

《紫外-真空紫外遥感仪器及辐射定标》专题文章导读

王淑荣

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

地球环境的紫外遥感是除可见、近红外、热红外和微波遥感以外的一个具有突出优势的遥感领域,是基于紫外波段太阳光被低、中、高层大气分别强烈散射和被大气中的臭氧等微量气体强烈选择吸收的原理进行大气密度和大气臭氧等吸收气体分布的遥感,而紫外辐射分布本身也是一项重要的大气辐射背景参数,对于目标识别等具有重要应用价值。

国外紫外遥感仪器发展已有 30 多年的历史,近年来我国紫外遥感技术研究也取得了实质性进展。2002 年,太阳紫外光谱监视器搭载神舟三号飞船,首次获得了地外太阳紫外光谱和大气后向散射紫外光谱;2008 年 5 月,随着 FY-3 气象卫星首发星的成功发射,FY-3 气象卫星紫外臭氧垂直探测仪投入在轨应用,其主要任务是测量臭氧总量的垂直分布,为环境监测、气候预报和全球气候变化研究提供重要参数。紫外臭氧垂直探测仪将我国气象卫星空间光学遥感仪器的光谱范围延拓到紫外-真空紫外波段,是我国气象卫星应用的首台紫外-真空紫外光谱遥感仪器。

长春光机所在紫外遥感仪器研制过程中,建立了紫外-真空紫外辐射定标实验室,引进美国 McPherson 3 m 真空紫外光谱仪及真空紫外分光光度计,自行研制了多功能紫外-真空紫外辐射定标装置,并开展了与紫外遥感仪器辐射定标相关的系列研究。本专题论文是紫外辐射定标研究的部分内容,文一《高精度紫外探测器辐射定标系统》利用所构建的定标装置,以 NIST 紫外标准探测器为准,实现了紫外探测器高精度定标;文二《紫外-真空紫外空间遥感仪器漫反射板的制备》提出一种漫反射板加工的新工艺及检测方法,改善了漫反射板的朗伯余弦辐射特性;文三《氟化镁窗口氙灯的真空辐射衰减特性》介绍了一种在真空辐射定标中抑制氟化镁窗口氙灯衰减的方法,保证了定标数据的稳定性。上述文章从不同侧面展开了紫外遥感仪器及定标方法研究,且在实际工作中得到应用和检验,取得了较好的效果。

文章编号 1004-924X(2009)03-0469-06

高精度紫外探测器辐射定标系统

王 锐^{1,2},宋克非¹

(1. 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;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:为了对紫外探测器进行高精度定标,满足紫外遥感量化的需求,构建了一套高精度紫外探测器辐射定标系统。以 NIST(美国国家标准技术研究院)紫外标准探测器为基准,在 200~400 nm 波段对响应度未知的紫外硅探测器,紫外增强型光电倍增管和日盲型紫外光电倍增管进行了绝对标准的传递和光谱响应度、量子效率的标定,并在 350 nm 对紫外硅探测器的空间均匀性进行了标定。按照国际通用不确定度评估规范,对测量结果进行了不确定度分析和评估。结果表明,总的传递不确定度 $<2\%$ 。实验证明了以标准探测器为基准,运用替代法建立高精度紫外探测器定标系统的可行性。

关键词:辐射定标;紫外探测器;标准探测器;绝对标准

中图分类号:TP73 文献标识码:A

High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector

WANG Rui^{1,2}, SONG Ke-fei¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To realize the high accuracy radiance calibration for a ultraviolet detector, a radiance calibra-

收稿日期:2008-03-26;修订日期:2008-06-06.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2002AA2Z9999;No. 2004AA99)

tion system for ultraviolet detector was established to meet the requirement of ultraviolet remote quantification. On the basis of ultraviolet standard detector in National Institute of Standard Technology (NIST, USA), the absolute criterion was transferred to the responsivity unknown ultraviolet silicon detector, ultraviolet multiplier phototube and the ultraviolet solar blind photomultiplier. The spectral responsivity and quantum efficiency of the ultraviolet silicon detector was calibrated at 200~400 nm and 200~300 nm, and the spatial uniformity was calibrated at 350 nm. According to the guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement, the relative uncertainty of transference is less than 2%. Experimental results reported here prove the feasibility establishing a radiance calibration system for ultraviolet detector by a replacement method based on standard detector.

Key words: radiance calibration; ultraviolet detector; standard detector; absolute criterion

1 引言

近年来,人们对紫外波段光谱范围的价值有了重新认识,在这一领域中的应用研究陆续展开。其中,空间紫外遥感技术已成为人类了解自然界的一条重要途径^[1]。许多现象都可以在紫外波段观测到,如多数恒星所辐射的光谱峰值都在紫外-真空紫外谱段,通过研究辐射光谱可以知道恒星的组成和发生着的物理、化学变化;通过对大气散射光、辉光和极光的探测,可以了解太阳和地球大气相互作用的机制,反演出大气中各种微量气体和气溶胶的含量,实现大气环境的实时监测。

随着量化遥感的不断深入,对紫外波段的辐射强度和光谱分辨率测量的精度不断提高,需要高精度的光谱响应率标准来标定各类传感器、评估其测量精度、长期稳定性以及数据可比较性。从理论上讲,实现绝对光谱辐射测量的途径有两个:一是基于辐射源,二是基于辐射探测器,其中基于探测器的定标技术是近 10 年来的发展趋势,具有国际公认的最高精度。

作为国内紫外遥感辐射定标的主要单位,长春光机所于 2005 年引进了 NIST(美国国家标准技术研究院)紫外标准探测器,并在此基础上搭建了一套高精度的紫外探测器光谱辐射响应度定标系统,陆续完成了对紫外探测器的绝对光谱响应度,量子效率及空间均匀性的标定,并对标定结果进行了不确定分析和评估,组合不确定度 $<2\%$ 。

2 紫外探测器辐射定标系统

所建立的紫外探测器辐射定标系统如图 1 所示,它由 300 W 氙灯、前置光学系统(前置平面

镜、前置球面镜)、紫外光栅双单色仪、后置光学系统(后置平面镜,后置球面镜)、出缝折转平面镜、探测器转台、NIST 紫外标准探测器、分束器、监视探测器、波长扫描控制器、探测器转台控制器、数据采集系统及计算机控制系统组成。

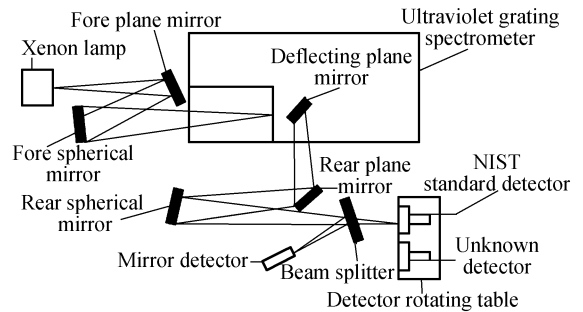


图 1 紫外探测器光谱辐射响应度定标系统

Fig. 1 Spectral radiance responsivity calibration system for ultraviolet detector

前置聚光反射镜将氙灯光源成像于单色仪入射狭缝,光栅双单色仪准直-聚光镜曲率半径为 0.5 m,平面光栅刻线密度 2 400 g/mm,光谱分辨率为 0.05 nm,工作波段为 200~400 nm。后置反射光学系统用于将单色仪的入瞳成像在探测器接收面上,NIST 标准探测器和待测探测器置于探测器转台上。整套系统的电控系统由一个驱动控制卡连接 3 个驱动控制器,控制单色仪光栅扫描机构及探测器转台的二维移动。使用这套系统可进行光谱响应度,量子效率的标定,还可以对探测器光敏面的空间均匀性进行测试。

3 定标原理

3.1 替代法基本原理

紫外探测器辐射定标系统采用替代法,将标

准探测器的已知响应度传递给响应度未知的待测探测器。对于待测探测器,其输出信号 Y_x 可以表示^[2]:

$$Y_x = S_x \cdot X_x, \quad (1)$$

其中, S_x 为待测探测器的未知响应度, X_x 为待测探测器所接收到光辐射。同理,标准探测器的输出信号 Y_s 可以表示为:

$$Y_s = S_s \cdot X_s, \quad (2)$$

S_s 为标准探测器的已知响应度。 X_s 为标准探测器所接收到的光辐射。将以上两式相除得到:

$$\frac{Y_x}{Y_s} = \frac{S_x \cdot X_x}{S_s \cdot X_s}, \quad (3)$$

假设两个探测器接收到的光辐射是一致的(这也正是替代法的理论基础),得到待测探测器的未知光谱响应度为:

$$S_x = \frac{Y_x}{Y_s} \cdot S_s. \quad (4)$$

3.2 监视探测器

式(4)只是在理想情况下运用替代法得到待测探测器响应度的基本表达式。在实际应用中还要考虑很多问题,例如光源信号稳定性,光学系统能量损失等。

为了消除信号波动及其他系统因素的影响,在紫外探测器定标系统中加入了监视探测器。

如图2所示, $\phi_{D,\lambda} = \tau_{bs} \cdot \tau \cdot \phi_\lambda$ 表示待测探测器接收到的光通量, $\phi_{M,\lambda} = \rho_{bs} \cdot \tau \cdot \phi_\lambda$ 表示监视探测器接收到的光通量, τ_{bs} 和 ρ_{bs} 分别表示分束器的透射率和反射率,在测量过程中,分束器及监视探测器相对稳定。因此,通过将监视探测器信号值加入到最终的计算式中,可以消除系统内部一些因素对定标结果的影响。

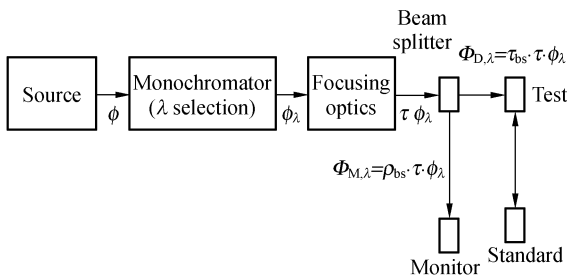


图2 监视探测器原理

Fig. 2 Theory of monitor detector

3.3 定标系统原理

考虑到紫外探测器定标系统内部一些因素对最后测量结果的影响,式(1)表示^[3]:

$$V_x = S_x \cdot \tau_x \cdot \phi_x + V_{d,x}, \quad (5)$$

τ_x 是系统内部光学系统的传递效率, ϕ_x 是光源处发出的光通量, $V_{d,x}$ 是暗电流。在实际测量中,在关闭单色仪出射狭缝的情况下,测量待测探测器信号输出,得到暗电流 $V_{d,x}$ 。因此,完全由于光源辐射产生的信号输出 ΔV_x 可表示为:

$$\Delta V_x = V_x - V_{d,x} = S_x \cdot \tau_x \cdot \phi_x, \quad (6)$$

在加入分束器及监视探测器后,待测探测器和监视探测器的信号输出可表示为:

$$\Delta V_x = V_x - V_{d,x} = S_x \cdot \tau_{bsx} \cdot \tau_x \cdot \phi_x, \quad (7)$$

$$\Delta V_{m,x} = V_{m,x} - V_{d,m,x} = S_{m,x} \cdot \rho_{bsx} \cdot \tau_x \cdot \phi_x, \quad (8)$$

其中, $V_{m,x}$ 为待测探测器进行测量时监视探测器的信号输出, $V_{d,m,x}$ 为待测探测器在进行测量时监视探测器的暗电流。待测探测器与监视探测器信号比率 R_x 为^[4]:

$$R_x = \frac{\Delta V_x}{\Delta V_{m,x}} = \frac{S_x \cdot \tau_{bsx} \cdot \tau_x \cdot \phi_x}{S_{m,x} \cdot \rho_{bsx} \cdot \tau_x \cdot \phi_x}, \quad (9)$$

同理,标准探测器和监视探测器信号比率 R_s 为:

$$R_s = \frac{\Delta V_s}{\Delta V_{m,s}} = \frac{S_s \cdot \tau_{bss} \cdot \tau_s \cdot \phi_s}{S_{m,s} \cdot \rho_{bss} \cdot \tau_s \cdot \phi_s}, \quad (10)$$

(9) 与(10)两式相除得:

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{S_x \cdot \tau_{bsx} \cdot \tau_x \cdot \phi_x}{S_{m,x} \cdot \rho_{bsx} \cdot \tau_x \cdot \phi_x} \cdot \frac{S_{m,s} \cdot \rho_{bss} \cdot \tau_s \cdot \phi_s}{S_s \cdot \tau_{bss} \cdot \tau_s \cdot \phi_s}, \quad (11)$$

从式(11)中可以看出,在用标准探测器对待测探测器进定标的过程中,光源的不稳定性及系统传递不稳定性所带来的问题,已经由于监视探测器的加入而得到解决。在监视探测器及分束器相对稳定的条件下,式(11)可化简为^[5]:

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{S_x}{S_s}, \quad (12)$$

因此,待测探测器的光谱响应度 S_x 可表示为:

$$S_x = \frac{R_x}{R_s} \cdot S_s = \frac{V_x - V_{d,x}}{V_{m,x} - V_{d,m,x}} \cdot \frac{V_s - V_{d,s}}{V_{m,s} - V_{d,m,s}} \cdot S_s, \quad (13)$$

式(13)即为紫外探测器辐射定标系统中标准传递的最终表达式。

4 定标方法及实验数据

4.1 光谱响应度

氙灯光源发出的光经过前置光学系统进入光栅双单色仪,通过计算机控制光栅转动,使不同波段的单色光从单色仪出缝发出,经过后置光学系统后,成像在探测器转台上的接收面上,NIST 标准探测器和待测探测器置于转台上,通过计算机控制探测器转台转动,可使两探测器分别移入光路。首先,将标准探测器移入光路,在单色仪扫描过程中,对标准探测器和监视探测器同时进行数据采集,并采集零点信号,最后将数据存储。然后将待测探测器移入光路,同样进行数据采集,存储数据。将得到的数据代入式(13),求出待测探测器的光谱响应度,完成光谱响应度的标定。以下为实验数据。

图 3 为所测得的紫外硅探测器的响应度曲线图。测量波段为 200~400 nm,峰值位置在 400 nm。

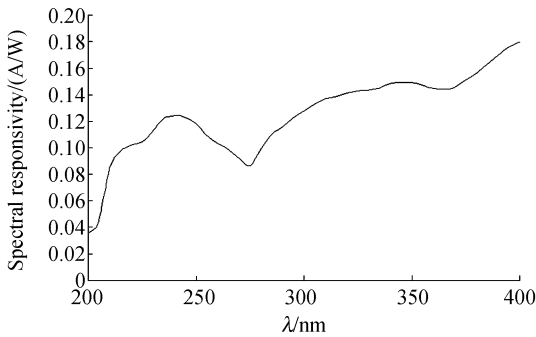


图 3 紫外硅探测器光谱响应度

Fig. 3 Responsivity of ultraviolet silicon detector

4.2 量子效率

对紫外增强型光电倍增管和日盲型紫外光电倍增管的量子效率进行了定标。量子效率是探测器光子转化为电子的效率。由光谱响应度转化为外部量子效率的计算过程如下,外部量子效率 EQE 由下面的公式给出:

$$EQE(\lambda) = \frac{I(\lambda) \cdot h \cdot c}{\phi(\lambda) \cdot n \cdot e \cdot \lambda}, \quad (14)$$

式中, I 为光电流(输出电流减去暗电流), h 为普朗克常数, c 为真空光速。 Φ 为输入辐射通量, n 为空气的折射系数, e 为基本电荷。

$$EQE(\lambda) = 1\,239.85 \cdot \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot \lambda} = 1\,239.85 \cdot \frac{S(\lambda)}{\lambda}, \quad (15)$$

$S(\lambda) = I(\lambda)/\phi(\lambda)$ 为光谱响应度,单位 [$A \cdot W^{-1}$]。根据式(15)可得到标准探测器的量子效率,再运用替代法对紫外增强型光电倍增管和日盲型紫外光电倍增管的量子效率进行定标,定标过程与光谱响应度定标相同。

图 4 为紫外光电倍增管的量子效率曲线,光电倍增管测试电压为 750 V,测量波段为 200~400 nm。峰值位置在 400 nm 处。

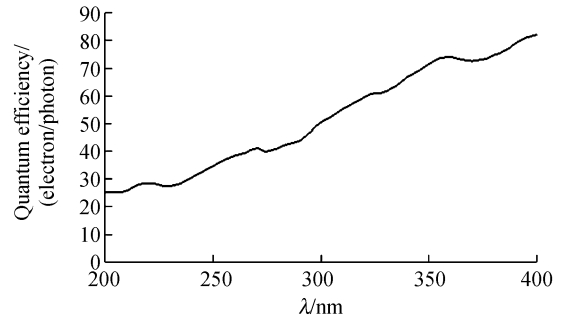


图 4 紫外光电倍增管量子效率曲线

Fig. 4 Quantum efficiency of ultraviolet multiplier phototube

图 5 为日盲型紫外光电倍增管量子效率曲线,光电倍增管测试电压为 1 800 V,测量波段为 200~300 nm,峰值位置在 220 nm 处。

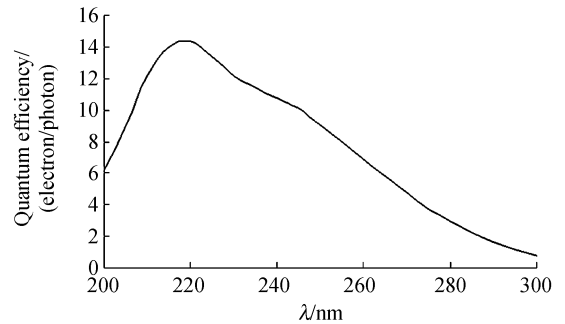


图 5 日盲型光电倍增管量子效率曲线

Fig. 5 Ultraviolet quantum efficiency of solar blind photomultiplier

4.3 空间均匀性

空间均匀性是硅探测器的重要特性,理想的光辐射探测器具有良好的空间响应均匀性,即入射辐射照射在探测器光敏面上的不同位置时,得

到的输出信号相同。但是受光敏面材料和制造工艺的限制,以及落在光敏面上的细小灰尘等的影响,实际上探测器的响应度是空间非均匀性的。光敏面不同区域在相同的入射条件下的响应都会存在差异,而这种差异直接影响到探测器的测量精度。

首先,将待测探测器置于探测器转台上(探测器转台可作二维 X-Y 方向移动。行程为 50 mm,双向重复精度 $<2\ \mu\text{m}$)。在探测器接收面前加入直径为 1 mm 的孔径光阑,移动探测器的位置测量不同坐标点的响应度,测量结果是探测器光敏面响应度均匀性与光斑功率空间分布函数的卷积。卷积具有平滑的作用,所以要选择适当大小的测量光斑,如果扫描光斑太大则不能客观反映实际的空间响应均匀性,如果扫描光斑或间距太小则需要大量的扫描。

扫描波长为 350 nm,光斑直径为 1 mm,扫描区域为 10 mm \times 10 mm,间隔为 1 mm,延迟 5 s。图 6 为所测得的紫外硅探测器的空间均匀性曲面,曲面所呈现的凹凸形状正是由于探测器光敏面非均匀性所造成的。因此,为了提高探测器的测量精度,就要求探测器在使用过程中使光束会聚于光敏面中心。

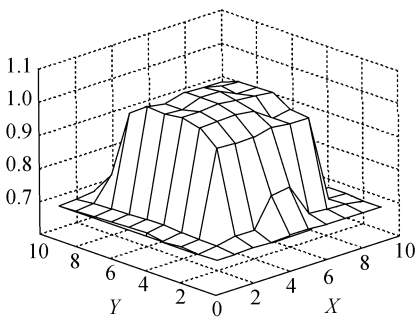


图 6 紫外硅探测器空间均匀性曲面

Fig. 6 Spatial uniformity of ultraviolet silicon detector

5 不确定度分析

依照国际同行的规范对紫外探测器定标过

程中的不确定度进行了分析^[6],通过式(13)可以看出,由于监视探测器的加入,排除了光源稳定性对传递结果的影响。但传递过程中还存在着一些影响最后结果的因素。如表 1 所示。这些因素决定了定标结果的不确定度。

表 1 紫外探测器定标的相关不确定度

Tab. 1 Relative uncertainty of detector calibration

不确定度来源	相对不确定度
单色仪波长重复性	0.5%
标准探测器不确定度	1.2%
监视探测器不确定度	1.5%
数据采集不确定度	0.5%
组合不确定度	2%

(1) 单色仪波长重复性:对单色仪进行波长定标得到波长重复性不确定度为 0.5%。

(2) 标准探测器及监视探测器:NIST 标准紫外探测器及监视探测器自身不确定度由重复性、线性及空间均匀行决定。

(3) 数据采集系统:由 keithley 表稳定性决定。

将上述几个因素代入式(16)中,最后求得定标过程的组合不确定度为 2%。

$$u_c = \left[\left(\frac{u(V_\lambda)}{V_\lambda} \right)^2 + \left(\frac{u(V_s)}{V_s} \right)^2 + \left(\frac{u(V_m)}{V_m} \right)^2 + \left(\frac{u(V_d)}{V_d} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

6 结论

为了达到对紫外探测器进行高精度定标的目的,构建了一套紫外探测器定标系统。在 200~400 nm 紫外波段内,分别对紫外硅探测器的光谱响应度和紫外增强型光电倍增管,日盲型紫外光电倍增管的量子效率进行了定标。并对紫外硅探测器进行了空间均匀性的测量。测试过程的组合不确定度 $<2\%$ 。证明了以标准探测器为基准,运用替代法建立一套高精度紫外探测器定标系统的可能行。对于紫外探测器的应用与研发有着重要意义。

参考文献:

- [1] 王淑荣, 邢进, 李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2):186-190.
WANG SH R, XING J, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):186-190. (in Chinese)
- [2] 曹光宇, 张志伟, 张存林. 光电检测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
CAO G Y, ZHANG ZH W, ZHANG C L. *Technology of Photoelectricity Testing* [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [3] ZALEWSKI E F, GEIST J. Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration[J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19:1214-1216.
- [4] ZALEWSKI E F. *The NBS Photodetector Spectral Response Calibration Transfer Program*, Natl [M]. Bur. Stand. (U. S.), Spec. Publ., 1988.
- [5] JASON M K. Foveation by a pulse-coupled neural network[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, 10(3):621-625.
- [6] 费业泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
FEI Y T. *Theory of Error and Precision and Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



王锐(1982—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事紫外-真空紫外探测器定标的研究。

通讯作者:



宋克非(1967—),女,吉林长春人,研究员,硕士生导师,主要从事紫外-真空紫外遥感仪器方面的研究。E-mail: songkefei@sina.com

● 下期预告

用于纳秒级窄脉冲工作的大功率半导体激光器模块

陈彦超, 赵柏秦, 李伟

(中国科学院 半导体研究所, 北京 100083)

介绍了一种将脉冲半导体激光器发射应用系统中脉冲整形电路、驱动电路、激光器保护电路、激光器集成封装成一个激光器模块的方式。当激光器工作于纳秒级窄脉冲状态下时,激光器封装引脚所产生的电抗会使得耦合进激光器的脉冲波形劣化,导致能量损失。为得到上升时间短,波形半宽窄,峰值功率大的光输出,改进激光器管芯的结构并采用混合光电子集成的方式将驱动电路和激光器管芯封装在一个模块内,使得窄脉冲电信号高效地耦合进半导体管芯。分析验证了改进后的激光器模块的各项输出参数均得到改善。同等条件下,改进后的模块在光脉冲宽度为 4.5 ns 时,峰值功率比单独封装激光器提高 6 倍多。此激光器模块可以得到宽度 7 ns 左右,峰值光功率 176 W 的光脉冲输出。测试了该模块在脉冲宽度为 7 ns 左右的 U-P 曲线。