コンピュータ —Thin Film Lithium Niobate (TFLN) 光技術は AI データセンターの救世主になれるか—

産業技術総合研究所 G-QuAT フェロー スタンフォード大学名誉教授
山本 喜久 先生



日 時：2026年5月28日（木）16:00～17:00

場 所：如水会館（千代田区一ツ橋2-1-1）

演 題：光コンピュータ

— Thin Film Lithium Niobate (TFLN) 光技術は
AI データセンターの救世主になれるか —

参加者：SEAJ 会員 約200名

（ご講演内容）

1. AI データセンター消費電力問題と光コンピュータ

2030年までに米国における全消費電力の10%はAI データセンターで消費され、日本でも2024年から2030年にかけての消費電力増加の50%はAI データセンターが占めるだろう。AI 半導体における消費電力増大は、銅ワイヤーを使ったプロセッサとメモリ間のデータ転送に起因している。

光コンピュータの消費電力の理論限界は、信号対雑音比（S/N 比）30dB 以上、最低500フォトンが必要として、0.07fJ（フェムトジュール・1兆分の1J）に留まる。電子コンピュータに比べて4桁以上小さいため、その「通信ボトルネック」は光技術による解決が可能である。

しかし1980年代当時の光コンピュータでは、メモリが作れない、「線形演算」は得意だが「非線形演算」が苦手、信

2026年5月、産業技術総合研究所・スタンフォード大学の山本喜久先生をご講演者としてお招きし、「光コンピュータ」をテーマとする講演会が開催されましたので報告いたします。

山本先生は、量子光学および量子情報科学分野における世界的第一人者で、長年にわたりスタンフォード大学および、NTT Research, Inc. において、最先端研究を牽引されました。現在は、産業技術総合研究所 G-QuAT（ジークアット）フェローとスタンフォード大学名誉教授を兼任されております。



号を増幅できない等の課題があり、実用化は難しかった。現在、光コンピュータにおけるこれらの課題は、TFLN-OPA (TFLN 光パラメトリック増幅器) の登場により解決される可能性が高まっている。

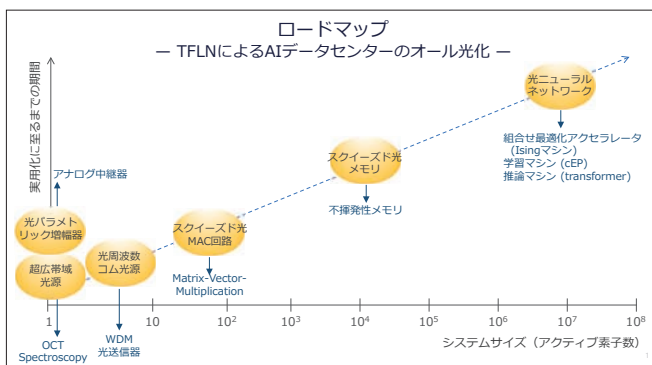
2. TFLN 導波路は非線形光学のゲームチェンジャー

TFLN (ティフリン・薄膜ニオブ酸リチウム) 導波路は、従来の LN (バルク型ニオブ酸リチウム) 導波路に比べて、断面積を約1/30に出来る。光モードの「空間閉じ込め強化」により光非線形効果を30倍以上に増強し、光パルスの「時間閉じ込め強化」により光非線形効果を300倍以上に増強できるようになった。1 nJ のパルスエネルギーを必要とした従来の非線形光学実験は、TFLN の登場により0.1 pJ で実現できる。光パルスの繰り返し周波数を100 MHz とすると、従来10 W の電力で発現した光非線形性は、1 mW (1/10,000) の電力で発現できるようになった。

3. TFLN 実用化のロードマップ

将来的に目指すのは、TFLN による AI データセンターの「オール光化」である。

「超広帯域光源」、「光周波数コム光源」、「光パラメトリック増幅器」は、すでに技術的に完成され実用化が待たれている。次のステップではトランジスタロジックに相当する回路としての TFLN ロジックの実用化が期待される。「光メモリ」では揮発性メモリ・不揮発性メモリの両方が登場するはずである。その後、(ロジスティクスや創薬への応用が期待される)「光イジングマシン」(コヒーレントイジングマシン) による組合せ最適化アクセラレータへの適用が考えられる。そして、現状 GPU・HBM が担っている学習・推論分野へも「光ニューラルネットワーク」の展開が予想される。この段階では、システムサイズ(アクティブ素子数)は 10^7 以上のレベルに達するだろう。



4. TFLN 超広帯域光源と TFLN-OPA (TFLN 光パラメトリック増幅器)

TFLN 超広帯域光源では、入力された周波数 ω の基本波

光子 (FH) 2つと周波数 2ω の第2高調波光子 (SH) 1つが、TFLN 導波路の中で強結合を起こし、出力パルスは多数のパルスレットに分裂することで、新しい複合粒子 (Optical Meson) が出力される。FH パルスエネルギー 40 (pJ) で、波長2000 nm の入射光パルスが、波長360 nm (紫外光) から波長2660 nm (中赤外光) に至る、超広帯域なコヒーレント光へと連続して変換されることになる。

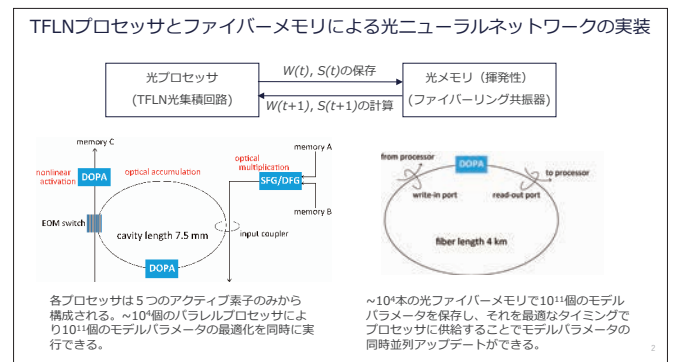
光干渉断層計 (Optical Coherence Tomography : OCT) は現在も眼科など医療機関で広く使われる技術であるが、TFLN 技術の応用により半導体集積回路の非接触・非破壊検査に用いる検討が進む。特に HBM 向けの TSV 等は、外側からの検査が難しく適用が期待される分野である。最小検出限界は波長をスweep (掃引) する範囲で決まるため350~2800nm の波長域を持ち、極めて低消費電力の TFLN は優位性がある。

光増幅器は、昔から国際海底ケーブルの光アナログ中継、今後はデータセンターの光分岐 / チャンネルスイッチに使われるはずであるが、TFLN 光パラメトリック増幅器 (TFLN-OPA) を使えば、増幅帯域、変調帯域 (スイッチング速度)、雑音指数、エネルギー効率の全てで、既存の光増幅技術を凌駕するため、その実用化が期待されている。

5. TFLN の光ニューラルネットワークへの応用

Back-Propagation (BP) は、ニューラルネットワークのモデルパラメータを強化学習により最適化する現在のメインストリーム・アルゴリズムである。しかし、このアルゴリズムを実行するには「空間」領域でも「時間」領域でも「非局在 (膨大)」な情報量を使って計算するため、大きなメモリ容量とメモリープロセッサ間のデータ転送を必要とする。

Equilibrium Propagation (EP) は、エネルギーをベースとした学習モデルであり、「空間」領域では「局所」的、「時間」領域では「非局所」的な情報量を使って計算する。さらに、continual Equilibrium Propagation (cEP) では、「空間」領域でも「時間」領域でも、両方局所的な情報だけで



計算を実行できる。

TFLN 光プロセッサ (TFLN 光集積回路) と光ファイバーメモリ (揮発性・ファイバーリング共振器) を光ニューラルネットワークに実装できるようになれば、プロセッサとメモリ間のデータ転送負荷を一挙に減らすことが出来る。

強化学習性能の比較において、光ニューラルネットワークは、電子ニューラルネットワークに比べて、アクティブ素子の数を10桁、計算時間を2桁、消費エネルギーを3桁、改善できると期待されると期待される。

光ニューラルネットワークと
電子ニューラルネットワークによる強化学習性能の比較

	光ニューラルネットワーク (TFLN + Fiber)	電子ニューラルネットワーク (GPU + HBM)
クロック周波数	200 GHz	2 GHz
使用するアクティブ素子	1.8×10^5 (TFLN OPAs)	8×10^{15} (CMOS transistors)
全消費電力	1.2×10^3 [W]	3×10^5 [W]
プロセッサ消費電力	~92%	~80%
メモリ消費電力	~8%	~20%
アップデート時間	2×10^{-5} (s)	5×10^{-3} (s)
アップデートエネルギー	24 [mJ]	35 [J]

光ニューラルネットワークは、電子ニューラルネットワークに比べて、アクティブ素子の数を10桁、計算時間を2桁、消費エネルギーを3桁、改善できると期待されると期待される

6. まとめ (山本先生の要約より抜粋)

光パラメトリック増幅器は、光コンピュータの中核デバイスとして、電子コンピュータにおける CMOS トランジスタと同様の役割を演じることになる。非線形信号処理、低雑音内部増幅、光メモリなど光コンピュータを構成する上で欠くことのできないほとんど全ての機能を、このデバイス一つが担うことになる。

光パラメトリック増幅器の占有面積と消費電力は CMOS トランジスタのそれよりもはるかに大きくて集積化に向かないように思われがちであるが、一つの光パラメトリック増幅器は約100億個の CMOS トランジスタの機能を実現することができる点を忘れてはならない。

例えば、1 兆個 (10¹¹) のモデルパラメータを有するニューラルネットワークの強化学習には106個の光パラメトリック増幅器が必要であるが、その全占有面積は8インチ TFLN ウェーハの約5% に過ぎない。

7. 所感

データセンターの消費電力増大は、今や地球全体の課題といえる状況になりつつあります。半導体各社では、特にロジックの性能向上に対してメモリ帯域幅の向上がボトルネックとなる、いわゆる「メモリーウォール」の問題解決が急務となっています。今後も GPU と HBM の技術革新により、演算能力に対する相対的な省電力化は進みますが、桁数が下がるほどの低消費電力化は容易ではありません。

光コンピュータは、計算能力の最大化ではなく「データ転送負荷の極小化」や「計算に使用する領域の局所化」といった、電子コンピュータとまったく異なるアプローチで世界を変える可能性を持つ技術であることが、よく実感できました。

ご講義後の質疑応答は所定の時間をオーバーし、「4インチから12インチに至るウェーハの大口径化、TFLN の膜厚均一性や膜品質の重要性、SiN 層や CMOS 層の形成」といった、将来の課題にも触れられました。技術的に高いハードルがあるからこそ挑戦する価値があると、会場の議論も活発に行われたと感じております。

改めまして、大変に有意義なご講演をいただきましたことに、深く感謝申し上げます。



春季講演会後に行われた懇親会の模様

(SEAJ 事務局長 小林 章秀)