

# 導波路パラメータ制御法および波面整合法による光 波制御回路設計に関する研究

橋本, 俊和

<https://hdl.handle.net/2324/4784651>

---

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 橋本 俊和

Name

論 文 名 : 導波路パラメータ制御法および波面整合法による光波制御回路設計に関する研究

Title

区 分 : 甲

Category

## 論 文 内 容 の 要 旨

## Thesis Summary

光通信を始めとして、光を用いた情報処理やセンシング等、様々な場面で光が使われている。特に光をそのまま信号処理や情報処理することで、光のもつ信号の広帯域性、低遅延性、低消費電力性等を活かした信号処理や情報処理が可能となると期待されている。光の受動部品は、電子回路のプロセッサのように可変な振る舞いを高速に行うことは困難であるが、広帯域性、低遅延性を維持して光信号を光のまま信号処理する光フィルタとして、光通信の中で用いられている。具体的な光の受動部品としては、光強度の分岐回路やアレイ導波路格子による波長合分波器、光信号を局発光と干渉させて振幅と位相の情報を光強度として取り出す光90度ハイブリッド回路などがある。それらの光部品は光導波路構造を用いた光導波路回路により構成されている。光導波路を用いることで光信号の分岐や位相等の制御が可能となり、遅延も光導波路回路の長さを調整することで正確に制御できることから、デジタル信号処理で実現されるフィルタ機能を光周波数領域で実現可能となる。しかし、光導波路回路で複雑な信号処理を行うと、要素回路を多段につなぎ合わせて大規模な回路を構成する必要があり、回路サイズが大きくなることや、要素回路を多段につなぎ合わせたことで要素回路の損失が積み重なって損失の大きな回路になってしまう等の課題が生じる。回路サイズが大きくなるという課題を解決する1つの手段として期待されているのがSiの半導体プロセスを用いて光導波路回路を実現するSiフォトニクスである。従来、光導波路回路は石英ガラス(屈折率として約1.45)等で作られてきたが、Siの高い屈折率(通信波長1.3~1.6 $\mu\text{m}$ に対して約3.5)を用いることで要素回路が格段に小型化され、要素回路を組み合わせることで大規模な回路をつくることが可能となっている。しかし、光導波路回路は干渉を使って動作させるため要素回路のサイズは光の波長と同等程度(通信波長だと1.3~1.6 $\mu\text{m}$ 程度)に制限されるため、電子回路のような数ナノサイズの要素回路を実現することは困難である。また、要素回路を多段につなぎ合わせることで損失が積算されて大きな損失になるという課題も残されることになる。このサイズと損失の増大という課題のため、光導波路回路に対して、電子回路のように要素の小型化と要素を組み合わせることで大規模な回路を実現する、というアプローチには限界があるように思われる。

そのような限界を克服する一つの方法としては、回路要素に分けて要素を組み合わせる従来の導波路技術に代えて、光の波面に情報を載せて、波の状態で扱い、光の回路全体で信号処理・情報処理を行うというアプローチが考えられる。本博士論文においては、光の回路全体で信号処理・情報処理を行う光回路を光波制御回路とよぶことにする。従来の光導波路回路では、光の広がりを伝搬方向の1次元に制限して、パルスや時間領域で位相や強度が変化する信号として扱うのに対して、光波制御回路では光の空間の自由度を1次元に制限せずに波面に情報を載せるため多くの自由度を使うこと可能となる。逆にいえば、波面の自由度を制御するためには、そのための光回路にも必然的に多くの自由度をもたせることになるので、多自由度の光回路を設計で決定する必要があり、導波構造および要素回路の少数のパラメータを決定して要素回路を組み合わせることで機能を実現するという従来の設計手法とは異なる設計手法が求められる。本研究では、光回路上の回路全体の屈折率分布を、光回路の自由度として、回路全体の屈折率分布という大きな自由度を設計するための新たな設計手法を提案し、数値計

算によりその有効性を示す。

光波制御回路の設計として、光回路全体の屈折率分布を扱うには、大規模な計算が必要である。大きな自由度と大規模な計算に起因して光波制御回路設計の課題としては、主に(1)計算規模の問題と、(2)「良い」光波制御回路をどうやって求めるか、という2つの課題があると考えられる。光波制御回路は、光回路全体で動作させるため、Si フォトニクス<sup>1</sup>の導波路回路要素を組み合わせた回路(回路長で mm から cm オーダーの回路)全体と同程度の領域の屈折率分布を設計対象とする必要がある。このサイズは波長と比較して大規模な計算となるため極力計算量を抑制する必要がある。この光波制御回路の設計では光回路全体を計算対象とするために必要な計算量が膨大になるというのが(1)の計算規模の問題である。たとえば、有限差分時間領域法(Finite-difference time-domain method; FDTD method)を用いたトポロジー最適化による光回路の設計では、設計に相当する光回路形状の最適化において、多く計算リソースを必要とする FDTD 法を反復計算で用いるため、計算機の能力によるが、現実的に扱える領域サイズが回路長で百  $\mu\text{m}$  オーダー以下程度ではないかと思われる。この領域サイズは Si フォトニクスの導波路回路要素の最適化には十分であるが、光波制御回路には不十分である。

また、光波制御回路の設計で得られる屈折率分布は、一意には決まらない場合がほとんどなので、小型になる、あるいは、作製誤差の影響を受けにくい等の要望を反映した「良い」光回路を生成できることが望ましいが、そのため手法は確立していない。一意には決まらない屈折率分布をどのように絞込んでいくかが(2)の「良い」光波制御回路をどう求めるかという課題である。

以上の課題に対応する光波制御回路の設計手法として、本研究では、FDTD 法を用いたトポロジー最適化よりも大規模化に適し、さらに、「良い」光波制御回路を実現するために物理的な解釈を可能にして物理的な制約条件を課しやすくすることを目指して、2つの手法を提案する。一つは光導波路を拡張して、光導波路の屈折率分布を与えるパラメータを伝搬方向に対して変化させ、導波路中の光の波面を制御する手法で、本研究では導波路パラメータ制御法とよぶ。本研究の導波路パラメータ制御法では、グレーデッドインデクスファイバに代表される断面構造の動径方向に対して2次関数となっている屈折率分布の導波路について、2次関数のパラメータが伝搬方向に変化する導波路回路を扱う。もう一つは、本研究において波面整合法とよんでいる手法で、導波路構造に限定せずに、屈折率分布を自由な形状として、その屈折率分布を後述する手順で決定する手法である。本研究では、それぞれの設計手法について、光回路の屈折率分布を決めるための関係式を導き、それに基づいて屈折率分布を決定する。導波路パラメータ制御法においては、光導波路中の光を Gauss 分布として Gauss 分布のパラメータと光導波路のパラメータの関係を方程式として導出し、その方程式をもとに簡単な設計方針から光導波路中の光の挙動を制御できること示す。波面整合法については、反復計算により屈折率分布を更新して所望の入力から出力が得るための、屈折率分布の更新式として波面整合式を導出する。波面整合式は、物理的に解釈すると、入力から順伝搬させた光と出力から逆伝搬させた光の位相差を減らすように屈折率分布を更新し、最終的に波面の位相を一致させるという手順を与えるため、この屈折率分布の決定手法を波面整合法と呼んでいる。この手法は FDTD 法と比較して計算量が格段に少ないビーム伝搬法(Beam Propagation Method: BPM)を用いて、BPM の光伝搬の計算中に、逐次、光回路を再構成していく形にアルゴリズムを実装することが可能であり、大規模な光回路の設計にも適用可能である。さらに、経路積分による解釈や、波面整合法では決められない系のパラメータ(ハイパーパラメータ)について設計に取り入れるため考察も行う。2つの光波制御回路の設計手法(導波路パラメータ制御法と波面整合法)それぞれについて、いくつかの光回路設計に適用して、光伝搬のシミュレーションで従来の光導波路との特性比較等により有効性を確認する。さらに、深層ニューラルネットワーク(Deep Neural Network: DNN)と波面整合法とが、学習方法のみならず、ネットワークの特性としても類似性があることを示す。DNN と波面整合法の類似性は、近年研究が活発な DNN において提案されている莫大な学習パラメータで規定されるネットワークの中から適切なネットワークを選び出すための様々な手法の波面整合法への適用可能性を示唆するものと考えられる。本研究では、波面整合法への DNN 手法の適用例としてドロップアウトと呼ばれる DNN 手法の適用により波面整合法の過剰適応が抑制されることを確認し、波面整合法への DNN 手法の適用可能性を示す。

以上のとおり、本研究では2つの光波制御回路の設計手法を提案し、ハイパーパラメータや設計手法の物理的な解釈、DNN の手法を取り込んだ光波制御回路設計の可能性等を示す。さらに、提案した設計手法の有効性を確認するため、基本的な光回路設計への適用および数値計算による特性の検証を行う。最後に、本提案手法を発展させる方向性について考察を行う。