

非冗長光フェーズドアレイによる高分解能光掃引

High-resolution beam steering with non-redundant optical phased array

東大院工 ○福井太一郎, 田之村亮汰, 小松憲人, 山下大之, 高橋俊, 中野義昭, 種村拓夫

Univ. of Tokyo¹, ○Taichiro Fukui, Ryota Tanomura, Kento Komatsu, Daiji Yamashita,

Shun Takahashi, Yoshiaki Nakano, and Takuo Tanemura

E-mail: fukui@hotaka.t.u-tokyo.ac.jp

光フェーズドアレイ(OPA: optical phased array)は, 多数のポートから位相制御した光を出射することにより光偏光を行う素子である. 小型な半導体チップに集積可能な非機械式の光偏向素子として機能し, 高信頼性・省電力性・省スペース性・高速性などの利点により注目されている[1]. 一方, 従来の OPA はポート数程度の解像点数しか実現できず, 実用的な高い空間分解能の実現は困難だった. 本研究では, 図 1(a)に示すように, 非冗長アレイ(NRA: non-redundant array)[2] (図中のものは二次元 NRA の一種であるコストスアレイ[3])に従い N 個の光出射アンテナを配置することで, アンテナ数 N の 2 乗オーダーの高い空間分解能を実現できることを見出し, シリコン OPA 素子を用いて実証した.

OPA は, 出射光が自由空間を十分伝搬したあとに形成するフ라운ホーファ回折像, 即ち遠視野像(FFP: Far-field pattern)を用いる. FFP は出射部の極近傍での電界分布, 即ち近視野像(NFP: near field pattern)のフーリエ変換で与えられる. 一方, 画像取得等で重要な FFP の強度分布は NFP のフーリエ変換の二乗であるから, ウィーナー・ヒンチンの定理により, その空間周波数スペクトルは NFP の自己相関関数で与えられる. この自己相関関数を広帯域化・平坦化することにより, 鋭い強度ピークを持つ FFP を形成することができる. 自己相関を平坦化・広帯域化するためには, 各ポートのアンテナ位置の差分ベクトルが極力均一な密度で広範囲に分布していればよい[4].

NRA とは, 任意の要素の組の間の差分ベクトルが相異なるようなアレイ配置である. 1 次元においてはゴロム定規[5], 2 次元においてはコストスアレイ[3]などが知られているが, これらを OPA の出射アンテナ配置に適用することで, 高い空間分解能が実現できる. 一例として $N = 36$ の等間隔アレイ[図 1(b)]とコストスアレイ[図 1(c)]のアレイ配置の自己相関関数を比較すると, 確かに等間隔アレイの自己相関関数[図 1(d)]が狭いピラミッド型の分布であるのに対し, コストスアレイの自己相関関数[図 1(e)]は均一かつ広域に分布していることがわかる. 特に, NRA を用いると任意の要素の組がそれぞれ別の空間周波数成分として寄与するため実現可能な空間分解能は, 要素の組の場合の数, 即ち N^2 に比例して増大する. このため, 空間分解能のスケラビリティが従来の OPA 素子に較べ格段に優れている.

実験的に上記の効果を実証するため, コストスアレイに基づき出射ポートを配置したシリコン集積 OPA を作製した($N = 127$). 作製した集積素子を図 2(a)に示す. 素子中で光は多段 1×2 スプリッタにより 128 本の導波路に分配され(1 ポートはモニタ用に用いた), 127 ポートそれぞれに付随する熱光学効果位相シフタにより位相制御された後, 微小回折格子カプラ型アンテナにより上方に出射される. OPA の出射光は 4-f 系を介して NFP を一度結像し, スリットで背景光を除去した後, 2-f 系により FFP を形成し, InGaAs カメラにより観察した. 逐次的最適化により各位相シフタの駆動信号を最適化して得られた FFP の強度分布を図 2(b)に示す. 更に, FFP 面の座標軸である (θ, ψ) のそれぞれの方向についても光偏向を行った. θ 軸についての光掃引結果($\psi = 0$)を図 2(c)に, ψ 軸についての光掃引結果($\theta = 0$)を図 2(d)に示す. 各軸について全掃引可能範囲に亘って光掃引を行うことができた. また, FFP の半値全幅は 0.0428° であり, 理論と一致する.

この結果と, アレイ配置の基本間隔 $15 \mu\text{m}$ から導かれる掃引可能範囲 $5.92^\circ \times 5.92^\circ$ をもとに解像点数を算出すると, $\sim 19,100$ 点 ($\sim N^2$)となる. これは, 波長掃引を用いない OPA で得られた解像点数としては過去最大の解像点数である. 以上より, NRA を用いた OPA の有効性が示された.

謝辞 本研究は, 文部科学省科学研究費補助金 (18H03769, 21J11982) の助成を受けて実施された.

参考文献 [1] M. J. R. Heck, *Nanophotonics* **6**(1), 93 (2017). [2] A. Moffet, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **16**(2), 172 (1968). [3] J. P. Costas, *Proc. IEEE* **72**(8), 996 (1984). [4] T. Fukui *et al.*, *Optica* **8**, 1350 (2021). [5] W. C. Babcock, *The Bell Sys. Tech. J.* **32**(1), 63 (1953).

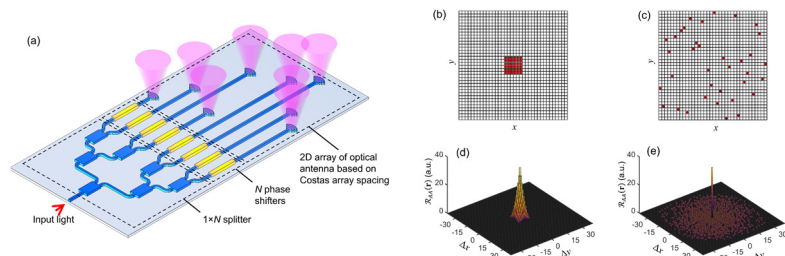


図 1. (a) 本研究で用いた OPA の模式図. (b) 2 次元等間隔アレイ ($N = 36$). (c) コストスアレイ ($N = 36$). (d) 2 次元等間隔アレイの自己相関関数. (e) コストスアレイの自己相関関数.

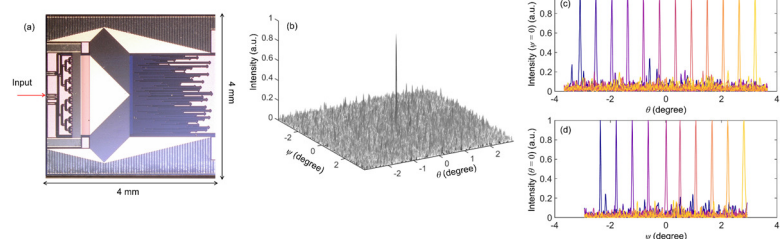


図 2. (a) 作製した OPA の顕微鏡写真. (b) ビーム形成結果の一例. (c) θ 方向についての光掃引結果 ($\psi = 0$). (d) ψ 方向についての光掃引結果 ($\theta = 0$).