

激光三维成像中光电混频技术的研究进展

卜禹铭, 曾朝阳, 杜小平*, 宋一铄

航天工程大学, 北京 101416

摘要 阐述了光电混频技术的基本原理。基于独立光电器件和组合光电器件两种实现途径, 追踪并归纳了光电混频技术的研究进展。受微波光子变频技术的启发, 提出了一种基于体型电光调制器的光电混频方法。该方法使用电光调制器在光场进行混频解调, 后端采用高分辨率、低成本的图像传感器, 突破了阵列尺寸对图像分辨率的限制, 具有高能量利用率、高信噪比的优势。

关键词 光电子学; 光电混频技术; 电光调制; 体型电光调制器

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.080002

Research Progress of Photoelectric Mixing Technology in Laser Three-Dimensional Imaging

Bu Yuming, Zeng Zhaoyang, Du Xiaoping*, Song Yishuo

Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract The basic principle of the photoelectric mixing technology is elaborated. The research progress of the photoelectric mixing technology is traced and summarized from two ways of the independent photoelectric devices and the combined photoelectric devices. Inspired by the microwave photon frequency conversion technology, a photoelectric mixing method is proposed based on the bulk electro-optic modulator. This method uses the electro-optic modulator to demodulate the frequency mixing on the optical field and uses the high-resolution and low-cost image sensors at the back end, which breaks through the limitation of the array size on the image resolution and achieves the advantages of high energy efficiency and high signal-to-noise ratio.

Key words optoelectronics; photoelectric mixing technology; electro-optic modulation; bulk electro-optic modulator

OCIS codes 250.0040; 250.1345; 040.1880

1 引言

随着激光技术的不断发展, 激光雷达在国内外得到了迅速发展, 其中三维成像激光雷达作为一种新型的成像技术, 在 20 世纪 90 年代末就已被提出, 当前正处于快速发展阶段^[1]。该技术具有成像精度高, 探测距离远, 三维图像获取速度快等优点, 在军用和民用领域具有广泛应用^[2]。其中无扫描调频连续波(FMCW)激光三维成像凭借杰出的环境适应性、目标适应性和抗干扰能力, 适用于复杂光照和干扰条件下空间目标的三维成像, 同时不易使探测器饱和甚至损毁, 无需多次累积探测和双相机接收, 无

测距盲区 and 距离模糊问题, 具有测距精度高、距离解算方法简单等优点^[3]。

美国陆军实验室、美国海军和英国宇航系统公司, 以及国内的航天工程大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、西南技术物理研究所等多家单位持续深入地研究了 FMCW 激光三维成像系统的关键技术, 并研制出了原理样机。研究表明: 如何高效地实现高分辨率、高灵敏度、超宽带外差接收是该技术走向实用的瓶颈, 而光电混频正是突破这一技术瓶颈最有效的途径之一。为此, 国内外多家单位先后系统研究了基于线性模式雪崩光电二极管(LM-APD)、金属半导体金属(MSM)、盖革模式雪

收稿日期: 2018-09-12; 修回日期: 2018-10-12; 录用日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61805284)

* E-mail: htgcdxdxp401@163.com

崩光电二极管 (GM-APD)、像增强电荷耦合器 (ICCD)、电子轰击有源像素传感器 (EBAPS) 的光电混频技术。本文整理了多种光电器件的国内外相关研究工作, 追踪并归纳了其研究进展。

2 光电混频基本原理及研究现状

光电混频技术的基本模型如图 1 所示^[4], 其基本原理是利用光电探测器的响应特性, 使本振信号 (LO) 和射频信号 (RF) 相乘, 进行带宽压缩并同时实现信号混频解调, 从而解算出中频 (IF) 信息。其中, 光电探测器须完成光电探测并实现信号混频解调。

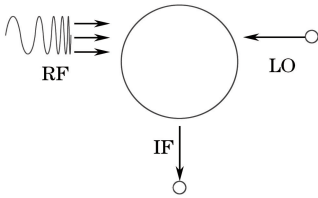


图 1 光电混频技术的基本模型^[4]

Fig. 1 Basic model of photoelectric mixing technology^[4]

根据文献[5-34], 实现光电混频的器件有很多, 光电混频技术分类如图 2 所示, 按照不同的实现途

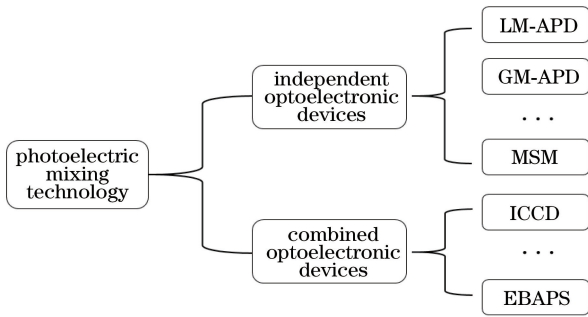


图 2 光电混频技术分类

Fig. 2 Classification of photoelectric mixing technology

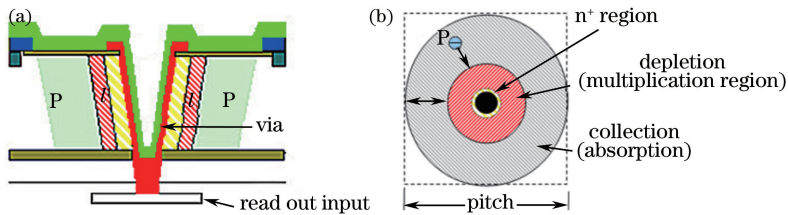


图 3 美国 DRS 公司生产的 HgCdTe LM-APDs 示意图^[11]。(a) 截面图; (b) 俯视图

Fig. 3 Schematic of HgCdTe LM-APDs produced by DRS company in USA^[11].

(a) Cross-section; (b) top view

2012 年, 法国 CEA-LETI 与以色列的 Sofradir 公司合作, 研制了一种基于 HgCdTe 的 LM-APDs, 探测器的像素规模为 320×256 ^[13]。2013 年, George M. Williams 团队对砷化镓 (InGaAs)

径将现有的光电混频技术分为两类: 一是基于独立光电器件实现光电混频, 主要包括 LM-APD、GM-APD、MSM; 二是基于组合光电器件实现的光电混频, 主要包括 ICCD 和 EBAPS。

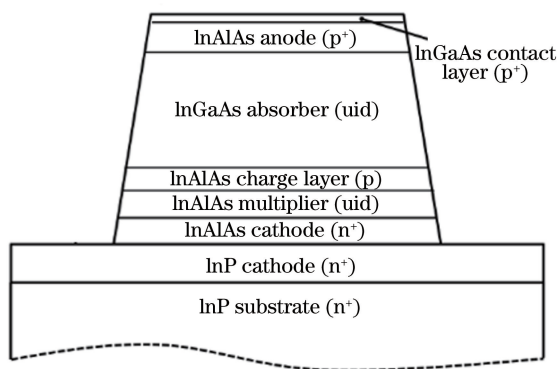
2.1 基于独立光电器件的光电混频

2.1.1 线性模式雪崩光电二极管

1970 年, 英国萨利大学的 Davis 等^[5-6] 验证了 APD 光电混频的可行性, 并进行了相关理论和实验研究。在此基础上, Seeds 等^[7] 分段建立了 LM-APD 光电混频的数学模型, 其混频效率的研究结果在趋势上与之前的报道基本一致。此后, Castagnet^[8] 和 Moutaye 等^[9] 构建了不同光电流下 LM-APD 增益特性模型, 并研究了混频效率与本振信号的关系, 得到了光电流对混频效率和信噪比的影响规律。2014 年, 航天工程大学的 Song 等^[10] 从 APD 倍增过程中空间电荷动态分布入手进行分析, 揭示了空间电荷效应对光电混频性能的影响规律。至此, 基于 LM-APD 的光电混频理论研究已较为完备。

在器件方面, 雷神公司于 2011 年研制出了 256×256 的碲镉汞 (HgCdTe) LM-APDs 阵列, 其示意图如图 3 所示, 其中 P 为阳极, W_p 为阳极宽度, via 为通道。该器件在 1550 nm 波长的响应度为 $15 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 在 300 K 工作温度下, 增益可达到 100 以上, 读出噪声较小, 动态范围为 12 bits, 帧速能达到 30 Hz, 有效克服了探测器阵列光学串话问题, 同时有效抑制了读出电路单元间的串扰^[11]。但实测增益与理论值相差较大, 原因在于工作温度过高, 导致器件性能降低。因此该器件面临的技术问题是需要实时采取制冷措施保证高增益的性能^[12]。

LM-APD 进行研究, 研制的基于 InGaAs 的 LM-APD 的结构如图 4 所示。面积为 $30 \mu\text{m}^2$ 的像素在 273 K 下, 暗电流为 0.2 nA, 线性增益为 20, 量子效率为 80%, 电离系数比例 $k = 0.2$ 时的过量噪声因

图4 基于InGaAs的LM-APD结构^[14]Fig. 4 Structural diagram of InGaAs-based LM-APD^[14]

子 $F=5.56$ 。采用多层InGaAs吸收层的结构,过剩噪声降低,工作增益约达到 $M=1000$,但多层结构技术尚不成熟^[14]。

国内方面,2011年东南大学设计了LM-APD主/被动红外成像读出电路^[15],阵列的验证规模为 64×64 。2013年,中国电子科技集团公司第四十四研究所设计并分析了 64×64 氮化铝镓(AlGaIn) APD焦平面阵列的读出电路^[16],利用等效电路模型推导得到积分电容为 70 pF ,放大增益可达到300。2014年,中国科学院上海技术物理研究所设计了一种用于门控激光成像雷达的制冷型数字化混成式HgCdTe LM-APDs焦平面阵列的读出电路,其正常工作温度为 77 K ,阵列规模为 128×128 ^[17]。

2.1.2 金属半导体金属(MSM)

美国陆军研究实验室(ARL)对MSM光电混频开展了深入研究。Shen等^[18-19]首先基于MSM物理模型建立了电压-电流响应特性曲线,而后根据光电混频原理建立了MSM光电混频模型。通过实验发现,实际MSM的饱和电流和光生电流不完全相等,造成了电压-电流响应关于 0 V 电压不对称,这会使得混频电流中存在较大的直流(DC)成分,从而引起自混乱效应现象。研究人员还发现混频效率随调制频率增大而逐渐减小,随入射光功率增大而增大。

ARL的Aliberti等^[20]改进了InGaAs MSM的结构,使其在调制带宽为 800 MHz 、入射光功率为 $1 \mu\text{W}$ 量级时,实现混频响应最高达到 $0.17 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,混频效率达到 35% 。为了更进一步提高响应度,ARL引入了高能隙晶格匹配磷化铟/砷化铟铝(InP/InAlAs)肖特基势垒增强层,响应度提高一倍约达到 $0.43 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,暗电流为 1 nA 。

2011年,中国科学院西安光学精密机械研究所张立臣等^[21]根据ARL提出的理论,研制出了响应度较高的 32×32 砷化镓(GaAs) MSM阵列芯片,暗电流更大,稳定性不高,有待进一步优化。2015年,该机构重新设计了MSM探测器的外延材料结构和叉指电极结构,采用LP-MOCVD完成了对外延材料的生长,制备了叉指电极,完成了单元探测器的初步封装,经过测试暗电流密度为 $0.6 \sim 0.8 \text{ pA} \cdot \mu\text{m}^{-2}$, 1550 nm 波段响应度能达到 $0.554 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$,量子相率为 88.7% 。但探测器面积仅有 $(100 \times 100) \mu\text{m}^2$,还未做成面阵型。西南技术物理研究所余明权等^[22]也利用该 32×32 GaAs MSM阵列开展了光电混频实验,发现存在频谱分裂现象,限制了MSM光电混频的实际应用。

2.1.3 盖革模式雪崩光电二极管(GM-APD)

ARL的Redman等^[23]首次提出并通过实验验证了盖革APD光电混频。实验中,他们实现了接近散粒噪声极限的高灵敏度接收,灵敏度约为MSM光电混频的10000倍。在此基础上,哈尔滨工业大学张子静等^[24]沿着ARL思路,对GM-APD实现光电混频并进行了理论研究和仿真分析,采用不同的算法提取了遮蔽目标信息。2013年,该团队又提出了一种基于GM-APD探测器预混频的方法^[25],提高了系统的信号带宽,并且消除了探测器死区时间的影响。

2012年,美国雷神(Raytheon)公司研制了基于HgCdTe GM-APDs探测器的成像激光雷达,目前可做到 256×256 规格的阵列,主要应用于航天器导航和登月飞行器自主着陆^[26]。2014年,美国Princeton Lightwave公司对规格为 32×32 和 128×32 的InGaAs GM-APD进行研究,其生产的 32×32 InGaAs GM-APD的结构如图5所示。探测单元直径为 $18 \mu\text{m}$,单光子响应率为 32.5% ,使用更宽带隙的InGaAs作为吸收层后,暗电计数率在 253 K 温度下为 5 kHz ,时间抖动约为 500 ps ,抖动误差主要来自于读出集成电路^[27]。

国内资料显示,对于GM-APDs阵列,目前只有中国电子科技集团公司第四十四研究所研制出了 32×32 的InGaAs GM-APDs探测器阵列,但其性能与国外存在较大差距,还未达到三维成像的应用标准^[28]。其他研究团队目前仅开展了理论研究和仿真分析,还未研制出相关样品。

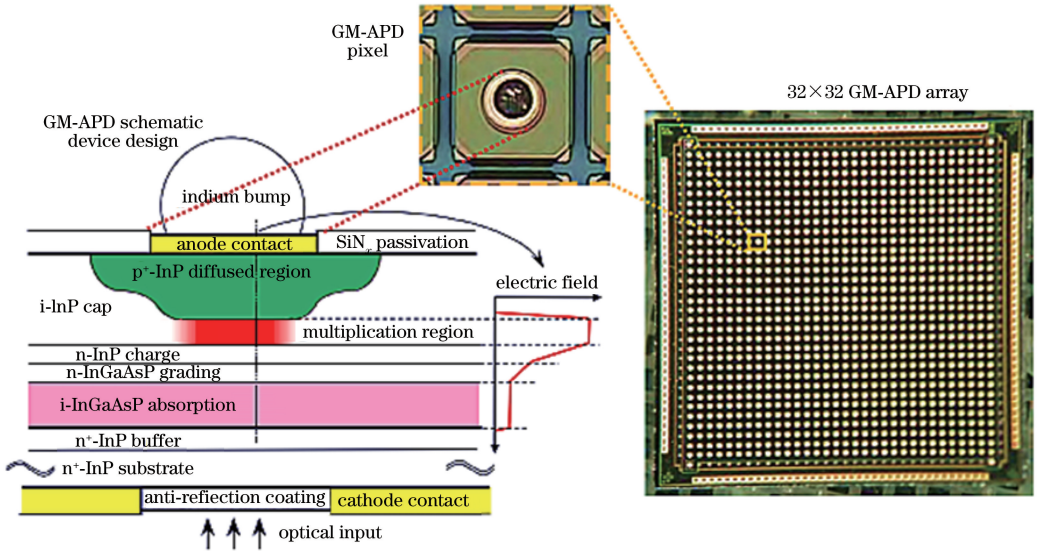


图 5 美国 Princeton Lightwave 公司生产的 32×32 InGaAs GM-APD 的结构^[27]

Fig. 5 Structural diagram of 32×32 InGaAs GM-APD produced by Princeton Lightwave company in USA^[27]

2.2 基于组合光电器件的光电混频

2.2.1 像增强电荷耦合器 (ICCD)

ICCD 由像增强管 (IIT) 和电荷耦合器件 (CCD) 通过中继元件组合而成, 其结构示意图如图 6 所示。ARL 的 Ruff 等^[29]对 ICCD 的光电混频性能进行了深入研究, 通过实验发现 IIT 管的工作电压达到上千伏, 在高频调制时, 等效电容较大, 会导致信号能量泄露严重, 使得 IIT 的荧光屏上出现永久损坏点。

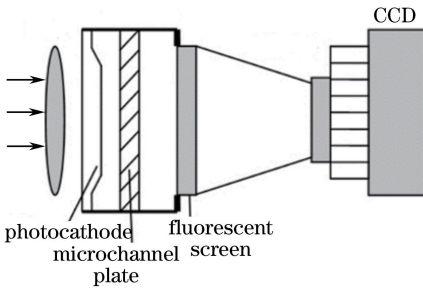


图 6 ICCD 结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of ICCD

我国微光技术起步较晚, 像增强器主要通过引进仿制, 价格昂贵。国外已经研制出高性能第 4 代像增强管, 我国已经研制出了第 3 代 IIT 的样品, 其光电阴极灵敏度基本达到国外水准, 技术瓶颈在于中继元件耦合问题, 器件的稳定性和可靠性不足^[30-31]。

2.2.2 电子轰击有源像素传感器 (EBAPS)

EBAPS 结构与 ICCD 相比, 省去了结构复杂的 IIT 以及中继元件, 减少了光损耗; 相比电子倍增电

荷耦合器件 (EMCCD), 具有更小的增益过剩噪声^[32]。EBAPS 凭借其良好的性能有望替代 ICCD 和 EMCCD 的下一代高性能弱光成像探测器。美国 Intevac 公司生产的 EBAPS 探测器芯片如图 7 所示, EBAPS 的性能参数如表 1 所示。该产品对美国以外的其他任何国家均严格禁运。

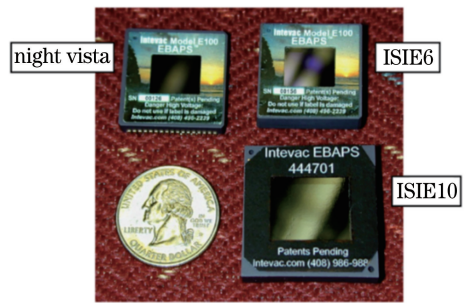


图 7 美国 Intevac 公司生产的 EBAPS 探测器芯片^[32]

Fig. 7 EBAPS detector chip produced by Intevac company in USA^[32]

表 1 EBAPS 的性能参数

Table 1 Performance parameters of EBAPS

Parameter	Night Vista	ISIE6	ISIE10
Name	VGA	SXGA	SXGA
Maximum gain	640×480	1280×1024	1280×1024
Working voltage		300	
Pixel size	12.0 μm×12.0 μm	6.7 μm×6.7 μm	10.8 μm×10.8 μm
Frame rate	30 frame·s ⁻¹	27.5 frame·s ⁻¹	37 frame·s ⁻¹

Stann 研究团队对 EBAPS 的光电混频性能进行了实验研究, 实验证明 EBAPS 响应度为 $150 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$, 增益可达 300, 器件调制效率高, 极低的过剩噪声可以有效提高信噪比。然而在实验中, 为了实现 30% 的混频效率, 需要对 EBAPS 偏置电压加载峰峰值为 440 V 的电信号, 功率消耗巨大^[33], 并且其成像帧频不到 $40 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$, 需要降低分辨率来提高成像帧速。

宋德等^[34]对 P 型基底均匀掺杂条件下 EBAPS 电荷收集效率开展了模拟研究, 但该研究处于理论研究和模拟仿真阶段, 未见产品的相关报道。由于探测器发展较慢, 在国内尚无基于 EBAPS 成像探测系统的研究报道。

2.3 存在问题

研究现状表明, 光电混频技术按照基于独立光电器件和基于组合光电器件两种实现途径不断发展, 对无扫描 FMCW 激光三维成像性能有了不同程度的改善, 但是现有光电器件存在调制信号功耗较大、混频带宽不足、混频噪声水平较高、探测器阵列像素规模较小等缺点, 因此现有光电混频技术都难以实现高分辨率、高灵敏度超宽带外差接收, 从而阻碍了无扫描 FMCW 激光三维成像的实用化进程。特别对于国内而言, 该技术的发展面临两大难题: 一是国内半导体产业技术水平落后, 短时间内无

法研制出大面积、高性能的探测器阵列; 二是国外对相关器件严格禁运, 对我国实行技术封锁, 切断了外部技术的支持。为了突破这一瓶颈问题, 一方面要继续提高国内半导体产业技术水平, 研制出具有高性能探测器阵列; 另一方面, 从中频信号混频解调的原理入手, 并结合当前较为成熟的光电探测技术, 开辟一条高效且易于工程实现的混频解调新路径。

3 解决方案及优势

近年来, 研究人员将微波技术与光子学相结合, 提出了一门新型的交叉学科——微波光子学 (MWP)。微波光子变频技术是将射频信号用电光调制器调制到光波上, 在光域内运用光信号处理方法对信号进行变换, 使得光电探测器输出的电信号频率发生变化的技术。

ARL 的 Gopalakrishnan 等^[35-36]首先系统地研究了波导结构铌酸锂电光调制器的微波光子混频技术。他们利用两个马赫-曾德尔 (MZ) 干涉型电光强度调制器串联构建了一种新型微波光电混频器, 其结构框图如图 8 所示。通过理论推导和实验, 验证了系统的可行性。其研究结果表明, 使调制器工作在正交偏置点下不仅可使链路达到最大混频增益, 还能够有效消除调制失真带来的干扰, 从而增大动态范围。

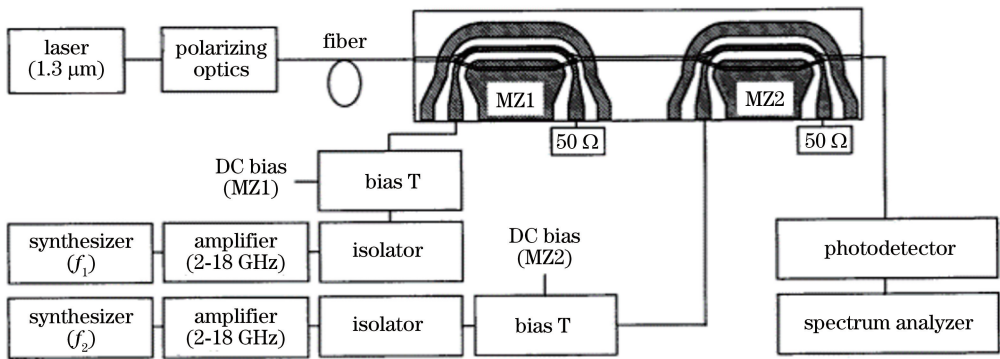


图 8 新型微波光电混频器的结构框图^[35-36]

Fig. 8 Structural diagram of novel microwave photoelectric mixer^[35-36]

在国内, 西安电子科技大学、北京邮电大学、南京邮电大学等单位深入研究了微波光子变频技术, 得到以下结论^[37-39]:

1) 链路变频增益与入射光功率呈正比, 当工作于最佳线性偏置点时, 可提高链路增益和线性动态范围;

2) 变频信噪比与入射光功率呈正比, 当工作于最佳线性偏置点时, 能有效降低链路噪声系数;

3) 下变频增益与调制电压幅度的平方呈反比。

微波光子变频技术与光电混频技术原理相同, 均是将本振信号和射频信号相乘产生中频信号, 并且要实现的功能也相同, 这对光电混频技术的发展方向具有极大的参考价值。微波光子变频技术采用波导型电光调制器实现频率变化, 在光纤通信、MWP 领域应用广泛。但波导型电光调制器的通光孔径较小、传输的光功率较低, 极大地限制了其在目

标成像领域的应用。

根据文献报道,近年来,国内外一些研究机构开始探究体型电光调制器在目标探测、空间光通信等领域的应用前景。美国 TetraVue 公司利用多个个体电光调制器以及现有的 CCD 和 CMOS 设计了一种基于偏振调制技术的高分辨率三维成像系统,并在实验环境下获得了运动目标的三维图像^[40-41]。航天工程大学对体型电光调制器成像系统从原理上进行分析推导,进一步研究了调制信号形态对系统性能的影响^[42]。中国科学院光电技术研究所刘博等^[43-44]在美国 TetraVue 公司的技术原理基础上,利用两个体型电光调制器和 EMCCD 进行探测实验。长春理工大学设计加工了体型电光调制器,并通过空间激光通信演示实验验证了采用体型电光调制器使光通信中光传输系统具有大容量、大功率、高速率优点的结论^[45-46]。目前美国 Fast Pulse Technology 公司生产的体型电光调制器口径尺寸能达到 50 mm,其生产的大口径晶体如图 9 所示,这使得体型电光调制器用于成像领域成为可能。



图 9 美国 Fast Pulse Technology 公司生产的大口径晶体
Fig. 9 Large diameter crystals produced by Fast Pulse Technology company in USA

针对目前光电混频技术存在的诸多问题,根据微波光子下变频技术原理以及体型电光调制器的研究现状,提出了基于体型电光调制器的光电混频技术,即利用体型电光调制器在光学层面混频解调出中频信号,技术优势具体如下:

1) 体型电光调制器具有大口径优势,后端可采用高分辨率、低成本、成熟的图像传感器进行接收探测,从而可解除三维成像应用中三维传感器对图像分辨率的限制;

2) 电光调制器在光学层面进行混频解调,相比于光电混频探测器省去了多重“光-电”“电-光”转换过程,减小了能量损失,提高了利用率,减小了电学噪声,提高了信噪比;

3) 体型电光调制器的调制带宽能达到几百兆,

可满足光电混频带宽需求,后端探测器满足中频信号带宽即可,因此降低了对后端探测器响应带宽的要求。

4) 通过选择不同晶体材料、晶体结构设计等方式降低了体型电光调制器半波电压,可有效降低系统功耗。

4 结束语

针对当前光电混频技术存在调制功耗较大、混频带宽不足、噪声水平较高、探测器阵列像素规模较小等问题,受相关领域技术启发并结合当下研究热点,明确了利用体型电光调制器实现光电混频的优势所在,既具有可实现高分辨率、高能量利用率、高信噪比、降低探测器带宽要求等技术优势,又具有良好的应用前景,对光电混频技术发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Dai Y J. Lidar technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 2-7.
戴永江. 激光雷达技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 2-7.
- [2] Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, *et al.* Application and development direction of lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 4-22.
赵一鸣, 李艳华, 商雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势 [J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-22.
- [3] Song Y S, Du X P, Zeng Z Y. The key technology analysis of foreign 3D LADAR for space target [J]. Journal of Academy of Equipment, 2014, 25(1): 55-60.
宋一铄, 杜小平, 曾朝阳. 国外空间目标激光三维成像雷达关键技术分析 [J]. 装备学院学报, 2014, 25(1): 55-60.
- [4] Du X P, Zhao J G, Zeng Z Y, *et al.* FMCW laser detection technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 92-93.
杜小平, 赵继广, 曾朝阳, 等. 调频连续波激光探测技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 92-93.
- [5] Davis Q V, Kulczyk W K. Optical and electronic mixing in an avalanche photodiode [J]. Electronics Letters, 1970, 6(2): 25.
- [6] Kulczyk W K, Davis Q V. The avalanche photodiode as an electronic mixer in an optical receiver [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1972, 19(11): 1181-1190.
- [7] Seeds A J, Lenoir B. Avalanche diode harmonic

- photoelectric mixer [J]. IEE Proceedings J-Optoelectronics, 1986, 133(6): 353.
- [8] Castagnet D. Avalanche-photodiode-based heterodyne optical head of a phase-shift laser range finder [J]. Optical Engineering, 2006, 45(4): 043003.
- [9] Moutaye E R, Tap-Beteille H. CMOS avalanche photodiode embedded in a phase-shift laser rangefinder [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2008, 55(12): 3396-3401.
- [10] Song Y S, Du X P, Zeng Z Y. On the research of avalanche photodiodes-based heterodyne in FM/CW laser rangefinder [J]. Optik, 2014, 125(12): 2895-2898.
- [11] McKeag W, Veeder T, Wang J X, *et al.* New developments in HgCdTe APDs and LADAR receivers [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8012: 801230.
- [12] McManamon P F, Banks P, Beck J, *et al.* Comparison of flash lidar detector options [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 031223.
- [13] de Borniol E D, Rothman J, Guellec F, *et al.* Active three-dimensional and thermal imaging with a 30- μ m pitch 320 \times 256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array [J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 061305.
- [14] Williams G M, Compton M, Ramirez D A, *et al.* Multi-gain-stage InGaAs avalanche photodiode with enhanced gain and reduced excess noise [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2013, 1(2): 54-65.
- [15] Wang F, Jiang S B, Hu J L, *et al.* Circuit design of single-photon detector based on APD [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39(5): 1093-1097.
王凡, 蒋书波, 胡佳琳. APD 单光子探测的电路设计 [J]. 电子器件, 2016, 39(5): 1093-1097.
- [16] Deng G P, Liu C J, Zhu X X, *et al.* Readout IC for low-level light imaging AlGaIn APD arrays [J]. Semiconductor Photoelectrics, 2013, 34(4): 569-572, 575.
邓光平, 刘昌举, 祝晓笑, 等. 一种弱光成像用 AlGaIn APD 阵列的读出电路设计 [J]. 半导体光电, 2013, 34(4): 569-572, 575.
- [17] Chen G Q, Zhang J L, Wang P, *et al.* Design of digital ROIC for HgCdTe E-APD FPA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 2798-2804.
陈国强, 张君玲, 王攀, 等. 碲镉汞 e-APD 焦平面数字化读出电路设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2798-2804.
- [18] Shen P H, Stead M R, Taysing-Lara M A, *et al.* Interdigitated finger semiconductor photodetector for photoelectric mixing [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4028: 426-436.
- [19] Aliberti K, Shen H, Stead M R, *et al.* Modeling the optoelectronic mixing effect in metal-semiconductor-metal detectors [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4646: 127-137.
- [20] Aliberti K, Shen H, Stann B, *et al.* Mixing characteristics of InAlAs/InGaAs metal-semiconductor-metal photoelectric mixers [J]. Proceedings of SPIE, 2003: 369-377.
- [21] Zhang L C, Wang T, Yin F, *et al.* Fabrication of high responsivity GaAs-MSM photoelectric self-mixing array [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(8): 925-928.
张立臣, 汪韬, 尹飞, 等. 高响应度 GaAs-MSM 光电自混频面阵器件 [J]. 激光与红外, 2011, 41(8): 925-928.
- [22] Yu M Q, Gao J B, Fang Z X, *et al.* Research on the design and experiment of MSM laser range imaging radar [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(6): 616-621.
余明权, 高剑波, 方照勋, 等. MSM 激光距离成像雷达系统设计与实验研究 [J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 616-621.
- [23] Redman B, Ruff W, Giza M. Photon counting chirped AM lidar: Concept, simulation, and initial experimental results [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6214: 62140P.
- [24] Zhang Z J. The research of the sheltered target imaging using chirped amplitude modulation lidar based on GM-APD [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 10-18.
张子静. GM-APD 啁啾幅度调制激光雷达对遮蔽目标的成像研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 10-18.
- [25] Zhang Z J, Wu L, Zhang Y, *et al.* Method to improve the signal-to-noise ratio of photon-counting chirped amplitude modulation lidar [J]. Applied Optics, 2013, 52(2): 274.
- [26] Jack M, Chapman G, Edwards J, *et al.* Advances in lidar components and subsystems at Raytheon [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8353: 83532F.
- [27] Itzler M A, Entwistle M, Jiang X D, *et al.* Geiger-mode APD single-photon cameras for 3D laser radar imaging [C] // IEEE Aerospace Conference, March 1-8, 2014, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE, 2014: 1-12.

- [28] Sun J F, Jiang P, Zhang X C, *et al.* Experimental research of 32×32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206006.
孙剑峰, 姜鹏, 张秀川, 等. 32×32 面阵 InGaAs Gm-APD 激光主动成像实验 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1206006.
- [29] Ruff W C, Bruno J D, Kennerly S W, *et al.* Self-mixing detector candidates for an FM/CW lidar architecture [J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4035: 152-163.
- [30] Zhang A M, Jiang N. Simulation of ICCD optical coupling in underwater low-light-level imaging [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2013, 32(11): 17-22.
张爱民, 江南. 水下微光成像的 ICCD 光路耦合仿真 [J]. *国外电子测量技术*, 2013, 32(11): 17-22.
- [31] Xu Q Q. Noise characteristic test and analysis of low light ICCD [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015: 25-33.
徐茜茜. 微光 ICCD 的噪声特性测试与分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 25-33.
- [32] Verle W A, Kenneth A C, Philip W A, *et al.* EBAPS ©: Nest generation, low power, digital night vision [C] // *Proceedings of Presented at the OPTRO International Symposium*, May 9-12, 2005, Paris, France. Paris: Association Aéronautique et Astronautique de France, 2005: 1-10.
- [33] Stann B, Redman B C, Lawler W, *et al.* Chirped amplitude modulation lidar for range and Doppler measurements and 3-D imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6550: 655005.
- [34] Song D, Shi F, Li Y. Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 56-60.
宋德, 石峰, 李野. 基底均匀掺杂下 EBAPS 电荷收集效率的模拟研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 56-60.
- [35] Gopalakrishnan G K, Burns W K, Bulmer C H. A LiNbO₃ microwave-photoelectric mixer with linear performance [C] // *1993 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, June 14-18, 1993, Atlanta, GA, USA, USA. New York: IEEE, 1993: 1055-1058.
- [36] Gopalakrishnan G K, Burns W K, Bulmer C H. Microwave-optical mixing in LiNbO₃ modulators [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, 41(12): 2383-2391.
- [37] Zhao L J. Research on linear modulation and microwave photonic frequency conversion technology based on electro-optic modulator [D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 33-41.
赵丽君. 基于电光调制器的线性调制和微波光子变频技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 33-41.
- [38] Wang M E. The research into high linear and high carrier-to-noise ratio microwave photonic technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2017: 18-26.
王明娥. 高线性高载噪比微波光子技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 18-26.
- [39] Dong X Y, Xu E M, Li F, *et al.* Linearized microwave photonic link based on phase modulation [J]. *Optical Communication Technology*, 2018, 42(2): 55-58.
董雪莹, 徐恩明, 李凡, 等. 基于相位调制的线性化微波光子链路 [J]. *光通信技术*, 2018, 42(2): 55-58.
- [40] Schmidt B, Tuvey S, Banks P S. 3D sensor development to support EDL (entry, descent, and landing) for autonomous missions to Mars [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8519: 851905.
- [41] McManamon P. Review of lidar: A historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 060901.
- [42] Zhang P, Du X P, Zhao J G, *et al.* High resolution flash three-dimensional LIDAR systems based on polarization modulation [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): 3889.
- [43] Chen Z. Research on Laser 3D imaging based on polarization modulation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017: 16-23.
陈臻. 基于偏振调制的激光三维成像方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 16-23.
- [44] Peng Z X. Research on 3D array imaging lidar receiving test system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 29-36.
彭章贤. 面阵三维成像激光雷达接收试验系统研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 29-36.
- [45] Zhan W D. Study on high-power and high-speed electro-optic modulation technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 19-27.
詹伟达. 大功率、高速率电光调制技术研究 [D]. 长

春: 长春理工大学, 2011: 19-27.

Technology, 2009: 28-34.

- [46] Wang D S. Research on the driving technology of the high power and high rate electro-optic modulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and

王大帅. 大功率、高速率电光调制器驱动技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009: 28-34.