

文章编号: 1001-3806 (2007) 05-0452-04

# G-APD 阵列——一种具有单光子灵敏度的三维成像探测器

龚 威

(武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

**摘要:** 介绍了一种利用盖革模式雪崩二极管 (G-APD) 作为成像单元的新型阵列光电探测器, 重点介绍了该新型成像光电探测器的关键技术、器件研发和系统应用的发展状况。G-APD 阵列探测器兼具单光子探测灵敏度和皮秒级时间分辨率两大特点, 适用于对极微弱光目标的三维成像探测。同时, G-APD 阵列探测器又是一种全固态的光电探测器件, 不仅体积小、重量轻、可靠性高, 而且还可利用现有的微光电子工艺进行规模化生产。因此, G-APD 阵列是目前阵列光电探测器件的一个重大发展, 必将在各种高端光电成像领域获得广泛的应用。

**关键词:** 光学器件; 光电成像探测; 雪崩二极管阵列; 盖革模式; 单光子成像; 三维成像

**中图分类号:** TN312<sup>+</sup>. 7 **文献标识码:** A

## G-APD arrays——a three dimensional imaging detector with single photon sensitivity

GONG Wei

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** A novel photonics detector arrays consisted of Geiger-mode avalanche photodiodes (G-APD) was introduced. The key techniques, device developments and system integration of this new image detector were emphasized. A G-APD array detector has two outstanding characters: single photon sensitivity and pico-second resolving power, which makes the detector very suitable for the weak optical signal 3-D imaging. On the other hand, the G-APD array detector is all-solid state photonics detection device. It has small size, lightweight and high reliability, and it can be mass manufactured with nowadays matured micro photonics device process. Therefore, G-APD array is a great advantage at the array photonics detector development, and it will be applied widely in the advanced photonics imaging area.

**Key words:** optical devices; photonics image detection; avalanche photodiode arrays; Geiger-mode; single photon image; three-dimensional image

## 引 言

CCD 成像器件的出现, 导致了光电成像技术在包括人们日常生活在内的诸多领域的广泛应用。虽然如此, 目前的 CCD 技术水平尚不能满足许多高端应用领域对成像器件的技术要求, 这些应用领域包括: 目标探测、军事侦察、地形测绘、资源勘查、自适应光学、高能物理、高能天文、生物医学成像等<sup>[1~5]</sup>。

这些应用领域对成像器件提出的高要求可概括为两个主要方面, 即要求它们具有更高的探测灵敏度和更高的时间分辨率。高的探测灵敏度是为了实现对微弱发光目标或远距离目标的成像。探测灵敏度的极限是单光子, 因此, 人们希望成像器件的每个像元都具有单光子探测能力; 高的时间分辨率是为了实现对目标的三维探测, 即除了获得目标的方位角和俯仰角之外, 还获得目标距离信息 (称之为角度-角度-距离像, angle-angle-range, AAR)。对于常用的飞行时间 (time of flight, TOF) 测距而言, 毫米级的测距精度要求探测器具有皮秒级的时间分辨能力。除了上述两个要求外, 对于一个能实用化的成像探测器件, 还对其体积、重量、功耗、牢固性、可靠性以及大规模生产的可能性有相应的要求。下面将要介绍的一种盖革模式雪崩二极管阵列探测器件 (Geiger-mode avalanche photodiodes, G-APD 阵列), 就是为了满足上述各种要求而发展起

基金项目: 国家九七三计划资助项目 (2006CB701302); 国家自然科学基金资助项目 (40523005); 教育部留学回国基金资助项目 (2006331); 武汉“晨光”计划资助项目 (20065004116-04)

作者简介: 龚 威 (1970-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事光学遥感方面的研究工作。

E-mail: weigong@mars.whu.edu.cn

收稿日期: 2006-09-27; 收到修改稿日期: 2006-12-17

来的一种新型的光电成像探测器<sup>[6~8]</sup>。

## 1 G-APD 阵列探测技术

在目前所用的诸多种类的光电探测器中,具有单光子探测能力的主要有两种,即光电倍增管(photo multiplier tube, PMT)和 G-APD。其中, PMT 是一种电真空器件,依靠其内部的多个电子倍增极所产生的极高增益而获得单光子探测灵敏度<sup>[9]</sup>; G-APD 则是一种处于盖革工作方式的 APD 固体器件,依靠处于击穿状态的雪崩过程获得单光子探测灵敏度<sup>[10]</sup>。

显然,在上述两种分立单光子探测器的基础上构建单光子探测器阵列是很自然的办法。但是, PMT 存在体积庞大、结构复杂、坚固性差和需由电真空工艺制造等缺点,不适于构建阵列器件。而 G-APD 则是一种全固态的具有单光子探测能力的器件,其诸多优点都有利于构建阵列器件。因此,在上世纪 90 年代,当分立 G-APD 技术逐渐成熟后,对 G-APD 阵列的研究受到普遍关注,并且直到目前, G-APD 阵列技术的研究还处在快速发展之中。

从分立 G-APD 器件发展到 G-APD 阵列探测器,需要解决两类主要的技术问题: G-APD 的集成和 G-APD 与相应电路的集成。

为解决 G-APD 探测像元的集成问题,发展出一种平面结构的 G-APD。这种结构与传统结构的不同主要有两点,即 P-N 结区更薄和可采用平面工艺(如 complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)制造。P-N 结厚度降低有利于降低器件的工作电压和提高时间分辨能力;而采用与半导体集成电路兼容的加工工艺则有利于实现探测器像元器件和相应电路的集成。

对于 G-APD 像元与相应电路的集成技术,最好当然是采用单片集成工艺,即将组成阵列的探测器和电子电路在同一基片上同时加工完成。但是,由于探测器和电子电路是特性很不同的两类器件,两者虽然可用同类工艺加工,但加工的技术要求很不相同。因此,简单地采用单片工艺可能会降低两者或两者之一的技术性能。这种状况,使得目前并行采用着两种探测器与电路的集成技术,即混合集成和单片集成。

### 1.1 混合集成 G-APD 阵列

这是美国林肯实验室的研究者所提出并采用的一种技术,称之为桥接集成技术<sup>[11]</sup>。这种技术是先在两块独立的基片上按统一的设计要求分别加工出 G-APD 阵列和相应的电路阵列,然后再将两者利用桥接的方法集成起来。由于探测器和电路可以按各自的技术要求制造,故可保证两者技术性能的发挥。桥接的处理是先将加工好的探测器阵列和电路阵列面对面连接,

再将探测器阵列的基底用电化学方法腐蚀掉(便于探测器工作于背面照射方式),然后将各电路的接头部分刻蚀出来,最后将露出的电路接头和探测器接头通过定位金属连接方式分别连接。

现以林肯实验室开发的一种 32 × 32 阵列 Si 基 G-APD 为例,说明该技术的实际状况。由于该阵列探测器设计为用于微弱光目标的 AAR 三维成像,故各像元电路的功能仅为测量光子的到达时间。其中, G-APD 的每个像元都采用平面结构。像元光敏面尺寸 30 μm ~ 50 μm,像元间距约 100 μm。每个像元都有相应的电路单元,这种电路单元是一种数字计时器,具有类似于秒表的功能;每个像元的计数器都按规定的程序对公共的时钟脉冲计数,一旦有单光子入射某像元,该像元探测器输出的雪崩电流脉冲将终止相应计数器单元的计数,并将结果保存,供读出用。图 1a 是该 32 ×

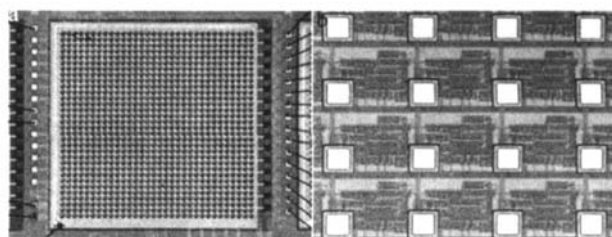


图 1 混合集成 32 × 32 G-APD 阵列  
a—阵列外形 b—电路局部放大

32 阵列 G-APD 探测器的外形照片;图 1b 是其部分电路单元的放大照片,其中的正方形小方块是放置相应的 G-APD 像元所需的空位。本探测器需采用两组工作电压 - 23.5 V 和 5 V。此时 G-APD 所处的反向偏置电压为  $|V_p| + V_d = 28.5 \text{ V}$ , 高于其击穿电压。该技术的开发者认为,该技术具有直接扩展的可能,不久即可扩展到 128 × 128 阵列,并可适用于非 Si 基的 G-APD 阵列与其电路的集成。

### 1.2 单片集成 G-APD 阵列

这种技术主要由瑞士洛桑工大和意大利米兰工大等机构的研究者所采用<sup>[12,13]</sup>。它是在现有的先进半导体生产加工技术的基础上,通过特殊的工艺设计,制造一体化的 G-APD 阵列探测器。显然,该技术在扩大探测器阵列规模和降低器件的制造成本方面具有优势,但此技术只适用于制作 Si 基的 G-APD 阵列。对于为扩展器件的工作波长而采用非 Si 基半导体材料时,就只能采用上述的混合集成技术。

现以瑞士洛桑工大开发的 32 × 32 阵列 Si 基 G-APD 探测器为例,说明该技术的实际状况<sup>[14]</sup>。图 2a 所示为本探测器的外形照片,图 2b 则是其中单个像元的显微照片(左边是 G-APD 像元,右边是相应的像元电路)。本探测器像元中 G-APD 探测器和相应的像元

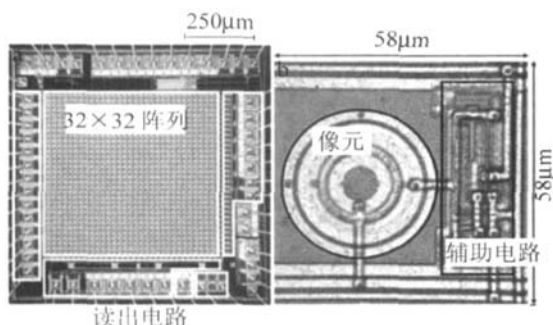


图 2 单片集成 32 × 32 G-APD

a—阵列外形 b—像元放大

电路被作为一个整体,采用  $0.8\mu\text{m}$  的 CMOS 工艺同时加工完成。由于 G-APD 采用了特殊的结构设计和特殊的工艺过程,使之能承受高的反向偏置电压。探测像元光敏面的直径为  $38\mu\text{m}$ ,像元间隔  $58\mu\text{m}$ 。本探测器阵列需要  $-25.5\text{V}$  和  $5\text{V}$  两组电源,前者加在 G-APD 阳极,后者加在 G-APD 阴极,使 G-APD 处于  $30.5\text{V}$  的反向偏置,过剩电压 (即反向偏置电压与击穿电压之差)  $V_e \approx 5\text{V}$ 。由于所采用的  $0.8\mu\text{m}$  CMOS 工艺的限制,使本阵列探测器的像元电路不能太复杂,使探测器的读出只能采用串行方式,限制了帧频的提高。同一小组的研究者最近报道了一种采用  $0.35\mu\text{m}$  CMOS 技术制造的 G-APD 阵列,就能采用较为复杂的像元电路,实现了阵列探测器的并行读出,大大提高了使用帧频<sup>[15]</sup>。

## 2 G-APD 阵列应用举例

由以上的介绍可知, G-APD 阵列具有两大主要优点:单光子探测灵敏度和皮秒级时间 (距离) 分辨率。应用 G-APD 阵列进行成像探测,可以利用前者实现对极微弱光目标成像,也可以利用后者实现高距离分辨三维目标成像。

若仅用 G-APD 阵列的单光子探测灵敏度的特点,则可将此阵列作为普通成像设备的焦平面器件使用。目标的照明依赖自然光,属于通常的被动强度成像技术角度-角度-强度 (angle-angle intensity, AA I) 成像。但采用 G-APD 阵列后,由于其具有单光子的探测能力,因此,可对极微弱光的目标成像。图 3a 所示即为

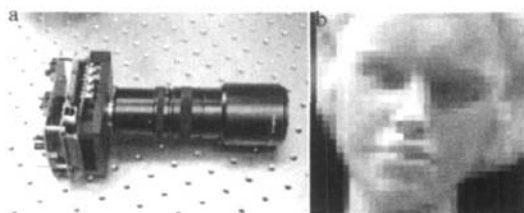


图 3 G-APD 阵列强度成像应用

a—强度成像装置 b—强度成像结果

一种用于被动式弱光成像的 G-APD 阵列成像装置的外形。它和普通 CCD 成像装置类似,也由成像光学系

统、面阵光电探测器和图像处理电路等组成<sup>[15]</sup>。图 3b 则为利用这种 G-APD 阵列探测器成像装置对一个人像模型的成像结果<sup>[14]</sup>。限于目前 G-APD 阵列的像元数,故此图像分辨率尚不如目前的普通 CCD 技术。但由于 G-APD 具有光子计数强度成像功能,在阵列像元数扩大之后,可实现对极微弱光目标的高分辨成像。

若要利用 G-APD 阵列的距离分辨能力进行三维成像,则必须采用主动成像方式,即将其构成激光雷达形式,见图 4<sup>[16]</sup>。用脉冲发射激光束对目标 (圆锥体)

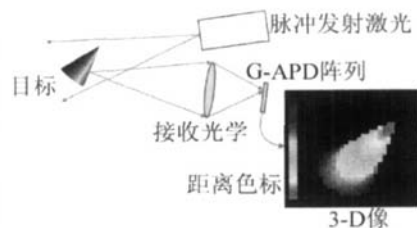


图 4 三维成像激光雷达原理

照射,目标的反射光经接收光学系统收集,并在其焦平面上由 G-APD 阵列进行单光子距离成像。成像结果示于此图的右下部。这是一幅伪彩色三维图像,用彩色表示目标上各点到成像仪器的距离。图 5 为利用这

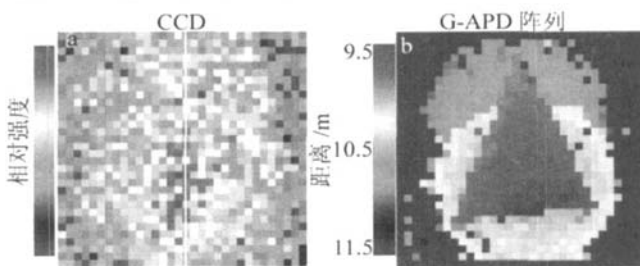


图 5 强度 (二维) 成像和距离 (三维) 成像

a—强度成像 b—距离成像

种激光雷达对同一组目标 (纵向放置的一个圆锥和两个圆球) 进行两种成像的比较:图 5a 为用低噪声 CCD 进行的强度成像,图 5b 则为用 G-APD 阵列进行的单光子距离成像。可见,在同样的照射光强和成像条件下,当 G-APD 阵列获得清晰的三维距离像 (AAR) 时,低噪声 CCD 所给出的强度像 (AA I) 基本上是一片噪声,说明 G-APD 阵列成像不仅获得了距离信息,而且其成像灵敏度还远远超过了低噪声 CCD。

显然, G-APD 阵列探测器最具特色的应用是同时利用其单光子探测能力和距离分辨能力,即对远距离目标进行主动三维成像。美国林肯实验室的研究就展示了这方面的结果<sup>[16]</sup>。他们的研究目标是超小型的激光雷达,发射采用芯片式微型激光器<sup>[17]</sup>,接收采用 G-APD 阵列,要求其具有远距离目标的快速识别能力,以满足导弹拦截器应用的需求<sup>[18]</sup>。这种超小型激光雷达的外形见图 6。图中,安装于扫描装置上的方形仪器即为



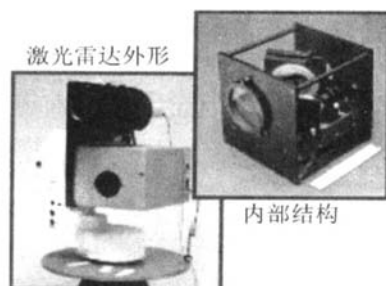


图6 G-APD阵列单光子成像激光雷达

G-APD阵列成像激光雷达,其上的圆柱形仪器为普通CCD成像仪,以方便成像激光雷达取景<sup>[19]</sup>。

图7为他们用G-APD阵列激光雷达拍摄的远距离汽车图像,其中图7a为实际拍摄的正视图像,图7b

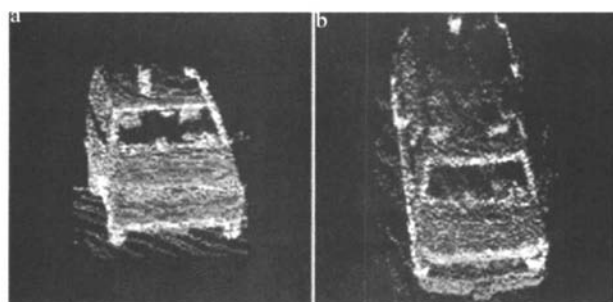


图7 G-APD阵列三维单光子成像结果

a—成像结果 b—变换结果

则为经变换后的图像,可获得顶视的效果。这种对拍摄结果可进行观察角度变换是AAR三维成像的一个突出特点,由此可获得目标更加全面的信息。利用AAR三维成像还可以显示出被障碍物遮挡的目标图像,如图8所示。两辆汽车中的左边一辆被其前方的

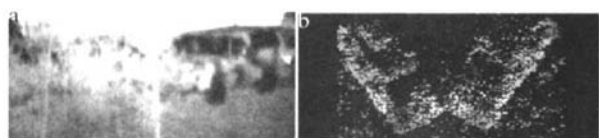


图8 障碍物后目标的显现

a—二维成像 b—三维成像

一片树林所遮挡,如果采用普通的强度成像技术,成像结果只能显示未被遮挡的右边一辆汽车和左边的树林,见图8a;而在三维距离成像中,通过角度变换处理,两辆汽车不仅可以清楚地显示出来,而且还可以对其进行多角度显示,图8b为显示其顶视的结果。由此可以看出三维成像在目标探测应用中的优势。

### 3 结束语

G-APD阵列作为一种全固态的探测器,兼具单光子探测灵敏度和皮秒级时间分辨率的突出优点,是固态焦平面阵列探测器技术的一个突破性发展。虽然G-APD阵列的发展史不长,但目前的技术状态已显示出它在微弱光、高分辨率三维成像领域的技术优势和

应用前景。该技术的发展趋势,如更大的阵列、更高的时间分辨率、更小的噪声电流和向长波(红外波段)的延伸,以及其应用的快速推广都可以预期,G-APD阵列探测器技术的研究和开发已受到世界许多国家的普遍重视,其技术和应用的发展状况都值得人们关注。

### 参考文献

- [1] O'KEEFFE J, JACKSON C. Low-light imaging: silicon photon-counting detectors enable next-generation imaging [J]. *Laser Focus World*, 2006, 42 (1): 32~35.
- [2] OTTE A N, DOLGOSHEN B, MOSER H G *et al*. Status of silicon photomultiplier developments as optical sensors for MAGIC/EUSO-like detectors [A]. 29th International Cosmic Ray Conference [C]. Pune: CRC, 2005. 101~106.
- [3] SHAH K S, FARRELL R, GRAZDZO R *et al*. Position-sensitive avalanche photodiodes for gamma-ray imaging [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 49 (4): 1687~1692.
- [4] AGRONSKA K A V, TERTTOOLEN L, GERRITSEN H C. Fast fluorescence lifetime imaging of calcium in living cells [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2004, 9 (6): 1230~1237.
- [5] HENRICH S R, AULL B, MARNO R *et al*. Three-dimensional laser radar with APD arrays [J]. *Proc SPIE*, 2001, 4377: 106~117.
- [6] VASILE S, GOTHOSKAR P, FARRELL R *et al*. Photon detection with high gain avalanche photodiode arrays [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, 45 (3): 120~123.
- [7] AULL B F, LOOMIS A H, GREGORY J A *et al*. Geiger-mode avalanche photodiode arrays integrated with CMOS timing circuits [A]. 56th Annual Device Research Conference Digest [C]. Charlottesville: ADR, 1998. 58~59.
- [8] ROCHAS A, GÖSCH M, SEROV A *et al*. First fully integrated 2-D array of single-photon detectors in standard CMOS technology [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15 (7): 963~965.
- [9] FAN Zh G. *Photonics detection technology* [M]. 2nd ed, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1987. 98~220 (in Chinese).
- [10] KNDTW J, SHAHRJERDYN H, ZEJIL H W. A silicon avalanche photodiode for single optical photon counting in Geiger mode [J]. *Sensors and Actuators*, 1997, A60 (1): 98~102.
- [11] AULL B F, LOOMIS A H, YOUNG D J *et al*. Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13 (2): 335~350.
- [12] NICLASS C, ROCHAS A, BESSE P A *et al*. A CMOS single photon avalanche diode array for 3-D imaging [A]. *IEEE International Solid-State Circuit Conference (ISSCC)* [C]. Switzerland: IEEE, 2004. 120~121.
- [13] ZAPPA F, GULNATTIA, MACCAGNANI P *et al*. Single-photon avalanche diode arrays [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17 (3): 657~659.
- [14] NICLASS C, ROCHAS A, BESSE P A *et al*. Design and characterization of a CMOS 3-D image sensor based on single photon avalanche diodes [J]. *IEEE Journal Solid-State Circuits*, 2005, 40 (9): 1847~1854.
- [15] NICLASS C, SERGD M, CHARBON E. A single photon avalanche diode array fabricated in deep-submicron CMOS technology [A]. *Design, Automation, and Test in Europe, Proceedings of the Conference on Design, Automation and test in Europe* [C]. Munich: IEEE, 2006. 81~86.

(下转第554页)

$$\frac{\partial^2 \Delta k}{\partial \theta^2} = \frac{2\pi}{\lambda_3} \frac{\partial^2 n(\omega_3)}{\partial \theta^2} - \frac{2\pi}{\lambda_2} \frac{\partial^2 n(\omega_2)}{\partial \theta^2} - \frac{2\pi}{\lambda_1} \frac{\partial^2 n(\omega_1)}{\partial \theta^2} \quad (24)$$

将  $\lambda$  值代入 (1) 式、(5) 式、(6) 式求出温度变化后晶体的主折射率  $n_j$  ( $j=x, y, z$ ), 再将该值代入 (17) 式 ~ (19) 式, 将得到的  $n(\omega_i)$  值代入 (23) 式、(24) 式并求解 (22) 式, 从而得到不同温度所对应的允许角  $\Delta\theta$ 。  $\Delta\phi$  可以用同样的方法求出。图 4、图 5 就是通过计算得到的允许角  $\Delta\theta$ 、 $\Delta\phi$  随温度的变化关系曲线。

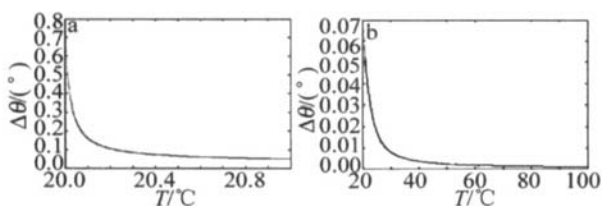


Fig 4 Relationship between  $\Delta\theta$  and temperature

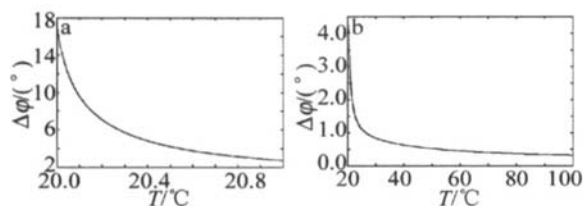


Fig 5 Relationship between  $\Delta\phi$  and temperature

从图 4、图 5 中可以看出, 随着温度的升高, 允许角在逐渐减小, 在  $20^\circ\text{C} \sim 21^\circ\text{C}$  之间允许角的数值下降得很快, 在  $35^\circ\text{C}$  以后, 下降逐渐趋于平缓, 同时可以看出: 在一定温度下, 相位匹配角的允许范围比方位角的允许范围小。

### 3 结 论

通过以上分析, 可以看出温度的变化会直接影响光参变振荡晶体的有效非线性系数、相位匹配角、走离角和允许角, 当温度在  $20^\circ\text{C} \sim 20.5^\circ\text{C}$  之间变化时, 晶体的有效非线性系数、相位匹配角和允许角的减小都非常剧烈, 在  $20.5^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$  之间, 晶体的允许角减小相对趋于平缓, 而有效非线性系数和相位匹配角的数值在这个温度范围内缓慢增加。而走离角的变化始终都是随着温度的升高而增大的, 因此, 在实际应用中应当综合考虑这几个方面的因素, 选择合适的晶体工作温度。

### 参 考 文 献

- [1] JOHNSON L F, GEUSC J E, van U IERT L G Coherent oscillation from  $\text{Ti}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  and  $\text{Er}^{3+}$  ions in yttrium aluminum garnet [J]. A P L, 1965, 7(5): 127 ~ 129.
- [2] ZHU Y Ch, LAN G, LI T *et al*  $2\mu\text{m}$  OPO laser based on KTA [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 317 ~ 321 (in Chinese).
- [3] YAO B Q, WANG Y Zh, WANG Q. Development of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 217 ~ 220 (in Chinese).
- [4] WEI J Q, WANG J Y, LU Y G The study about growth and character of  $\text{KTaO}_4$  crystal [J]. Artificial Crystal, 1994, 23(2): 95 ~ 101 (in Chinese).
- [5] ANEMA A, ISAKENKO L, RAD NG T. The nonlinear optical properties of KTA [J]. J O S A, 1995, B12(5): 794.
- [6] KATO K, UMEMURA N. Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for  $\text{KTaO}_4$  [DB/OL]. <http://www.cleoconference.org/materials/ThursdayAbstract.pdf>, 2004-12-13.
- [7] YAO J Q. Techniques about nonlinear optical frequency transformation [M]. Beijing: Science Press, 1995. 35 ~ 37 (in Chinese).

(上接第 455 页)

- [16] ALBOTA M A, AULL B F, FOUCHÉ D G *et al* Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13(2): 351 ~ 370.
- [17] ZAYHOWSKI J J, DILL C III. Diode-pumped passively  $Q$ -switched picosecond microchip laser [J]. Opt Lett, 1994, 19(3): 1427 ~ 1429.

- [18] HENRICH S R, AULL B F, KOCHER D G *et al* Development of 3-D imaging laser radar technology for advanced seekers [A]. *Proceedings of Active Systems* [C]. Denver: *IEEE*, 1997. 35 ~ 38.
- [19] MARINO R M, STEPHENS T, HATCH R E *et al* A compact 3-D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements [A]. *Laser Radar Technology and Applications VIII*, *Proceedings of SPIE 5086* [C]. Orlando: *SPIE*, 2003. 1 ~ 15.