

文章编号 1004-924X(2005)02-0211-08

纳秒激光等离子体光源的光谱测量技术

尼启良

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:提出了一种新的探测和测量激光等离子体软 X 射线源光谱强度的方法。此方法使用通道电子倍增器和定标过的硅光电二极管为探测器,前者是非标准探测器,后者为标准探测器。应用电荷灵敏前置放大器和峰值探测器测量探测器产生的电量,并以高分辨率的光谱仪为分光元件,在已知光栅效率、通道电子倍增器增益、硅光电二极管能量响应的条件下,给出了计算激光等离子体软 X 射线源在某一波长光谱强度的公式。

关键词:软 X 射线源;激光等离子体;光谱强度;峰值探测器

中图分类号:O536 **文献标识码:**A

Technology for measuring spectrum from nanosecond laser plasma soft X-ray source

NI Qi-liang

(*State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: A method detecting and measuring the intensity of spectrum from laser plasma soft X-ray source is presented. A channel electron multiplier (CEM) and a calibrated silicon photodiode are used as detectors in this method, the former is a nonstandard detector and the latter is a standard one. Charge-sensitive preamplifiers and peak detector are used for measuring total charges generated by detectors, and a monochromator with high resolution is employed as spectrometer, formulae to calculate the intensity of spectrum from laser plasma soft x-ray source is given, based on known the grating efficiency of monochromator, CEM's gain and responsivity of silicon photodiode to photons.

Key words: soft X-ray source; laser plasma; spectrum intensity; peak detector

收稿日期:2005-02-10;修订日期:2005-03-06.

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(No. 60223003);应用光学国家重点实验室基金

1 引言

激光等离子体(LPP)软 X 射线光源是以高功率激光脉冲(功率密度大于 10^{10} W/cm^2)照射物质表面产生高温、高密度激光等离子体,并由等离子体辐射出一到几十纳米软 X 射线的小型高亮度点光源。液体靶激光等离子体光源在软 X 射线投影光刻、软 X 射线显微术等领域已经得到应用,尤其是氙液体靶激光等离子体光源被认为是未来软 X 射线投影光刻的最佳候选光源之一。激光等离子体软 X 射线源产生的光信号是极快的脉冲信号。对于使用脉冲宽度为皮秒甚至于飞秒量级的激光器的激光等离子体软 X 射线光源,其光谱的探测通常使用价格昂贵的背照射 X 射线 CCD。实际上,短脉冲激光与物质相互作用时辐射的软 X 射线可以持续几个纳秒^[1]。对于脉冲宽度是几个纳秒的光脉冲,它经过响应时间足够快的探测器后将变成几个纳秒脉冲宽度的电脉冲。本文讨论的是这类光脉冲强度的测量问题。作者提出了一种新的探测和测量激光等离子体软 X 射线源光谱强度的方法,并建立起测量短脉冲软 X 射线光源光谱的装置。即使用美国 Burle Industrise 公司制造的最新型通道电子倍增器 5900 Magnum 作为探测器^[2],也可以使用定标过的标准探测器硅光电二极管 AXUV-100 作为探测器。5900 Magnum 型通道电子倍增器为非标准探测器,它有足够短的响应时间能探测到脉宽为几个 ns 的脉冲信号。AXUV-100 用于脉冲测量时需加反偏电压 10~50 V,其响应时间可以提高到几个 ns。

2 LPP 软 X 射线光源光谱测量装置

LPP 软 X 射线光源光谱测量装置由

Mcpherson 247 型单色仪和探测系统(包括探测器及其放大电路)二部分组成,如图 1 所示。

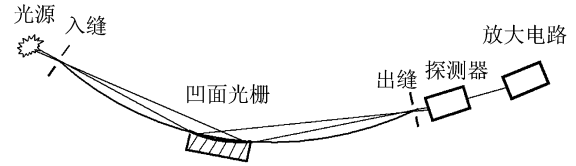


图 1 激光等离子体光谱测量装置简图
Fig. 1 Schematic diagram of setup used in spectra measurement of LPP

Mcpherson 247 型单色仪的入射狭缝、出射狭缝、凹面光栅在同一罗兰圆上。使用 600 lp/mm 光栅,在出入狭缝宽度为 $10 \mu\text{m}$ 时,光谱分辨率是 0.015 nm。光栅曲率半径 2.217 m,有效面积 $30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。入射角为 88° 时,波段范围 1~125 nm。

在光谱测量实验中光谱分辨率直接决定测量结果的好坏,同时也是衡量单色仪系统的一项重要指标。它与衍射光栅的像差、单色仪的入缝、出缝、各光学元件表面的面形精度以及光栅的衍射极限密切相关。对于较小的狭缝宽度 $10 \sim 20 \mu\text{m}$,像差对分辨率的贡献起到主要作用。对于较大的狭缝宽度(大于 $100 \mu\text{m}$),凹面光栅单色仪的光谱分辨率主要由狭缝宽度决定,可以使用下面的表达式近似估算:

$$\Delta\lambda = S \times \frac{d}{R} \cos \beta, \quad (1)$$

S 是狭缝宽度, R 是光栅的曲率半径。

图 2 给出了放大电路示意图,由激光等离子体软 X 射线源产生的软 X 射线经过单色仪入射到光电探测器上,光电探测器将光脉冲信号变成电脉冲信号,再进一步由电荷灵敏前置放大器放大,电荷灵敏前置放大器的输出信号是一具有十几 ns 上升时间和很长的下降时间的脉冲,其幅度为 V_0 。此脉冲经过线性放大器的第二次

放大变成具有高斯(Gaussian)分布的脉冲,其幅度为 V_P 。线性放大器起到两个作用:其一,由于电荷灵敏前置放大器的输出信号具有十几个 ns 上升时间,峰值探测器对这样的脉冲信号不响应,必须由线性放大器将其变成上升时间小于 250 ns 的脉冲;其二,来自光源的软 X 射线经过光学系统后,强度很弱,线性放大器能将其进一步线性放大。线性放大器输出的高斯脉冲的幅度被峰值探测器保持几个 ms。在这段保持时间内,A/D 转换器把这一幅值转化成数字量。在激光辐照到靶上产生软 X 射线的同时,激光器亦产生一同步触发脉冲信号,此信号经过延迟电路的处理同时产生几路按一定时序触发峰值探测器和 A/D 转换器的 TTL 电平,确保 A/D 转换器能采集到峰值探测器输出信号的峰值。测量是由 Labview 图形语言编制的软件来完成的^[3]。下面将详细地讨论如何选择合适的探测器,如何使选择的探测器与电荷灵敏前置放大器匹配才能使放大电路的噪声最小,以及如何测量出探测器产生的电荷。

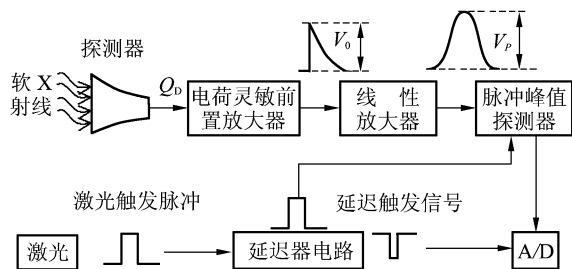


图 2 探测激光等离子体光脉冲信号的方法

Fig. 2 Method to detect light pulse signal from LPP

3 探测器的选择

在软 X 射线波段,通道电子倍增器(CEM)是一种耐用并有较高探测效率的探测器。选择合适的 CEM 对弱信号的检测是非常重要的,选择标准如下:第 1 要有足

够小的噪声。CEM 的噪声包括散粒噪声、暗电流、离子噪声。散粒噪声来自电子发射及倍增过程的随机起伏。暗电流主要来自阳极漏电流和场致发射。离子噪声来自离子反馈。第 2 要有足够小的电容。对电荷灵敏前置放大器来说,探测器的电容是噪声源,它的电容要与电荷灵敏前置放大器的容许电容相匹配,否则会在前置放大器的输出端产生无法容忍的噪声,湮没信号。第 3 其输出脉冲要有足够快的上升时间,因为入射的光脉冲很快,仅持续几个 ns,探测器必须有足够快的响应时间。为此,选择了美国 BURLE 公司制造的 Magnum 型 CEM,它是目前世界上最好的通道电子倍增器之一。

激光等离子体光源是脉冲式软 X 射线光源,它产生的是持续时间为几个 ns 的光脉冲。测量它的脉冲幅度是一种比较好的方法,这是对光脉冲所产生的电脉冲信号模拟量的测量,亦要求 CEM 工作在模拟模式。CEM 既可以工作在模拟模式又可以工作在脉冲计数模式,这取决于通道电子倍增器所加高压的大小。对于 5 900 Magnum,工作在模拟模式通常要求其增益小于 1×10^6 ;工作在脉冲计数模式则要求其增益大于 1×10^6 。

另一种常使用的探测器是标定过的硅光电二极管,例如,美国 IRD 公司的 AX-UV-100 硅光电二极管经常作为二级传递标准测量软 X 射线光源的光谱强度^[4-14]。测量脉冲光源时,AXUV-100 两端需加 10~50 V 的反偏电压。其脉冲上升时间为几个 ns。图 3 是 AXUV-100 在 0.1~30 nm 波段的能量响应曲线,即入射到 AX-UV-100 接收面上 1 J 的光能量,它产生的电荷量随波长变化的曲线。

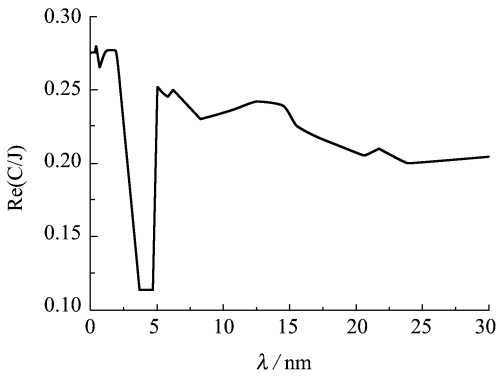


图 3 AXUV-100 的光子灵敏度响应曲线
Fig. 3 Responsivity curve of AXUV-100 to photons in pulse application

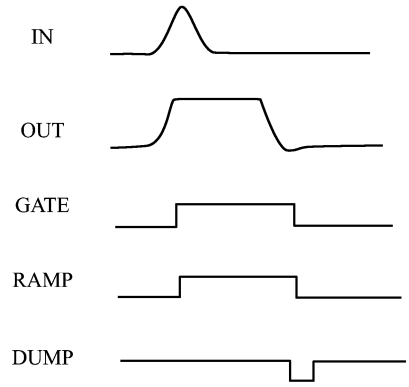


图 4 PH300 输入和输出端的时序图
Fig. 4 Time sequence of PH300 input and output

4 电荷灵敏前置放大器

在脉冲事件处理和分析过程中,经常使用电荷灵敏前置放大器,它被用于测量探测器产生的电荷总量。来自探测器的脉冲电流被它的反馈电路中的电容 C_f 积分产生一输出脉冲,其幅度与流入电荷灵敏前置放大器的电荷 Q_D 成正比。一个与 C_f 并联的反馈电阻 R_f (几百兆欧姆) 慢慢地释放掉 C_f 中的电荷。电荷灵敏前置放大器的增益等于反馈电容 C_f 的倒数,即增益

$$G_2 = 1/C_f, \quad (2)$$

如前所述,电荷灵敏前置放大器输出脉冲幅度 V_0 与流入电荷灵敏前置放大器的电荷 Q_D 成正比,即

$$V_0 = Q_D/C_f, \quad (3)$$

$$\tau = C_f R_f. \quad (4)$$

激光等离子体软 X 射线光源产生的光脉冲经 5900 Magnum 后变成电脉冲信号。对于脉冲信号的放大,电荷灵敏前置放大器是最合适的前放之一,它的输出与探测器输入它的电荷成正比,并且它经常被用作响应时间比其上升时间更快的探测器的前置放大器。基于上述原因,选择了 AMPTEK 公司的电荷灵敏前置-整形放大器 A203,见图 4。

5 脉冲峰值探测器

线性脉冲整形放大器的输出脉冲具有 $1 \sim 3 \mu\text{s}$ 的上升时间和几个 μs 的脉冲宽度,为了捕获这种脉冲的幅度,使用峰值探测器是最好的方法之一。下面介绍 2 种脉冲峰值探测器。

5.1 PH300 脉冲峰值探测器

PH300 可以将上升时间大于 250 ns 的模拟输入脉冲的最大幅度作为采样保持电容的峰值电压加以保持。它的内部采样保持电容是 470 pF ,也可以使用外接采样保持电容 $50 \sim 1000 \text{ pF}$,根据实际需要而定。值得注意的是如果使用外接电容作为采样保持电容,高质量的聚本乙烯或聚四氟乙烯电容将是最佳选择,因为这些材料做成的电容漏电流很低。因输出电压在保持阶段将有所下降,通常用保持电压的下降速率来表征保持特性,计算公式是: $\partial V/\partial t (\text{V/s}) = I (\text{pA})/C_H (\text{pF})$,其中 V 是电容两端的电压, I 为漏电流, C_H 为保持电容。由此公式可知,减小漏电流和增大保持电容可以减小下降速率,提高精度。但是增大保持电容又会使采样特性变坏,所以减小漏电流是减小下降速率最好方法。

在室温 PH300 的下降速率为 $1 \text{ nV}/\mu\text{s}$ 。在输入脉冲信号的上升时间内,通过一个二极管和保持电阻,PH300 的保持电容被充电,PH300 处于充电模式。在此期间 PH300 控制输入端的门必须打开,即 GATE 端处于高电平(TTL 电平)。一旦达到输入脉冲的最大值 V_{max} ,PH300 马上就进入保持阶段,即保持工作模式。保持

电容两端的电压等于 V_{max} 。同时 V_{max} 以 $1 \text{ nV}/\mu\text{s}$ 下降速率衰减。如果在 PH300 的 RAMP 端和 DUMP 端分别加上低电平(TTL 电平),PH300 将快速放电。图 4 说明了 PH300 各输入端和输出端的工作时序。图 5 则给出了 PH300 与 A203、5900 Magnum 的连线图。图 6 是 A203 输出脉冲(即 PH300 输入)和 PH300 输出波形。

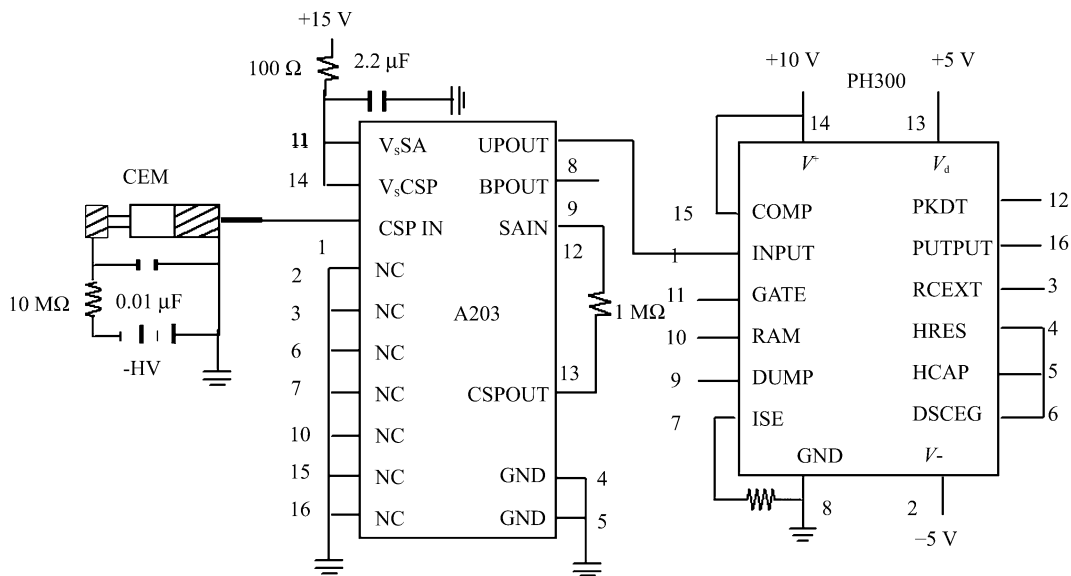


图 5 PH300 与 A203、5900Magnum 的连线图

Fig. 5 Circuit connecting PH300 to A203 and 5900 Magnum

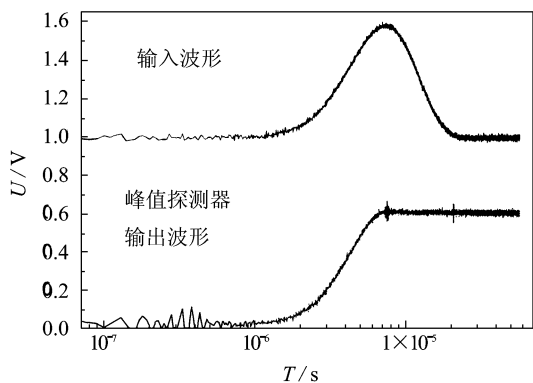


图 6 峰值探测器的正输入和输出波形

Fig. 6 Positive input and output waveform of peak detector

5.2 负脉冲峰值探测器

PH300 脉冲峰值探测器仅能保持正脉冲的峰值,但在一些需要保持负脉冲峰值的应用中 PH300 则无能为力。我们研制了既能保持正脉冲的峰值又能保持负脉冲的峰值的电路,如图 7 所示。在此电路中如果两个二极管 4148 反向,则此电路变成负脉冲的峰值探测器。图 8 是峰值探测器的负输入和输出波形。

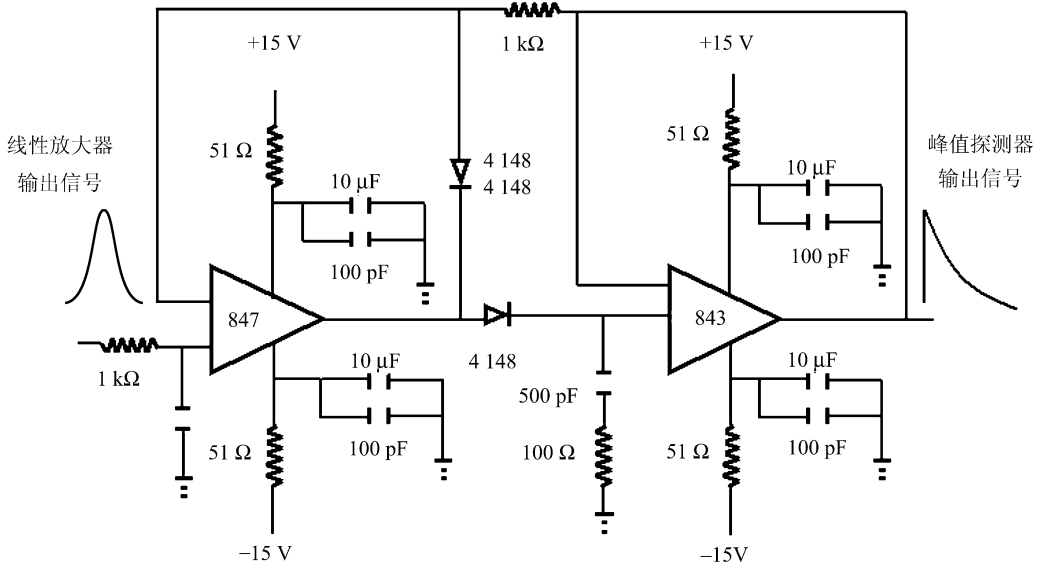


图 7 正脉冲和负脉冲峰值探测器电路

Fig. 7 Circuit of peak detector used for holding positive and negative pulse

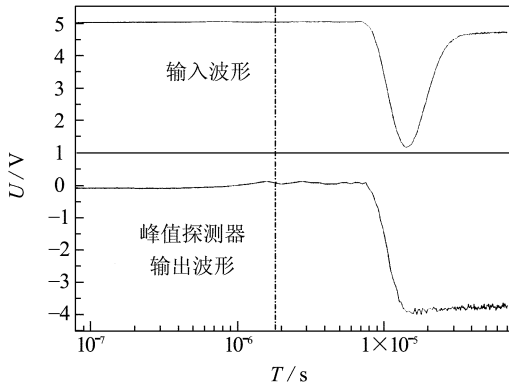


图 8 峰值探测器的负输入和输出波形

Fig. 8 Negative input and output waveform of peak detector

6 激光等离子体光源光谱强度的计算

如果在某一电压下 5900 Magnum 的增益为 G_1 , 量子效率为 $L(\lambda)$, 线性滤波放大器的放大倍数为 G , A/D 模数转换器读出峰值探测器的输出为 V_p , V_p 就是线性滤波放大器输出的脉冲辐度, 凹面光栅的效率为 $T(\lambda)$, 单色仪对光源所张立体角为

Ω , 光谱带宽为 $\Delta\lambda$ 。如果只考虑单色仪狭缝有一定宽度的情形, 忽略光谱带宽的其他增宽效应。

则由 5900 Magnum 产生的电荷 Q_D (以库仑为单位) 为

$$Q_D = V_0 / G_2 = V_0 C_f = V_p C_f / G, \quad (5)$$

光源在某一波长单位立体角单位波长每个激光脉冲内发射的光子数为:

$$Q_D / [e G_1 \times T(\lambda) \times \Delta\lambda \times \Omega \times L(\lambda)] = V_p C_f / [e G_1 \times T(\lambda) \times G \times \Delta\lambda \times \Omega \times L(\lambda)], \quad (6)$$

其中 e 是一个电子的电量。

由 AXUV-10 产生的电荷同样可以表示为:

$$Q_D = V_0 / G_2 = V_0 C_f = V_p C_f / G$$

光源在某一波长单位立体角单位波长每个激光脉冲内发射能量为:

$$Q_D / [T(\lambda) \times R_e(\lambda) \times \Delta\lambda \times \Omega] = V_p C_f / [T(\lambda) \times R_e(\lambda) \times G \times \Delta\lambda \times \Omega], \quad (7)$$

其中 $R_e(\lambda)$ 是 AXUV-100 在波长 λ 处的能量响应。图 9 是使用硅光电二极管 AXUV-100 为探测器测量到的液体 Xe 激光等离子体光谱。

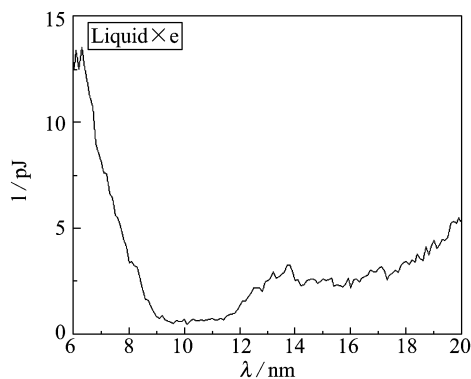


图 9 Xe 液体微滴喷射靶 LPP 源光谱

Fig. 9 Spectrum of Xe liquid aerosol spray jet target LPP

7 结 论

探讨了使用通道电子倍增器和定标过的硅光电二极管为探测器探测和测量激光等离子体软 X 射线源光谱强度的方法。给出了具体的使用通道电子倍增器、硅光电二极管与电荷灵敏前置放大器测量电量的电路。在已知光栅效率、通道电子倍增器增益、硅光电二极管能量响应的条件下,推导了计算激光等离子体软 X 射线源在某一波长光谱强度的公式。

参考文献:

- [1] DITMIRE T, DONNELLY T, RUBENCHIK A M, *et al.* Interaction of intense laser pulses with atomic clusters[J]. *Physical Review A*, 2000, 53(5):3379-3402.
- [2] 尼启良,陈波,巩岩,等.激光等离子体软 X 射线光源的一种诊断方法[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3):235-238.
NI Q L, CHEN B, GONG Y, *et al.* A diagnostic method to soft X-ray laser-produced plasma source[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3):235-238. (in Chinese).
- [3] 曹继红,尼启良,巩岩.虚拟仪器实现极紫外波段光谱数据采集和处理[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6 增):103-106.
CAO J H, NI Q L, GONG Y, *et al.* Data acquisition and processing in EUV band with labview program[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6 supplement):103-106. (in Chinese)
- [4] GULLIKSON E M, KORDE R, CANFIELD L R. Stable silicon photodiodes for absolute intensity measurements in the VUV and soft X-ray regions[J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 1996, 80:313-316.
- [5] FUNSTEN H O, RITZAU S M, HARPER R W H. Response of 100% internal quantum efficiency silicon photodiodes to 200 eV to 40 keV electrons[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2001, 48(6):1785-1789.
- [6] KORDE R. One gigarad passivating nitrated oxides for 100% internal quantum efficiency silicon photodiodes[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1993, 40(6):1655-1659.
- [7] BAILEY S M, WOODS T N, CANFIELD L R, *et al.* Sounding rocket measurements of the solar soft X-ray irradiance[J]. *Solar Physics*, 1999, 186: 243-257.
- [8] CANFIELD L R, VEST R. Silicon photodiodes with integrated thin film filters for selective bandpasses in the extreme ultraviolet[J]. *SPIE*, 1994, 2282:1-38.
- [9] OGAWA H S, MCMULLIN D R, JUDGE D L. Normal incidence spectrometer using high density transmission grating technology and high efficiency silicon photodiodes for absolute solar EUV irradiance measurements[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(12): 3121-3125.
- [10] KORDE R, FURUNO K, HWANG H. Large area silicon detectors for calorimetry[C]. *Proc. Symp. On Detector Research and Development for the Superconducting Super Collider*.

World Scientific, 1991, 334-336.

- [11] JORQUERA C R, KORDE R, FORD V G. Design of new photodiode Standards for use in the MISR in-flight calibrator[J]. *IEEE*, 1994, 5(94):1998-2000.
- [12] CANFIELD L R, VEST R E. Absolute silicon photodiodes for 160 nm to 254 nm photons[J]. *Metrologia*, 1998, 35:329-334.
- [13] SEELY F, KORDE R, HANSER F, *et al.* Characterization of silicon photodiode detectors with multilayer filter coatings for 17~150 Å[J]. *SPIE*, 1999, 3764:103-109.
- [14] FUNSTEN H O, SUSZCYNISKY D M, RITZAU S M. Response of 100% internal carrier collection efficiency silicon photodiodes to low-energy ions[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, 44(6):2561-2565.

作者简介:尼启良(1966—),男,辽宁辽阳人,博士,副研究员,现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室从事软 X 射线和紫外光学研究工作。