

光学相控阵技术研究进展

颜跃武^{1,2}, 安俊明^{1,2}, 张家顺^{1*}, 王亮亮¹, 尹小杰¹, 吴远大^{1,2}, 王玥¹

¹中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 论述了光学相控阵的原理,回顾了光学相控阵的发展历程,特别是近年来硅光子相控阵的研究进展。利用与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺线相兼容的绝缘体上硅(SOI)技术实现了大规模的集成,目前国外报道的最大的硅光子相控阵集成了4096个阵元。在硅光子上实现的二维光束扫描角度可以达到 $46^\circ \times 36^\circ$,光束宽度只有 $0.85^\circ \times 0.18^\circ$,天线的损耗小于3 dB,且旁瓣抑制大于10 dB。此外,采用微机电系统(MEMS)器件实现的光学相控阵的光束扫描速度超过0.5 MHz。阐述了各种方式实现光学相控阵的优缺点,并对未来发展前景进行了展望。最后,介绍了光学相控阵在激光雷达、成像、军事上的应用。

关键词 光学器件; 光波导; 光学相控阵; 扫描角度; 绝缘体上硅

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020006

Research Progress of Optical Phased Array Technology

Yan Yuewu^{1,2}, An Junming^{1,2}, Zhang Jiashun¹,

Wang Liangliang¹, Yin Xiaojie¹, Wu Yuanda^{1,2}, Wang Yue¹

¹State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The principle of optical phased array is briefly discussed. The development of optical phased array is reviewed, especially the research progress of silicon photon phased array in recent years. Large-scale integration has been achieved by using silicon-on-insulator (SOI) technology compatible with complementary metal oxide semiconductor (CMOS) process lines. And the largest silicon photon phased array has been reported abroad, and its size is up to 4096 elements. The two-dimensional beam scanning angle achieved on silicon photons can reach $46^\circ \times 36^\circ$, the beam width is only $0.85^\circ \times 0.18^\circ$, the antenna loss is less than 3 dB, and the sidelobe suppression is greater than 10 dB. In addition, the steering speed of the optical phased array made of micro-electromechanical system (MEMS) devices is more than 0.5 MHz. Advantages and disadvantages of various methods to realize optical phased array are expounded, and the future development prospect is prospected. Finally, the applications of optical phased array in laser radar, imaging and military are introduced.

Key words optical devices; optical waveguide; optical phased array; scanning angle; silicon-on-insulator

OCIS codes 230.3120; 230.7370; 250.3140

收稿日期: 2017-07-28; 收到修改稿日期: 2017-08-11

基金项目: 国家 863 计划(2015AA016902)、国家自然科学基金重点项目(61435013)、国家自然科学基金青年基金(61405188)、王宽诚教育基金会资助项目

作者简介: 颜跃武(1994—),男,硕士研究生,主要从事光电子集成芯片方面的研究。

E-mail: yanyuewu16@mailsucas.ac.cn

导师简介: 安俊明(1969—),男,博士,研究员,主要从事光波导器件、光电子集成及产业化等方面的研究。

E-mail: junming@semi.ac.cn

1 引言

光学相控阵(OPA)的概念来源于传统的微波相控阵,但比微波相控阵有着明显的优势,由于光学相控阵是以工作在光波段的激光作为信息载体,因而不受传统无线电波的干扰,而且激光的波束窄,不易被侦察,具备良好的保密性。另外,相比于大体积的电学相控阵,光学相控阵可以集成在一块芯片上,尺寸小,质量轻,灵活性好,功耗低。这些优势使得光学相控阵在自由空间光通信、光检测和测距(LIDAR)、图像投影、激光雷达和光学存储等领域有着极大的吸引力^[1-6]。

1972年, Meyer^[7]用钽酸锂移相器实现了一维光学相控阵,验证了光学相控阵技术的一些基本理论,为以后光学相控阵的研究奠定了基础。传统上,光学相控阵有两个比较热门的研究方向,分别基于液晶(LC)和锆钛酸铅陶瓷(PLZT)材料,PLZT材料需要的调制电压较高,达到10 V以上,扫描角度受限,液晶材料虽然可以降低需要的工作电压,且经过多年的研究,已经可以实现大角度偏转,但是液晶的电光效应来自于液晶分子在电场作用下的重新取向,液晶分子的重新取向过程是一个非常缓慢的过程,因而这种光学相控阵响应较慢,限制了其在激光雷达等对光束扫描速度要求比较高的场合的应用。

除了上述液晶和电光晶体材料的光学相控阵之外,目前比较热门的两个光学相控阵研究方向为光波导相控阵和微机电系统(MEMS)相控阵。光波导相控阵因具有响应速度快、控制电压低、扫描角度大等特点受到了研究人员的青睐。随着半导体工艺的进步,尤其是与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺线相兼容的绝缘体上硅(SOD)技术的发展^[4-6,8-9],为开展大规模的硅光子集成提供了坚实的基础,使得光波导在光学相控阵领域显示出巨大的发展潜力^[10-14]。MEMS光学相控阵因具有系统稳定、功耗低、扫描速度快等特点,也成为了近年的研究热点。

本文简要介绍了光学相控阵的基本原理,并从实现光束偏转的方式出发,重点介绍了近年来比较热门的光波导光学相控阵和MEMS光学相控阵的研究进展,分析了这些光学相控阵的优缺点和今后光波导相控阵研究需要解决的问题,最后介绍了光学相控阵的相关应用。

2 基本原理

光学相控阵的基本原理和微波相控阵类似,一

束光经过光分束器分为多路光信号,在各路光信号不存在相位差的情况下,光到达等相位面处的时间相同,光向前传播,不会发生干涉,因而不会发生波束偏转。在各路光信号附加相位差之后(以各路光信号赋予均匀的相位差为例,第二个波导与第一个波导的相位差为 $\Delta\phi_B$,第三个波导与第一个波导的相位差为 $2\Delta\phi_B$,以此类推),此时的等相位面不再垂直于波导方向,而是有了一定的偏转,满足等相位关系的波束会相干相长,不满足等相位条件的光束就会相互抵消,故光束的指向总是垂直于等相位面。如图1所示,设相邻波导之间的间距都为 d ,则相邻波导输出的光束到达等相位面的光程差为 $\Delta R = d \cdot \sin \theta$,其中 θ 表示光束偏转角度,由于这个光程差是由阵元的相位差引起的,因而 $\Delta R = \Delta\phi_B \cdot \lambda / 2\pi$,所以在阵元中引入相位差完成了波束的偏转效果,这就是一维相控阵的扫描原理。

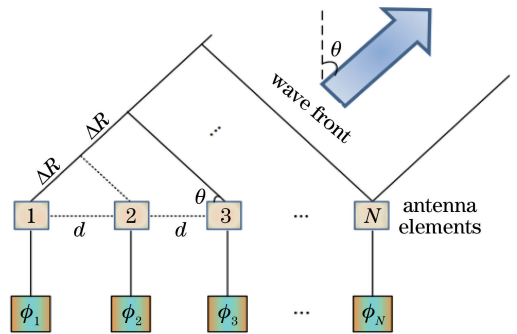


图1 光相控阵原理图

Fig. 1 Schematic of optical phased array

3 光波导光学相控阵研究进展

光学移相器是光学相控阵中的核心部件,主要是通过材料的一些特性来实现相位的变化。电光效应是通过外加电场的方式使得材料的折射率发生变化,采用电光调制的方式具有响应快速的特点,但是调制电压依然偏大,且功耗较高。热光效应指的是材料的折射率会随温度的变化而变化,通过给波导加热,改变波导的折射率,从而实现相位的变化,受环境温度的影响较大,需要一些伺服装置,以优化其使用范围,另外如何有效给波导进行加热及提高加热效率,也是一个需要解决的问题^[5-7]。

3.1 基于电光移相器的光波导相控阵

电光移相器是根据光的电光效应,即通过外加电压的方式,改变波导的折射率,引入相位差,完成调制功能。日本光通信和射频通信研究实验室于20世纪90年代提出波导阵列的光学相控阵天线技

术,该波导阵列由三根光纤组成,通过控制光束相位,采用相干合成的方法实现了光束的二维空间扫描,并完成了 0.30° 的光束偏转实验。该方法从理论以及实验上证明了光纤波导阵列实现光束扫描的可行性。1991年, Wight 等^[15]报道了由 AlGaAs 光波导构成的一维相控阵光波导扫描器,它具有高速度、高性能等优点。1993年, Vasey 等^[16]设计了基于 III-V 族化合物 AlGaAs 的一维光波导阵列,如图 2 所示,他们采用二级级联技术来减少控线数目,制备了一种快速、高性能一维相位阵列光束扫描器,该光波导阵列由 43 个阵元构成,在 900 nm 的工作波长下能够实现角度 ± 7.2 mrad 的偏转,全波调制电压小于 8.5 V,但是传输损耗高达 20 dB/cm。

国内开展光波导相控阵研究最早的是西安电子科技大学的石顺祥课题组,2005年,他们在 GaAs/AlGaAs 材料上所设计的 10 波导光波导阵列^[17](图 3)可以获得的最大扫描角度可达 13.6° ,扫描速度为 800 Hz,加载电压为 8.7 V,结果验证了光波导阵列电光扫描器原理的可行性。

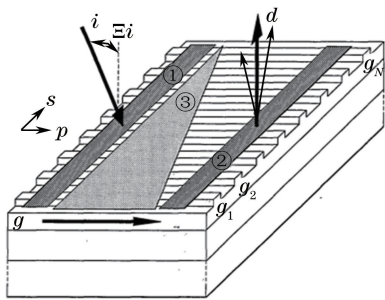


图 2 文献[16]中的光束扫描器示意图

Fig. 2 Schematic of the beam scanner in Ref. [16]

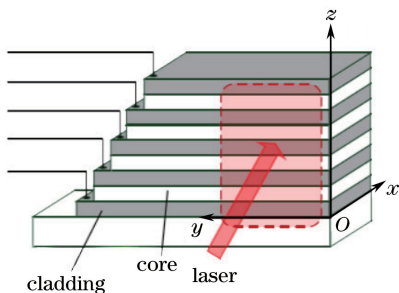


图 3 10 波导光相控阵

Fig. 3 Ten waveguide optical phased array

3.2 基于热光移相器的光波导相控阵

由于 SOI 与 CMOS 工艺线相兼容,使得硅光子利于实现大规模集成,近年来,该领域引发了研究的热潮。硅没有很高的电光系数,因而电光调制受限,但是硅在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处有相对较高的热光系数,为 $1.86 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,而且硅和二氧化硅之间的高折

射率差提供了很强的光场限制,为相位调制提供了一个低成本、较稳定的实现方式^[10]。

对于一个 $N \times N$ 的热光调谐的光学相控阵,要实现二维的波束扫描,则需要 $N \times N$ 个热光调谐阵元,无疑会大大增加系统的复杂性,对工艺也提出了很高的要求。在垂直于波导平面的方向上使用波长进行调谐,而在平行于波导平面的方向上仍然采用热光调谐,采用这种方式进行二维的光束扫描,只需要 $N+1$ (1 个可调谐激光器) 个控制单元就可以实现,大大减少了系统的复杂性。

在其中一个方向上,通过调控波导的相位差来实现光束的偏转;在另一个方向上,则可以通过输出光栅耦合器来实现,从光栅耦合器耦合出去的光的偏转角度 θ 满足如下关系:

$$\sin \theta = \frac{\Delta n_{\text{eff}} - \lambda_0}{n_{\text{cl}} \Lambda}, \quad (1)$$

式中 Λ 表示光栅的周期, n_{eff} 表示波导的有效折射率, λ_0 表示光在真空中的波长, n_{cl} 是背景的折射率,一般指的是光在空气中的折射率,即 $n_{\text{cl}} = 1$ 。由(1)式可以看出,偏转角度是波长和有效折射率的函数,因而可以通过调节波长或者有效折射率来实现另一个方向的角度偏转^[11]。

2009年, Acoleyen 等^[10]报道了一维光学相控阵,该器件通过焦耳加热来改变相位,如图 4 所示。图中 BCB 表示苯并环丁烯,用来芯片键合, MMI 表示多模干涉仪。实验证明,以这种方式进行光束扫描,在 1550 nm 波长下的扫描角度为 2.3° ,而波长控制的扫描角度为 14.1° 。2010年,在之前的研究基础上 Acoleyen 等^[11]报道了基于波长调谐的二维光学相控阵,实现了 $0.24^\circ/\text{nm}$ 的转向速度,天线损耗小于 3 dB。2011年, Acoleyen 等^[12]报道了包含 16 个阵元的光学相控阵,采用热光调谐,具有 23° 的视场范围,同时通过减小波导之间的间距,可以有效增加视场范围,鉴于硅光子易于实现大规模集成,也使其在光束转向和扫描应用中显示出巨大的潜力。

2011年, Doyle 等^[13]同样采用波长调谐和热光相位调谐的方式,制备了 16 通道的二维光相控阵列,如图 5 所示。该光相控阵列实现了远场分辨率小于 1° 的 $20^\circ \times 14^\circ$ 视场的自由空间光束转向,背景抑制超过 10 dB。2014年,他们又报道了集成在芯片上的 16 元素光学相控阵列,用于实现二维光束转向。该器件在顶层硅厚度为 250 nm 的 SOI 片上制作,光束扫描通过波长调谐和热光相移的组合实现,使用具有多晶硅覆盖层的硅波导光栅来实现窄的远

场光束宽度,同时减轻常规浅刻蚀光栅所需的精确刻蚀。实验表明:使用该系统,在 $20^\circ \times 15^\circ$ 视野下进

行二维转向,其旁瓣电平优于 10 dB,光束宽度为 $1.2^\circ \times 0.5^\circ$ 。

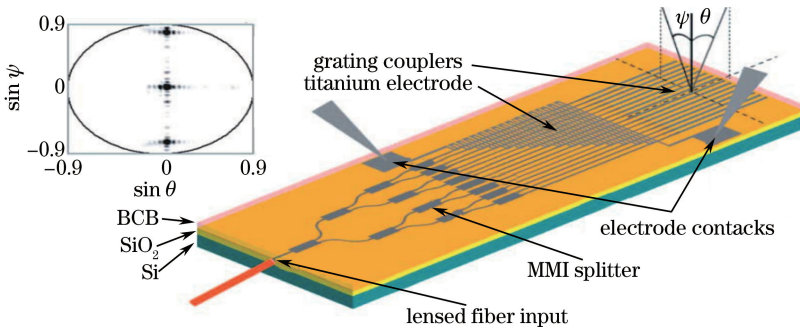


图 4 光束扫描组件示意图

Fig. 4 Schematic of the beam scanning component

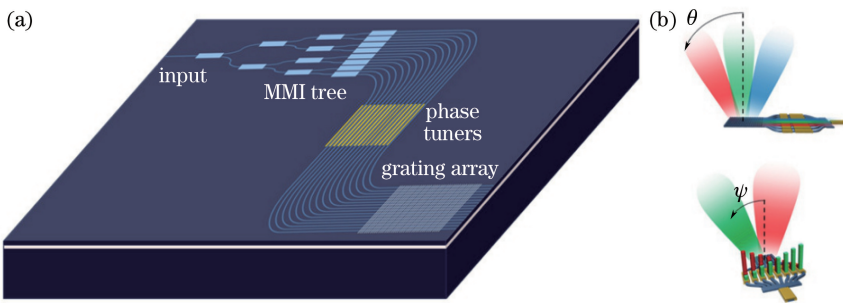


图 5 16 通道光栅阵列示意图。(a) 器件结构;(b)纵轴和横轴的角度取向

Fig. 5 Schematic of the 16-channel grating array.

(a) Device structure; (b) angle alignment of longitudinal axis and transverse axis

对于周期性的波导光学相控阵来说,由于相邻波导之间拥有相同的相位差,在远场干涉容易出现旁瓣,造成主瓣能量的损失和波束的展宽,影响波束扫描效果。为了抑制旁瓣的出现,实现大角度的扫描,需要确保其波导间距小于工作波长的一半,这又会造成相邻波导之间光场的强耦合,出现串扰,由于光波的波长往往是微米量级,即意味着波导的间距要小于 500 nm,这对工艺提出了更高的要求^[14,18-19]。

为了解决这个问题,2011年,Kwong等^[14]报道了一种非周期性的阵列波导结构,如图6所示,该结构输入端经过 1×12 的多模干涉仪耦合进入不等间距的直波导,通过电阻给波导加热,利用硅的热光效应(TO),改变波导的折射率,引入相位差,根据加热功率的不同,在远场不同方向上发生干涉,从而实现波束扫描。在热光调谐单元后还有时延线,用来补偿不等间距波导所引入的相位差,从而使得在不加热的情况下不会发生波束的偏转。实验结果表明:完成 2π 的相位偏移下,加热功率只需 24.8 mW,在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的扫描角度为 31.9° ,可以达到 100 kHz的扫描速度。

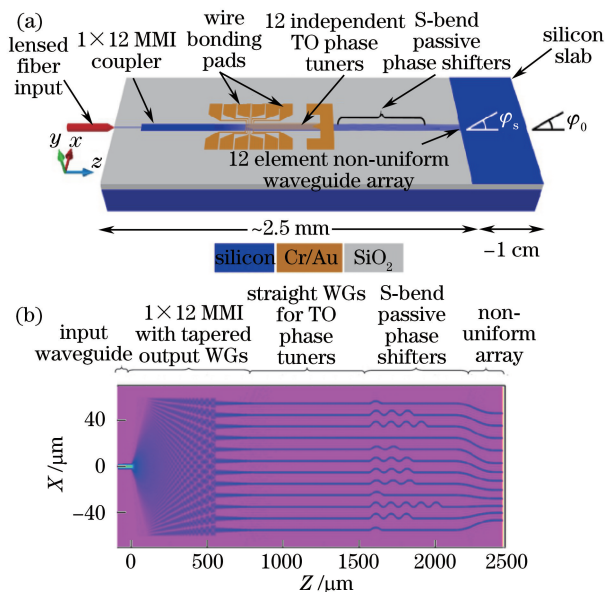


图 6 器件结构和仿真。(a)基于硅波导的优化相位阵列示意图;(b)光束传播模拟图

Fig. 6 Device structure and simulation. (a) Schematic of the silicon waveguide based optical phased array; (b) beam propagation simulation

2013年,美国国防部高级项目研究计划局(DARPA)在SOI上实现了大规模的二维纳米光相控阵^[18],验证了二维光相控阵技术在先进激光雷达(LADAR)和其他国防用途上的可行性。如图7所示,该器件采用直接给硅波导加热的方式进行热光调制,功率效率有所提升。另外,该相控阵列的 64×64 (4096)个纳米天线均集成在一块硅芯片上,而器件的尺寸却只有 $576 \mu\text{m} \times 576 \mu\text{m}$ 。

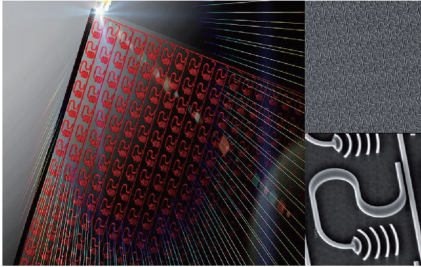


图7 纳米相控阵系统

Fig. 7 Nanophotonic phased array system

2014年,Yaacobi等^[20]研制出了可在未来适用于单片硅基光探测与搜索系统的光学相控阵。器件在最大电压信号为10.6 V时,扫描角度范围可以达到 51° ,每个天线只消耗18 mW的能量,具有100 kHz的扫描速度。系统工作在 $1.2 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 的波长范围,从而可以使得成百上千的LIDAR系统一起工作而不产生干扰。2016年,Poulton等^[21]采用分组级联移相器的方式来补偿相位噪声,设计出了小光束宽度、大转向范围的光相控阵。如图8所示,该器件采用三级级联,包含50个光栅天线,这是

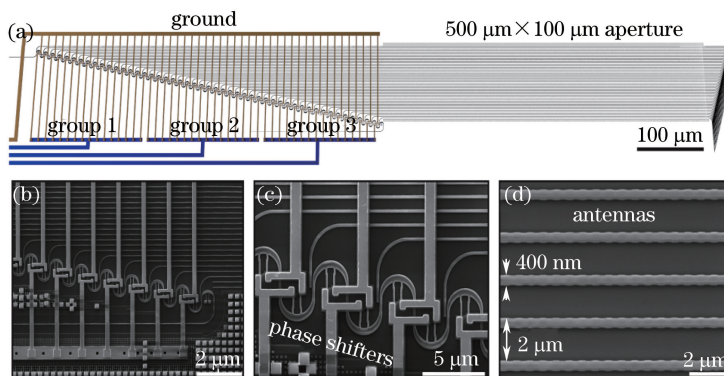


图8 器件结构和扫描电子显微镜(SEM)扫描图。

(a)光学相控阵的三维效果图;(b)级联移相器架构、(c)热移相器、(d)全刻蚀光栅天线的SEM图

Fig. 8 Device structure and SEM scanning graphs. (a) 3D rendering of the optical phased array; SEM graphs of

(b) cascaded phase shifter architecture, (c) close-up of the thermal phase shifters,

(d) full-etch silicon grating based antennas

3.3 基于光波导延迟技术的光载微波相控阵

最早的光延迟线主要运用于光控微波相控阵天

报道的最大规模的一维光相控阵列,器件尺寸为 $1200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$,光束宽度为 $0.85^\circ \times 0.18^\circ$,在加热功率为1.2 W下,波长从1454 nm到1641 nm调谐的时候,扫描范围可达 $46^\circ \times 36^\circ$ 。

虽然通过波长调谐配合热光调谐的方式可以有效地减少阵元的数量,从而减小系统的复杂性,但是在自由空间光通信等方面上却并不适用,因为自由空间光通信需要在固定波长下工作。由上述光栅耦合器的方程式[(1)式]可以看出,扫描角度不仅和波长有关,而且和光栅处波导的有效折射率相关,基于这种情况,同样可以利用硅的热光效应来改变波导的有效折射率,从而实现波束扫描,即在两个方向上均采用热光调谐。2016年,Rabinovich等^[22]就采用了这种方式来实现适用于自由空间光通信的二维光束扫描,光栅间距为570 nm,刻蚀深度为70 nm,用于加热光栅的金属掩埋在SOI的氧化层中,通过外加电压的方式给光栅处的波导加热。2016年,Mahon等^[23]采用这种方式进行二维扫描,实验结果表明,对光栅波导进行加热只能提供 2° 的扫描角度,效率不高。另外,鉴于光束扫描角度范围和扫描精度往往不能兼顾,2016年,Intel公司的研究人员通过实验验证了通过使用不均匀的波导间距,可以在有效地扩大扫描角度的同时,提高光束扫描的精度^[24]。

总的来说,硅光子易于实现大规模集成,在下一步的研究中需要进一步解决扫描角度和扫描精度的矛盾、有效地抑制旁瓣以及提高扫描速度等问题,最终实现大规模实用化的硅光子相控阵。

线^[25]。随着微波相控阵雷达应用的不断扩大,传统相控阵雷达的波束形成方式也逐渐暴露出它的弊

端。为了提高相控阵雷达的抗干扰能力,相控阵天线必须有尽可能大的瞬时带宽。而电学相控阵受天线孔径效应的影响,带宽不能满足覆盖整个微波波段。

基于这种情况,由于光波拥有近乎无限的带宽,人们想到将宽带微波信号通过调制器加载到光波信号上,调制的光信号再经过 π 的光分路器分配到 M 路波导中,在波导中经过光延迟线,附加光程差,从而引入相位差,在接收端再用探测器探测光信号,将微波信号恢复出来。这样恢复出来的微波信号就比原先的微波信号从时间上来看延迟了,达到了改变相位的目的,完成波束扫描的功能,采用光纤延迟线实现的微波相控阵可以覆盖整个微波波段(直至 100 GHz),比传统电学相控阵具有明显的优势。此外将光学技术引入到相控阵天线带来了许多优点,比如以光纤为传输媒质质量轻、尺寸小、灵活性好、损耗小^[26]。

1991年,Ng等^[27]在GaAs上首次演示了光控相控阵微波天线,可以实现L波段(1~2.6 GHz)和X波段(8~12 GHz)的微波相控阵雷达应用。1992年,Sullivan等^[28]报道了基于AlGaAs/GaAs光波导技术的尺寸为1.32 μm 的转换延迟元件的光控相控阵天线。这个光时移网络由一个双级联的 2×2 线性电光开关和1.32 μm 的GaAs波导光学延时线组成。之后Ng等^[29]又在GaAs和二氧化硅波导上实现了4 bit的基于光开关的适用于L波段的时延网络。2008年,Roeloffzen等^[30]提出了基于光波导光学谐振环的光延时系统,其瞬时带宽为2 GHz,覆盖频率范围为10.7~12.75 GHz。2009年,Jun等^[31]报道了其搭建的基于光开关切换光路的波束形成系统。

国内方面,电子科技大学和清华大学较早开展了相关研究,2008年,Zhou等^[32]报道了基于宽谱光源、可调滤波器和色散元件的光波束形成网络,在9.25~10.25 GHz射频范围的延时误差小于1 ps。2006年,高瑜翔^[33]提出了基于磁光开关矩阵的真时延网络,实现了5 bit延时,通道间隔为400 ps,总延时范围可达12 ns。另外,2009年,邱志成^[34]对高精度光纤真延迟线进行了研究,制作了延迟步进为100 ps、可以实现32种状态切换的延迟网络,最大延时误差小于2.98 ps。2014年,Zhang等^[35]在光控相控阵天线领域取得实质性进展,其相控阵天线的原理图如图9所示,LD、RF、OBPF、PoIM、PC、PBS、PD分别表示激光器二极管、微波信号、光带通

滤波器、偏振调制器、偏振控制器、偏振分束器、探测器。利用单边带偏振调制器结合偏振控制器实现微波光子移相,各通道微波相位延时量连续可调。在此研究基础上,2017年,中国电子科技集团第十四研究所联合南京航空航天大学研制出了K波段(18~27 GHz)的微波光子雷达实时成像验证系统^[36],这在世界上首次实现了对小尺寸目标的实时高分辨率成像,成像精度优于2 cm,为下一代宽带多功能雷达奠定了基础。

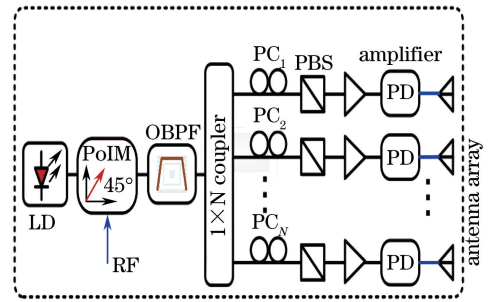


图9 相控阵天线原理图^[35]

Fig. 9 Schematic of the phased array antenna^[35]

本课题组多年来开展光波导技术的研究工作,在石英基、硅基二氧化硅光分路器^[37]、阵列波导光栅^[38]、可调光衰减器等方面取得一系列研究成果,石英基光分路器及硅基阵列波导光栅已成功实现商用,其中光分路器和密集阵列波导是光波导相控阵的基础单元,为下一步开展光波导光学相控阵研究奠定了基础。

4 基于MEMS器件的光学相控阵

近年来,MEMS器件由于具有快速的处理速度、较低的能耗以及高的光学效率等特点,在光束扫描方面开始受到研究人员的关注^[39]。

2013年,Yoo等^[40]在SOI上制备了 8×8 的亚波长高对比度光栅(HCG)结构的光学相控阵,器件原理如图10所示,可以实现 $\pm 1.26^\circ \times 1.26^\circ$ 的二维

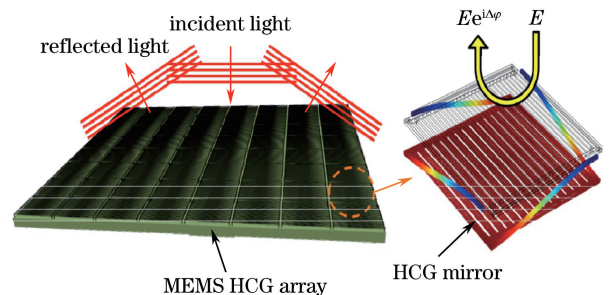


图10 HCG结构的光学相控阵示意图

Fig. 10 Schematic of optical phased array composed of HCG mirrors

光束扫描,该器件在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处具有99%的高反射率,控制电压小于30 V,响应在微秒量级,但是占空比只有35%。2014年,在此研究基础上,Yoo等^[41]又制备了 32×32 的MEMS光学相控阵,扫描角度达到了 $\pm 2^\circ$,同时将占空比提高到了85%,响应时间为 $3.8\ \mu\text{s}$ 。

同时,Yoo课题组^[42]还报道了利用HCG全通滤波器实现的光学相控阵,通过电压驱动改变两个反射镜之间的距离,附加光程差,从而改变输出光束

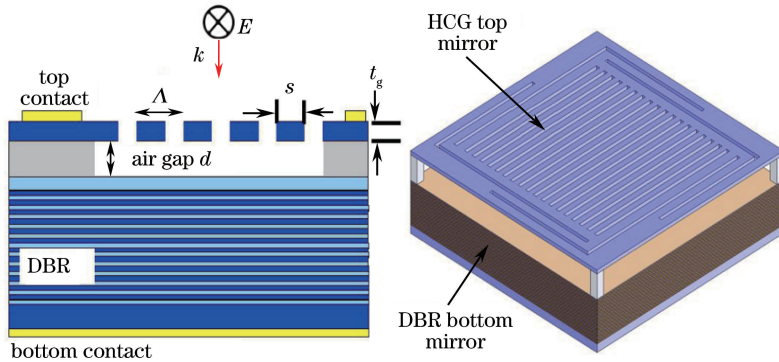


图 11 HCG 组成的 MEMS 相控阵示意图

Fig. 11 Schematic of MEMS phased array composed of HCG

5 光学相控阵的发展趋势和应用

5.1 光学相控阵的发展趋势

根据光学相控阵的研究现状,比较了液晶、光波导、MEMS光学相控阵的优缺点,如表1所示。

表 1 三种光学相控阵比较

Table 1 Comparison of three kinds of optical phased array

Type	Steering speed /kHz	Control voltage /V	Steering angle /($^\circ$)	Integration
LC	5 ^[43]	6,8	82	Low
Waveguide	100 ^[20]	10	51	High
MEMS	632 ^[42]	10	2	High

从比较来看,液晶相控阵和光波导相控阵都可以提供比较大的扫描角度,而且液晶相控阵经过多年的发展,技术较为成熟,具备了一定的实用价值,但是液晶相控阵的扫描速度慢,不易于集成,不符合现今器件小型化、高速率的要求,也制约了其进一步实用化^[4,10-11]。借助于先进的半导体工艺,光波导光学相控阵和MEMS光学相控阵可以实现高度的集成化,光波导光学相控阵又因为扫描角度大的优势,是最有望实现大规模商用化的,也将是未来一段时间内的研究重点。MEMS光学相控阵虽然扫描角度有限,但是其扫描速度快,在一些高速扫描领域仍然具有研究价值^[12-14,39-42]。

的波阵面,器件结构如图11所示,其中DBR指分布布拉格反射镜,该器件实现了低压的微机电驱动,响应速度可以达到 $0.626\ \text{MHz}$,在 $10\ \text{V}$ 的驱动电压下,相位变化为 1.7π 。

基于MEMS器件的光学相控阵具有扫描速度快、能耗低的特点,有一定的研究价值,但目前采用这种方式制备的光学相控阵的扫描角度有限,另外整个器件的结构也较为复杂,离实用尚有一段距离,有待进一步研究。

光波导光学相控阵要实现商用化,还需要在扫描角度、扫描速度等方面进一步提升。在提高扫描角度方面,由于阵元数量的增加可以提高扫描角度和扫描精度,而光学相控阵中的光波在传输过程中存在损耗(包括分束的损耗、在波导中传输的损耗),因而传递到发射端的功率有限,这也制约了光学相控阵的规模^[18,20],从这个角度考虑,可以采用掺铒光纤放大器(EDFA)进行中继放大,这样可以有效扩展光学相控阵阵元的规模,从而提高扫描角度。当然,要在一小块芯片上实现大规模阵元的集成,对工艺提升有较高的要求^[14,18-19]。

在提高扫描精度方面,主要是要有效地抑制旁瓣的产生,除了上述增加阵元数量来实现外,采用不等间距的阵列波导也是常用的手段^[14,24]。还可以通过减小波导之间的间距来提高衍射效率,从而抑制旁瓣的产生,由于工作波长为 $1550\ \text{nm}$,则需要波导间距在微米量级,此外,还要制作电极,这对于工艺要求比较高,有赖于工艺的提升。波导之间间距小,相互之间容易产生串扰,为了保证精度,需要隔离或者改进算法来补偿^[14,18-19]。

在提高扫描速度方面,光波导相控阵扫描主要是通过热光效应来实现的,扫描速度取决于材料的导热性和热光系数,导热性越好,热光系数越大,扫

描速度也就越快,对于热光系数大的材料,还可以减小器件功耗。硅的导热性能好,而聚合物材料有相对大的热光系数,可以考虑通过复合波导的形式来制作响应速度快且功耗低的移相单元^[44]。此外,鉴于热光调制的响应时间在毫秒量级,为了提升响应时间,还可以考虑采用响应速度更快的 SOI 电光调制来制作移相器单元^[45]。传统的热电极都是制作在上包层,热量先通过上包层再传递到芯层,这样的做法导热速度慢,而且存在能量损耗,增加了功耗。可以将热电极制作在芯层或者氧化层中,提高导热速率,更快速地对芯区加热,从而提高扫描速度^[18,22-23]。

5.2 光学相控阵的应用

激光雷达领域是光学相控阵的一个巨大的发挥舞台。传统的机械扫描激光雷达系统复杂、扫描速度慢、质量大、体积大,不利于集成,无法大规模生产,尤其是目前随着人工智能的发展,无人驾驶汽车和辅助驾驶成了很热门的研究方向,无人驾驶汽车极为重要的一环就是激光雷达,它就好比是汽车的眼睛,为无人驾驶汽车指引方向;传统的机械扫描雷达的扫描视场太小,很显然无法满足无人驾驶汽车的要求,同时机械式扫描的激光雷达扫描速度慢,实时性差,无法实时地把控路况,这就需要光学相控阵激光雷达。鉴于上述问题,一种解决方式就是在器件中完全取消机械结构,采用光通信中较为成熟的平面光波导技术来制作光学相控阵扫描器件,比如美国的 Quanergy 公司在 2016 年公布了其“固态激光雷达”产品,也就是光波导相控阵激光雷达,图 12 是 Quanergy 公司公开的“固态激光雷达”的原理图。2017 年,Quanergy 公司也凭借 Solid State LiDAR S3 产品在国际消费类电子产品展销会(CES)上获得智能汽车类的最高奖项——最佳创新奖^[46]。另一种解决方式是采用 MEMS 微振镜来取代原来的机械结构,通过半导体工艺将其集成到单个芯片上。2016 年底,研究超微型投影显示和传感技术的 MicroVision 公司与意法半导体集团合作推广激光束扫描(LBS)技术,该技术可以应用于激光雷达、微型投影仪等市场。荷兰的 Innoluce 公司采用 MEMS 结构制作的激光雷达可以实现探测距离 250 m、角分辨率 0.1°、激光功率利用率大于 95% 的效果,该激光雷达预计在 2018 年量产。此外,曾经生产机械旋转式激光雷达的欧姆龙公司以及日本的先锋公司等也都在进行 MEMS 激光雷达的研发^[47]。随着市场的不断扩大,以光学相控阵为核心单元的激光雷达无疑会吸引更多的研究。

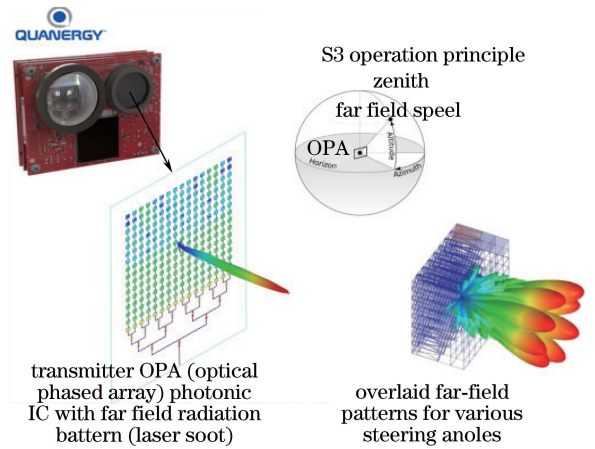


图 12 相控阵激光雷达原理图

Fig. 12 Schematic of phased array lidar

不仅仅在激光雷达方面,光学相控阵在成像技术上也存在着一定的优势,目前智能手机制造总是向着更薄、更轻的方向发展,而手机摄像头为了拍摄效果,不可避免地会使用更多透镜,使得摄像头部分凸出来,影响美观,也容易磨损,限制了智能手机进一步变薄。2017 年,美国加州理工学院采用平面光波导技术^[48]研制了以光学相控阵接收器为基础的新型摄像头,利用一层薄的硅光学器件就可以通过电子控制实现摄像头的多种成像特性,让人们重新认识了摄像头技术,为成像设备开拓了一个新的研究方向。

除了在民用层面,光学相控阵在军事领域同样有着巨大的发展前景,比如机载激光武器运用光学相控阵技术可以实现快速目标追踪和精确打击。由于光学相控阵天线具有超宽频带的接收能力,美国国防高级研究计划局(DARPA)等科研机构研究采用光学相控阵天线在雷达波段获取视频图像,从而进一步提升雷达性能。

6 结束语

介绍了几种光学相控阵的实现方式,包括光波导、MEMS 器件等,并分析了它们的优缺点。目前新型光学相控阵技术正在向着高响应速度、低控制电压、大扫描角度、小体积、高集成度的方向发展。硅光子易于实现大规模集成,功耗低,价格低廉,是实现商用化的最佳手段,目前硅的调制器、探测器均有了较好的解决方案,光源方面主要是采用混合集成 III-V 族材料的激光器来实现,在硅基光源的问题解决之后,单片集成的硅基光学相控阵列芯片在激光雷达、成像、自由空间光通信领域有着更加广阔的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Chao T H, Zhou H Y, Reyes G F, *et al.* High-speed high-density holographic memory using electro-optic beam steering devices [C]. SPIE, 2002, 4803: 70-73.
- [2] Nikkiah H, Acoleyen K V, Baets R. Beam steering for wireless optical links based on an optical phased array in silicon [J]. *Annals of Telecommunications*, 2013, 68(1/2): 57-62.
- [3] Winker B, Mahajan M, Hunwardsen M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications [C]. *Aerospace Conference*, 2004, 3: 631-634.
- [4] Yan Z, Xu J. Research development of beam scanning technology [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(4): 1-9.
闫舟, 徐景. 光束扫描技术研究进展 [J]. *光电技术应用*, 2013, 28(4): 1-9.
- [5] Yan A M, Zhi Y N, Sun J F, *et al.* Recent development of optical phased array scanning technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 102801.
闫爱民, 职亚楠, 孙建锋, 等. 光学相控阵扫描技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 102801.
- [6] Qu R H, Ye Q, Dong Z R, *et al.* Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(12): 1861-1867.
瞿荣辉, 叶青, 董作人, 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展 [J]. *中国激光*, 2008, 12(12): 1861-1867.
- [7] Meyer R A. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(3): 613-616.
- [8] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, *et al.* Optical phased array technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [9] Inagaki K, Karasawa Y. Fiber-type optical phased array antenna-two dimensional beam steering and coherent power combining [C]. *Ninth International Conference on Antennas and Propagation*, 1995, 1: 1-8.
- [10] Acoleyen K V, Bogaerts W, Jagerska J, *et al.* Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1477-1479.
- [11] 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.
- [12] Acoleyen K V, Komorowska K, Bogaerts W, *et al.* One-dimensional off-chip beam steering and shaping using optical phased arrays on silicon-on-insulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(23): 3500-3505.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Wight D R, Heaton J M, Hughes B T, *et al.* Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(8): 899-901.
- [16] Vasey F, Reinhart F K, Houdre R, *et al.* Spatial optical beam steering with an AlGaAs integrated phased array [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(18): 3220-3232.
- [17] Li J L. Study on waveguide optical phased array technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2005.
李家立. 光波导光学相控阵技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [18] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, *et al.* Large-scale nanophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195-199.
- [19] 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.
- [20] Yaacobi A, Sun J, Moresco M, *et al.* Integrated phased array for wide-angle beam steering [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [21] Poulton C V, Yacobi A, Su Z, *et al.* Optical phased array with small spot size, high steering range and grouped cascaded phase shifters [C]. *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics*, 2016: IW1B-2.
- [22] Rabinovich W S, Goetz P G, Pruessner M W, *et al.* Two-dimensional beam steering using a thermo-optic silicon photonic optical phased array [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(11): 111603.
- [23] Mahon R, Pruessner M W, Rabinovich W S, *et al.* Two dimensional thermo-optic beam steering using a

- silicon photonic optical phased array [C]. SPIE, 2016, 9739: 97390R.
- [24] Hutchison D N, Sun J, Doyle J K, *et al.* High-resolution aliasing-free optical beam steering [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 887-890.
- [25] Nester W. A study of tracking accuracy in monopulse phased arrays[J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1962, 10(3): 237-246.
- [26] Nguyen L V T. Optical RF phase shifter design employing optical phase manipulation and coherent detection part I: concept proposal[J]. *International Journal of Microwave and Optical Technology*, 2011, 6(5): 301-309.
- [27] Ng W, Walston A A, Tangonan G L, *et al.* The first demonstration of an optically steered microwave phased array antenna using true-time-delay [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(9): 1124-1131.
- [28] Sullivan C T, Mukherjee S D, Hibbs-brenner M K. Switched time-delay elements based on AlGaAs/GaAs optical waveguide technology at 1.32 μm for optically controlled phased-array antennas[C]. SPIE, 1992, 1703: 264-271.
- [29] Ng W W, Yap D, Narayanan A A. GaAs and silica-based integrated time-shift network for phased arrays [J]. SPIE, 1994, 2155: 114-123.
- [30] Roeloffzen C G H, Meijerink A, Zhuang L, *et al.* Integrated photonic beam former employing continuously tunable ring resonator-based delays in CMOS-compatible LPCVD waveguide technology [C]. SPIE, 2008, 7135: 1-11.
- [31] Jun B, Yao J. A two-dimensional optical true time-delay beam former consisting of a fiber Bragg grating prism and switch-based fiber-optic delay lines [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(10): 627-629.
- [32] Zhou B, Zheng X, Yu X, *et al.* Optical beam forming networks based on broadband optical source and chirped fiber grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(9): 733-735.
- [33] Gao Yuxiang. High-temperature control phased array system and its key technology research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2006.
高瑜翔. 光控相控阵列系统及其关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [34] Qiu Z C. Study on high precision optical fiber delay technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009.
- 邱志成. 高精度光纤延时技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [35] Zhang Y M, Wu H, Zhu D, *et al.* An optically controlled phased array antenna based on single sideband polarization modulation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3761-3765.
- [36] 中国电子科技集团第十四研究所. 中国电科 14 所智能感知实验室联合南航成功研制微波光子实时成像系统[EB/OL]. (2017-05-18). <http://14.cetc.com.cn/14/338565/338541/470089/index.html>.
- [37] Wang L L, An J M, Wu Y D, *et al.* Design and fabrication of novel symmetric low-loss 1×24 optical power splitter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(18): 3112-3118.
- [38] An J M, Zhang J S, Wang Y, *et al.* Study on wavelength division multiplexer for silicon photonics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110006.
安俊明, 张家顺, 王玥, 等. 硅光子中波分复用技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 110006.
- [39] Koh K H, Lee C K. A two-dimensional MEMS scanning mirror using hybrid actuation mechanisms with low operation voltage [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(5): 1124-1135.
- [40] 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.
- [41] Yoo B W, Megens M, Sun T B, *et al.* A 32×32 optical phased array using polysilicon sub-wavelength high-contrast-grating mirrors [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19029-19039.
- [42] Yang W J, Sun T B, Rao Y, *et al.* High speed optical phased array using high contrast grating all-pass filters [J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20038-20044.
- [43] Engstrom D, O'Callaghan M J, Walker C, *et al.* Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(9): 1721-1726.
- [44] Liang L. Optimum design and preparation of thermo-optical switch based on organic and inorganic composites [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
梁磊. 有机无机复合波导热光开关的优化设计与制备 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.

- [45] Haldar R, Banik A D, Sanathanan M S, *et al.* Compact athermal electro-optic modulator design based on SOI off-axis microring resonator[C]. 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics, 2014: JW2A.37.
- [46] 雷锋网. 技术解析: Velodyne VS Quanergy 固态激光雷达哪家强 [EB/OL]. (2017-01-16). <https://www.leiphone.com/news/201701/zv1OzRGNh5JWdT05.html>.
- [47] 雷锋网. 廉价化激光雷达的希望: MEMS 激光雷达 VS 固态激光雷达 [EB/OL]. (2017-03-31). <https://www.leiphone.com/news/201703/hp0uSR2f4u6VB00M.html>.
- [48] Hajimiri A, Abiri B, Fatemi R. An 8x8 heterodyne lens-less OPA camera[C]. CLEO: Applications and Technology, 2017: JW2A.9.