

文章编号:1001-9014(2012)02-0183-05

一种优化的微测热辐射计热学参数性能测试分析方法

刘子骥, 吕坚, 郑兴, 蒋亚东, 王涛

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要:优化的微测热辐射计热学参数的测试方法,与传统测试方法相比,能够实现热导和响应时间的精确测量,克服热学参数评估依赖仿真的缺陷,且该方法易于实现,工程应用性强.通过对研制的微测热辐射计性能进行相应的测试,确定了该测试方法准确、可靠.

关键词:微测热辐射计;测试;热导;热容

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A

An improved test and analyze method for microbolometer thermal performances

LIU Zi-Ji, LV Jian, ZHENG Xing, JIANG Ya-Dong, WANG Tao

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: An improved test method was introduced. Compared with the traditional one, it could be more precision and impersonal. Nevertheless it is easy to implement and anti-influence of fabricated process. Through the test process with the microbolometers fabricated, this test method is reliable and precision.

Key words: microbolometer; test; thermal conductance; thermal capacitance

PACS: 07.57.Kp

引言

国外的非制冷红外探测器在军事、电力、消防、医疗等领域获得了大规模的应用,重要的探测器生产企业都采用了基于微测热辐射计技术.国内的一些热像仪生产企业也开始关注探测器核心技术的国产化进程.微测热辐射计单元的性能决定了由其构成的焦平面阵列的性能.微测热辐射计作为红外热探测的传感器,其微观热学参数的设计和测试是整个探测器性能提高的关键.目前热学参数的获取主要依赖于模拟仿真和精度较低的评估方法,由于各种材料参数的缺失以及工艺的不稳定性,往往导致设计参数与实测参数差距较大,而无法指导工艺过程的参数微调节.因此,认识微测热辐射计微观性能参数,并掌握相关理论,测试方法以及基础材料的工

艺条件都是必不可少的重要环节.

1 测试原理

响应率在微测热辐射计中主要与微桥的结构、热敏材料的温度系数、以及吸收材料的吸收效率有关.而需要控制的噪声是金属与半导体材料的接触噪声、热敏材料的本征噪声、以及封装中需要注意的热噪声和杂散光噪声.

微测热辐射计灵敏度的基本参数特征体现在响应率,它是输出电信号与输入的红外信号之间的比值.通过基础理论分析,微测热辐射计的热平衡方程式为

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G(\Delta T) = \varepsilon P_0 \exp(j\omega t) \quad , \quad (1)$$

其中 ε 是物体表面的比辐射率, P_0 是微测热辐射计

收稿日期:2011-04-06,修回日期:2011-12-12

基金项目:国家自然科学基金(608206021)

Foundation item: Supported by National Natural Science Foundation of China(608206021)

作者简介:刘子骥(1981-),男,重庆人,博士研究生,主要从事非制冷红外焦平面测试技术研究. E-mail: zjliu@uestc.edu.cn.

Received date: 2011-04-06, revised date: 2011-12-12

表面对应的红外辐射强度. 由式(1)求解得到

$$\Delta T = \frac{\varepsilon P_0 \exp(j\omega t)}{G + j\omega C} = \frac{\varepsilon P_0}{G \sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (2)$$

其中 τ 是热响应时间, 其值为 $\tau = C/G$, C 是微测热辐射计的热容, G 是微测热辐射计的热导值. 由此推算出红外探测器的响应率为

$$R_v = \frac{\Delta V}{P_0} = \frac{\Delta T \alpha i_b R}{P_0} = \frac{\varepsilon \alpha i_b R R_{th}}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (3)$$

其中 α 是热敏材料的温度系数, i_b 为加载在微测热辐射计的偏置电流, R 为微测热辐射计的阻值, R_{th} 表示桥腿的热阻, ω 是信号的频率.

半导体材料的温度系数和阻值与材料的本征噪声有着密切的关系, 热敏温度系数越高, 材料的噪声也就越大, 按照经验值, 热敏温度系数会控制在 4% 以内, 而 2% 是其典型值. 在材料的温度系数、阻值、吸收效率一定的情况下, 由式(3)可得到高效的隔热性能是获得高响应率的关键. 响应时间 τ 与探测器的工作帧频有着密切的关系, 所以在探测器设计中热导、热容的设计和测试是至关重要的.

1.1 热导

微测热辐射计示意图如图 1 所示. 由图看出中心桥面比桥腿的面积大很多, 同时作为半导体材料的 SiN 热导率较小, 又能起到支撑的作用, 所以微桥结构的桥腿能够起到高度热绝缘的效果. 为了得到较高的热导, 一般支撑桥腿会尽量做长做薄, 测试也必须在高真空环境下, 通过测量微测热辐射计 $I-V$ 曲线的方法获得. 测试采用恒流偏置, 电流非常微弱, 对于高热绝缘的微测热辐射计, 偏置电流一般小于 $2 \mu A$, 以保证微测热辐射计在测试中不受到损

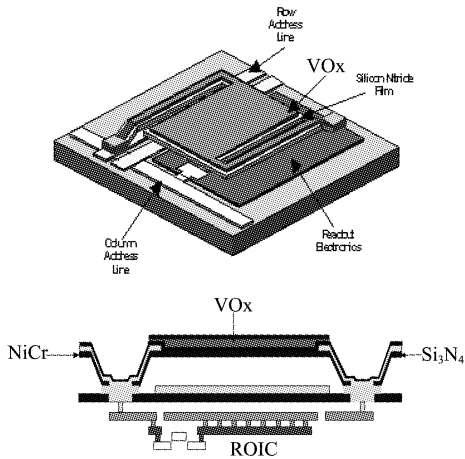


图 1 微测热辐射计微桥及膜层结构示意图
Fig. 1 The mechanical and film structure of microbolometer

坏.

因为测试是在高真空和小电流下进行的, 由自身红外辐射和空气形成的热导可以忽略, 而主要的热导来自于支撑桥腿. 其热平衡方程式为

$$W(t) = \frac{CdT_b}{dt} + G(T_b - T_s), \quad (4)$$

其中 W 是电学功率, C 是热容, G 是热导, T_b 微测热辐射计中心桥面的温度, T_s 为衬底温度.

$$W = G(T_b - T_s) = V \times i, \quad (5)$$

其中, i 是偏置电流, V 是微测热辐射计两端的电压. 由半导体材料阻值与温度关系式

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad (6)$$

可以推导出

$$T_b = \frac{E_a}{k(\ln R_b - \ln R_0)}, \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)得到

$$G = \frac{V \times I}{\frac{E_a}{k(\ln R_b - \ln R_0)} - T_s}, \quad (8)$$

式(8)中 E_a 为导带激活能, R_0 为微测热辐射计在衬底温度时的阻值, 即获得热导值. 由于在红外响应中起关键作用的是有效热导, 所以还要做进一步的分析计算.

在红外辐射情况下, 考虑到偏置电流引入焦耳热导致的微测辐射热计的自热热效应, 同时结合式(1)的原理可推导出

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G(\Delta T) = \frac{d(i^2 R_b)}{dT} \Delta T + \varepsilon P_0 \exp(j\omega t), \quad (9)$$

其中, ε 是比辐射率, P_0 是微测热辐射计表面对应的红外辐射强度. 由式(9)可得到

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G_e(\Delta T) = \varepsilon P_0 \exp(j\omega t), \quad (10)$$

其中, G_e 称为器件的有效热导. 热敏温度系数 α 的定义为

$$\alpha = \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{dT}, \quad (11)$$

由式(9)、式(10)及式(11)可推导出

$$G_e = G - i^2 \alpha R_b, \quad (12)$$

式(12)中偏置电流 i 、热敏温度系数 α 、阻值(可得到微测辐射热计的热导值) R_b 都是已知, 热导 G 也可通过式(5)推导得到, 即可得到有效热导值 G_e .

1.2 响应时间和热容

热容目前还没有直接的手段能够测试, 目前基

本都是通过分析膜层材料的比热和体积累加计算得到,这种方法对于工艺稳定性的要求比较高,而且材料的微观特性难以深入了解,会出现工作量大,估计值与实际值误差偏大的情况。

本文采用测试电学参数的方法测试响应电压,从而推导出响应时间和热容由式(3)可以看出响应电压与频率的关系为

$$R_v \propto \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (13)$$

通过不同调制频率下的响应电压数据,可推导出

$$\frac{R_v^2(\omega_1)}{R_v^2(\omega_2)} = \frac{V^2(\omega_1)}{V^2(\omega_2)} = \frac{1 + (\omega_2\tau)^2}{1 + (\omega_1\tau)^2}, \quad (14)$$

变换化简可得

$$\tau = \sqrt{\frac{\omega_2^2 R_v^2(\omega_2) - \omega_1^2 R_v^2(\omega_1)}{R_v^2(\omega_1) - R_v^2(\omega_2)}}, \quad (15)$$

由式(15)可推导出较准确的有效热响应时间值,有效热导已通过式(12)计算获得,由热容、热导和响应时间关系式 $C = G \cdot \tau$, 计算得到有效热容 C 的值。

2 测试方法

作者采用本文的方法对实验室制作的 320×240 氧化钒非制冷红外焦平面陪片上的微测热辐射计进行了测试和分析。微测热辐射计 SEM 照片如图 2 所示。像元中心距尺寸 $35 \times 35 \mu\text{m}$, 桥腿宽度约为 $1 \mu\text{m}$, 桥面厚度约为 $1.59 \mu\text{m}$ 。

测试前需要将制作完成后的晶圆划片后释放牺牲层,并将微测热辐射计的两端引脚键合并安装到杜瓦中,然后对微测热辐射计的热敏温度系数 α 进行测试,该测试在高精度小体积温箱中进行,温箱控制精度可达到 0.01 K , 温度恒定度可达到 0.05 K 。微测热辐射计热敏温度系数如表 1 所示,经过统计可以得到热敏温度系数平均值为 2.029% 。

然后试验进入热导测试阶段,测试杜瓦的真空

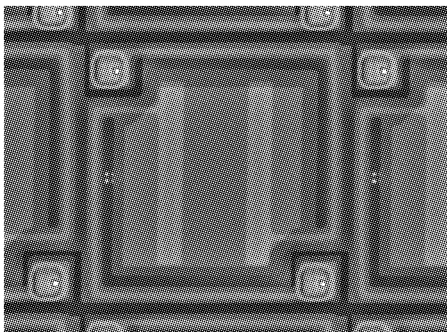


图 2 微测热辐射计 SEM 图
Fig. 2 The SEM photograph of microbolometer

度控制在 0.1 mTorr 以下,所以在测试中需要分子泵机组对杜瓦内部抽气,前端杜瓦红外窗口用盲板盲上,以最大程度降低外界红外杂散光对内部微测热辐射计的影响。

表 1 微测热辐射计热敏温度系数测试值
Table 1 TCR test result of microbolometer

| 温度/℃ | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 阻值/kΩ | 166.42 | 152.94 | 140.41 | 128.65 | 117.28 | 106.82 |
| 温度系数 | -0.01763 | -0.01785 | -0.01828 | -0.01939 | -0.01958 | -0.01838 |
| 温度/℃ | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| 阻值/kΩ | 97.83 | 88.58 | 80.21 | 72.43 | 64.72 | 57.52 |
| 温度系数 | -0.02089 | -0.02087 | -0.02148 | -0.02383 | -0.02503 | |

表 2 微测热辐射计 $I-V$ 测试参数表

| 偏置电流/ μA | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 阻值/kΩ | 133.09 | 133.07 | 132.97 | 132.81 | 132.58 |
| 热导/(W/K) | 4.49283E-08 | 3.59318E-08 | 5.04532E-08 | 6.22462E-08 | 5.8664E-08 |
| 有效热导/(W/K) | 4.4935E-08 | 3.59588E-08 | 5.05139E-08 | 6.2354E-08 | 5.88321E-08 |
| 偏置电流/ μA | 0.3 | 0.35 | 0.4 | 0.45 | 0.5 |
| 阻值/kΩ | 132.2 | 131.73 | 131.01 | 130.07 | 129.25 |
| 热导/(W/K) | 6.79089E-08 | 5.9909E-08 | 5.92816E-08 | 8.47782E-08 | |
| 有效热导/(W/K) | 6.81503E-08 | 6.02364E-08 | 5.9707E-08 | 8.53127E-08 | |

$I-V$ 测试示意图如图 3 所示,实验采用 Keithley 4200 进行电流扫描。为了不损伤到微桥,偏置电流扫描范围 $0.05 \sim 0.5 \mu\text{A}$, 微测热辐射计的阻值在常温 (20°C) 下约为 $130 \text{ k}\Omega$ 。测试数据如表 2 所示,通过对测试数据进行计算分析,得到该微测热辐射计平均有效热导值为 $5.84445\text{E-}8 \text{ W/K}$ 。根据测试数据描绘的 $I-V$ 和 $I-R$ 测试曲线见图 4 和图 5。

通过对热导值和有效热导值进行比较,发现偏置电流越小,其引入的热导误差也越小,总热导也越接近有效热导。在 $0.1 \mu\text{A}$ 偏置时,其差值只为有效热导值的万分之五,基本可以忽略,随着偏置电流的增加,如果不对有效热导进行分析,引入的误差将大大增加。

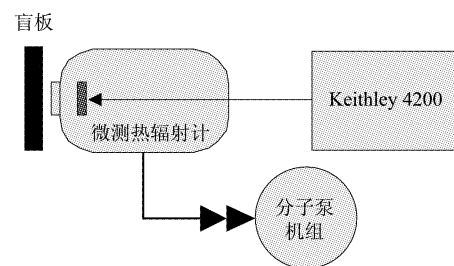


图 3 微测热辐射计 $I-V$ 测试示意图
Fig. 3 $I-V$ measurement setup for microbolometer

响应率测试示意图如图 6 所示,测试中将黑体温度调至 400℃,光窗口径 5 mm,光窗材料为硫化锌,波长 8 ~ 14 μm 透过率 80%. 使用 Keithley 低噪声恒流偏置源,微测热辐射计响应斩波器调制后的红外信号,并通过电压前方(SR560)放大,进入锁相放大器,锁相放大器(SR850)的解调相干频率由斩波控制器输入. 为了减小衬底的温漂对测试结果的影响,本测试还将芯片固定在热电制冷器上,温度恒定在 30℃,温度漂移可通过高效 PID 网络电路控制在 0.01℃ 以内. 在响应测试中微测热辐射计偏置电流为 0.1 μA,调整斩波频率,计算机实时读取锁相放大器的响应信号,测试数据如表 3 所示. 通过计算该微测热辐射计响应时间 τ 约为 20.117 ms,由此可推出热容为 1.175E-9J/K. 图 7 为斩波频率与响应电压关系示意图.

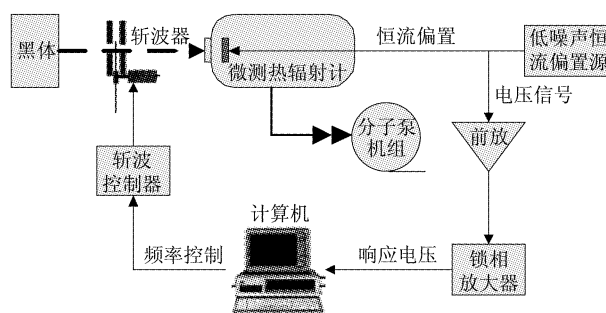


图 6 微测热辐射计响应率测试示意图
Fig. 6 Response voltage measurement setup for microbolometer

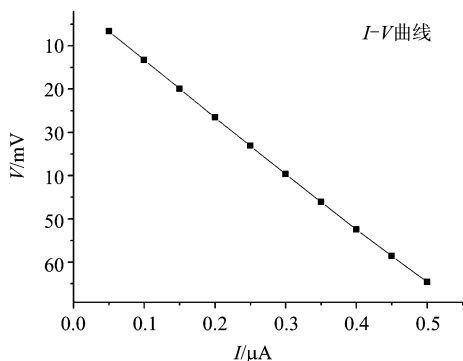


图 4 微测热辐射计 I-V 测试曲线
Fig. 4 I-V curve of microbolometer

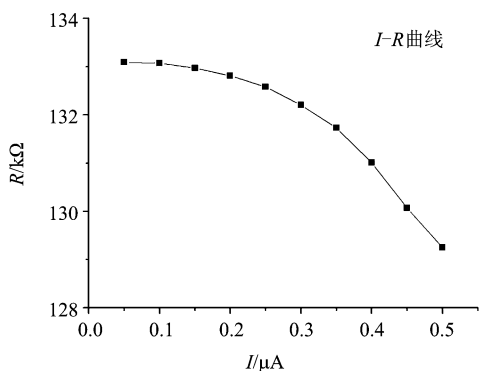


图 5 微测热辐射计 I-R 测试曲线图
Fig. 5 I-R curve of microbolometer

表 3 微测热辐射计斩波测试参数表
Table 3 Chopping test result of microbolometer

| 斩波频率/Hz | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 响应电压/μV | 368.8 | 269.9 | 202.4 | 159.7 | 130.7 |
| 响应时间/s | 0.020296 | 0.020441 | 0.019947 | 0.021194 | 0.022232 |
| 斩波频率/Hz | 30 | 50 | 100 | 200 | |
| 响应电压/μV | 110.2 | 67.3 | 34.1 | 17.1 | |
| 响应时间/s | 0.022137 | 0.016724 | 0.017967 | | |

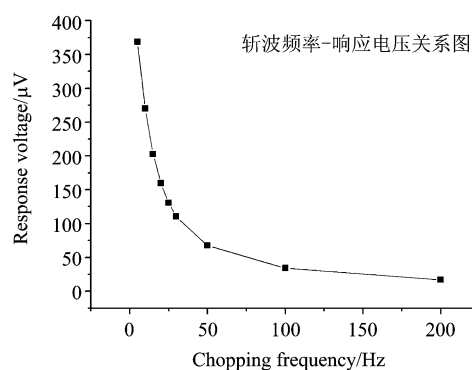


图 7 偏置为 0.1 μA 时响应电压的测试结果
Fig. 7 Chopping frequency-response voltage curve of microbolometer at 0.1 μA bias current

设计中,热容值通过如下公式得到

$$C = A_d(\rho_1 c_1 d_1 + \rho_2 c_2 d_2 + \dots) \quad (16)$$

式(16)中 A_d 代表探测器有效面积, d 代表膜层厚度约为 1.6 μm, ρc 设计值为 0.783 J/Kcm³, 探测器有效面积为 33.5 μm × 33.5 μm 计算得到热容设计值为 1.39E-9J/K, 测试值与设计值之间的误差为 15%, 在可接受范围内.

3 测试方法的评估与优化

该测试方法是在探测器制作过程中结合传统测试理论对探测器性能评估中探索出的一套较为行之有效的办法,同时本论文还分析了热导测试中可能引入的误差,分析了有效热导和总热导之间的对应关系,提出了规避该测试误差的改良方案. 该测试方法及理论可以用于指导探测器的设计,特别是探测器的结构及膜层在光热学方面的设计. 同时,有效的测试微测辐射热计的热学性能,能够为读出电路提供更为全面的设计,所以该测试理论及方法在基于微测热辐射计非制冷红外焦平面探测器的设计中具有较为重要的指导意义. 已经成功研制出了 320 × 240 基于氧化钒微测热辐射计的非制冷红外焦平

面探测器,图 8 是其成像图片.

该测试方法测试理论的数学推导较多,容易产生一定的误差,示例中测试值与设计值之间就出现了约 15% 的误差,该误差经过分析,主要来源于式(6)的数学模型. 同时在实际的斩波测试中,由于反射层与桥面之间形成了微型电容,系统的寄生电容可能对电学测试方法得到的测试值产生影响. 总而言之,微观热学参数测试还需要从微观数学模型中找到误差所在,进行完善,使得测试值更接近客观的实际参数.

4 结论

介绍了一种微测辐射热计热学参数的测试方法



图 8 320 × 240 非制冷红外探测器成像图片
Fig. 8 IR image by 320 × 240 uncooled IRFPA

及理论,建立了一套相对准确的计算模型,同时验证了该方法及数学模型的有效性. 该方法能够满足非制冷红外探测器的研制,在测试中能够得到相对准确的微测热辐射计热学电学参数,可以用于指导基于微测热辐射计的非制冷红外焦平面研制.

REFERENCES

- [1] Ahmed A H Z, Tait R N. Characterization of amorphous $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$ for micromachined uncooled bolometer applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(8): 5326 - 5332.
- [2] Almasri M, Bai Xu, Castracane J. Amorphous silicon two-color microbolometer for uncooled IR detection[J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2006, **6**(2): 293 - 300.
- [3] Neuzil P, Mei T. Evaluation of thermal parameters of bolometer devices[J]. *Applied Physics Letters*. 2002, **80**(10): 1838 - 1840.
- [4] Qi C, Paradis S, Bui T, et al. Design of dual-band uncooled infrared microbolometer[J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2011, **11**(1): 167 - 175.
- [5] Mang O Y. Measurement of effective absorptance on microbolometers [J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE*, 2006, **55**(3): 1012 - 1016.
- [6] Zerov V Y, Malyarov V G, Khrebtov I A. Computational modelling of the main characteristics of an uncooled linear microbolometer array[J]. *Journal of Optical Technology*, 2004, **71**(3): 153 - 157.
- [7] Li G, Yuan N Y, Li J H, et al. Thermal simulation of micromachined bridge and self-heating for uncooled VO_2 infrared microbolometer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, **126**(2): 430 - 435.
- [8] Yang C H, Hua H, Tan W. Loss spectrum measurement for infrared hollow fiber based on the Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(13): 2504 - 2509.
- [9] Peng Y, Wu P Y, A two dimensional infrared correlation spectroscopic study on the structure changes of PVDF during the melting process [J]. *Polymer*, 2004, **45**(15): 5295 - 5299.
- [10] WENG Shi-Fu. *Fourier transform infrared spectrometer* [M]. Beijing: Chemical Industry Press(翁诗甫.傅立叶变换红外光谱仪.北京:化学工业出版社), 2005: 240 - 246.
- [11] LIN Fen-Fang, CHEN Zhu-Lu, WANG Ke, et al. Determination of nitrogen in rice leaf based on FTIR spectra and siPLS-GA-PLS algorithm [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (林芬芳,陈祝炉,王珂,等.基于傅立叶变换红外光谱和 siPLS-GA-PLS 的水稻叶片氮素含量预测研究.红外与毫米波学报), 2009, **28**(4): 277 - 280.
- [12] George R, Harrington J A. Infrared transmissive hollow plastic waveguides with inner Ag-AgI coatings[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(30): 6449 - 6455.
- [2] XIA Qing, ZUO Hong-Fu, XU Juan. Remote sensing of aircraft engine exhausts using FTIR-emission-spectroscopy [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* (夏卿,左洪福,许娟. FTIR 发射光谱遥测飞机发动机排放指数.航空学报), 2009, **30**(5): 837 - 841.
- [3] Oppenheimer C, Francis P, Burton M, et al. Remote measurement of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Appl. Phy. B*, 1998, **67**(4): 505 - 515.
- [4] JIN Yu-Xi, HUANG Mei-Zhen, SHI Man-Man. Fourier transform spectrometer status and its progress in miniaturization[J]. *Modern Scientific Instruments* (金玉希,黄梅珍,施嫚嫚,傅里叶变换光谱仪现状及其微型化进展.现代科学仪器), 2010, (3): 131 - 137.
- [5] Harrington J A. A review of IR transmitting, hollow waveguides[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2000, **19**(3): 211 - 227.
- [6] Nubling R K, Harrington J A. Hollow waveguide delivery system for high-power, industrial CO_2 lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(3): 372 - 380.
- [7] Shi Y W, Ito K, Ma L, et al. Fabrication of a polymer-coated silver hollow optical fiber with high performance [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(26): 6736 - 6740.

(上接 152 页)