

敵対的生成ネットワークを利用した偏光制御素子の構造最適化手法の確立

代表研究者

岡本 浩行

阿南工業高等専門学校 創造技術工学科 教授

1 はじめに

情報通信技術の発展に伴い、通信トラフィックは急増している。日本国内における総ダウンロードトラフィックは、2024年11月時点で前年比12.7%増の約38.9 Tbpsに達しており[1]、この増大に対応するため、電気・光信号間の変換を排除し、低消費電力、低遅延、大容量化を可能にするオール光ネットワーク（APN）の導入が進められている。APNにおいて信号品質を維持するには、伝送路や光交換ノード内で生じる不規則な偏光変動を補償し、信号光の偏光状態を最適に制御する偏光制御素子が不可欠であり、これまでも活発な研究が行われてきた[1, 2]。APNの社会実装に向けては、これら光素子の低損失化および微小化が強く求められている。しかし、従来の誘電体光素子は光の回折限界によるサイズ制約を受ける。また、方向性結合器の結合長や回折格子の周期構造を動作原理とする従来の偏光制御素子は、モード結合に必要な物理長や加工プロセスの寸法精度といった制約により、さらなる小型化が困難となっている。したがって、幾何学的構造の単純な最適化にとどまらない、新規の動作原理や構造決定手法に基づいた次世代の偏光制御技術の創出が課題である。この課題を解決するアプローチとして、近年、敵対的生成ネットワーク[3]をはじめとする深層学習を用いた光学素子の設計手法が注目されている。偏光制御素子の設計に敵対的生成ネットワークを導入する主な利点は、人間の直感に依存しない微細トポロジー構造の探索が可能となり、限られた領域内で偏光変換効率を最大化する構造を創出できる点にある。従来の遺伝的アルゴリズム等の最適化手法は、初期構造への依存性が高いことや計算コストの肥大化が課題であったが、敵対的生成ネットワークは広大な設計空間を効率的に探索できる。また、学習過程においてマクスウェル方程式に基づく物理損失だけでなく、最小線幅や孤立パターンの禁止といった作製制約を識別器に課すことで、シミュレーション上のみで成立する再現不可能な構造を排除し、実作製に適したロバストな設計が可能となる。さらに、敵対的生成ネットワークは事前のトレーニングを要するものの、一度学習を完了したモデルは、要求される偏光特性を入力するだけで電磁界シミュレーションを繰り返すことなく最適な三次元構造を出力できるため、設計および開発期間の大幅な短縮につながる。

本研究では、微小化と低損失化を両立する偏光制御素子構造の構築を目指し、敵対的生成ネットワークを用いた構造最適化手法を提案する。偏光制御素子の構造最適化に敵対的生成ネットワークを適用した報告例は過去になく、本研究で実施する手法は全く新規な試みである。本手法は、学習プロセスに製造制約をはじめとする物理的・幾何学的制約を直接組み込むことで、シミュレーションから実作製への移行が容易な偏光制御素子構造を最適化することを目的とする。

2 偏光制御素子構造の最適化

2-1 敵対的生成ネットワークについて

本研究で提案する偏光制御素子の構造最適化手法の基盤となる敵対的生成ネットワークは深層学習モデルの一種であり、互いに対抗する二つのニューラルネットワークを同時に訓練させることで、高度なデータ生成能力を獲得するモデルである。敵対的生成ネットワークは、目的とする構造を創出する生成器と、入力された構造の妥当性を評価・判別する識別器の二つから構成される。生成器は、識別器を欺くために、より要求を満たす構造を生成するように学習を進める。一方で識別器は、入力されたデータが満たすべき物理的・幾何学的制約に合致しているかを高精度に識別するように学習を行う。この相補的な最適化プロセスを通じて、生成器は高度に最適化された構造設計能力を獲得する。光学素子の設計において敵対的生成ネットワークを適用する場合、一般には敵対的生成ネットワークの拡張系が用いられる。具体的には、生成器に対する入力として、最適化する構造の偏光特性（偏光状態、挿入損失など）を与える。生成器は入力された偏光特性を満たすような素子の三次元トポロジー構造を出力する。従来の敵対的生成ネットワークと異なり、本研究のように光学設計へ応用する際には、識別器の役割を物理的・幾何学的な評価尺度に基づいて拡張する。識別器には、生成された構造がマクスウェル方程式を満たしているかを検証するための物理損失に加え、作

製プロセスにおける最小線幅の超過や孤立パターンの存在を検知する作製プロセスにおける制約を組み込む。識別器は、これら複数の評価軸から生成器により生成された偏光制御素子構造を厳密に評価して、そのフィードバックを損失関数を通じて生成器へ送る。この学習プロセスが収束すれば、生成器は要求される偏光特性と作製可能な物理構造との間の複雑な関係を学習した状態となる。これにより、従来手法のように設計した構造の評価に膨大な計算時間を要する順方向の電磁界解析を繰り返すことなく、最適化する構造の偏光特性を入力するだけで実作製に適した三次元偏光制御素子構造を導出することが可能となる。

図1に本研究で構築した敵対的生成ネットワークモデルの概要を示す。

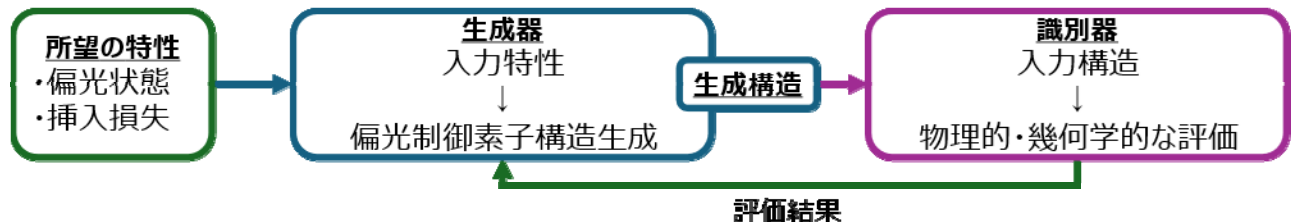


図1 構築した敵対的生成ネットワークモデル構造概要

2-2 □基本的な偏光制御素子構造の最適化

図1に示した敵対的生成ネットワークモデルの有効性を検証するため、水平方向の電界成分を持つ電磁波のみ透過する基本的な偏光制御素子の構造設計を対象とした実証を行った。また、本研究で設計する構造の材料として厚さ $30\ \mu\text{m}$ のアルミ、また、作製プロセスの制限となる最小線幅を $5\ \mu\text{m}$ とした。入射波長は $100\ \mu\text{m}$ とした。本モデルの学習スケジュールは、生成器の更新を100回、識別器の更新を100回行うプロセスを1サイクルとし、これを100サイクル繰り返すことで、ネットワークの学習を行った。生成器には、入力として目的とする偏光状態（水平方向の電界成分100%、垂直方向の電界成分0%）、出力として要求する特性を満たす素子の偏光制御素子構造を生成する。一方、識別器には、この生成された偏光制御素子構造データが入力され、構造の物理損失および微細加工における最小線幅の超過や孤立パターンの有無を検知する幾何学的制約に基づいて評価を行い、その妥当性を数値化した値を出力する。この学習プロセスにおいて、生成器は出力した構造の特性が入力された所望の特性に極限まで近づき、かつ識別器の検閲をパスできるように学習を深める。識別器によって算出された評価結果は、誤差逆伝播法を通じて損失関数から生成器へフィードバックされる。この敵対的な最適化ループを繰り返すことで、生成器は最終的に所望の光学特性を得られる構造を生成かつ実際の加工プロセスで作製可能な偏光制御素子構造を設計する。

図2に学習時の損失の変化を示す。実線は生成器の損失、破線は識別器の損失を示す。生成器の損失が全100サイクルを通じて約2の値で、ほぼ一定に推移しており、識別器の損失も同様に約0.5の値で極めて安定している。構築した敵対的生成ネットワークモデルでは、生成器および識別器をそれぞれ100回ずつ交互に最適化するプロセスを1サイクルとし、各サイクルの最終損失値を表示している。両者の損失が一定値に収束している挙動は、生成器と識別器が拮抗し、学習の破綻を起こすことなく安定状態に達したことを示している。これより、識別器による物理損失や幾何学的制約におけるペナルティに対し、生成器が破綻することなく適応できたと考えられる。また、生成器はランダムな構造を生成して識別器による低い評価となる段階を早期に脱し、複雑な境界条件や加工制限をクリアした上で、所望の偏光特性を発現する構造の生成が可能となったと考えられる。

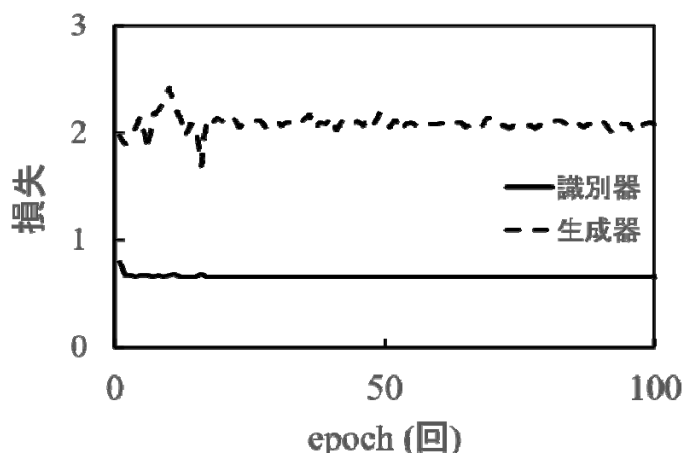


図2 敵対的生成ネットワークモデルの学習時の損失の変化

図3に提案する敵対的生成ネットワークモデルによって生成された偏光制御素子のx-y平面における断面図を示す．生成された構造は，大面積への展開を見据え，二次元的な周期的配置に適応するよう最適化されており，1ユニットセルの設計領域はx軸，y軸ともに1辺120 μm の正方形で構成されている．図中の白色領域はアルミニウムの薄膜パターンであり，黒色領域は穿孔された空気孔を表している．生成されたパターンの最小線幅やギャップの寸法は想定している作製プロセスの加工精度限界である3 μm を遵守している．これは，識別器に組み込んだ幾何学的制約フィルタが有効に機能した結果であり，構造の作製が可能なデザインをシミュレーションなしで生成可能であることが分かる．

図3に示した最適化構造の光学特性を詳細に検証するため，有限差分時間領域（Finite-Difference Time-Domain: FDTD）法

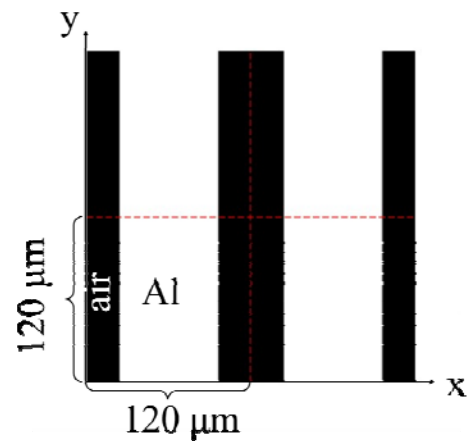


図3 生成された構造のx-y平面断面

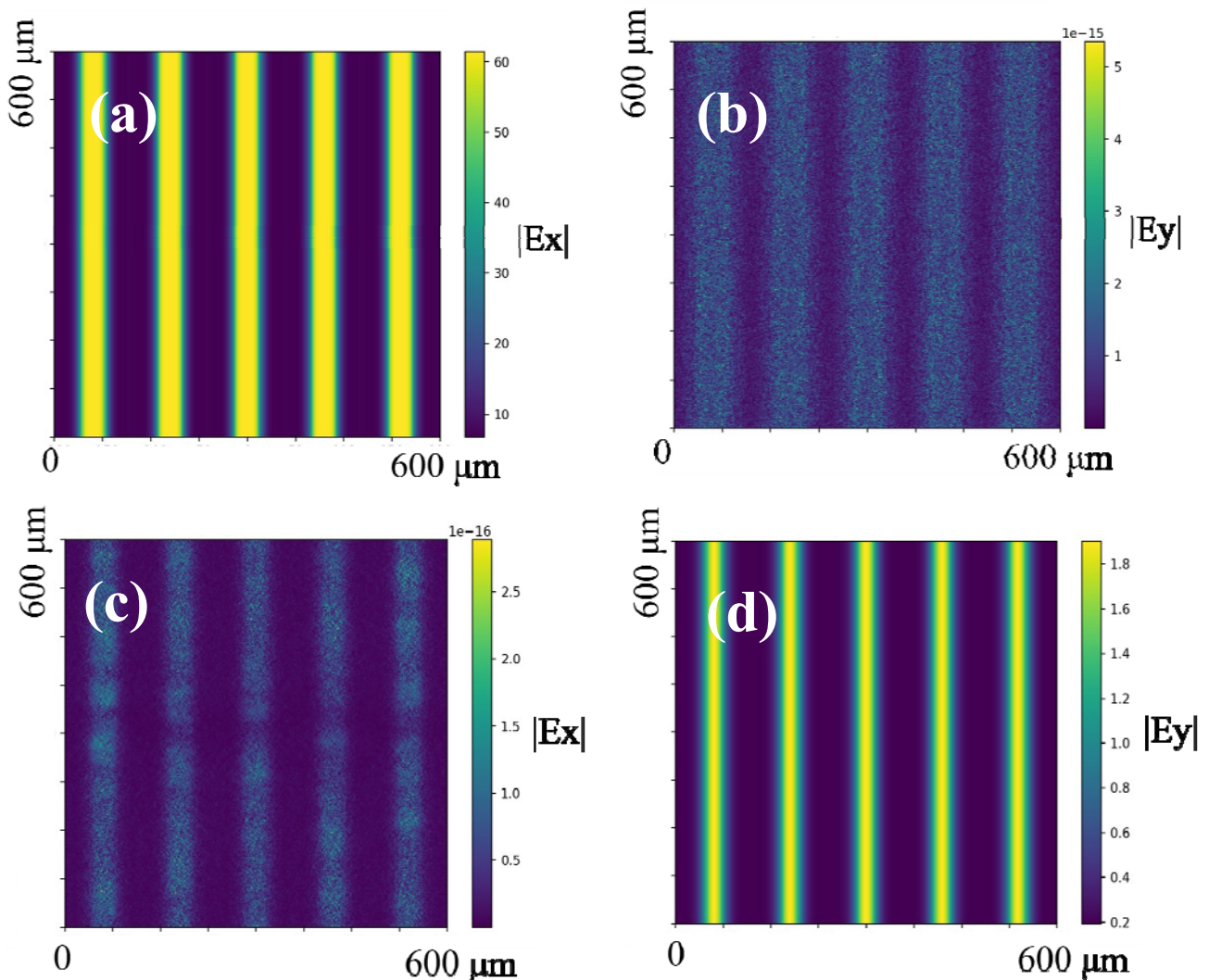


図4 生成した構造構造透過直後のx-y断面における電界分布 (a) x偏光が入射された場合のEx成分，(b) x偏光が入射された場合のEy成分，(c) y偏光が入射された場合のEx成分，(d) y偏光が入射された場合のEy成分

を用いた電磁界解析を行った．解析では，波長100 μm の平面波を光源とし，電界がx軸方向（x偏光）お

よび y 軸方向 (y 偏光) に振動する 2 種類の直線偏光を垂直入射した。解析モデルは、最適化されたユニットセルを x 軸および y 軸方向にそれぞれ 5 個配列した 1 辺 $600\ \mu\text{m}$ の周期構造 (ユニットセル周期 $120\ \mu\text{m}$) とした。図 4 に、構造透過直後の x - y 断面における電界分布を示す。図 4(a) および (b) は x 偏光入射時における透過電界の x 成分および y 成分であり、図 4(c) および (d) は y 偏光入射時における透過電界の x 成分および y 成分をそれぞれ表している。図 4(a), (b) より、 x 偏光を入射した場合は電界が構造内の空気孔を伝搬し、前方へ透過していることを確認できる。一方、図 4(c), (d) に示す y 偏光の入射時では、電界が空気孔の入力端近傍に一部浸入しているものの、前方へはほとんど伝搬せず、透過電界の最大振幅は x 偏光入射時の約 3.0% にまで抑制されている。この偏光選択的な透過・遮蔽挙動は、最適化された構造が有する構造的複屈折および導波モードの偏光依存性に起因するものと考えられる。本構造の周期 ($120\ \mu\text{m}$) は入射波長 ($100\ \mu\text{m}$) と同程度であり、空気孔の幾何学的異方性が、 x 偏光に対しては伝搬モードを許容する一方で、 y 偏光に対しては遮断条件を満たすように作用している。構造全体として y 偏光を効率的に反射・遮蔽するワイヤグリッド様の機能が発現しているといえる。

さらに、構造内部および近傍における電界の伝搬挙動を詳細に解析するため、 $y = 300\ \mu\text{m}$ での x - z 断面における電界強度分布を図 5 に示す。図 5(a) の x 偏光入射時では、入射波が生成された微細構造内を大きな減衰なく通過し、順方向に伝搬していく様子が確認できる。一方、図 5(b) の y 偏光入射時においては、電界が構造の入力端面において遮断され、構造内部へ伝搬することなく後方へ反射されている様子が確認できる。これらの透過および反射特性に関する解析結果から、敵対的生成ネットワークによって最適化された構造は、目標特性である x 軸方向の電界成分を持つ電磁波のみを選択的に透過させる偏光分離機能を有していることを確認できた。これにより、敵対的生成ネットワークを用いた設計手法が、所望の特性を持つ微細構造の導出において有効であることが確認された。

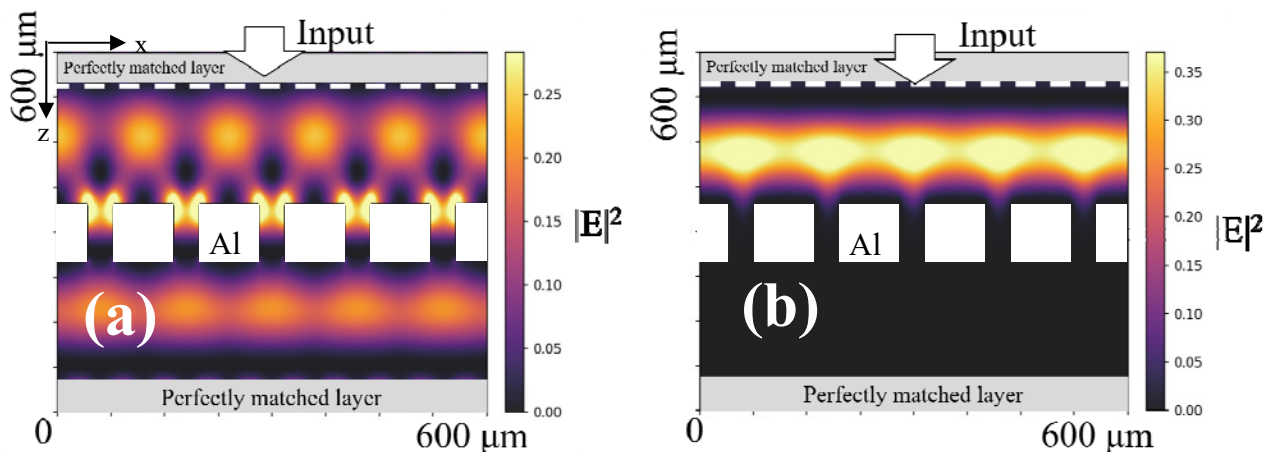


図 5 $y = 300\ \mu\text{m}$ での x - z 断面における電界強度分 (a) x 偏光入射時, (b) y 偏光入射時

3 まとめ

本研究では、APN 等への応用を見据え、微小化と低損失化を両立する波長偏光制御素子の自動設計を目的とし、敵対的生成ネットワークを用いた設計手法を提案・実証した。具体的には、波長 $100\ \mu\text{m}$ における特定の偏光成分のみを選択的に透過させる微細構造の創出を対象とし、その有効性を電磁界解析により評価した。本手法では、敵対的生成ネットワークモデルの学習プロセスにおいて、最小線幅制限等の作製プロセスにおける幾何学的制約を識別器に直接組み込んだ。生成器と識別器の対抗的学習において、全 100 サイクルを通じて両者の損失関数は安定して一定値に収束し、学習の破綻なく最適化が進行することを確認した。これにより、実際の微細加工において再現不可能な孤立パターンや極小ギャップを自動的に排除した実用性の高い構造の生成が可能となった。生成された 1 辺 $120\ \mu\text{m}$ のユニットセル構造について、 5×5 の周期配列を対象に FDTD 法による電磁界解析を行った結果、 x 偏光の垂直入射に対しては電界が空気孔内を効率的に

伝搬して前方へ透過する一方、y 偏光に対しては構造の入力端面において電界が遮断され、後方へ強く反射される様子を確認できた。y 偏光の透過電界最大振幅は x 偏光入射時の約 3.0%にまで抑制されており、提案構造が高い偏光分離能を有していることを確認した。これらの結果は、敵対的生成ネットワークを用いた設計手法が、偏光制御素子構造の設計において有効な方法であることを示している。

今後の課題としては、本研究で最適化された構造の妥当性を実験的に検証するため、実際に素子を作製し、評価を行うことが挙げられる。具体的には、厚さ 30 μm のアルミニウム等の金属薄膜基板に対し、レーザ加工技術を用いて、生成された微細パターンを精密に加工・再現する。作製した素子に対しては、テラヘルツ時間領域分光法等の光学計測システムを用いて、波長 100 μm における x 偏光および y 偏光の透過率・反射率スペクトルを評価する。これにより、シミュレーションで得られた偏光分離特性や挿入損失、消光比が実験的にも再現されるかを検証し、プロセス誤差に対するロバスト性を評価するとともに、実環境における APN 用偏光制御素子としての実用性を実証していく予定である。

【参考文献】

- [1] 総務省, 令和 7 年版情報通信白書 (2025).
- [2] H. Zafar et al., Laser Photonics Rev., Vol. 18, 2301025 (2024).
- [3] I. Goodfellow et al., Communications of the ACM 63.11, pp. 139-144 (2020).

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Experimental demonstration of hybrid plasmonic devices on propagation characteristics	Kosen Research International Symposium 2025, Research Highlights & Abstract, p. 217 (2025).	2025 年 8 月
AI を利用した光学素子の設計	次世代光フォーラム 2026 in 徳島 論文集 pp. 59 – 69 (2026).	2026 年 1 月