

全光ニューラルネットワークに向けた Si プラットフォーム 上半導体レーザーを利用した活性化関数

Activation function using semiconductor laser on Si platform toward all-optical neural networks

西山 伸彦, 高橋 直樹, 雨宮 智宏
Nobuhiko Nishiyama, Naoki Takahashi, Tomohiro Amemiya

東京工業大学 工学院電気電子系, 〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1-S9-1
Tokyo Institute of Technology, School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, 2-12-1-S9-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

Abstract : To realize an all-optical neural network, the ReLU function, one of the activation functions, was realized using a semiconductor membrane laser that can be formed on a silicon platform. Theoretical calculations have shown that a high accuracy comparable to that of an ideal ReLU is obtained for optical ReLU. In the operation verification using actual external light and a membrane laser, ReLU operation according to the input signal was realized.

Keywords : optical neural network, semiconductor laser, membrane lasers, heterogeneous integration

はじめに

人工知能 (artificial intelligence : AI) の活用が急激に広まっている。あらゆるアプリケーションに AI 技術が組み込まれるようになってきており、特に生成 AI 技術の有無が国家の将来を左右するような論調さえ見て取れる。これは、Transformer などの AI アルゴリズムの進歩もさることながら、最近はやや言葉としてあまり出てこなくなった internet の普及による big data の蓄積とコンピューターハードウェアの進化が大きく寄与している。一方で、副作用として身近な AI の利用が消費電力の問題を引き起こしつつある。生成 AI は、学習、そして結果の生成に大量な電力を消費することが知られており、このまま普及がより進めば、その電力消費に発電が追いつかない可能性すらあるのではないかと筆者らは恐れている。これに対して LSI メーカーは、微細加工技術の利用とともに生成 AI 専用の回路を設計するなどして計算効率化を図り、消費電力を低減する努力をしている。

もう1つの考え方として、光集積回路を利用して深層学習計算を行うことにより、消費電力の低減、そして計算速度の向上を図ろうという取り組みもなされている¹⁻³⁾。これは、シリコンフォトニクス技術により、従来に比べて比較的容易に大規模光集積回路を形成できるようになってきたことによる。筆者らは、しばらく前になるが、光 FPGA (field programable gate array) を提案した⁴⁾。これは、大量に並べたスイッ

チ回路で、アプリケーションによって経路を切り替え、さらに異種材料接合で形成した能動素子と組み合わせで複数の回路機能をワンチップで実現しようというものであったが、これと同様にシリコンフォトニクス技術を利用してシリコンプラットフォーム上にマッハツェンダー干渉計などを大量に形成し、それをニューラルネットワーク (neural network : NN) 線形処理回路として利用しようというものである。原理的には、光の速度で計算が進み、回路構成によっては消費電力を低減可能であると言われている。世界的に様々な提案が行われ、いくつかのベンチャー企業も設立されている。

繰り返しになるが、多くの提案は線形処理回路を形成するための技術であり、実際の深層学習回路では、図 1a のように非線形処理の回路も必要とされる。この非線形処理回路は、活性化関数と呼ばれ、線形処理回路の後段に形成される。これにより、より複雑なデータに対応することができ、精度を上げることが可能となる。この活性化関数には、シグモイド関数、Softplus 関数など様々な関数が存在するが、最も広く使われているのは ReLU (rectified linear unit) 関数である。この関数は、ある入力までは 0 を出力として返し、あるしきい値を超えると線形に出力を返すというものであり、光集積回路による NN 回路が、より広く利用されるためには、この ReLU 関数を導入することが大切である。しかしながら、これまでの他機能の取り組みにおいて、そもそも活性化関数は、電気に

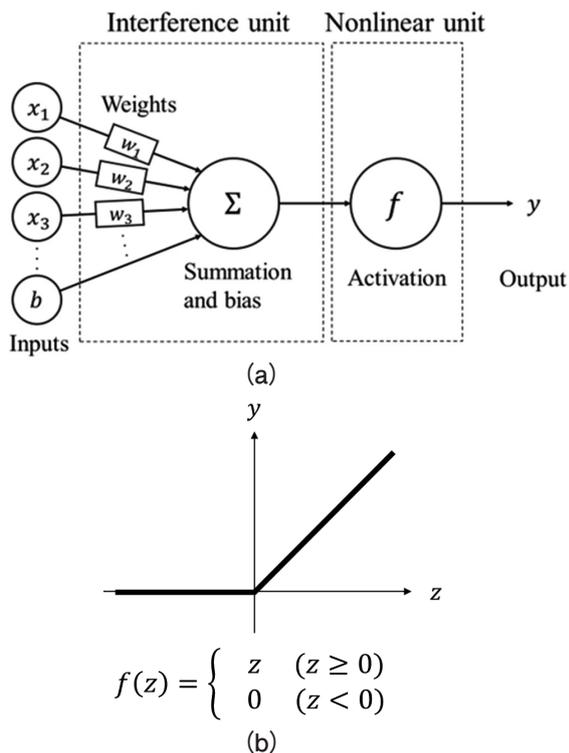


図1 NN回路一層の基本構成
(a) 前段は線形処理ユニット，後段非線形処理ユニット，
(b) ReLU関数

戻して処理するケースも多く，光で活性化関数を実現する取り組みにおいても，その多くはシグモイド関数などを目的にしており ReLU 関数を目的にした取り組みは少ない⁵⁻⁷⁾。

筆者らは，半導体レーザーを生業に研究を行ってきたグループであり，ReLU 関数が半導体レーザーの光出力特性に似ていることに着目した。特に筆者らが長年取り組んできたシリコンプラットフォーム上に形成可能な半導体薄膜レーザーは，シリコン基板上に形成できるという特長だけでなく，小型かつ低消費電力で動作することが可能である。本稿では，この半導体薄膜レーザーが，全光 NN 回路の実現を目的とした ReLU 関数として実現できるかどうかについて，理論及び実験的に検討した結果を報告する。

半導体薄膜レーザー

半導体薄膜レーザーは，図2のように厚み数100nm（筆者らの設計は270nm）程度の活性層を含むコア層を，空気，ガラスなどの低屈折率材料で閉じ込めた構造を有したレーザーである⁸⁻¹¹⁾。通常の半導体レーザーに比べて屈折率差が大きいため，光をコア層に強く閉じ込めることができる。また，共振軸方向に

表面回折格子を形成することによって，同じく大きい屈折率差により強い結合係数を確保可能である。結果として，低いしきい値電流，高い変調効率を小型素子で実現できる。また，間に低屈折率材料を挟み，任意の基板上に形成できるため異種材料集積技術¹²⁾を利用してシリコン基板上に形成すれば，シリコンフォトニクス回路や CMOS 電子回路との統合が可能である。筆者らは，CMOS 電子回路の上部グローバル配線層の配線遅延や消費電力の低減を目指してこの半導体薄膜レーザーを研究し，実際に図3のような光集積回路で低消費電力データ伝送を実現してきた。近年は国内，海外研究機関でも半導体薄膜レーザーの研究がなされるようになってきた^{9,13)}。

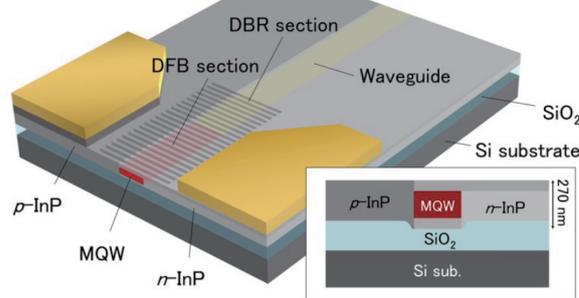
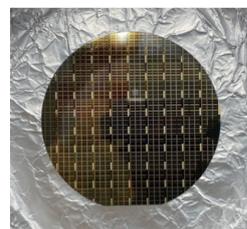
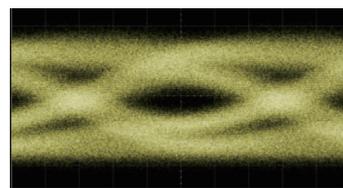


図2 半導体薄膜分布反射型レーザーの構造



(a)



(b)

図3 Si基板上半導体薄膜光集積回路¹¹⁾

(a) ウェハ写真，(b) 25 Gbpsにおけるアイダイアグラム
©2022 Optica Publishing Group

光 ReLU 関数の理論検討

前節で説明した半導体薄膜レーザーを，光 NN 回路の ReLU 関数として組み込みこんだ構成を図4aに示す¹⁴⁾。前段の線形処理部からの光入力信号を，半導体薄膜レーザーに光のまま入力し，その出力を次段に

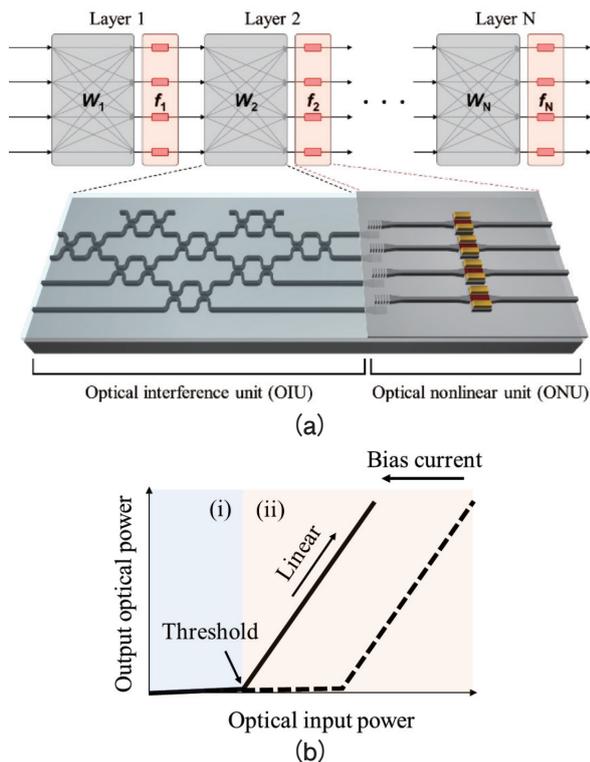


図4 半導体薄膜レーザーを利用した全光 NN 回路¹⁴⁾
 (a) 素子構成, (b) 半導体レーザーの動作特性概念
 ©2022 Optica Publishing Group

送る。線形処理回路はシリコン導波路で形成されているが、そこから回折格子や縦方向性結合器によって、半導体薄膜レーザーを含む III-V 族光回路層に結合する 3 次元構造となっている。この 3 次元方向の光結合構造は、筆者らが過去すでに実現しており、それが利用可能である。

半導体薄膜レーザーの駆動方法としては、光と電気ハイブリッド駆動で行われる (図 4b)。前段のユニットからの出力は、レーザーの発振波長よりも短波の光である必要がある。そのような光がレーザーに入力されると吸収によりキャリアが生成され、そのキャリアが発振しきい値以上であればレーザー発振が起こる。つまり光励起である。ただし、その発振しきい値は、電流バイアスによって自由に可変できる。つまり ReLU 関数における 0 点をユーザー側で学習結果によって任意に決定できる。ここで、発振波長より短波の光を入力信号として入れなければならないことから、それにより学習の層数に限りがあるが、そもそも活性層の動作波長範囲は 50 nm 以上は確保可能であるため、実用的な範囲では大きな問題にならないと考えている。

一方で、ReLU 関数は、しきい値以上では $f(z) = z$ を出力するが、レーザーにおいては、光入力に対して、

光出力が、これよりも低い変換効率を有してしまう。これがどのように影響を与えるかについて、理論検討を行った。図 5 には、理論検討を行った構成を示している。

一般的に深層学習のデータセットとして利用される MNIST の数字認識データセット 6 万点を利用し学習をした後、1 万点のデータセットによって、その認識率を検討した。この時のしきい値以上における入力信号に対する出力は、実際の半導体薄膜レーザーの特性を勘案し、 $f(z) = 0.24z - 0.062$ としている。光 ReLU だけでなく、他の活性化関数も含め計算し、その正答率を比較した結果を表 1 に示す。正答率が 98.22% と理想的な ReLU 関数における正答率 98.32% と比べてほとんど遜色のない正答率を示している。これを実際の半導体薄膜レーザーの構造に落とし込んだ計算結果を図 6 に示す。光集積回路は、端面が存在しないため、

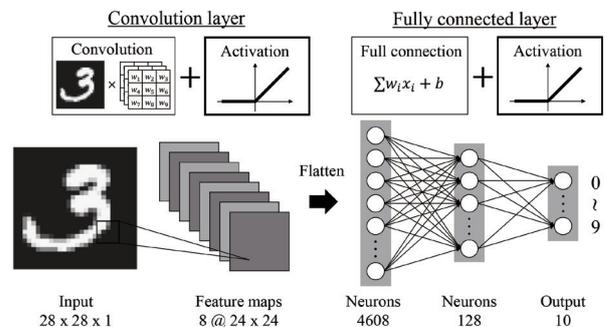


図5 理論計算で利用した NN 構成¹⁴⁾
 ©2022 Optica Publishing Group

表1 様々な活性化関数における正答率の比較¹⁴⁾
 ©2022 Optica Publishing Group

Type	Activation Function	Epoch	Test Accuracy
1	Optical ReLU	10	98.22%
2	ReLU	10	98.32%
3	ELU	10	98.05%
4	Sigmoid	10	97.71%
5	Softplus	10	97.75%

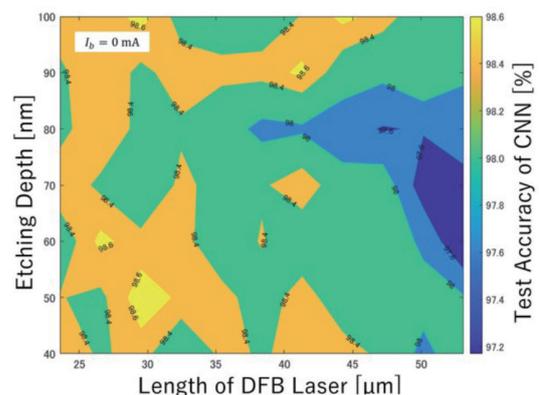


図6 正答率のレーザー構造依存性

端面をミラーとするファブリペローレーザー構造は利用できない。

そのため、回折格子を有する分布反射型レーザー構造を採用している。その反射強さを決定する共振器長さと回折格子の深さ（=屈折率差）をパラメーターに正答率をプロットした。共振器長が長くなる、もしくは回折格子深さが深くなる、つまり共振器方向の閉じ込めが強くなり、レーザー出力のスロープ効率が下がることにより、正答率が下がっていることがわかるが、急激な劣化は認めることはできないため、一般的なレーザー設計の範囲では、大きな問題とはならないと言える。

光 ReLU 関数としての動作特性

以上の理論検討を受けて、実際に半導体薄膜レーザーを利用して動作検討を行った。本報告では、半導体薄膜レーザー単体及び光ファイバーを利用して駆動した場合の実験結果について述べる。実験システム構成を図7に示す。共振器長 90 μm の半導体分布反射型薄膜レーザーを利用した。電流駆動を行った場合のしきい値電流は 0.5 mA、発振波長は 1,585 nm 付近である。このようなレーザーに先球レンズファイバーを通して、外部から波長 1530 nm の光を導入した。今回は、回折格子のストップバンドの関係もあり、十分短波な

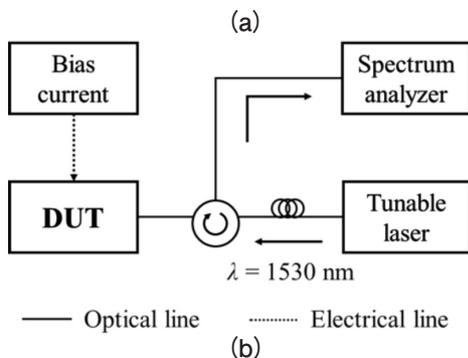
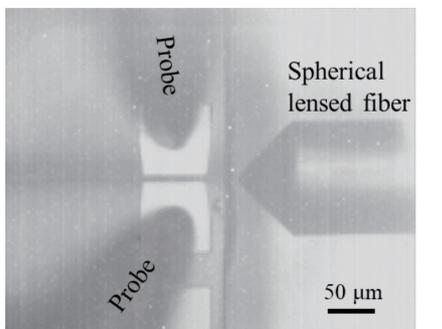


図7 測定システム¹⁴⁾
(a) 測定風景, (b) システム構成
©2022 Optica Publishing Group

光を導入したが、光 ReLU 関数専用の設計を導入することにより、より発振波長に近い入力波長でも駆動が可能であると考えている。電極を通してバイアス電流を印加し、出力光を光スペクトルアナライザで観測した。光ファイバーと素子の結合損失は約 10dB である。

入力信号の強度が 0.1 mW と 2.0 mW の場合のスペクトルを図8に示す。この場合のバイアス電流は、0.1 mA であり、電流だけでは発振しきい値に到達していない。入力信号が 0.1 mW の場合は、反射した入力信号の波長のみが観測され、レーザーからの出力は観測できない。

一方で入力信号が 2.0 mW となると明確にレーザーからの発振スペクトルが観測される。図9には、発振スペクトル波長ピークの入力信号強度依存性を示す。バイアス電流は 0.1 mA 刻みで 0.5 mA まで変化させた。明瞭なしきい値光入力が観測され、光励起により発振動作を起こしていることがわかる。また、バイアス電流を増加させていくと、発振しきい値光入力が低下していき、バイアス電流 0.5 mA の時には、ほぼしきい値光入力は 0 mW になっている。繰り返しになるが、光ファイバーと素子の結合損失は約 10 dB で

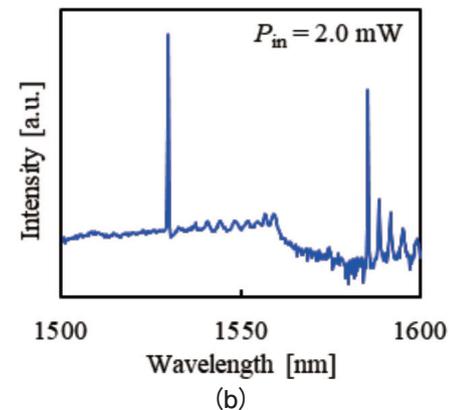
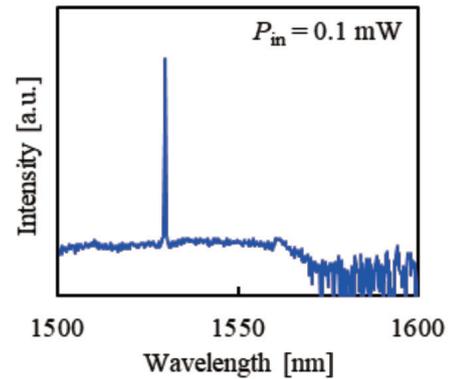


図8 発振スペクトル¹⁴⁾
(a) 光入力 0.1 mW, (b) 光入力 2.0 mW
©2022 Optica Publishing Group

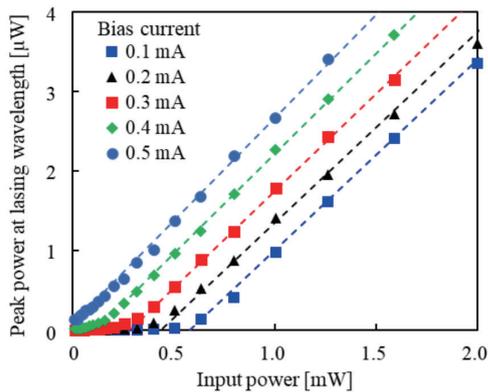


図9 発振波長ピークの入力光強度依存性¹⁴⁾

©2022 Optica Publishing Group

あり、図8における実効的な入力光強度は10分の1、実効的な出力光強度は10倍である。最終的に光集積回路上のSi導波路との結合効率においては、より高い結合効率が見込める。ただし、理想的に考えても変換効率100%にはできないことや、前段のSi導波路で構成される線形処理部においても損失が存在するため、多段化のためには光増幅器の集積が必須である。幸いレーザーと同様の薄膜構造で、光増幅器は集積可能であるため、プロセスとしてはシームレスに対応可能である。

以上より、半導体薄膜レーザーは、光ReLU関数としての動作が期待できることがわかった。ただ、半導体薄膜レーザーでなくとも、一般的なレーザーで同様のことができるのではないかという疑問も湧く。これに対しては、まず、一般的なレーザーは共振器長が長く、必要とする発振電力も高いため、導波路方向からの入力で光励起発振をさせることが難しいことが挙げられる。実際に半導体薄膜レーザーでも比較的発振電力が高いファブリペロー型を利用した実験では、発振を得ることが困難であった。一方で、半導体薄膜レーザーと同じく低消費電力動作が期待できる面発光レーザーでは、平面内に集積化することができないため、本目的には合致しない。よって半導体薄膜レーザー、特に分布反射型構造を有するレーザーが有効であると言える。

まとめ

本稿では、全光ニューラルネットワークを実現するための活性化関数として半導体薄膜レーザーを利用する取り組みについて紹介した。AIは今後その重要性を増していくことは明白であり、光技術は重要な役割

を担っていくであろう。本技術は他機関で様々な提案されている光線形処理回路と高い親和性を有するため、今後の共同研究などを通じて、全光ニューラルネットワークを実現していく。

謝辞

本研究は、科研費(19H02193, 20H02200, 21J14548)及びJST-CREST(JPMJCR15N6)の補助を受けて実施した研究成果である。

【参考文献】

- 1) Shen, Y., et al: "Deep learning with coherent nanophotonic circuits," Nat. Photonics, 11 (2017) 441-446.
- 2) Pour Fard, M. M., et al: "Experimental realization of arbitrary activation functions for optical neural networks," Opt. Express, 28 (2020) 12138-12148.
- 3) Ohno, S., et al: "Si Microring resonator crossbar array for on-chip inference and training of the optical neural network," ACS Photonics, 9 (2022) 2614-2622.
- 4) Nishiyama, N. and Arai, S: "On-silicon membrane and hybrid lasers for intra/inter-chip connections," ISPEC 2015 (2015).
- 5) Mourgias-Alexandris, G., et al: "An all-optical neuron with sigmoid activation function," Opt. Express, 27 (2019) 9620-9630.
- 6) Crnjanski, J., et al: "Adaptive sigmoid-like and PReLU activation functions for all-optical perceptron," Opt. Lett., 46 (2021) 2003-2006.
- 7) Huang, Y.: "Programmable low-threshold optical nonlinear activation functions for photonic neural networks," Opt. Lett., 47 (2022) 1810-1813.
- 8) Arai, S., et al: "GaInAsP/InP membrane lasers for optical interconnects," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 17 (2011) 1381-1389.
- 9) Jiao, Y., et al: "InP membrane integrated photonics research," Semicond. Sci. Technol., 36 (2020) 13001.
- 10) Takahashi, N., et al: "Low threshold current operation of membrane DR laser on Si with buried-ridge waveguide and ACPM grating for on-chip optical interconnection," 28th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2022) WB-06 (2022).
- 11) Fang, W., et al: "High-temperature and high-efficiency operation of a membrane optical link with a buried-ridge-waveguide bonded on a Si substrate," Opt. Express, 30 (2022) 34420-34428.
- 12) 西山伸彦: "シリコン光電子集積チップへ向けた光源集積," 応用物理, 87 (2018) 337-343.
- 13) Yamaoka, S., et al: "Directly modulated membrane lasers with 108 GHz bandwidth on a high-thermal-conductivity silicon carbide substrate," Nat. Photonics, 15 (2021) 28-35.
- 14) Takahashi, N., et al: "Optical ReLU using membrane lasers for an all-optical neural network," Opt. Lett., 47 (2022) 5715-5718.