光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260721002

基于蓝宝石下转换的紫外能量传感器研制与性能表征

黄 建[1*]，曹 飞[1]，唐遵烈[1]，陈 彤[1]，屈菁菁[2]，张 兴[1]，
袁中朝[1]，丁雨憧[2]，甘秋宏[1]，陈于伟[1]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 四川压电与声光技术研究所，重庆 400060）

摘 要： 紫外能量传感器是光刻机中监测曝光光源能量的关键零部件。文章基于荧光下转换技术路线，研制了由蓝宝石晶体、光电二极管、信号处理电路、滤光片、机械结构件等组成的紫外能量传感器；采用光学非共轴空间布局，实现多界面光热能量耗散，提高传感器工作稳定性、抗激光损伤能力；提出基于仿真预测的晶体多自由度互相补偿安装方法，提高响应均匀性；采用近红外增强光电二极管，两级放大、差分输出的电路结构，提高传感器重复性。通过相关双光路对比法，减小光源能量波动对测试结果的影响，完成传感器相关性能参数高精度测试表征；测试结果显示，在波长为193 nm、脉宽为10 ns、能量为10 mJ、重频为1 000 Hz的条件下，其重复性小于0.08%、非线性度达到0.018%、响应频率达到13.9 kHz、不稳定性达到0.005%、非均匀性达到0.23%/mm、抗强光损伤能力大于1.5×10^7个脉冲，可应用于相关光刻机曝光能量实时监测。

关键词： 下转换；蓝宝石；紫外能量探测；抗强光损伤；重复性

中图分类号： TN23 **文章编号：** 1001－5868(2026)05－0886－08

Development and Characterization of Ultraviolet Energy Sensor Based on Sapphire Down-Conversion

HUANG Jian[1], CAO Fei[1], TANG Zunlie[1], CHEN Tong[1], QU Jingjing[2], ZHANG Xing[1],
YUAN Zhongchao[1], DING Yuchong[2], GAN Qiuhong[1], CHEN Yuwei[1]

（1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060; 2. Sichuan Institute of Piezoelectric and Acousto-Optic Technology, Chongqing 400060）

Abstract: Ultraviolet energy sensors are key components for monitoring exposure light source intensity in lithography machines. Based on fluorescence down-conversion, herein we developed an ultraviolet energy sensor composed of a sapphire crystal, a photodiode, a signal-processing circuit, an optical filter, and mechanical structural components. A non-coaxial optical configuration was adopted to achieve multi-interface photothermal energy dissipation, improving both operational stability and laser-induced damage resistance. To enhance response uniformity, a multi-degree-of-freedom mutual compensation installation method based on simulation predictions was proposed. A near-infrared enhanced photodiode, a two-stage amplification, and a differential output circuit structure were adopted to improve the sensor′s repeatability. Furthermore, a dual-path correlation comparison method was used to mitigate the impact of source energy fluctuations, enabling high-precision testing and characterization of sensor performance. The test results show that the repeatability was less than 0.08%, nonlinearity was

收稿日期：2026－07－21.

*通信作者：黄 建

0.018%, response frequency reached 13.9 kHz, instability reached 0.005%, non-uniformity reached 0.23%/mm, and resistance to intense light damage exceeded 1.5×10^7 pulses, demonstrating its viability for real-time exposure energy monitoring in lithography machines.

Key words: down-conversion; sapphire; ultraviolet energy detection; resistance to intense light damage; repeatability

0　引言

光刻机是半导体制造的核心装备，其光刻分辨率直接决定集成电路的元件集成密度、集成规模。紫外能量传感器作为光刻机中监测曝光光源光脉冲能量的关键零部件[1-2]，其性能直接影响光刻机的光刻分辨率及产率。随着半导体技术的发展，光刻机曝光光源波长从早期的 g 线（436 nm）、i 线（365 nm）逐步缩短到深紫外（193 nm）和极紫外（13.5 nm）[3-6]；光刻机曝光光源单脉冲能量、重复频率也不断提高，光源能量波动也随之增大，这对光刻机用紫外能量传感器的探测重复性、线性度、响应频率、均匀性、稳定性、抗强光损伤能力等提出了更高要求。

常见的紫外能量传感器主要为基于硅[7-9]、Ⅲ族氮化物（GaN，AlN 及其合金 AlGaN）[10-12]、氧化物半导体（ZnO，β-Ga_2O_3，TiO_2，SnO_2等）[13-16]等材料的光电转换直接探测型传感器。因用于先进光刻机的紫外能量传感器需长期处于高能高重频紫外光照条件下，其性能易退化、输出易漂移，导致重复性、稳定性较差，难以满足应用需求。而基于荧光转换晶体（Ce:YAG、蓝宝石等）下转换的间接探测型传感器[1,17-20]，因抗强光损伤能力更强，成为光刻机曝光剂量监测传感器的主要研究方向之一。目前，主流光刻机紫外能量传感器就采用了这一方案，主要由 ASML、STI 等厂商提供。

本文基于蓝宝石下转换技术路线，通过荧光转换晶体、光电二极管、信号处理电路、滤光片、机械结构件等优化设计与加工，完成了紫外能量传感器研制；采用相关双光路对比法，完成相关性能参数高精度测试表征。

1　传感器结构设计

1.1　工作原理及总体结构设计

实验中的紫外能量传感器通过结构设计与制造工艺，强化重复性、线性度、响应频率、稳定性、均匀性、抗强光损伤等特性，以适配光刻机高能高重频紫外脉冲能量探测应用需求。传感器总体结构如图 1 所示，主要由荧光转换晶体、滤光片、光电二极管、信号处理电路、机械结构件构成，采用光学非共轴空间布局，实现多界面光热能量耗散，提高传感器工作稳定性、抗激光损伤能力。其工作原理如图 2 所示，入射脉冲紫外光从进光口进入蓝宝石荧光转换晶体，被转换为近红外光，然后被滤光片滤除影响响应速度和信号残留的杂散光，剩余近红外光被硅光电二极管转换为电流信号，输出给信号处理电路反演出入射紫外光强度。

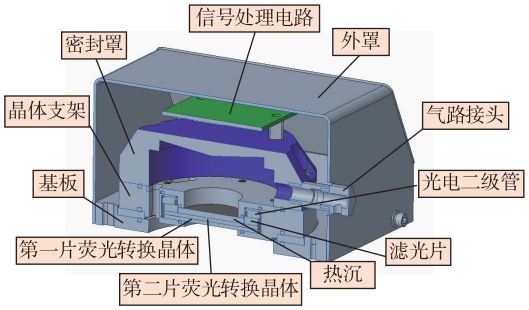


图 1　紫外能量传感器总体结构图

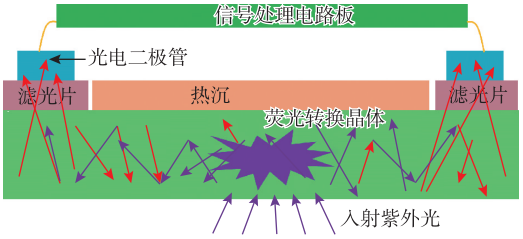


图 2　紫外能量传感器工作原理图

1.2　主要功能构件作用及结构设计

（1）荧光转换晶体：主要起将紫外光转换为近红外光的作用，避免高能紫外光直接照射，毁伤光电二极管，提高传感器使用寿命。其光转换均匀性、线性度会影响传感器组件响应均匀性、线性度；其热导率、余辉时间会影响组件的热稳定性、响应频率。本文传感器的荧光转换晶体采用蓝宝石，具有抗激光损伤能力强、热导率较高、化学稳定性高的特点[21-23]。蓝宝石荧光转换晶体结构尺寸设计为单片直径为 60 mm、厚度为 1.5 mm，兼顾荧光转换效率与均匀性；蓝宝石荧光转换晶体发光强度曲线如图 3 所示，通过杂质控制，调节荧光转换光谱与余辉时间 t（$t\leqslant100$ μs）。

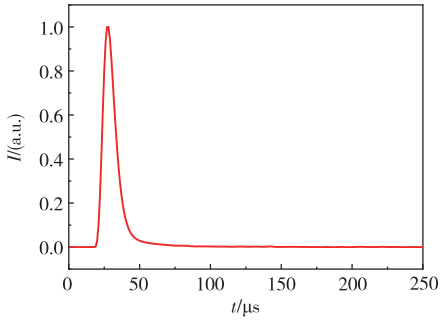


图3 蓝宝石荧光转换晶体发光强度曲线

(2)滤光片:主要起滤除近红外光以外杂散光的作用。为提高线性度,减小光电探测器表面死区影响,短波光需截止。滤光片透射谱如图4所示,滤光片带通光谱范围为750~1 100 nm,通带透过率不小于80%,带外截止率大于等于99%,兼顾高透过率与截止特性。

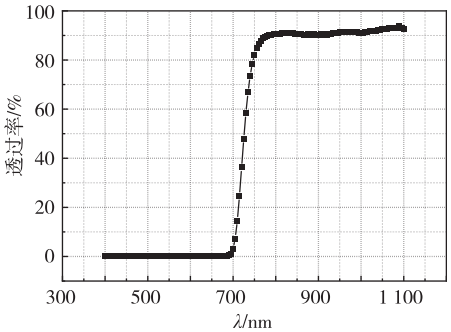
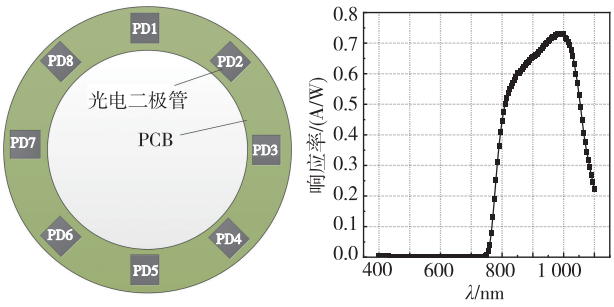


图4 滤光片透射谱

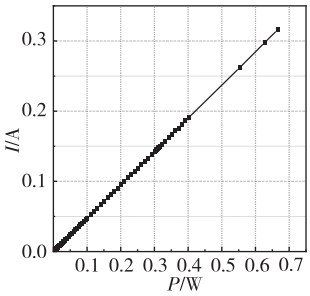
(3)光电二极管:主要起光电信号转换的作用。其响应率、暗电流、非线性度直接影响传感器组件整体响应重复性、非线性度。光电二极管采用环状分布式布局如图5(a)所示,可减小寄生电容,提高响应速度和响应均匀性;集成带通滤光膜,隔绝杂散光影响;采用黑硅近红外响应增强技术[24],提高近红外灵敏度、线性度。性能曲线如图5(b)和(c)所示,响应率大于等于0.6 A/W@850 nm,非线性度不超过0.1%。

(4)信号处理电路:主要起光电信号放大与输出的作用。其增益、噪声、线性度是影响传感器组件整体响应重复性、非线性度的主要原因。信号处理电路原理图如图6所示,采用低噪声运算放大器,两级放大、差分输出的电路结构。

(5)机械结构件:主要起各组件连接装配的作用。综合考虑结构件在长时间不间断工作时的散热需求、各组件间的轴向装配精度、结构件热膨胀变形对光信号的影响、材料高平面度的加工可行性以及结构件适应光反射需求的表面处理等。传感器主要结构件如图7所示。



(a)空间分布图 (b)响应光谱图



(c)响应线性度仿真图

图5 光电二极管空间分布和性能曲线

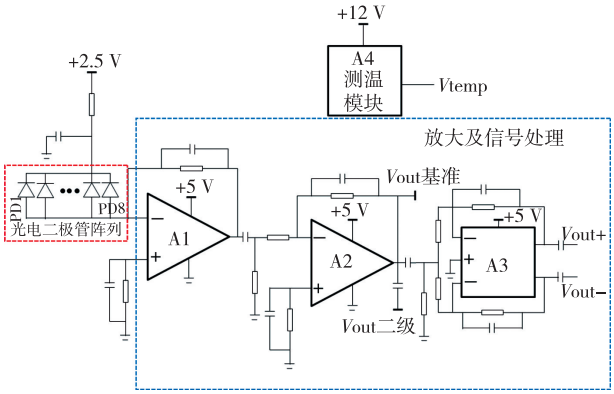


图6 信号处理电路原理图

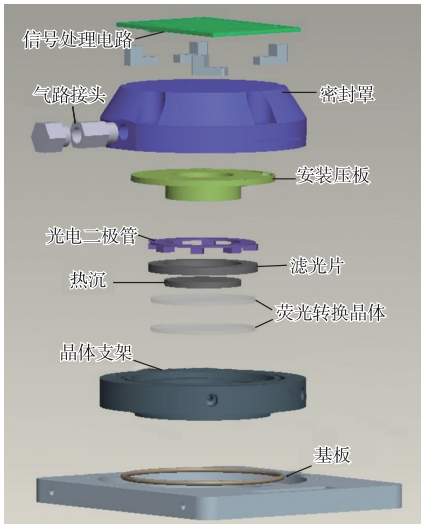


图7 传感器主要结构图

2　传感器制造与组装

2.1　核心构件制造工艺

紫外能量传感器所用蓝宝石荧光转换晶体采用提拉法生长，通过原材料配比、杂质浓度控制调节荧光转化光谱及余辉，通过生长温度场控制提高晶体荧光转换均匀性。滤光片采用有机材料结合染料热塑成型的工艺，通过材料厚度、染料成分及比例控制，实现大角度带内透过率高、带外透过率低的滤光片制造。光电二极管采用0.35 μm线宽6英寸（15.24 cm）硅工艺线制造，集成特色黑硅近红外响应增强工艺提高近红外响应率，采用高精度PECVD镀膜工艺片上集成增透膜限制余辉光谱。信号处理电路基板采用成熟的FR-4材料，采用单点就近接地及整版铺铜方式，减小地环路面积和防止公共阻抗耦合措施；通过SMA接头与光电二极管连接，通过DB25接头输出采样信号。机械结构件采用不锈钢基材，表面接触层镀镍，保障结构热稳定性、电磁屏蔽与抗腐蚀性。

2.2　传感器组装

零部件实物图如图8所示，根据传感器结构设计与装配图，按照由内到外的组装顺序，完成组件的装配如图9所示。为提高传感器响应均匀性，荧光转换组装通过预先测试单片晶体荧光转换分布，然后仿真预测旋转/翻转不同角度（多自由度互相补偿）叠加组合后晶体整体荧光转换效率分布，对比优选出最优组合进行组装，从而提高传感器整体响应均匀性。



图8　零部件实物图

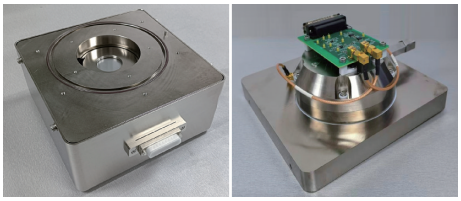


图9　紫外能量传感器实物图

3　传感器性能测试表征

3.1　重复性

重复性用以评价传感器在相同光输入条件下的多次测量输出信号的一致性。测试系统原理图如图10所示，采用相关双光路对比法消减光源能量波动对测试结果的负面影响：将光源发出的每一个光脉冲一分为二，一路用于照射被测传感器产生测试光信号，一路用于照射参考传感器实时监测每一个光脉冲能量；测试时对两个传感器同时打光，通过其输出信号幅值比值$R_i=\frac{V_{1i}}{V_{2i}}$（$V_{1i}$，$V_{2i}$分别为第$i$个光脉冲在测试传感器、参考传感器上激发的输出信号幅值），按公式（1）计算重复性δ。

$$\delta=\frac{\sigma}{\mu} \tag{1}$$

式中，$\mu=\frac{\sum_{1}^{n}R_i}{n}$，$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i-\mu)^2}{n-1}}$，$i$为测试激光脉冲序数，$n$为测试激光脉冲总数。

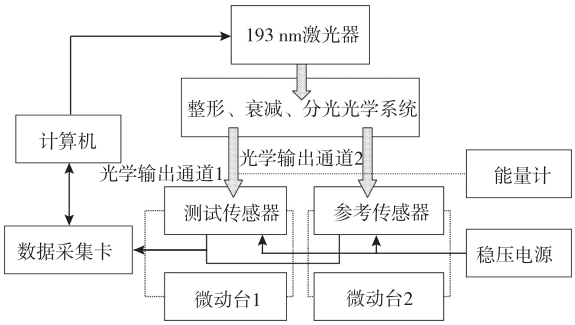


图10　紫外能量传感器参数测试系统原理图

图11为不同能量照射下紫外能量传感器的重复性。

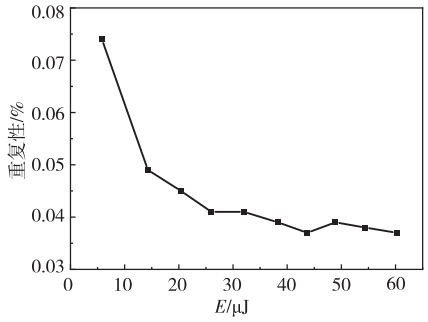


图11　不同能量光照下紫外能量传感器的重复性

由图可知，紫外能量传感器输入光能量从6 μJ到60 μJ，重复性都小于0.08%，这主要得益于光电二极管和放大电路的高信噪比，晶体荧光转换的高

稳定性；输出光强越小，重复性越差，这是因为光强越小，传感器接收到的信号越小，噪声占比越大，输出信号波动越大，重复性越差。

3.2 线性度

线性度用以评价传感器在不同光照条件下，光能量与输出信号幅值的线性程度。通过测试两个传感器在不同光照能量下的输出信号幅值平均值$\overline{V_{Tj}}$，$\overline{V_{Sj}}$（j为测试条件序数），然后利用（$\overline{V_{Sj}}$，$\overline{V_{Tj}}$）数据拟合直线公式$V_{TNj}=a\overline{V_{Sj}}+b$；通过该拟合公式，获得测试传感器拟合输出幅值$V_{TNj}$。能量非线性$L$可表示为：

$$L=\frac{\Delta V_{max}}{\left|\overline{V_{T1}}-\overline{V_{Tt}}\right|} \tag{2}$$

式中，$\Delta V_{max}=\left|\max(V_{TNj}-\overline{V_{Tj}})\right|$，为测试传感器输出信号与拟合信号幅值最大偏差；$\left|\overline{V_{T1}}-\overline{V_{Tt}}\right|$为参考传感器全量程输出信号最大读数减最小读数。测试结果如图12所示，紫外能量传感器在6～60 μJ能量范围非线性为0.018%，这表明荧光转换晶体、光电二极管、信号处理电路都具有良好的能量线性度，且在该范围内工作于线性区。

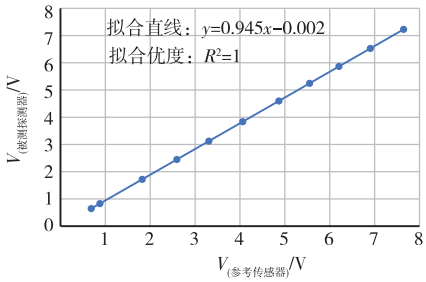


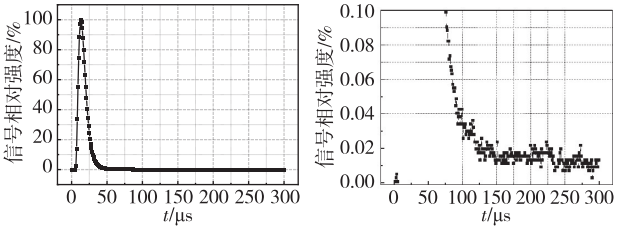
图12 紫外能量传感器非线性度曲线

3.3 响应频率

响应频率通过传感器接收光脉冲信号延迟时间的倒数进行表征。测试时给传感器输入脉宽130±10 ns的光脉冲信号，测试传感器输出信号的时域波形；记输出（上升段）信号为达到峰值幅度0.1%所对应的时间为t_0，作为脉冲起始时间；记输出（下降段）信号为达到峰值信号的0.1%所对应时间为t_f，作为脉冲结束时间。响应频率f可表示为：

$$f=\frac{1}{t_f-t_0} \tag{3}$$

传感器输出信号时域波形如图13所示，脉冲起始时间t_0为4 μs，脉冲结束时间t_f为76 μs，则响应频率为13.9 kHz，满足先进光刻机曝光频率要求。



（a）整体波形图 （b）局部放大图

图13 紫外能量传感器响应时域波形

3.4 稳定性

稳定性通过传感器接收不同数量光脉冲后的输出信号变化比例来表征。测试系统原理图如图14所示，在图10的基础上增加一个可开合的遮光板，用于参考传感器接收光开/关控制。测试时，测试传感器持续接收光，作为长期工作（稳定性）测试物；参考传感器间歇接收脉冲光，作为稳定工作标准；通过两路传感器输出电压比值变化计算稳定性。

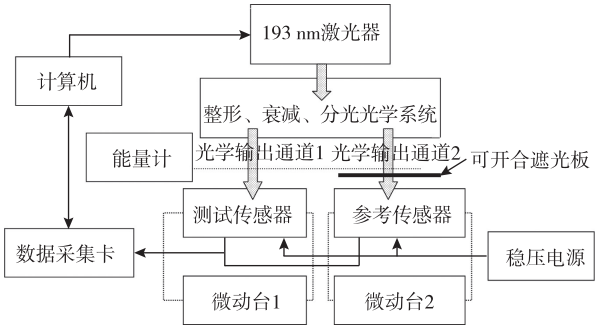


图14 紫外能量传感器稳定性测试系统原理图

测试时，测试传感器每接收2.4×10^5个光脉冲后，打开遮光板，同步采集测试传感器和参考传感器的1 000个脉冲输出幅值比值平均值记为R_i（i为测试条件序数），并重复测试获得11组数据；利用11组（i，R_i）数据拟合直线公式$R_{in}=ai+b$；通过该拟合公式，获得输出幅值比值拟合值R_{in}，$i=1\sim11$；利用公式（4）计算不稳定性ΔR_1。

$$\Delta R_1=\frac{\max(R_{in})-\min(R_{in})}{10\times[(\max(R_{in})+\min(R_{in})]}\times100\% \tag{4}$$

式中，$\max(R_{in})$，$\min(R_{in})$分别为11组数据中的最大值、最小值。测试结果显示，紫外能量传感器不稳定性为0.005%，这主要得益于荧光转换晶体、机械结构件、光电二极管良好的光热、光电稳定性。

3.5 响应非均匀性

响应均匀性通过光脉冲照射传感器光敏区不

同位置时输出信号的变化百分比来表征。测试系统原理图如图 15 所示。同步采集测试传感器与参考传感器的 100 个脉冲输出幅值比值的平均值记为 $\overline{R_{i,j}}$，i 为光斑横坐标序号，j 为光斑纵坐标序号；采集 7×7 个数据点，采用公式(5)计算响应非均匀性 ΔR_a。

$$\Delta R_a = \max\left(\frac{\Delta_{i+1,j}+\Delta_{i-1,j}+\Delta_{i,j+1}+\Delta_{i,j-1}}{4\,\overline{R_{i,j}}\,L}\right) \quad (5)$$

式中，$\Delta_{i+1,j}$，$\Delta_{i-1,j}$，$\Delta_{i,j+1}$，$\Delta_{i,j-1}$ 分别为 $\overline{R_{i,j}}$ 与相邻 4 个位置点 $\overline{R_{i+1,j}}$，$\overline{R_{i-1,j}}$，$\overline{R_{i,j+1}}$，$\overline{R_{i,j-1}}$ 相减后得到的输出幅值比值偏差值，L 为相邻光斑中心距。

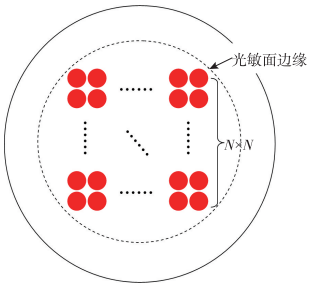
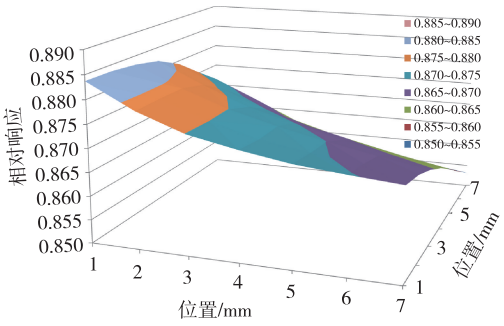


图 15　均匀性测试光斑中心位置分布图

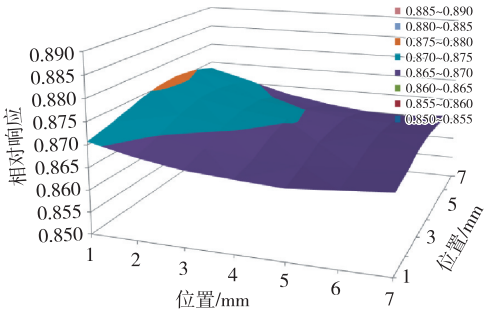
图 16(a)和(b)分别是荧光转换晶体采用晶向对齐安装和多自由度补偿安装获得的紫外能量传感器相对空间响应分布图，晶体采用补偿安装的紫外能量传感器响应非均匀性为 0.23 %/mm，仅为晶向对齐安装的传感器的 49.3%，表明晶体多自由度互相补偿安装可有效减小晶体自身均匀性影响，提高传感器整体响应均匀性。

3.6　抗激光损伤能力

抗激光损伤能力通过在规定脉冲光照射下，且不引起被测传感器相对的响应率发生明显退化，传感器所能承受的最大光脉冲数量来表征。设置光脉冲能量为 10 mJ，脉宽为 10 ns，波长为 193 nm，测试传感器照射 1.5×10^7 个光脉冲过程中相对参考传感器响应率变化如图 17 所示。由图可知，传感器在照射前后，相对响应率未发生明显变化(变化量小于等于 1%)，也未见明显趋势性变化(相对响应率变化主要来源于测试噪声)。在波长为 193 nm、脉宽为 10 ns、能量为 10 mJ、重频为 1 000 Hz 的条件下，其抗激光损伤能力大于 1.5×10^7 个脉冲。这主要得益于传感器下转换技术体制，规避了高能激光对光电二极管的直接照射，有效提高了传感器抗激光损伤能力。



(a) 晶向对齐安装



(b) 多自由度互相补偿安装

图 16　晶体空间响应分布图

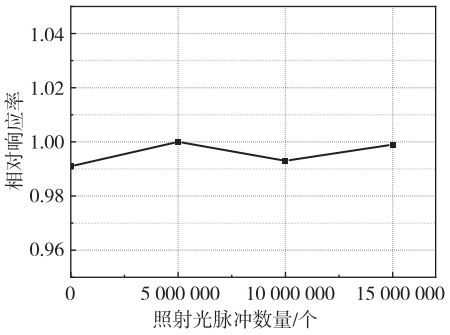


图 17　相对响应率随照射激光脉冲数量的变化

4　结论

本文基于荧光下转换技术路线，研制了由蓝宝石晶体、光电二极管、信号处理电路、滤光片、机械结构件等组成的紫外能量传感器。采用相关双光路对比法，完成了传感器相关性能参数高精度测试表征；测试结果显示，在波长为 193 nm、脉宽为 10 ns、能量为 10 mJ、重频为 1 000 Hz 的条件下，其重复性小于 0.08%、非线性度达到 0.018%、响应频率达到 13.9 kHz、不稳定性达到 0.005%、非均匀性达到 0.23%/mm、抗强光损伤能力大于 1.5×10^7 个脉冲。验证了光学非共轴空间布局、晶体多自由度互相补偿安装、光电二极管近红外增强等措施对传感器重复性、抗激光损伤、均匀性等性能提高的有效性。该传感器性能优良，能够实现 ArF 准分子激

光脉冲能量高重复性、高线性、高稳定性测量[1,17,25-26]，可应用于相关光刻机曝光能量实时监测。

参考文献：

[1] 谢承科，陈 明，杨宝喜，等. 准分子激光脉冲能量探测器的设计与性能测试[J]. 中国激光，2015，42(1)：69-76.
Xie Chengke，Chen Ming，Yang Baoxi，et al. Development and performance testing of pulsed excimer laser energy detector[J]. Chinese Journal of Lasers，2015，42(1)：69-76.

[2] Liang X，You L，Wang T，et al. Excimer pulse energy stabilization realized by charging [J]. Chinese Journal of Lasers，2010，37(2)：374-378.

[3] Fay B. Advanced optical lithography development，from UV to EUV[J]. Microelectronic Engineering，2002，61-62：11-24.

[4] Switkes M，Kunz R R，Sinta R F，et al. Immersion liquids for lithography in the deep ultraviolet[J]. Proc. of SPIE，2003，5040：1-10.

[5] Meshulach D，Dolev I，Yamazaki Y，et al. Advanced lithography：wafer defect scattering analysis at DUV [J]. Proce. of SPIE，2010，7638：76380K.

[6] Cacouris T，Rao R，Rokitski R，et al. Advanced light source technologies that enable high-volume manufacturing of DUV lithography extensions[J]. Proc. of SPIE，2012，8326：83261G.

[7] 张猛蛟，蔡 毅，江 峰，等. 紫外增强硅基成像探测器进展[J]. 中国光学，2019，12(1)：19-37.
Zhang Mengjiao，Caiyi，Jiangfeng，et al. Silicon-based ultraviolet photodetection：progress and prospects[J]. Chinese Optics，2019，12(1)：19-37.

[8] Herbert S，Banyay M，Maryasov A P，et al. Quantum efficiency determination of a novel CMOS design for fast imaging applications in the extreme ultraviolet [J]. IEEE Transactions on Electron Devices，2012，59(3)：846-849.

[9] Blacksberg J，Nikzad S，Hoenk M E，et al. Near-100% quantum efficiency of delta doped large-format UV-NIR silicon imagers[J]. IEEE Transactions on Electron Devices，2008，55(12)：3402-3406.

[10] 杨富城，杨 帆，许金通. GaN基p-i-n型紫外探测器钝化工艺研究[J]. 半导体光电，2023，44(6)：895-900.
Yang Fucheng，Yang Fan，Xu Jintong. GaN-based p-i-n type UV detector passivation process study [J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(6)：895-900.

[11] Cicek E，Vashaei Z，Bayram C，et al. Ulmer. Comparison of ultraviolet APDs grown on free-standing GaN and sapphire substrates[J]. Proc. of SPIE，2010，7780：77801P.

[12] 张 燕，龚海梅，白 云，等. 空间用紫外探测及AlGaN探测器的研究进展[J]. 激光与红外，2006，36(11)：1009-1012.
Zhang Yan，Gong Haimei，Bai Yun，et al. UV detection applied to space and the research development of AlGaN detector[J]. Laser & Infrared，2006，36(11)：1009-1012.

[13] 陈 星，周 畅，刘可为，等. 基于宽禁带半导体氧化物微纳材料的紫外探测器研究进展[J]. 中国光学，2022，15(5)：912-928.
Chen Xing，Zhou Chang，Liu Kewei，et al. Review of ultraviolet photodetectors based on micro/nano-structured wide bandgap semiconductor oxide [J]. Chinese Optics，2022，15(5)：912-928.

[14] 李丽华，彭韶龙，从文博，等. Co_3O_4/Fe_2O_3异质结复合材料的制备及其紫外光光电探测性能[J]. 半导体光电，2024，45(3)：420-425.
Li Lihua，Peng Shaolong，Cong Wenbo，et al. Preparation and UV photodetection properties of a Co_3O_4/Fe_2O_3 heterojunction composite [J]. Semiconductor Optoelectronics，2024，45(3)：420-425.

[15] 张彩珍，戴明娇，闫升荣. ZnO基异质结紫外探测器光电特性研究[J]. 半导体光电，2023，44(6)：832-836.
Zhang Caizhen，Dai Mingjiao，Yan Shengrong. Study on the photoelectric characteristics of ZnO based heterojunction UV detectors[J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(6)：832-836.

[16] 李震球，钟皖生，舒林聪，等. 铟掺杂氧化镓日盲深紫外探测器[J]. 半导体光电，2025，46(2)：261-268.
Li Zhenqiu，Zhong Wansheng，Shu Lincong，et al. In doping of gallium oxide solar-blind deep-ultraviolet detector [J]. Semiconductor Optoelectronics，2025，46(2)：261-268.

[17] 陈 明，谢承科，杨宝喜，等. 高精度深紫外光学透射率测量装置的研制[J]. 中国激光，2016，43(3)：175-181.
Chen Ming，Xie Chengke，Yang Baoxi，et al. Development of device for high-precision deep ultraviolet optical transmittance measurement [J]. Chinese Journal of Lasers，2016，43(3)：175-181.

[18] Telfair W B，Martin C A，Gordon E I，et al. Ultraviolet radiometer：United StatesUS19880185867[P]. 1988-12-26.

[19] Fricke W C. Line scanner：United StatesUS07/498，321[P]. 1990-06-25.

[20] Fricke W C，Ganopoulos M. Position sensor for ultraviolet and deep ultraviolet beams：US6730915B[P]. 2002-05-06.

[21] 沈忠伟，王兆华，范海涛，等. 输出能量4 mJ的1 kHz飞秒掺钛蓝宝石激光再生放大研究[J]. 物理学报，2014，63(10)：189-194.
Shen Zhongwei，Wang Zhaohua，Fan Haitao，et al. A 4 mJ femtosecond Ti：sapphire regenerative amplifier at 1 kHz repetition rate [J]. Acta Physica Sinica，2014，63(10)：189-194.

[22] 刘同维. 超快激光作用下蓝宝石晶体表面损伤行为研究[D]. 长沙：湖南大学，2021.
Liu Tongwei. Surface damage behavior of sapphire crystal under ultrafast laser irradiation [D]. Changsha：Hunan University，2021.

[23] Gaft M，Reisfeld R，Panczer G. Modern luminescence spectroscopy of minerals and materials[M]. Cham：Springer

International Publishing, 2015.

[24] 黄　建, 雷仁方, 江海波, 等. 基于湿法腐蚀工艺的高性能黑硅光电探测器[J]. 半导体光电, 2021, 42(4): 464-468.
Huang Jian, Lei Renfang, Jiang Haibo, et al. High performance black silicon photodetector based on wet etching process[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(4): 464-468.

[25] Gentec-EO. UV converter crystal selection dataset [DS/OL]. (2021)[2026-07-21].

[26] 赵万琦, 江　锐, 冯泽斌, 等. ArF 准分子激光器脉冲参数高精度在线测量系统设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(6): 80-89.
Zhao Wanqi, Jiang Rui, Feng Zebin, et al. Design and implementation of high precision on-line measurement system for pulse parameters of ArF Excimer laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(6): 80-89.

作者简介：

黄　建(1984—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光电探测器研究。