

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2023.04.001

# 基于SiC的新型真空-固态混合光电探测器研究\*

徐鹏霄\*\*, 张 逊, 杨 杰, 刘 奥, 汪 玲, 易智豪, 赵文锦, 唐光华

(中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

**摘 要:** 基于SiC宽禁带半导体材料及器件, 实现了SiC宽禁带器件与超高真空器件的混合兼容设计与制备, 研制了一种新型的SiC基真空-固态混合光电探测器, 光敏面有效直径25 mm, 器件电子轰击增益近200倍, 响应信号半高宽4.5 ns。为真空-固态混合光电探测器理论研究与工程应用的深入推进奠定了基础。

**关键词:** 真空-固态混合光电探测器; 碳化硅; 电子增益; 响应时间

**中图分类号:** TN152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)04-0283-04

## Research of a Novel Vacuum and Solid-state Hybrid Photodetector Based on SiC

XU Pengxiao, ZHANG Xun, YANG Jie, LIU Ao, WANG Ling, YI Zhihao, ZHAO Wenjin,  
TANG Guanghua

(The 55th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN)

**Abstract:** Based on silicon carbide (SiC) wide bandgap semiconductor material and device, the hybrid compatibility of design and fabrication of wide bandgap device and ultra-high vacuum device was realized. A novel hybrid photodetector based on SiC was developed. The effective diameter of the photosensitive surface of the device could reach 25 mm. The electronic bombarded gain was nearly 200 times, and the full width at half maximum (FWHM) of response signal was 4.5 ns. It provided a solid foundation for the theoretical research and engineering application of vacuum and solid-state hybrid photodetector.

**Key words:** vacuum solid-state hybrid photodetector; SiC; electron gain; response time

### 引 言

真空-固态混合光电探测器是一种同时结合真空光电探测技术与固态光电探测技术的新型光电

探测器件<sup>[1-3]</sup>, 相较于传统真空器件通过打拿极或微通道板 (Micro-channel plate, MCP) 来实现电子增益, HPD 器件在器件内部直接引入半导体芯片, 通过高能电子轰击半导体材料产生的电子轰击半导

收稿日期: 2023-09-12

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF0709300)

作者简介: 徐鹏霄 (1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事真空及真空-固态混合光电器件的研究开发; (E-mail: xpx\_will@163.com)

张 逊 (1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事真空-固态混合光电器件的研究;

杨 杰 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事真空光电器件的研究。

\*\* 通讯作者

体增益实现信号倍增,解决了外部倍增系统过剩噪声因子高和输出易饱和的问题,优化了探测器的暗噪声和动态范围,拓宽了真空器件的应用场景<sup>[4]</sup>。HPD器件经过多年的研究发展,已经在高能物理、医学成像、天体物理等领域得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。

HPD器件继承了电真空器件和半导体类固态器件的优点,同时在一定程度上弥补了后两类器件的缺点与不足,具有电子增益高、输出线性电流大、响应时间快、探测灵敏度高、环境适应性强和抗电磁干扰等显著优点<sup>[2]</sup>。文章基于宽禁带半导体材料SiC研制了一种新型真空-固态混合光电探测器(SiC-HPD),通过电子光学仿真设计了静电聚焦器件结构,实现了真空与SiC半导体器件工艺的兼容制备。

## 1 工作原理

SiC-HPD器件的基本工作原理如图1所示,其由沉积在光窗表面的光电阴极、SiC半导体芯片阳极以及实现超高真空环境的金属-陶瓷管壳等部分组成。入射光信号经过SiC-HPD器件的输入光窗照射到光电阴极,光电阴极实现光电转换,产生的光电子在真空管壳中被电场聚焦加速后轰击在半导体芯片的表面。高能电子轰击电离作用使半导体芯片阳极内部产生大量的电子-空穴对,这些电子-空穴对在芯片内部电场作用下向耗尽层两端移动,实现电子轰击增益<sup>[1]</sup>。阳极采用SiC基半导体芯片作为信号收集极,倍增后的信号被SiC基半导体芯片结区收集后输出,供研究分析。

M.Suyama团队<sup>[7-8]</sup>和B.Smith团队<sup>[3]</sup>前期分别采用基于一代半导体材料Si和二代半导体材料

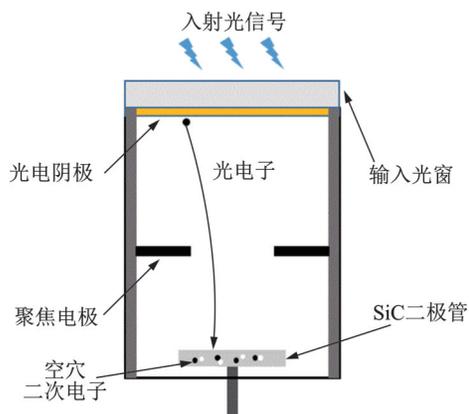


图1 SiC-HPD器件工作原理图

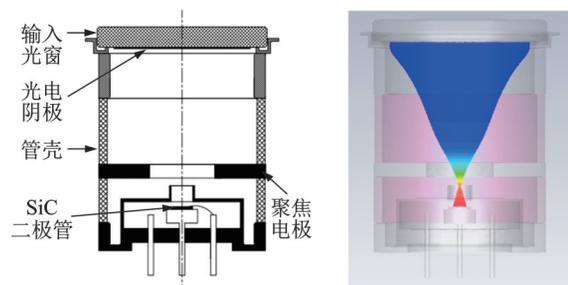
Fig.1 Working principle diagram of SiC-HPD device

GaAs的芯片作为阳极开展了HPD混合光电探测器器件的研究。相较传统一、二代半导体材料,SiC作为第三代宽禁带半导体材料,具有高击穿场强、耐高压、耐高温和抗辐照等优点<sup>[9-10]</sup>,相同有源层厚度的SiC电子器件具有更低的泄漏电流。SiC的禁带宽度室温下达3.2 eV,是Si的2.8倍、GaAs的2.2倍。SiC器件的最高工作温度在500℃以上,而硅器件的最高工作温度只有150℃,砷化镓器件的最高工作温度也不到250℃。利用宽禁带半导体材料的SiC器件替代Si和GaAs器件,可以有效克服一、二代半导体阳极器件的稳定性低、耐辐照性能差的缺点,使混合光电探测器件满足更多复杂场景的应用需求。

## 2 器件设计与制备

### 2.1 器件设计

SiC-HPD与传统真空光电探测器结构有显著不同,它将半导体芯片融合进了电真空器件中,由于半导体芯片阳极一般尺寸较小,要实现较大的探测光敏面积,必须在光电阴极与半导体芯片阳极之间增加电子光学系统,否则容易造成探测信号的损失,进而导致输出信号幅度减小。如果没有电子光学系统,HPD器件中产生的光电子可能直接轰击在半导体探测器边缘,导致器件暗电流升高甚至器件失效。因此,对所需电子光学系统及器件结构进行了设计,器件结构图如图2(a)所示。通过电子光学仿真软件对器件的电场分布等进行理论仿真,如图2(b)所示,器件所采用的电子光学系统将光电阴极产生的光电子有效地汇聚到了SiC半导体芯片阳极的有效面上,缩放比最高可达到10:1以上。



(a) SiC-HPD器件结构示意图 (b) SiC-HPD器件电子光学仿真结果

图2 SiC-HPD器件结构及仿真结果

Fig.2 Structural diagram and simulation results of SiC-HPD device

### 2.2 器件制备

基于半导体芯片贴装与真空光电阴极制作工艺,实现了SiC PIN二极管在超高真空管壳中装配,并在超高真空器件制作系统完成了HPD器件的封接与制备,器件真空度优于 $5.0 \times 10^{-6}$  Pa,研制出了SiC-HPD新型真空-固态混合光电探测器,光敏面有效直径达到25 mm,探测器实物如图3所示。



图3 SiC-HPD真空-固态混合光电探测器实物图

Fig.3 Picture of the fabricated SiC-HPD

### 3 结果与讨论

在器件制作过程中,涉及了半导体器件工艺、真空器件工艺、芯片封装测试等多领域技术交叉融合,如SiC二极管芯片在超高真空环境下长时间高温烘烤后等工艺环境影响,其在真空管内的正常工作是器件研制的关键,真空器件工艺通常需要经历数十小时的高温烘烤,可能会影响SiC器件的性能,为此进行了芯片高温试验验证,以选择最合适的器件制备工艺条件。

图4为SiC-HPD真空-固态混合光电探测器制管前后SiC二极管I-V性能的变化对比,从图中可以看出,SiC芯片经历HPD器件真空制管工艺后,性能未发生明显变化。这也与SiC材料的耐高温性能相符,同时SiC二极管芯片工艺制作过程中掺杂和退火等工艺过程温度都很高(通常高于800℃),远高于真空器件400℃左右的烘烤温度;另一方面对于真空放气,由于SiC半导体材料的杂质含量很少,芯片表面的洁净度高,且结合力牢固,十分适用于真空-固态混合型器件。

通过对研制的SiC基真空-固态混合光电探测器进行电子轰击增益、响应时间等光电参数测试分析,从图5中可以看出,对光电阴极工作在不同负高压(0~5000V)下、SiC二极管工作电压(-50V)下的电子轰击SiC二极管芯片进行测试,在最高阴极负高压5000V时,光电阴极产生光电子加速后轰击在SiC芯片表面,器件获得了近200倍的稳定电子增益。

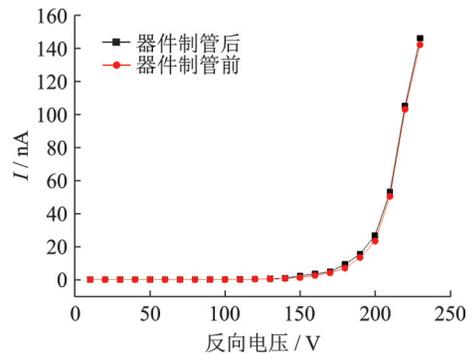


图4 SiC-HPD器件整管制备前后SiC二极管芯片性能变化对比

Fig.4 Comparison of performance changes of SiC diode before and after fabrication of SiC-HPD

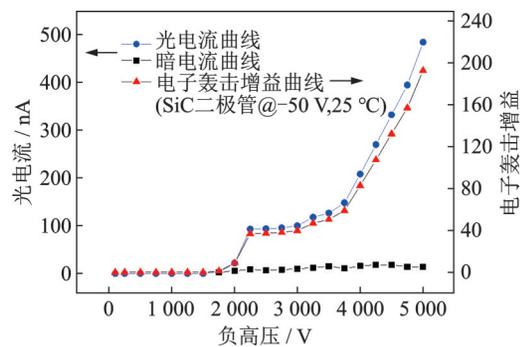


图5 SiC-HPD器件电子增益测试曲线

Fig.5 Test curves of electron gain of SiC-HPD

由于探测器工作时,入射光透过透明光窗照射在光电阴极上,通过外光电效应实现光电转换,产生的光电子在外加强电场的作用下进入真空腔体中,由于电子轰击半导体倍增效应<sup>[11]</sup>,将产生大量的电子-空穴对,电子轰击倍增系数 $G_{EBS}$ 存在以下关系:

$$G_{EBS} = (V_H - V_{TH}) / 3E_g \quad (1)$$

式中, $V_H$ 为混合光电探测器两端所加的加速电压, $V_{TH}$ 为增益开启阈值电压,由于这种电子轰击增益仅取决于加速电压,因此增益非常稳定,这种增益引起的噪声极小,过剩噪声因子接近于1<sup>[12]</sup>。研究采用了SiC二极管,从电子增益曲线拟合出增益开启阈值电压为2500V左右,SiC材料的禁带宽度约为3.2 eV,当施加的加速电压 $V_H$ 达到5000V时,电子增益的理论值约为260,造成增益实测值偏低的原因可能在于SiC二极管电子敏感有源层内尤其材料表面处存在一定缺陷与表面态,电子轰击产生的部分电子-空穴对未来得及形成信号输出即被缺陷俘获,减小了输出光电流信号的幅度,进而降低了电子增益的数值。

采用皮秒激光测试系统对探测器的时间响应

特性进行了测试,从图 6 可以看出,研制器件的响应信号半高宽为 4.5 ns。SiC 基混合光电探测器的响应时间  $t$  主要由 SiC 二极管器件 RC 充放电引起的延迟、总的渡越时间及负载电路引起的延迟共同决定<sup>[13]</sup>,即:

$$t_{\text{total}} = t_s + t_{\text{SiC}} + t_L + t_0 \quad (2)$$

式中,  $t_s$  为电子在真空中的渡越时间;  $t_{\text{SiC}}$  为 SiC 二极管器件 RC 充放电引起的延迟;  $t_0$  为总的电子渡越时间零散;  $t_L$  为负载电路引起的延迟。由于 SiC-HPD 采用了静电聚焦结构,电子在高压作用下在真空内运动,可以计算出电子渡越时间在百皮秒量级,且电子渡越时间零散亦很小。因此, SiC-HPD 器件的响应时间特性主要来源于 SiC 二极管芯片 RC 时间常数引起的延迟。后续通过优化 SiC 芯片的结构以及欧姆接触等性能参数,降低器件的等效电阻和等效电容,可进一步减小 SiC 芯片部分引起的响应延迟。

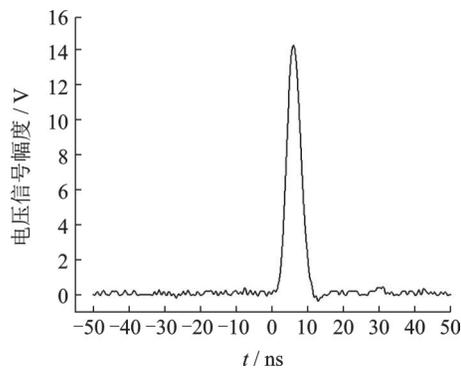


图 6 SiC-HPD 器件时间响应特性测试曲线

Fig.6 Test curve of time response characteristics of SiC-HPD

## 4 总结与展望

目前,在光电探测领域,基于传统打拿极和微通道板来实现电子增益的真空型光电探测器件已经历数十年的发展,两种体制分别在快响应时间、高分辨率成像和大线性电流、高动态范围的信号探测方面受到了一定的限制;同时,基于半导体材料的固态光电探测器在纳秒甚至皮秒级时间响应超高速探测、低噪声微弱光信号探测等领域无法完全取代。融合真空型光电探测器和固态光电探测器两者优点的真空-固态混合光电探测器件提供了一条全新的技术路径。近年来,国内外研究机构陆续开展了基于 Si、GaAs 等芯片阳极的混合光电探测器的研究与应用,取得了很大的进展,但也存在不

少问题有待进一步深入研究与解决,如电子轰击增益稳定性与缺陷产生机制、混合光电探测器件长期可靠性等。

基于 SiC 宽禁带半导体材料研制了一种全新的真空-固态混合光电探测器件,解决了电子光学静电聚焦器件结构设计、电真空器件工艺与半导体器件工艺混合兼容制备等关键技术问题,器件电子增益近 200 倍,响应信号半高宽优于 5 ns,为真空-固态混合光电探测器件理论研究与工程应用的不断深入推进提供了重要的技术支撑,未来有望在高能物理、紫外探测、微光夜视等诸多领域实现应用。

## 参 考 文 献

- [1] Hamamatsu Photonics K K. Photomultiplier tubes basics and applications. 3rd edition[M]. Shizuoka: Hamamatsu, 2006.
- [2] 宋登元,王小平. APD、PMT 及其混合型高灵敏度光电探测器[J]. 半导体技术, 2000, 25(3): 5-12.
- [3] Smith B, Passmore K, Smith A, et al. Development of hybrid photodetectors using single-crystal III-V photocathodes[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 504:182-187.
- [4] 唐家业,徐鹏霄,戴丽英,等. 混合式光电探测器[J]. 光电子技术, 2015, 35(2): 73-77.
- [5] Hirota Seiko, Nishimura Yasuhiro, Nakayama Shoei, et al. Development of hybrid photo-detectors for the hyper-kamiokande experiment [J]. Nuclear Physics B Proceedings Supplement, 2014, 253:208-209.
- [6] Barbier Remi, Baudot J, Chananat E, et al. Performance study of a MegaPixel single photon position sensitive[J]. Nuclear Instruments and Methods, 2009, A610: 54-56.
- [7] Suyama M, Kawai Y, Kimura S, et al. A compact hybrid photodetector(HPD)[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1997, 44(3):985-989.
- [8] Suyama M, Fukasawa A, Haba J, et al. Development of a multi-pixel photon sensor with single-photon sensitivity[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2004, 523(1):147-157.
- [9] Seshadri S, Dulloo A R. Demonstration of an SiC neutron detector for high-radiation environments[J]. IEEE Transactions on Electron Devices Ed, 1999, 46(3):567-571.
- [10] Nava F, Vanni P, Bruzzi M, et al. Minimum ionizing and Alpha particles detectors based on epitaxial semiconductor silicon carbide[J]. Nuclear Science IEEE Transactions, 2004, 51(1): 238-244.
- [11] Seitz Peter, Albert J P Theuwissen. Single-photon imaging [M]. New York: Springer, 2011: 65-67.
- [12] 陈 闽,杨胜杰. 电子倍增 CCD 微光传感器性能及应用分析[J]. 光电与控制, 2009, 16(1): 47-50.
- [13] 朱镜屏. 大电流、高增益门控光电倍增管的研究[J]. 光电子技术, 2001, 21(4): 272-280.