

FTIR 测量的量子型光电探测器响应光谱校正

张永刚^{1*}, 周立¹, 顾溢¹, 马英杰¹, 陈星佑¹, 邵秀梅², 龚海梅², 方家熊²

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要: 针对采用 FTIR 方法测量量子型光电探测器的光电流谱并据此校正获得器件的实际响应光谱问题, 提出了两种简便可行的校正方案, 即计算仪器函数校正方案和标准探测器传递校正方案; 对其可行性、限制因素及注意事项进行了详细讨论. 用两种方案对多种短波红外 InGaAs 光电探测器进行了测量校正, 获得了与实际符合的响应光谱. 为验证方案的适用性, 还与采用经精确标定的光栅分光测量系统测得的结果进行了比对, 确认了其适用性. 结果表明, 采用 FTIR 测量方法并结合适当的校正方案可以获得符合实际的响应光谱.

关键词: 响应光谱; 校正; 光电探测器; 量子型; 傅里叶变换红外

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A

Correction of response spectra of quantum type photodetectors measured by FTIR

ZHANG Yong-Gang^{1*}, ZHOU Li¹, GU Yi¹, MA Ying-Jie¹, CHEN Xing-You¹,
SHAO Xiu-Mei², GONG Hai-Mei², FANG Jia-Xiong²

(1. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: To get actual response spectra of quantum type photodetectors from measured photo-current spectra using FTIR method, two feasible and convenient correction schemes of calculated instrument function scheme and standard detector transfer scheme are proposed. The feasibility, limitations and matters which need attention are discussed in detail. Based on those schemes, consistent response spectra of various shortwave infrared InGaAs photodetectors have been gained. A comparison has been made to the response spectrum measured using a precisely calibrated grating monochromator system and the validity of the schemes is confirmed.

Key words: response spectra, correction, photodetectors, quantum type, Fourier transformed infrared

PACS: 33. 20. Ea, 07. 57. Ty, 85. 60. DW, 85. 60. Gz

引言

光电探测器的响应光谱是器件应用中必须关注的基本特性之一, 也是相关器件研究及生产过程中经常需要测量的参数. 测量一个实际光电探测器的响应光谱可以有多种方法; 传统的方法是采用所谓

分光光谱方案, 即用一个宽谱光源经由光谱分光装置(如光栅光谱仪)分光产生波长连续变化的单色光, 同时测量记录被测光电探测器对不同波长的响应信号. 分光光谱方案较为直观, 但也存在一些问题, 主要表现在: 由于是用分光元件将宽谱光源的总能量“均匀”分配到了各个波长上, 因此各个波长上

收稿日期: 2014-11-24, 修回日期: 2015-09-23

Received date: 2014-11-24, revised date: 2015-09-23

基金项目: 973 (2012CB619200, 2014CB643900), 国家自然科学基金(61275113, 61204133, 61405232, 61334004)

Foundation items: Supported by National Basic Research Program of China (2012CB619200, 2014CB643900), National Natural Science Foundation of China (61275113, 61204133, 61405232, 61334004)

作者简介 (Biography): 张永刚 (1957-), 男, 上海市人, 研究员, 博士, 研究领域为半导体光电子学.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ygzhang@mail.sim.ac.cn

可分到的能量并不高,测量时往往需要用大功率的所谓“高亮度光源”以获得足够的响应信号,功耗大发热严重,稳定性和寿命也较差,使用不方便;考虑到衍射效率和高级次衍射等因素,光栅元件的工作波长范围一般都较窄,需限制在一个倍频程之内,即最长波长不超过最短波长的两倍,测量不同波段的器件需要更换光栅,即使一个光电探测器响应光谱也可能较宽,有时需要换光栅分段测量;再则,分光方案原理上是基于机械扫描顺序测量的,比较耗时;用阵列型器件同时采集光谱的方法显然对光电探测器响应光谱的测量也是不适用的;此外,测量时对环境要求也较高,如需暗室等.采用傅里叶变换红外(FTIR)方法就可在很大程度上克服这些问题.

傅里叶变换红外光谱方法经半个多世纪的发展,在理论和技术方面都日臻成熟,并已成为鉴别固态、气态和液态物质的重要方法之一,其相关的测量仪器及其可选部件也根据这些主流应用得到了充分的发展,主要侧重于中红外($4\ 000\text{--}400\ \text{cm}^{-1}$)波段的吸收类光谱测量,并拓展进入近红外波段.在半导体特别是光电子研究领域,随着材料和器件的工作波长由近红外及可见—紫外波段向中红外波段推进,与分光光谱相比傅里叶变换红外光谱方法的高光通量、宽光谱范围、低等效噪声及快扫描速度等优点使其受到青睐.对于半导体及光电子研究中的吸收类光谱如透射谱、吸收谱、反射谱及光电谱(包括光电流谱、光电导谱及光电容谱等)以及发射类光谱测量而言,半导体样品与常规固态样品形式上相近测量方法上也可以借鉴^[1-2].测量光电探测器的响应光谱实质也就是测量响应光电流(或电压)谱,但直接采用 FTIR 方法测得的光电探测器响应信号谱中由于包含了仪器本身的影响,并不能直接代表器件的实际响应光谱^[3-4],也就是说其形状是失真的,只能用于定性的观察比较,而要由此获得器件的实际响应光谱必须进行一定的校正.由于 FTIR 是基于迈克尔逊干涉仪扫描和快速傅里叶变化的测量方法,与分光光谱有很大区别,因此也涉及分光测量方案中不会碰到的一些问题,分光方案中采用的一些测量标定方法在 FTIR 测量中并不适用^[5]. 本文将从 FTIR 方法的测量原理出发,讨论量子型光电探测器响应光谱的校正方法,并结合对短波红外 In-GaAs 探测器系列的具体测量实例介绍所发展的两种方便易行的校正方案,即通过计算仪器函数校正及通过标准探测器传递校正,并讨论其适应性、限制因素及需注意的问题.

1 测量校正基本原理讨论

测量一个实际光电探测器的响应光谱往往是指测量其相对响应光谱,即探测器对不同波长光的相对响应而非其绝对响应,要获得绝对光谱响应一般尚需用经过功率标定的单色光源(如半导体激光器)测出其响应波长范围内某一波长点上的绝对响应,并认为探测器的响应在线性区,根据其相对响应光谱外推到整个响应波长范围.采用分光方案测量响应光谱时经由整个测量系统(包括宽谱光源、分光元件及其它光路元件等)输出到探测器上的单色光在不同波长上的强度分布需为已知或可以实际测量标定,由此得出整个系统的波长输出分布即所谓仪器函数.此仪器函数由于主要受光源即灯的影响,因此也常统称其为灯谱(严格说灯谱中尚不包括系统中仪器及光学元件的影响).注意到这里灯谱可由实际测量获得或由产品生产者提供,因此此种方法称为“标准光源测量法”或“标准光源传递方案”,在所用仪器系统一致的情况下可通过所用光源进行响应光谱测量标准的传递.测得的光电探测器响应信号谱与此灯谱进行参比(Ratio)运算就能得出被测光电探测器的实际响应光谱.采用此方案时如有一只光谱响应与波长无关的宽谱探测器,例如输出信号只与所接收光功率成比例的热辐射型探测器,原则上测量就可以进行.此种方法经多年发展已十分成熟并获得了广泛应用,且已派生出一些原理类似的方案,例如:在有一只已知响应光谱且其响应谱宽大于被测光电探测器的所谓“标准探测器”的情况下,通过被测器件响应信号与“标准探测器”响应光谱进行参比也可以获得所需的实际响应光谱,也即通过“标准探测器”进行光谱标准传递^[5].实际上响应与波长无关的热辐射型探测器也就相当于一只已知响应的“标准探测器”.

由于基本原理的不同,以上分光方法中采用的测量和校正方案直接用于 FTIR 方法会遇到一些问题,主要表现在:FTIR 方法中光电探测器上接收到的光信号既非直流信号也非固定调制频率的信号(如分光方案中采用调制锁相测量时的固定斩波频率信号),而是按傅里叶频率 f_v 调制的信号,与动镜扫描速度 v 和测量的波数 ν 成正比(与波长 λ 成反比),即 $f_v = 2\nu v = 2\nu/\lambda$.由此可见,用热辐射型探测器(例如 FTIR 光谱仪自带的宽谱 DTGS 探测器)来测量 FTIR 光谱仪的仪器函数是有困难的,这是因为:傅里叶频率的变化范围较大,例如,固定扫描速

度下在 $1\ 000 \sim 10\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 范围测量,傅里叶频率就要相差十倍,变换扫描速度后范围会更大,而光谱响应平坦的热辐射型探测器一般为“低速”探测器,响应速度慢,在涉及的傅里叶频率范围内其响应信号大小往往是与波数相关的,也就是其响应虽然对光波长平坦但对光调制频率是不平坦的,这样也就无法直接将其作为“响应平坦”的探测器使用,而再对其按频率响应进行标定不仅麻烦,也不现实,因此采用器件原始响应谱图除以“背景谱图”进行校正的方法^[3-4]将可能引入较大误差.对采用 FTIR 测量光吸收谱而言,这个问题会由于信号与背景的参比运算而抵消因而并不显现;对被测的量子型光电探测器而言,相对而言其响应速度一般要远高于热辐射型探测器,也即傅里叶频率对其而言只是“低频”,因此可以认为其响应不受调制频率的影响.对分光测量而言由于探测器接收到的是直流信号或固定调制频率的信号(一般也限制在较低的调制频率),因此频响问题也不会造成影响.采用 FTIR 方法后碰到的另一个问题是测量数据转换.分光方案中采用衍射光栅分光时,在不太宽的波长范围内衍射角与波长间有很好的线性关系,因而过程中光都是按波长计量的.受先入为主和约定俗成的影响,应用中很多类型的光谱包括光电探测器的响应光谱也都是按波长计量的.FTIR 方法中由于是采用干涉仪产生干涉图并对其进行傅里叶变换,测量及变换过程中光都是按波数 ν 计量的,因此为获得按波长计量的响应光谱还必须对测得的数据进行一定的转换.此外,量子型光电探测器的响应光谱一般是指其电流响应度 R_i 的相对光谱(也有用电压响应度 R_v 的,二者间有对应关系),也即单位输入光功率下器件的响应电流按波长的相对分布,而响应电流即单位时间接收的光子(光量子)所产生的电子对应的电荷,而光子的能量是与波长相关的,因此数据转换也还涉及功率、能量等参数和电子数、光子数等参数间在波数分布或波长分布上的转换.注意到一些新版本的光谱仪控制和数据采集软件上对此已有一定设置,但从原理上了解这些问题也是有必要的.

2 FTIR 测量与校正实例

2.1 计算仪器函数校正

鉴于前述实测仪器函数的困难,采用计算的方法近似得出 FTIR 光谱仪的仪器函数并用其进行光电探测器的响应光谱校正是一种简便可行的方案.FTIR 光谱仪中最常用的宽谱光源是所谓炽棒灯或

硅碳棒,Global 或 EverGlo 等为其商品名,其辐射体为碳化硅棒状材料,采用电阻丝加热硅碳棒来产生红外辐射,FTIR 光谱术语中直接称其为 IR 光源.与直接由电阻丝产生辐射相比,经由硅碳棒辐射可以有更高的辐射效率,适用于中红外并扩展到近红外.由于 Global 没有外壳或窗口等的影响,此种热光源的辐射能量就基本上按黑体辐射分布了.FTIR 光谱仪中 IR 光源对应的温度一般约在 1200°C 左右,因此可以采用 $1500\ \text{K}$ 的黑体辐射较好地模拟其输出光谱.考虑到 Global 本身有一定温度分布,采用 $1500\ \text{K}$ 的单一温度对其进行模拟只是一个近似,会有一定误差.

FTIR 光谱仪中由于均采用反射光学元件如平面镜和曲面镜,其反射特性在很宽的范围内可认为与波长无关,因此除光源外另一对仪器函数造成影响的元件就是分束器.由此可见,采用黑体辐射模拟并考虑到所用分束器的效率就可以近似得出 FTIR 光谱仪的仪器函数.

按波数分布的黑体辐射功率为:

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \times \frac{1}{e^{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)} - 1} \quad (1)$$

由此得出的 $1\ 500\ \text{K}$ 黑体按波数分布的归一化辐射功率如图 1 所示,其中也给出了此波段上常用 CaF_2 分束器的相对效率^[6],以及二者相乘得出的在 IR 光源和 CaF_2 分束器组合下的归一化仪器函数 $F_i(\nu)$. CaF_2 分束器的相对效率是指其在不同波数下作为分束器的实际工作效率相对值,与分束器材料的透射率、反射率以及镀膜等都是直接相关的,但不能用单一参数直接等效,可以直观理解为其输出光(包括数次透射和反射的综合效果)相对于输入光的相对效率.由图可见,按 $1\ 500\ \text{K}$ 黑体模拟计算出的 FTIR 光谱仪中 IR 光源在短波方向上的输出衰减是较快的,所得仪器函数与其变化趋势基本吻合,但分束器的影响不可忽略.注意到此计算所得仪器函数仅由黑体光源温度和分束器效率决定,与具体仪器无关.实际操作中应注意到计算仪器函数在数据起始点和数据间隔上应和实际测量数据保持一致,方可方便地用于校正.

采用气态源分子束外延方法研制了多种不同截止波长的 InGaAs 光电探测器^[7-9].采用 FTIR 方法及计算仪器函数校正方案我们在 IR 光源/ CaF_2 分束器组合下对其进行了测试,所用 FTIR 光谱仪为 Nicolet Magna-860 型.图 2(a)为测得的截止波长约为 $1.7, 2.0, 2.4$ 和 $2.7\ \mu\text{m}$ 的 4 种器件在室温下按

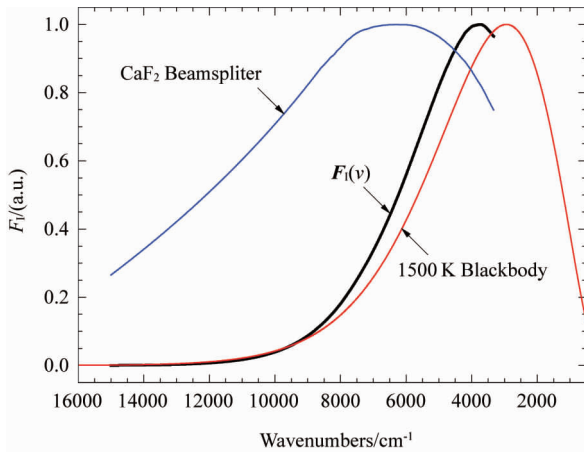


图1 按波数分布的归一化 1 500 K 黑体辐射功率和 CaF_2 分束器相对效率,以及据此计算出的 FTIR 光谱仪在 IR 光源/ CaF_2 分束器组合下的仪器函数 $F_1(\nu)$

Fig. 1 Normalized radiation power of 1 500 K blackbody and relative efficiency of CaF_2 beamsplitter in wavenumber scale, as well as calculated FTIR spectrometer instrument function in IR source/ CaF_2 beamsplitter combination

波数分布的归一化光电流谱(即原始数据 raw data),图 2(b)为经仪器函数 Ratio 校正后的响应光谱(即相对的电流响应度谱),其中测量光路上的水汽吸收影响清晰可见.注意到在此测量中从被测探测器上测得的是光电流信号,计算所得仪器函数或灯谱则反映辐射功率,二者做 Ratio 运算后具有电流响应度的量纲.由图可见原始测量信号光谱宽度较窄且在短波方向上被明显压低,而经由计算灯谱校正后短波方向上的响应相应提高,能真实反映被测器件的响应光谱.

如前所述,传统上光电探测器的响应光谱是按波长分布的,因此按波数分布的响应光谱还需转换成按波长分布用于实际比较和分析,因此光电流和辐射功率等实质性物理量需先转换成按波长分布再进行 Ratio 运算校正.根据光波长和波数间的倒数关系 $\nu = 1/\lambda$ 有, $d\nu = -1/\lambda^2 d\lambda$,光电流和辐射功率形状上转换成按波长的相对分布都只要除以波长平方即可,响应光谱是光电流谱和辐射功率谱相除,在转换过程中因为光电流和辐射功率都要除以波长平方,即该运算被相互抵消,这样形式上将按波数分布的响应光谱转换成按波长分布只要直接将波数换算成波长即可,得出的光谱形状就正确反映了实际器件的特性,但其数据间隔变为不均匀因此不可用于积分运算.图 3(a)示出了将图 2(b)转换成按波长分布后的器件实际响应光谱,在此分布下其形状符

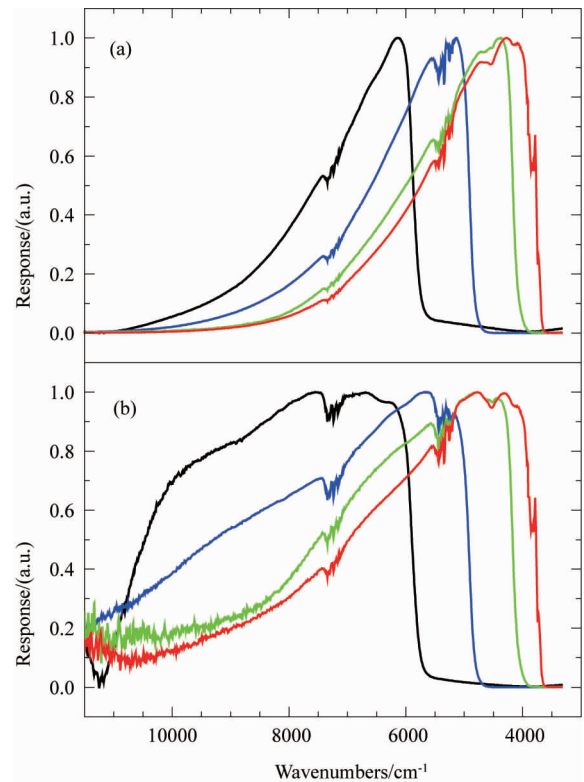


图2 四种不同截止波长的 InGaAs 探测器室温下按波数分布的归一化光谱 (a) 在 IR 光源/ CaF_2 分束器组合下测得的原始光电流谱, (b) 经计算仪器函数 $F_1(\nu)$ 校正后的响应光谱

Fig. 2 Normalized spectra of 4 InGaAs photodetectors with different cut-off wavelength. (a) Original photo current spectra measured using IR source/ CaF_2 beamsplitter combination, (b) Corrected response spectra using calculated instrument function $F_1(\nu)$

合传统方式.为验证计算仪器函数校正方案的适用性,我们还用此方法测量校正了一只 Judson 公司室温下截止波长约为 $2.6 \mu\text{m}$ 的 InGaAs 探测器,并与该只探测器采用经精确系统标定的光栅分光系统测得的结果进行比较,两种不同方案的测量结果如图 3(b)所示.由图 3(b)可见,两种方案的测量结果形状一致性较好,说明计算仪器函数校正方案有很好的适用性,且使用很方便,实际操作时只要一次性预先存好计算仪器函数数据就可随时调用做校正.此方案在长波一侧符合很好,短波一侧有些误差,采用 FTIR 计算灯谱方案的响应稍偏低.注意到计算仪器函数校正方案中是采用单一温度黑体进行近似模拟的.与红外探测器测试中常用的标准黑体源相比,FTIR 光谱仪中的 IR 光源由于发热体较小,工作距离短,出光口又相对较大,因此相当于具有一定温度范围的辐射体而非单一温度黑体,实际 IR 光源有一个温度分布,且主要应是向低温方向延展,被测器件

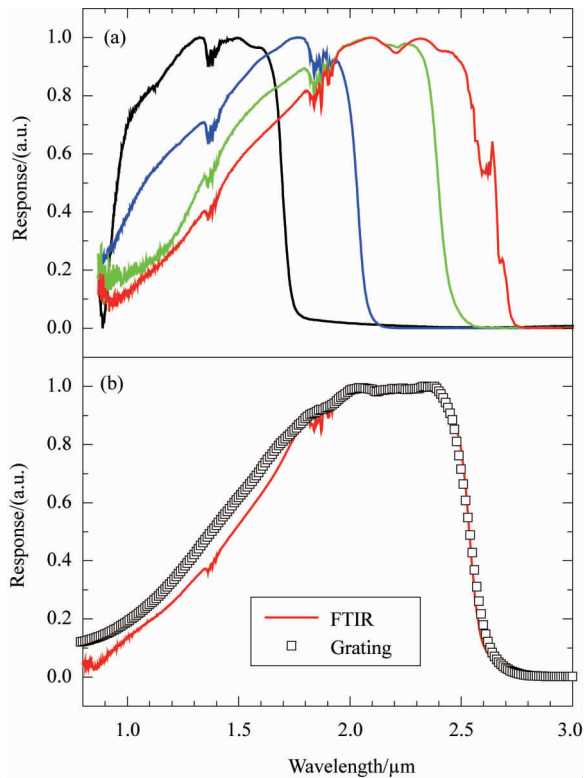


图3 (a) 转换成按波长分布的图2中四种器件响应光谱, (b) 采用 FTIR 测量及计算仪器函数校正的 Judson InGaAs 探测器的响应光谱及与采用经标定的光栅 (Grating) 光谱仪测量结果的比较

Fig. 3 (a) Response spectra at wavelength scale of 4 InGaAs photodetectors as in Fig. 2, (b) FTIR measured and calculated instrument function corrected response spectrum of a Judson InGaAs photodetector and the comparison with the data measured by calibrated grating monochromator system

本身在短波侧响应也较低,这应该是短波侧有一定误差的原因.此外,当采用光栅分光系统测量时如因范围较宽采用分段换光栅测量,则在每一光栅波长范围两侧效率较低处的误差也会较大.同时应看到,对 FTIR 光谱仪中的 IR 光源采用计算仪器函数方案效果较好,但如推广到卤钨灯光源即 FTIR 中的所谓白光 (White) 光源误差会显著增加,这是因为:一方面卤钨灯的工作温度高,稳定性差些,温度分布也会更宽,这给用单一黑体温度模拟带来困难,另一方面灯泡外壳的透过特性也会带进灯谱里难以模拟.

2.2 标准探测器传递校正

采用已知光谱响应且其响应波长范围宽于被测器件的光电探测器作为标准探测器进行校正也是一种简便易行的方案.以 FTIR 光谱仪自带的液氮冷却 InSb 探测器作为标准探测器,采用红外和白光两种光源对前述多种 InGaAs 探测器进行了响应光谱测量校正.首先按 FTIR 光谱仪配置采用 InSb

(77 K) 探测器测得的 IR 和 White 两种光源分别和 CaF_2 分束器组合的输出信号谱 $S_{\text{IR}}(\nu)$ 及 $S_{\text{WH}}(\nu)$, 并将其除以波长平方转换成按波长分布的 $S_{\text{IR}}(\lambda)$ 及 $S_{\text{WH}}(\lambda)$, 如图 4 所示.此次测量中作为标准探测器的 InSb (77 K) 探测器并不附有特定器件响应光谱数据,也无实测数据,由于光电探测器的探测率和响应度在光谱形状上一致,因此就对类似产品的探测率光谱曲线进行数字化后作为此次测量中的标准探测器响应光谱数据 $R_s(\lambda)$. 将 $S_{\text{IR}}(\lambda)$ 及 $S_{\text{WH}}(\lambda)$ 与 $R_s(\lambda)$ 做 Ratio 运算后得到的两种光源分束器组合的仪器函数 $F_{\text{IR}}(\lambda)$ 及 $F_{\text{WH}}(\lambda)$ 也与 $R_s(\lambda)$ 一并示于图 4 中.应指出的是采用量子型光电探测器测得的光源或仪器系统的输出源于光电流 (与信号电压、电荷、电子数乃至光子数等成比例), 而 InSb 探测器的响应光谱源于其电流响应度,因此二者 Ratio 运算后得出的仪器函数形状上恰好能反映仪器输出光功率 (或能量) 的分布,可以直接用于后续光谱校正.注意到在测得的仪器输出中已自然包括了分束器的影响,因此获得仪器函数过程中无需再单独考虑.

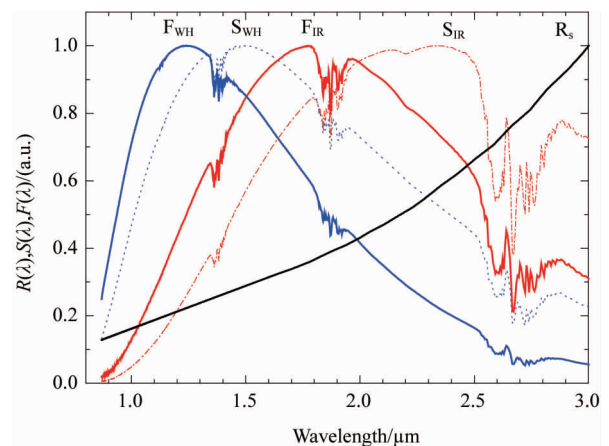


图4 归一化的 InSb (77 K) 标准探测器响应光谱 R_s 、红外和白光光源输出光谱 S_{IR} 和 S_{WH} 以及据此计算的 FTIR 光谱仪采用红外和白光两种光源时的仪器函数 F_{IR} 和 F_{WH} , 均按波长分布

Fig. 4 Normalized response spectrum of standard InSb (77 K) detector, IR and white source output spectra S_{IR} and S_{WH} , as well as calculated FTIR spectrometer instrument function F_{IR} and F_{WH} using IR or White source respectively, all in wavelength scale

采用不同光源/分束器组合测量并校正后的四种 InGaAs 光电探测器 (同图 2) 的响应光谱如图 5 所示,均按波长分布.由图可见,采用两种光源测得的结果光谱形状是基本符合的,有一定差别.图 5

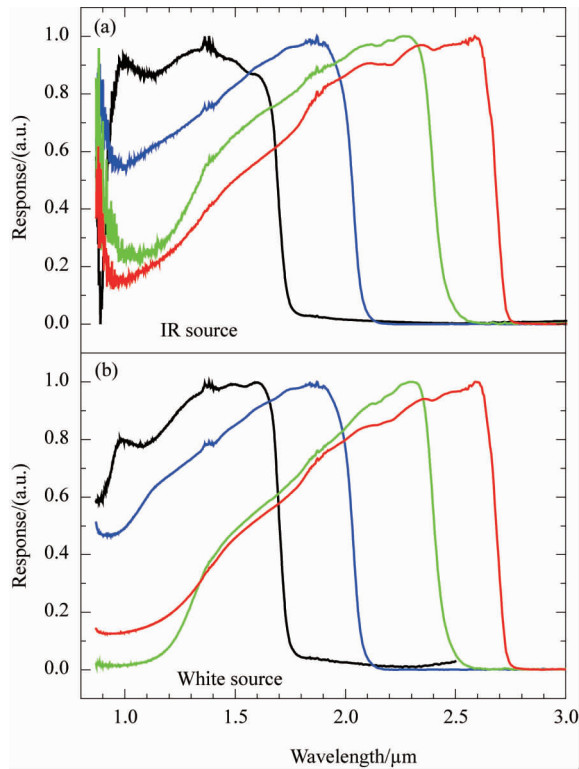


图5 采用不同光源/分束器组合测量并校正后的四种 InGaAs 光电探测器(同图2)的响应光谱,均按波长分布 (a) 红外光源/ CaF_2 分束器组合, (b) 白光光源/ CaF_2 分束器组合, 均按波长分布

Fig. 5 Measured and corrected response spectra of 4 InGaAs photodetectors (the same as in Fig. 2) using different source/beamsplitter combinations (a) IR source/ CaF_2 beamsplitter, (b) White source/ CaF_2 beamsplitter, all in wavelength scale

(a)为在红外光源/ CaF_2 分束器组合下测得的结果,其在短波一侧由于 IR 光源的输出降低很快,因此信噪比变差;图5(b)为采用白光光源/ CaF_2 分束器组合测得的结果,由于白光光源在短波侧输出较高,因此信噪比明显改善;因此实际 FTIR 测量中必须根据被测器件的响应波长范围选取光源/分束器组合才能获得较好效果.采用标准探测器传递校正方案后由于是实测了光源/分束器组合的输出特性,其中也包含了测量光路中水汽吸收的影响,因此最终获得的响应光谱中水汽吸收的影响得到了一定的抑制.为检验标准探测器传递校正方案的适用性,同样也对 Judson 公司室温下截止波长约为 $2.6\mu\text{m}$ 的 InGaAs 探测器采用两种光源/分束器组合进行了测量校正,并与该只探测器采用经精确系统标定的光栅分光系统测得的结果进行比对,两种不同方案的测量结果如图6所示.由图6可见,两种光源/分束器组合的测量校正结果本身差别很小,但 FTIR 和光

栅分光两种方案间还是有一定差别的,特别是在短波一侧.考虑到此次测量中所采用的标准探测器响应光谱数据是近似的,因此采用标准探测器传递校正方案时获得高精度的标准探测器响应光谱数据对减小误差十分重要,是此方案适用的关键.

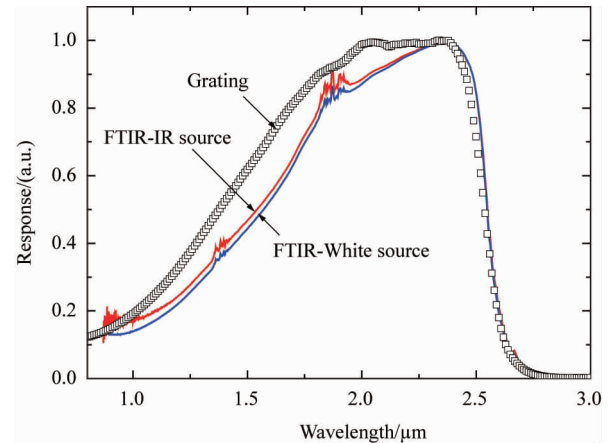


图6 对 Judson InGaAs 探测器采用 FTIR 光谱仪在不同光源下测量及用标准探测器传递校正获得的响应光谱及与用经标定的光栅 (Grating) 光谱仪测量的结果比对

Fig. 6 Response spectra of a Judson InGaAs photodetector measured by FTIR spectrometer using different source and corrected under standard detector transfer scheme, as well as the comparison to the measured result using calibrated grating monochromator system

3 结论

针对采用 FTIR 方法测量量子型光电探测器的光电流谱并据此校正获得器件的实际响应光谱的问题,提出了两种简便可行的校正方案,即计算仪器函数校正方案和标准探测器传递校正方案,并对其可行性、限制因素及注意事项进行了详细讨论.用此两种方案对所研制的多种短波红外 InGaAs 光电探测器进行了测量校正,获得了形状与实际符合较好的响应光谱.为验证两种测量校正方案的适用性,还将测量结果与经精确标定的光栅分光测量系统测得的结果进行了比对,二者基本相符.结果表明采用 FT-IR 测量方法并结合适当的校正方案可以获得符合实际的量子型光电探测器响应光谱.

References

- [1] Zhang Y G, Gu Y, Wang K, *et al.* Fourier transform infrared spectroscopy approach for measurements of photoluminescence and electroluminescence in mid-infrared [J]. *Rev. Sci. Instrum.* 2012, **83**(5):053106.
- [2] Zhang Y G. *Emission spectroscopy in the mid-infrared using FTIR spectrometry*, chapter 26 in the wonder of nanotechnol-

- ogy: *Quantum optoelectronic devices and applications* [M]. Bellingham, WA, SPIE Press, 2013:673.
- [3] YE Zhen-Hua, ZHOU Wen-Hong, HU Wei-Da, *et al.* Spectral study on response of HgCdTe IR two-color detector arrays [J]. *Infrared Millim. Waves* (叶振华,周文洪,胡伟达,等. 碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究, *红外与毫米波学报*) 2009, **28**(1):4-7.
- [4] HE Xiang-Rong, ZHANG Ya-Ni, WANG Yang. Measurement of response spectral characteristics for long wavelength broad-band (6.2-15 μ m) infrared detectors [J]. *Optics & Optoelectronic Technol*(贺向荣,张亚妮,汪洋. 甚长波宽波段(6.4-15 μ m)红外探测器响应光谱特性的测量, *光学与光电技术*)2014, **12**(2):79-82.
- [5] CHEN Yu, HE Xiang-Rong, SHAO Xiu-Mei, *et al.* Measurement system of relative spectral response for SWIR FPA based on LabVIEW [J]. *Optics & Optoelectronic Technol* (陈郁,贺向荣,邵秀梅,等. 基于 LabVIEW 的短波红外焦平面相对响应光谱测试系统, *光学与光电技术*)2013, **11**(6):25-28.
- [6] <http://www.bruker.com/nc/service/support-upgrades/software-downloads/infrared-and-raman-spectroscopy-software-download.html?cid=13999&did=50363&sechash=d949e96a>
- [7] ZHANG Yong-Gang, GU Yi, ZHU Cheng, *et al.* Fabrication of shortwave infrared InGaAs/InP photovoltaic detector series [J]. *Infrared Millim. Waves* (张永刚,顾溢,朱诚,等. 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制, *红外与毫米波学报*) 2006, **25**(1):6-9.
- [8] Zhang Y G, Gu Y, Tian Z B, *et al.* Wavelength extended 2.4 μ m heterojunction InGaAs photodiodes with InAlAs cap and linearly graded buffer layers suitable for both front and back illuminations [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, **51**(2):316-321.
- [9] Zhang Y G, Gu Y, Tian Z B, *et al.* Wavelength extended InGaAs/InAlAs/InP photodetectors using n-on-p configuration optimized for back illumination [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**(1):52-56.