

製造可能な全領域を探る 集積フォトニクス設計アプローチ

アレクサンダー・Y. ピゴット、ジェス・ル、ジェレナ・ブコビッチ

望ましい機能性だけを知りだけで、「オブジェクトファースト」ソフトウェアは、より小さな最適化されたシリコンフォトニクスデバイスを設計する。

デジタル回路の設計は現在、ヴェリログ (Verilog) や VHSIC ハードウェア記述言語 (VHDL) など、ハードウェア記述言語が優勢である。回路設計のこのような自動化により、最近の数十億トランジスタのコンピュータプロセスの開発が可能になった。

一方、集積フォトニクスデバイスは、まだ手動で設計されている。設計者はまず、少数 (2~6) の自由パラメータを持つ解析理論に基づいて基本設計を選ぶ。基準的な例は、狭スペクトルフィルタとして一般に利用されているマイクロリング共振器 (図1) であろう。設計は単純であり、調整可能パラメータは、リングの半径 (r)、導波路幅 (w)、それにリングと導波路間のギャップ (g) のわずか数点にすぎない。設計者は次に光学シミュレーションを何度も走らせてこれらを調整する。この力づくのアプローチは非効率であり、設計者は既知のデバイスの小さなライブラリに制約される。

任意のフォトニックデバイス

しかし、製造可能なデバイスの全域を探ることができたらどうだろう。もしこれに成功すれば、デバイスパフォーマンスの改善、デバイスサイズの縮小が保証されることになる。残念ながら、製造可能なデバイスの領域は絶対的に膨大である。例えば、 $1 \times 1 \mu\text{m}$ デザイン領域でシリコンフォトニクスデバイ

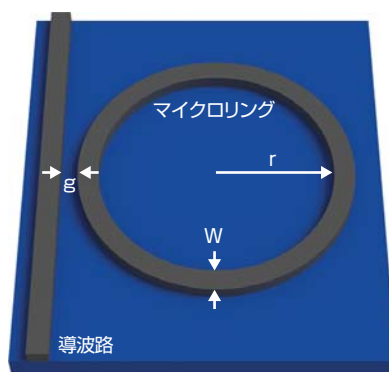


図1 集積フォトニクスで一般に使われるマイクロリング共振器の概略図。この共振器は、閉じたリング内に形成された導波路と入/出導波路で構成されている。リングは共振器キャビティとして機能する。主な設計パラメータは、リングの半径 (r)、導波路幅 (w)、それにリングと導波路間のギャップ (g)。

スの設計をしたいと考える。それを $0.1 \times 0.1 \mu\text{m}$ ピクセルに分割するなら、最近のナノファブリケーションで簡単に達成可能であり、各ピクセルはシリコン (1) を含むか、あるいは含まないか (0) のいずれかが可能であるので、可能なデバイスは $21^{00} \approx 10^{30}$ 得られる。

この例から、完全自由設計について2つの重要な洞察が引き出せる。まず、完全自由設計は自動化が不可欠である。設計者が人間だったら、デバイスのパフォーマンスは規定できるだろうが、実際の設計はコンピュータアルゴリズムで行われなければならない。二番目に、すべての可能なデバイスを単純に力づくで探すことは解決困難で、もっと効率的な設計法が必要である。

理想的には、計算コストが設計の自

由パラメータの数に関係しない最適アルゴリズムがほしい。ありがたいことに、そのような最適化方法が存在することが分かった。関連のある方法は、航空宇宙設計、機械学習など他の分野で以前から使われていたが、光学設計に導入されたのはつい最近のことである。

設計アルゴリズム

われわれの研究グループは、任意のフォトニックデバイスの設計に2つの方法を用いる。まず、いわゆるオブジェクトファースト設計法⁽¹⁾を用いて構造について最初の推測を行う。この方法では最初、電磁場は非物理的でよいが、考えられるどんなパフォーマンス制約でも満たすようにする。構造と電磁場の両方を変更することでマクスウェル方程式違反の減少を繰り返す。マクスウェルの方程式に対してわれわれのパフォーマンス目標が優先であるので、われわれはこの方法を「オブジェクトファースト」と呼んでいる。

次に、随伴最適化法を利用してわれわれの構造を微調整する。これは、光デバイスとの関連で多数の他のグループによっても研究されてきた^{(2)~(4)}。重要な考えは、性能測定基準の勾配は単一の随伴問題で効率よく計算できるということである。随伴最適化は、基本的にオブジェクトファースト法の対極にある。ここでは、われわれはマクスウェル方程式を維持し、次にわれわれ

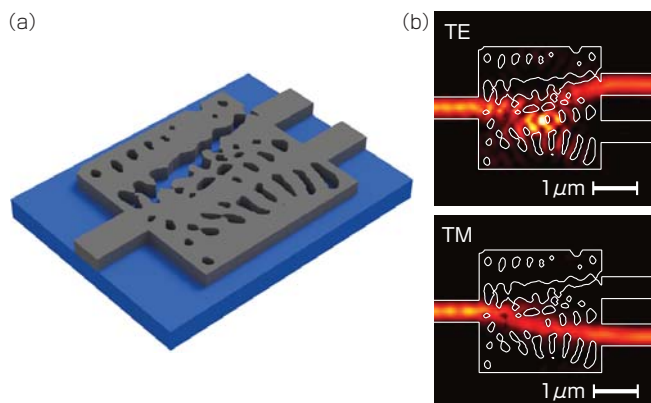


図2 1550nm光用の偏光プリッタはシリコンで作製され、二酸化ケイ素(SiO₂)に埋め込まれている(a)。シミュレートした電磁場は、水平偏光(TE)と垂直(TM)偏光(b)の入射光で示されている。

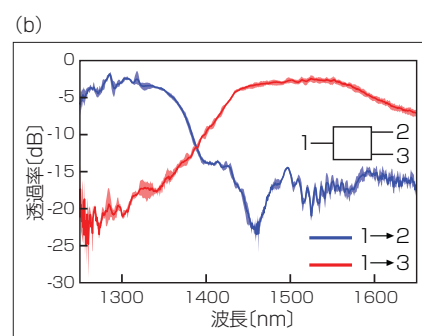
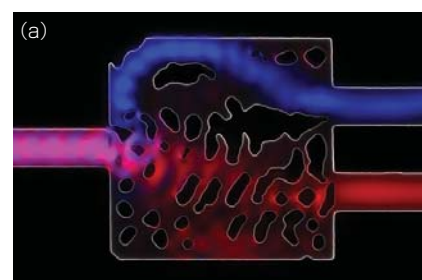


図3 コンパクトな分波器の電子顕微鏡検査は、1300nm(青)と1550nm(赤)で、シミュレートした電磁場でオーバーレイし、その効果を示している(a)。透過は、入力ポート1から出力ポート2(青)と3(赤)で実験的に計測された。平均透過率は実線で示している。最小値と最大値は、斜線部で示されている(出典: 許可を得て A. Y. Piggott et al. から⁽⁶⁾)。

の性能制約侵犯を最小化しようとする。

両方の方法の計算コストの大部分は、各反復で電磁シミュレーション(2回程度)を行うことから来る。批判的に言えば、各反復で走らせるシミュレーションの数は、自由設計パラメータの数とは完全に独立である。これにより、オブジェクトファースト法と随伴最適化法は、遺伝的アルゴリズムや粒子群最適化などの発見的方法よりもはるかに効率的になる。その計算コストは、自由パラメータの数に比例するからである。

オブジェクトファースト法と随伴最適化法の両方も、ある局所最適に集まってくる反復法である。したがって、いずれの方法も所与の問題に対する全体的に最適なデバイスを見つけられない。とは言え、パラメータスペースを大規模に開くことで、従来の方を用いて設計するよりも高いパフォーマンスのデバイス、遥かに小型のデバイスを設計できることが分かった。

われわれのアルゴリズムを用いて設計したそのようなデバイスの1つがTE/TM偏光スプリッタである(図2)⁽¹⁾。このデバイスは、2つの光入力偏光を2.8×2.8μmサイズの分離された出力導波路に分ける。シミュレーションでは、その挿入損失はわずか0.9dB、クロストーク19dB以下である。

実験デモンストレーション

概念実証として、われわれは通信波長のコンパクトな分波器を設計し、実験的にテストした(図3)⁽⁵⁾。このシリコンフォトニクスデバイスは、1300nmと1550nmの光をわずか2.8×2.8μmサイズのデバイスで分離する。その分波器の挿入損失は2~4dB、クロストークは11dB以下、3dB帯域は100nm以上である。

われわれの分波器は、製造欠陥に左右されないことも分かった。最小限の工程制御で製造されても、製造されたわれわれのデバイスの性能再現性は極めて高かった(図2)。これは、デバイスが広帯域となるように設計することによって達成した。これは、製造安定性にとっては優れてヒューリスティック(発見的)であることが分かった⁽¹⁾。

高度な最適化手法は、コンピュータパワーの最近の進歩と相まって、集積フォトニクスデバイスのわれわれの設

計法を変え始めた。こうした方法を利用して、研究者たちは最近、直射日光にさらされていても周辺温度以下に放射冷却できるデバイスを設計した⁽⁶⁾。あるいは、LEDとほぼ同等の効率を持つ白熱電球も作れる⁽⁷⁾。将来的には、われわれのオブジェクトファーストのような、高度な最適化法がフォトニクス業界に変革を起こし、新しい世代の極めてコンパクトで高性能のオプティクスを可能にすると見ている。

参考文献

- (1) J. Lu and J. Vučković, *Opt. Express*, 21, 11, 13351-13367 (2013); doi:10.1364/oe.21.0113351.
- (2) C. M. Lalau-Keraly et al., *Opt. Express*, 21, 18, 21693-21701 (2013); doi:10.1364/oe.21.021693.
- (3) A. C. R. Niederberger et al., *Opt. Express*, 22, 11, 12971-12981 (2014); doi:10.1364/oe.22.012971.
- (4) J. S. Jensen and O. Sigmund, *Laser Photon. Rev.*, 5, 308-321 (2011); doi:10.1002/lpor.201000014.
- (5) A. Y. Piggott et al., *Nature Photon.*, 9, 6, 374-377 (2015); doi:10.1038/nphoton.2015.69.
- (6) A. P. Raman et al., *Nature*, 515, 540-544 (2014); doi:10.1038/nature13883.
- (7) O. Ilic et al., *Nature Nanotechnol.*, published online Jan. 11, 2016; http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2015.309.

著者紹介

アレクサンダー・Y. ピグゴット、ジェス・ル、ジェレナ・ブコビッチは、スタンフォード大ギンズトン研究所所属。e-mail: piggott@stanford.edu URL: https://ginzton.stanford.edu