

doi:10.3788/gzxb20184709.0913001

基于爬坡算法的片上低栅瓣二维光学相控阵

杜书剑^{1,2,3}, 章玲璇^{1,2,3}, 王国玺^{1,2,3}, 李中宇^{1,2,3},
张其浩^{1,2,3}, 谢鹏^{1,2,3}, 李燕¹, 米磊¹, 孙笑晨^{1,2}, 张文富^{1,2,3}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西安光学精密机械研究所 中英微纳光子学联合研究中心, 西安 710119)

摘 要:通过两级定向耦合器结构实现了光学相控阵天线阵列的二维排布,并设计了特殊 C 形弯曲波导进行热调作为阵元的相位控制器.提出一种针对阵元数量不高的稀疏片上光学相控阵远场高阶干涉栅瓣的压缩方法,将均匀的阵元间距通过爬坡算法优化成非均匀间距,以破坏栅瓣产生所需的干涉相长条件,实现对栅瓣的压缩作用.在 1 310 nm 波长,通过时域有限差分法对基于微型光栅耦合器天线的稀疏阵列进行计算分析,结果表明优化的阵元间距能实现 -6~-7dB 的栅瓣抑制比.

关键词:硅光子学;相控阵;爬坡算法;光栅;栅瓣;干涉

中图分类号:TN256

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0913001-9

Low Side Lobe On-chip Two Dimensional Optical Phased Array Based on the Hill Climbing Algorithm

DU Shu-jian^{1,2,3}, ZHANG Ling-xuan^{1,2,3}, WANG Guo-xi^{1,2,3}, LI Zhong-yu^{1,2,3},
ZHANG Qi-hao^{1,2,3}, XIE Peng^{1,2,3}, LI Yan¹, MI Lei¹, SUN Xiao-chen^{1,2}, ZHANG Wen-fu^{1,2,3}
(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 China-UK Joint Research Center of Micro/Nano Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: A two-stage directional coupler structure is proposed to realize the two dimensional optical phased array, and a distinctive C-bend waveguide is designed for thermal regulation as optical phase shifter of array element. A method that compresses far field side lobes caused by high-order interference for sparse on-chip optical phased arrays is presented. Hill climbing algorithm is adopted to optimize the uniform antenna spacing and make it become non-uniform, which will greatly mitigate constructive interference conditions and then compress far field side lobes. Using finite difference time-domain method to simulate the sparse optical grating coupler array designed at 1 310 nm wavelength showing that this optimization can realize a -6~-7 dB ratio of side lobe and main lobe.

Key words: Silicon photonics; Phased array; Hill climbing algorithm; Gratings; Side lobe; Interference

OCIS Codes: 130.0130; 130.3120; 130.0250; 250.4390

0 引言

光学相控阵(Optical Phased Array, OPA)是一种工作在光学频段、由相控阵元组成的阵列,能够通过调

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61475188, 61705257, 61405243),中国科学院战略性先导科技专项(B类)(No.XDB24030600)资助

第一作者:杜书剑(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为微纳光子器件.Email:dushujian2015@opt.cn

通讯作者:张文富(1982-),男,研究员,博士,主要研究方向为微纳光子器件.Email:wfuzhang@opt.ac.cn

导 师:李燕(1977-),女,副研究员,博士,主要研究方向为光学载荷系统总体技术. Email:lyan@opt.ac.cn

收稿日期:2018-01-03;录用日期:2018-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

节每个阵元出射光相位来实现光束转向,可用于点对点自由空间光通信^[1]、光探测与测量^[2](Light Detection And Ranging, LIDAR)、全息成像^[3]等。

1971年,MEYER R A^[4]用钽酸锂移相器制成了第一个一维 OPA,验证了 OPA 技术的基本理论,奠定了 OPA 技术的发展基础.迄今,研究人员已经通过液晶^[5]、光纤^[6]、III-V 族激光器阵列^[7]、光波导^[8]、微机电系统(Micro-electromechanical Systems, MEMS)^[9-11]等多种平台实现了 OPA.由于硅基光波导能够借助热光或电光效应实现相位控制,同时硅光子集成具有 CMOS 工艺兼容等特点,光学相控阵通过硅光子集成技术实现具有一定先天优势.2010年 ACOLEYEN K V 等^[12]采用 SOI(Silicon-On-Insulator)结构完成了阵列大小为 4×4 的二维 OPA.2011年 KWONG D 等^[13]在 SOI 上采用非均匀间隔的阵列结构完成一维 OPA 片上集成.2011年 DOYLEND J K 等^[14]设计并加工了一种由 16 根硅波导组成的一维相控阵,实现了光束二维扫描.2013年, SUN J 等^[3]首次报道了大规模集成的 OPA,实现了 64×64 的无源 OPA 阵列以及 8×8 的有源 OPA 阵列,并用该 OPA 实现了成像功能,揭示了大规模光子集成 OPA 的可行性与巨大潜力.2014年 KWONG D 等^[2]优化了 DOYLEND J K 等设计的二维扫描 OPA,降低了加工难度.2016年 HUTCHISON D N 等^[15]将一维光栅耦合器阵列集成度提升到了 128 根,采用非均匀随机间隔排布,实现了 80° 大偏转范围。

OPA 的关键参数指标包含分辨率、偏转角大小以及主旁瓣对比度等^[15].目前片上光学相控阵受限于集成度,广泛采用的方案是一维阵列,为了实现二维光束偏转,采用多波长入射,一个维度通过控制出射光相位从而控制干涉主瓣偏转,另一个维度通过波长扫描而产生的色散来实现扫描.由于目前可用于集成化的可调谐光源不仅成本高而且带宽窄,制约了相控阵关键参数的提升.而少数的二维相控阵方案受光学频段波长短、阵元间距大等因素限制,产生了高阶干涉的栅瓣,使其无法满足应用需求.传统的射频相控阵通过二项式阵列、Dolph-Chebyshev 阵列等方法有效消除了栅瓣.HUTCHISON D N 等通过提升发射阵元的数量并采用伪随机间隔排布,消除了一维片上光学相控阵栅瓣,但是二维光学相控阵受阵元集成数量不高的限制,很难采用已有方法有效消除栅瓣。

本文设计了一种二维光学相控阵列,实现二维光束扫描,并且通过爬坡算法优化了阵元间距,解决了小阵元数目(单个维度阵元数量 < 10)、阵元稀布(阵元间隔 $> 10\lambda$)的硅基片上二维光学相控阵消栅瓣问题,实现了 $-6 \sim -7$ dB 的栅瓣抑制比,从而提升了分辨率以及偏转角两个关键指标。

1 基本原理

图 1 是一维 OPA 原理简图,距离为 d 的 N 个发射天线辐射出的光束在相控阵的控制下偏转角度 θ_s ,远场光场的主瓣在 O 点.若各个天线辐射强度相同,远场成像距离为 D ,则远场的电场分布可以表示为

$$E(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{in(\Delta\varphi_d - \Delta\varphi)} \quad (1)$$

式中, $\Delta\varphi$ 为光束偏转 θ_s 需要相位控制阵元的相位差, $\Delta\varphi_d$ 为阵元由于空间间隔 d 产生的空间相位差。

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_s \quad (2)$$

$$\Delta\varphi_d = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (3)$$

在不考虑衍射因子情况下,远场光强分布为

$$I(\theta) = |E(\theta)|^2 = N^2 \frac{\sin^2 \left[n \frac{\pi}{\lambda} d (\sin \theta - \sin \theta_s) \right]}{\left(N \frac{\pi}{\lambda} d \right)^2 (\sin \theta - \sin \theta_s)^2} \quad (4)$$

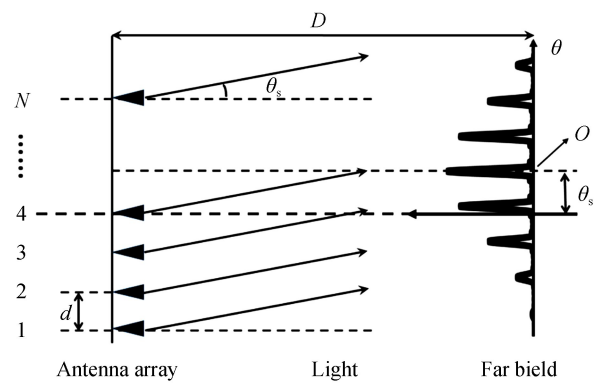


图 1 一维光学相控阵原理
Fig.1 Schematic diagram of one dimensional optical phased array

当 $\sin \theta = \sin \theta_s$ 时,光强为极大值,此时在 θ_s 方向生成主瓣.

若考虑调制相位差以及空间相位差共同作用,则阵元间的总相位差 α 为

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} d (\sin \theta - \sin \theta_s) \quad (5)$$

2 片上二维相控阵单元器件设计与仿真分析

如图 2,将阵元按照二维方阵排布,即可得到二维的光学相控阵列.阵列单元由定向耦合器(Directional coupler)、相位控制器以及光栅结构的微型天线三部分组成.采用波长为 1 310 nm 的近红外光,经单路输入后,在输入波导上设置 9 个定向耦合器,从而将输入的单路光分别耦合进 9 根波导,其中每根波导中的光功率相同.每路波导再设置 9 个定向耦合器,每个定向耦合器连接相控阵元.由此单路光输入通过两级的定向耦合器之后成功耦合进 81 个相控阵元.每个相控阵元包含了独立的相位控制单元,通过热调制功能,改变每个天线出射光的相位,从而达到光束扫描的效果.

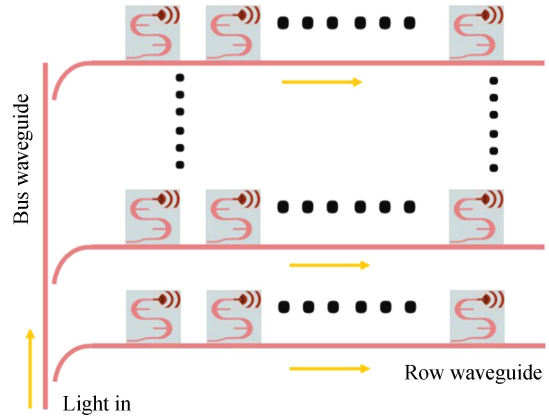


图 2 二维相控阵整体结构

Fig.2 Schematic diagram of two dimensional optical phased array

2.1 基于光栅耦合器的天线设计与仿真

图 2 所示的二维的片上 OPA 需要设计一种微型光栅^[16]作为天线^[17-19],将波导中的光场辐射到自由空间进行干涉.

天线的远场发散角越大,OPA 的可分辨偏转角度也越大,因此需要天线尽可能小.为了保证光栅尺寸足够小,设计时尽量减少光栅的周期数.但是较少的光栅周期数会降低辐射效率,为了能够有较高的辐射效率,光栅设计成图 3 的 Taper 形状,且为完全刻蚀结构,即刻蚀深度设置为波导厚度 $0.22 \mu\text{m}$.对于 SOI 结构的光栅,会有大量的光场能量向衬底辐射掉,造成能量利用率的降低,影响最终远场的辐射功率,因此将第一级设计为浅刻蚀,刻蚀深度设置为 $0.07 \mu\text{m}$,使向上辐射的光场干涉增强,保证光场能量主要向上辐射^[20].最终设计出的天线长宽尺寸 $< 3 \mu\text{m}$,采用 1310 nm 波长的光输入,图 4 为由有限时域差分算法并归一化后得到近场以及远场结果.

图 4(a)为天线近场辐射归一化强度分布,光场能量集中在光栅的第二级辐射出去,反射与散射损耗较小,保证了辐射效率;图 4(b)为天线远场归一化强度分布,X 方向与 Y 方向的远场发散角都达到 50° ,达到了 OPA 偏转角度的需求.

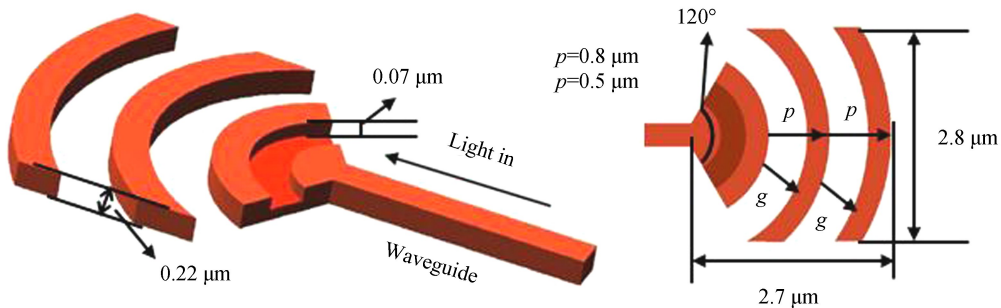


图 3 微型天线结构

Fig.3 A schematic of a Si photonics nanoantenna

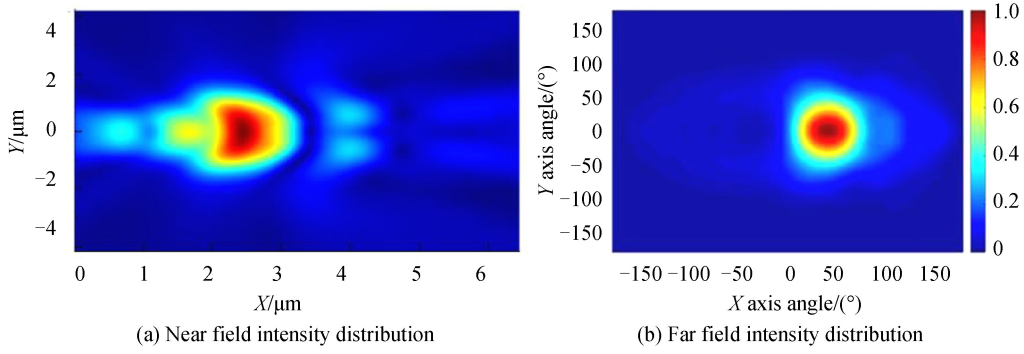


图4 天线光场强度分布

Fig.4 Electromagnetic field intensity distribution of the nanoantenna

2.2 定向耦合器设计与仿真分析

定向耦合器将光源输入到主波导(Bus waveguide)的光分别耦合进 9 路行波导(Row waveguide),行波导中再设置 9 个定向耦合器,将光场能量分别耦合进每个阵元.耦合器结构如图 5(a),耦合效率 T 与波导宽度、波导间距以及耦合长度有关.其中波导宽度和波导间距越小,耦合效率越高,设置间隔宽度(Gap)为 $0.2 \mu\text{m}$,同时为了保证波导中的光场单模传输,设置波导宽度(Width)为 $0.34 \mu\text{m}$.通过三维时域有限差分算法仿真计算得到耦合过程波导中的场强分布如图 5(b),光场经过耦合结构后主波导中光场明显减弱,部分光场耦合进了上方的弯曲波导.

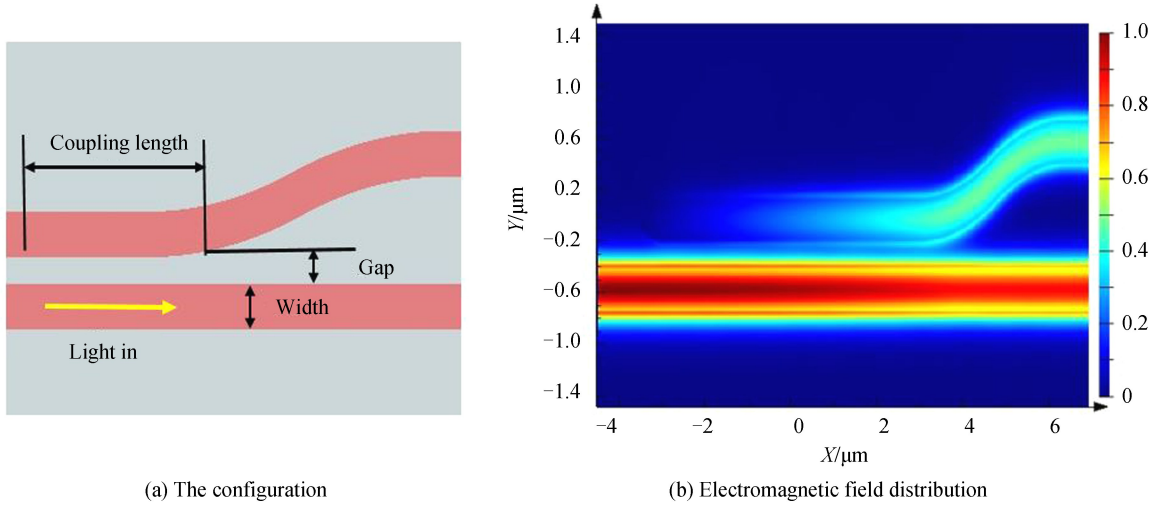


图5 定向耦合器设计

Fig.5 The design of the directional coupler

为了使每个天线的辐射功率相同从而保证规则的远场成像,需要调控每个定向耦合器的耦合效率以确保每个天线辐射功率相同.

设第 m 行 n 列的定向耦合器的耦合效率为 T_{mn} ,耦合的场强为 S_{mn} ,则

$$T_{mn} = \frac{S_{mn}}{S_{mN} + \sum_{j=n}^N S_{mj}} \quad (6)$$

设主波导上第 m 行的定向耦合器耦合效率为 T_m ,则

$$T_m = \frac{S_{mN} + \sum_{j=1}^N S_{mj}}{S_{MN} + \sum_{j=1}^N S_{Mj} + \sum_{i=m}^M (S_{iN} + \sum_{j=1}^N S_{ij})} \quad (7)$$

对于 9×9 的阵列设计, $M=N=9$,若光强分布为各个天线相同的均匀分布,可化简 $S_{mn}=1$.结合式(6)和(7),可以计算得到

$$T_m = \frac{1}{11-m} \quad (8)$$

$$T_{mn} = \frac{1}{11-n} \quad (9)$$

对于定向耦合器,当波导宽度以及波导间距确定后,耦合效率主要受耦合长度的影响,耦合长度越长,耦合效率越高,式(10)与图6表示了耦合效率 T 与耦合长度 L 的关系.

$$T = \sin^2\left(\frac{\pi L \Delta n_{\text{eff}}}{\lambda}\right) \quad (10)$$

式中, Δn_{eff} 为解模得到两个模式的有效折射率差.

结合式(8)和(9)的耦合效率分布,可得到整个相控阵列的所有耦合器需要的耦合长度.

2.3 相位控制器设计与仿真分析

由式(4)、(5)可知,为了确保远场干涉产生的主瓣可以在一定角度内进行扫描,需要对出射光的相位进行控制,从而使得各个天线的出射光存在相位差,因此需要在每个阵元的定向耦合器与天线之间设计相位控制器.

对于硅基光子器件,应用热光效应的相位控制器已经有成熟的设计思路与工艺,被广泛用于各种应用场景.常见的热调制方案是将金属加热电极覆盖在波导上方的电介质上,对波导进行加热,通过改变波导折射率来控制光的相位.对于集成度 9×9 的阵列,这种设计不仅影响相位控制速率与能量利用效率,同时由于阵元间距相对较小,热串扰会相对严重.

为了解决上述问题,热调器件可以直接由波导构成^[21-22].对于热调器件而言,一方面要实现天线出射光的相位变化范围能够达到 2π ,因此参与热调的波导需要尽可能长;另一方面为了尽量减小阵元整体尺寸,相位控制器所占的空间需要尽可能小.由此设计的相位控制器如图7所示,热调器件整体由两个弯曲C形的波导组成,保证了波导长度的同时缩小了相位控制器所占空间.

C形弯曲波导中间的波导和加热电极接触,用来对通光的C形波导进行控制.C形波导内外两侧为椭圆弧,在通光时,若波导宽度过小,热调制波导与C形波导接触处会带来大量的散射损耗;若波导宽度过大,则会在波导之中激发出高阶模式,也会降低整个相位控制器的透过率.影响C形波导宽度的两个重要参数是内侧椭圆弧的短轴长度 r_a 与内外椭圆弧圆心距离 Δ ,C形波导的透过率与两个参数的关系如图8所示.

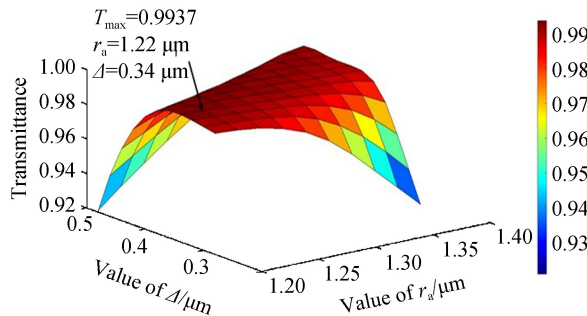


图8 C形波导透过率与圆心距离及短轴长度的二维分布关系

Fig.8 Two-dimensional relation between center distance and short axis length with transmittance of C shaped waveguide

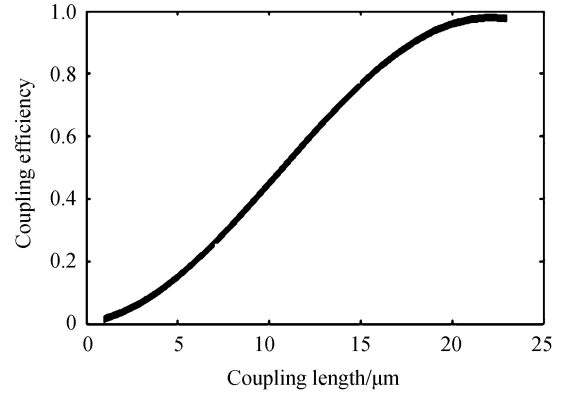


图6 定向耦合器耦合效率与耦合长度关系

Fig.6 Relation between coupling length of directional coupler and coupling efficiency

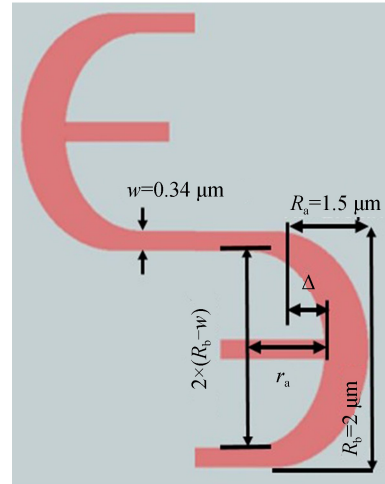


图7 相位控制器结构示意图

Fig.7 Configuration of the optical phase shifter

由图 8 可得,取 $\Delta=0.34 \mu\text{m}$, $r_a=1.22 \mu\text{m}$ 时,C 形波导透过率最高可达到 99.37%,此时光强分布如图 9,波导内光场保持单模传输,同时在交叉处散射损耗较少.

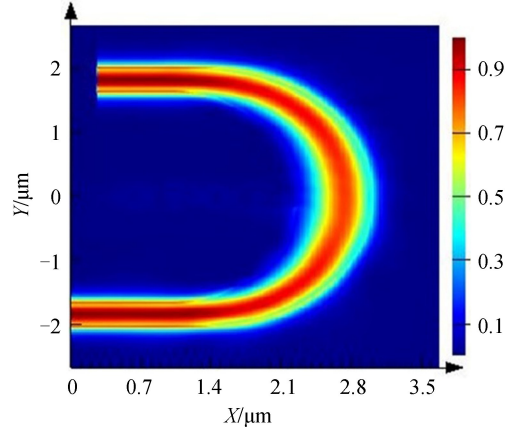


图 9 相位控制器光场强度分布

Fig.9 Electromagnetic field distribution of the optical phase shifter

3 片上二维相控阵远场消栅瓣设计

对于可调谐的二维有源片上 OPA,受金属布线工艺、实际应用中控制电路复杂度和功耗的限制,单一维度无法集成大量的相控阵元以及天线,此外,由于光学频段波长较小以及光波导尺寸的限制,相控阵元的间距无法和传统微波相控阵一样做到亚波长,增加了消除相干旁瓣的难度.

消除栅瓣需要破坏栅瓣的产生条件,即非主瓣位置处的干涉相长.由式(5)可知,产生主瓣以及栅瓣的干涉相长条件为

$$\Delta\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda}d(\sin\theta - \sin\theta_s) = \pm 2n\pi \quad (n=0,1,2,3 \dots) \quad (11)$$

式中, $\Delta\varphi_0$ 为阵元间总的相位差.

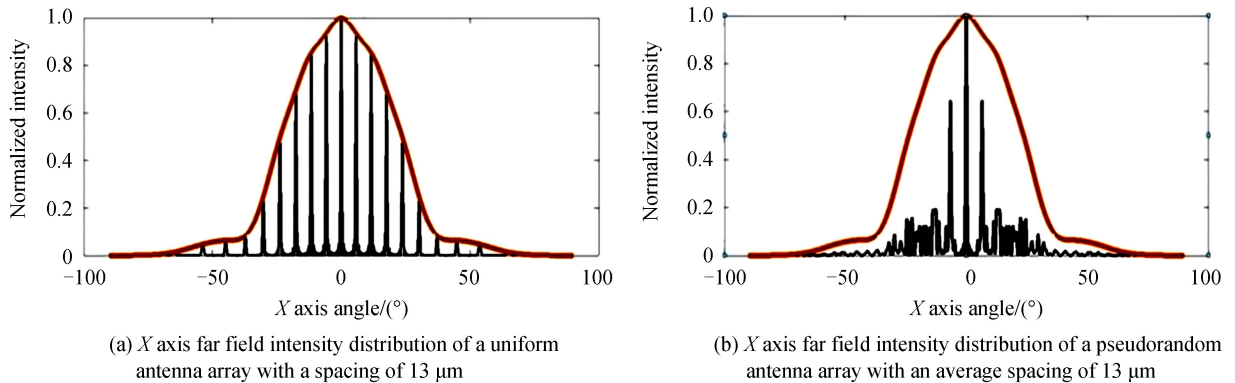
若将均匀阵列间隔优化成非均匀阵列间隔,则总相位差不再等于 $\pm 2n\pi$,即

$$\Delta\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda}d_n(\sin\theta - \sin\theta_s) \neq \pm 2n\pi \quad (12)$$

根据式(12)在 $\sin\theta = \sin\theta_s$ 的主瓣位置, $\Delta\varphi_0$ 始终等于 0,保证了主瓣位置始终能够干涉相长.若选取一组合适的间隔数 d_n ,就能对原均匀间隔阵列进行优化,优化后的非均匀间隔阵列取得压缩栅瓣的效果.

目前,被报道的有源片上 OPA 的集成度最大只有 8×8 ,单一维度只有 8 个阵元,间距只有 7 个,且比波长大一个数量级,在阵元数过少的情况下,二项式阵列、Dolph-Chebyshev 阵列以及伪随机排布阵列^[23]都无法体现其数据特点,因此均无法有效压缩栅瓣.

如图 10(a)、(c)所示,稀疏($d=13 \mu\text{m} \approx 10\lambda$)天线阵列在等间距均匀排布时,栅瓣过大,限制了主瓣偏转范围.图 10(b)、(d)是采用了均值为 $13 \mu\text{m}$ 的伪随机数作为间距的结果,阵元间隔取不等值之后对栅瓣的压



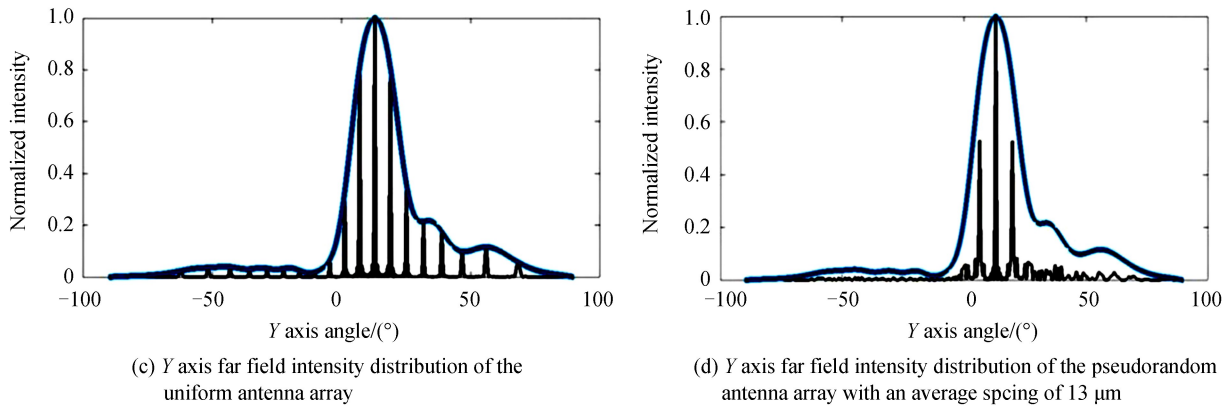


图 10 阵列的远场强度分布
Fig.10 Far field intensity distribution of antenna array

缩有了一定效果,但是由于阵元数量过少从而限制了间距的随机性,因而无法很好地破坏栅瓣干涉相长条件,使得栅瓣压缩效果不理想.

综上所述,想要取得理想的压缩栅瓣效果,需要让间距 d_n 具有更大的随机性.因此采用爬坡算法来优化间距,得到一组非均匀阵列间隔 d_n 之后,栅瓣相对于主瓣的压缩比如图 11,分别将栅瓣相对于主瓣压缩了 6.65 dB、7.26 dB.对比图 10 与 11,显然经过相位加权法优化阵元间距后,稀布相控阵列的栅瓣压缩效果有明显提升.

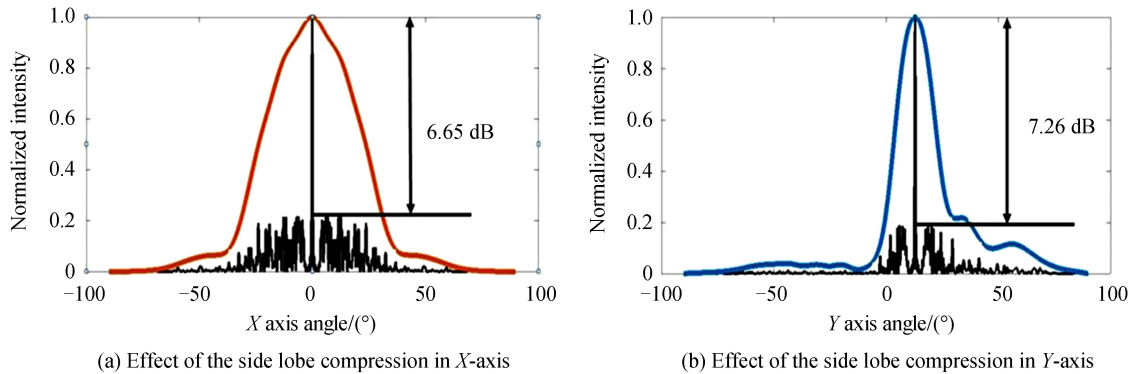


图 11 采用优化后的间距压缩栅瓣效果
Fig.11 Effect of the side lobe compression with optimized array spacing design

同时,由式(4)可知,主瓣与栅瓣的本质是多个天线光场干涉相长产生峰值,而干涉相长的条件为式(11),由于优化后的非规则间距破坏了式(11)构成条件,即令干涉相长条件更加严格,所以在压缩栅瓣的同时还取得了收窄主瓣的效果.如图 12(a),未优化前主瓣的半高全宽(Full Width at Half Maximum,

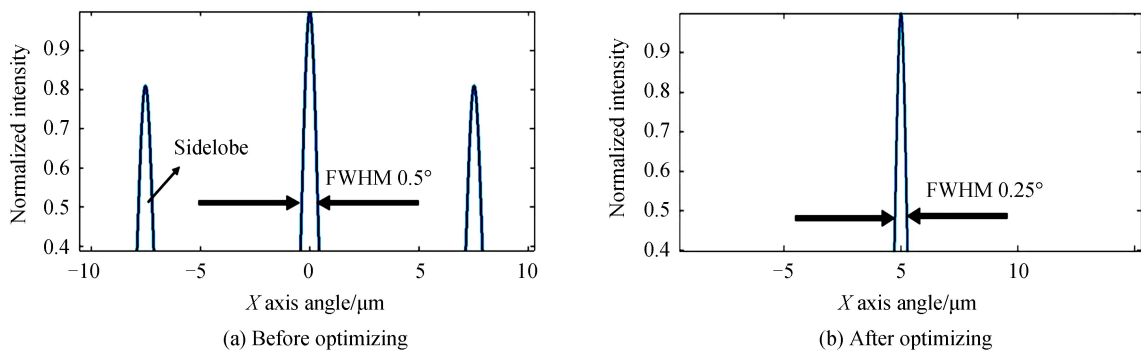


图 12 优化前后的主瓣半高全宽对比
Fig.12 Comparison of FWHM of the main lobe before and after optimizing

FWHM)为 0.5° , 优化之后效果如图 12(b), 不仅消除了栅瓣, FWHM 也缩小到了 0.25° , 由此将相控阵的分辨率提升了一倍.

4 结论

本文设计了一种低栅瓣、高分辨率的片上二维光学相控阵. 通过两级定向耦合器的结构实现了天线阵列的二维排布, 并且设计了基于弯曲波导的相位控制器结构, 缩小阵元间距的同时保证每个天线出射光相位独立可调. 同时对天线排布间隔基于爬坡算法进行优化, 远场强度的仿真结果表明, 优化出来的阵元间距能够有效压缩稀布的、阵元数量不高的片上光学相控阵在远场进行高阶干涉所产生的栅瓣, 将其成功压缩至主瓣的 $-6 \sim -7$ dB, 从而消除栅瓣所带来的影响, 提升了片上光学相控阵的偏转角, 并且将主瓣宽度压缩一半, 提高了分辨率, 提升了片上光学相控阵的实用性.

参考文献

- [1] GUAN B, SCOTT R P, QIN C, *et al.* Free-space coherent optical communication with orbital angular momentum multiplexing/demultiplexing using a hybrid 3D photonic integrated circuit[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(1): 145-156.
- [2] KWONG D, HOSSEINI A, COVEY J, *et al.* On-chip silicon optical phased array for two-dimensional beam steering[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(4): 941-944.
- [3] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, *et al.* Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, **493**: 195-199.
- [4] MEYER R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. *Applied Optics*, 1972, **11**(3): 613-616.
- [5] RESLER D P, HOBBS D S, SHARP R C, *et al.* High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(9): 689-691.
- [6] HUANG W R, MONTOYA J, KANSKY J E, *et al.* High speed, high power one-dimensional beam steering from a 6-element optical phased array[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(16): 17311-17318.
- [7] CARLSON N W, EVANS G A, AMANTEA R, *et al.* Electronic beam steering in monolithic grating-surface-emitting diode laser arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 1988, **53**(23): 2275-2277.
- [8] JARRAHI M, PEASE R F, MILLER D A, *et al.* Optical switching based on high-speed phased array optical beam steering[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(1): 014106.
- [9] CHAN T K, MEGENS M, YOO B W, *et al.* Optical beamsteering using an 8×8 MEMS phased array with closed-loop interferometric phase control[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3): 2807-2815.
- [10] YOO B W, MEGENS M, SUN T, *et al.* A 32×32 optical phased array using polysilicon sub-wavelength high-contrast-grating mirrors[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(16): 19029-19039.
- [11] YOO B W, MEGENS M, CHAN T, *et al.* Optical phased array using high contrast gratings for two dimensional beamforming and beamsteering[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(10): 12238-12248.
- [12] ACOLEYEN K V, ROGIER H, BAETS R. Two-dimensional optical phased array antenna on silicon-on-insulator[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(13): 13655-13660.
- [13] KWONG D, HOSSEINI A, ZHANG Y, *et al.* 1×12 Unequally spaced waveguide array for actively tuned optical phased array on a silicon nanomembrane[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(5): 051104.
- [14] DOYLEND J K, HECK M J R, BOVINGTON J T, *et al.* Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(22): 21595-21604.
- [15] HUTCHISON D N, SUN J, DOYLEND J K, *et al.* High-resolution aliasing-free optical beam steering[J]. *Optica*, 2016, **3**(8): 887-890.
- [16] HEI Xu-wei, ZHANG Ling-xuan, LIU Ji-hong, *et al.* Tunable narrowband filter based on guided mode resonance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(12): 1223001.
黑徐伟, 章玲璇, 刘继红, 等. 基于导模共振的窄带可调谐滤波器[J]. 光子学报, 2017, **46**(12): 1223001.
- [17] YAACOBI A, TIMURDOGAN E, WATTS M R. Vertical emitting aperture nanoantennas[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(9): 1454-1456.
- [18] NOTAROS J, POPOVIC M A. Finite-difference complex-wavevector band structure solver for analysis and design of periodic radiative microphotonic structures[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(6): 1053-1056.
- [19] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, *et al.* Large-scale silicon photonic circuits for optical phased arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, 2014, **20**(4): 8201115
- [20] ROELKENS G, THOURHOUT D V, BAETS R. High efficiency silicon-on-insulator grating coupler based on a polysilicon overlay[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(24): 11622-11630.
- [21] DEROSE C T, WATTS M R, TROTTER D C, *et al.* Silicon microring modulator with integrated heater

- and temperature sensor for thermal control[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2010: CThJ3.
- [22] WATTS M, ZORTMAN W, TROTTER D, *et al*. Adiabatic resonant microrings (ARMs) with directly integrated thermal microphotonics[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009: CPDB10.
- [23] KOMLJENOVIC T, HELKEY R, COLDREN L, *et al*. Sparse aperiodic arrays for optical beam forming and LIDAR [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(3): 2511-2528.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61475188, 61705257, 61405243), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No.XDB24030600)

引用格式:DU Shu-jian, ZHANG Ling-xuan, WANG Guo-xi, *et al*. Low Side Lobe On-chip Two Dimensional Optical Phased Array Based on the Hill Climbing Algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0913001

杜书剑,章玲璇,王国玺,等.基于爬坡算法的片上低栅瓣二维光学相控阵[J].光子学报,2018,**47**(9):0913001