

# 半导体吸收型光纤温度传感器线性度分析

孙 炫<sup>1</sup> 黎 敏<sup>1</sup> 周 聪<sup>1</sup> 李玉林<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 武汉理工大学物理系, 湖北 武汉 430070; <sup>2</sup> 武汉神州光电检测设备有限公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要** 良好的线性度能提高有效测量区域的精度。为提高半导体吸收型光纤温度计的测量精度和范围, 根据光源发射谱应能覆盖半导体的吸收边原理, 利用在常温下发射波长为 850nm 的光源, 着重讨论了半导体吸收谱线和光源辐射光谱的相互关系对温度测量线性度的影响。通过对 GaAs 材料的吸收谱随光子能量变化规律的理论分析, 以及光源输出光强随温度变化的实验数据的分析, 将温度线性测量范围从 20 °C~80 °C 拓宽至 10 °C~90 °C; 从光源的发射光谱特性和选用半导体材料的吸收谱线两个方面着手, 得出提高光源输出功率可相应拓宽温度的线性测量范围的结论, 为半导体吸收型光纤温度传感器的高精度测量提供参考。

**关键词** 光学器件; 线性度; 曲线拟合; 精度

**中图分类号** TN212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0335

## Linearity Analysis of Fiber-Optic Temperature Sensor Based on Semiconductor Optical Absorption

Sun Xuan<sup>1</sup> Li Min<sup>1</sup> Zhou Cong<sup>1</sup> Li Yulin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)  
(<sup>2</sup> Shenzhou Photoelectric Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract** A good linearity of measuring curve can improve the resolution of valid measure-area. The optical absorption edge is 850nm under the temperature of 25°C. The emission spectrum of the light source used with the sensor should overlap on both sides of the optical absorption edge. The displacement of this edge induced by temperature changes modifies the fraction of light that falls into the absorption band, meaning that transmitted intensity will change. From several equations, the reflected light intensity is closely connected with the temperature of detected object. As the temperature climbs up, the ultimate output light intensity falls down nonlinearly. After that, we have proposed the feasibility to broaden the range of measurement from 20 °C~80 °C, as many references discussed, to 10 °C~90 °C. Therein two groups of curve about reflected light intensity induced by temperature through the computation of Matlab, three groups of curve on output intensity according to temperature variations, three groups of curve about detected voltage changes under different incident light intensities are concluded. From above, four valuable conclusions are brought into being.

**Key words** optical devices; linearity; curve fitting; precision

## 1 引 言

目前人们对半导体吸收式光纤温度传感器的研究主要集中在三个方面:一是对温敏半导体材料的研究;二是为了克服环境因素对系统的影响,进行补偿光路的研究;三是产品开发。随着人们对半导体材料认识的不断深入,以及半导体制造和加工工艺水平的不断提高,实验室研制出的温度传感器的精

度和线性度不断提高。M. M. Salour 等<sup>[1]</sup>于 1985 年研制的 GaAs 半导体吸收式光纤温度传感器的测量精度在 0 °C~90 °C 温度范围内达 0.1 °C。国内对半导体吸收型光纤温度传感器的研究起步较晚,兴起于 20 世纪 90 年代后期。尽管已有很多基于 GaAs 和 CdTe 等直接带隙半导体材料的吸收型光纤温度传感探头和系统结构的研究<sup>[2]</sup>,但是与国外

**作者简介:** 孙 炫(1987—),女,主要从事光学器件方面的研究。E-mail: angle870315@gmail.com

**导师简介:** 黎 敏(1970—),女,博士,教授,主要从事光传感方面的研究。E-mail: min.zoe@gmail.com

在该领域的研究水平相比仍有较大差距。例如,上海某研究所于 2004 年研制的半导体光纤温度传感器在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内的实验室精度仅为  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>;天津某研究所于 2007 年研制的单光路半导体吸收式光纤温度传感器的实验室精度在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内为  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>;上海某有限公司研制的温度传感器测试及半导体致冷控温实验仪的测温精度为  $\pm 3\%$ 。

实际测量曲线良好的线性度能够提高测量区域内的分辨率,从而提高温度测量的准确性。本实验中测量的精度达  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。至今,尽管有很多同类课题的研究报道,但尚未见有相关论文针对测量线性度的影响因素进行具体详细的分析。本文从半导体材料和光源的发射光谱两个方面入手,详细分析了两者综合作用对测量线性度的影响,并提出改善方案。

## 2 半导体材料吸收谱对测量的影响

当温度升高时,半导体材料中电子自身能量增大,禁带宽度变窄<sup>[4]</sup>,使价带电子跃迁到导带所需的单个光子能量减小,导致在入射光功率和谱宽一定的条件下,被半导体材料吸收的光子数增多——即半导体材料的吸收系数增大,透射光功率减小<sup>[5]</sup>。因此,检测出半导体材料的透射光功率的变化,就可以实现对所监测环境温度的测量。

不同半导体材料的吸收系数随光子能量变化的曲线各异,为了能高精度地反映被测物体的温度,需考虑半导体材料的选择问题。

首先,在理论计算中将 GaAs 材料的吸收边近似为直线<sup>[6]</sup>。GaAs 材料是直接带隙材料,其吸收系数从  $1.35\text{ eV}$  开始陡然上升,吸收系数谱线如图 1 所示。图 1 中虚线为实际测得的点,实线是用样条插

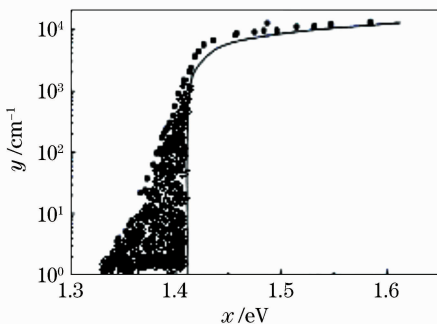


图 1 GaAs 的吸收系数随光子能量的变化图

Fig. 1 Impact curve of photon energy on absorption coefficient

值法计算出的拟合曲线,阴影部分的面积表示理论吸收边和实际吸收边的误差,面积是  $14.3981$ ,占整个面积的  $0.69\%$ ,由于这个误差百分比很小,可以将吸收边近似理解为陡峭的直边代入计算而忽略对输出结果的影响。

GaAs 材料的吸收系数随温度(即光子能量)变化明显<sup>[7]</sup>,从而决定了 GaAs 是理想的温度传感材料。为了进一步仔细探究 GaAs 材料的吸收谱对温度测量的影响,需从探测器的响应对测量线性度的影响,即光电转换信号出发,逆向推导<sup>[8]</sup>,对 GaAs 材料的吸收系数随温度的变化情况进行分析。

图 2 所示为光纤端面与半导体晶片表面上发生的透射与反射示意图。

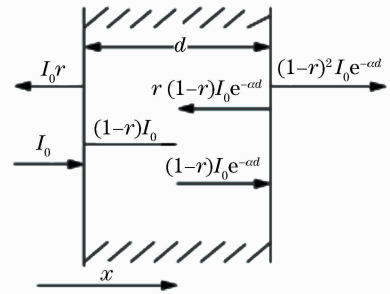


图 2 光纤端面-晶片表面的反射和透射示意图

Fig. 2 Diagram of reflection and refraction

设初始光强为  $I_0$  的光入射到厚度为  $d$ (单位为  $\mu\text{m}$ )的 GaAs 晶片上;GaAs 晶片表面同时存在反射和透射<sup>[8]</sup>。设 GaAs 晶片表面的反射系数为  $r$ ,因散射及其他光损耗与入射光、透射光和反射光能量相比很小,所以可忽略不计,则透射系数为  $(1-r)$ 。根据图 2 可知,半导体第一个面的透射光强为  $(1-r)I_0$ 。考虑吸收损耗,设温度为  $T$  时的介质吸收系数为  $\alpha(T)$ ,定义为光能量减弱到入射能量的  $1/e$  时,光在媒质中传播距离  $\alpha$  的倒数。此比例系数用于表征光强  $I$  在其传播路径上的衰减速率,其大小与光强度无关。设  $\alpha$  在均匀媒介中处处相同,则有

$$I = I_0 \exp[-\alpha(T)d] = \frac{P_0}{\pi r_0^2} \exp[-\alpha(T)d], \quad (1)$$

式中  $P_0$  为入射光功率。到达 GaAs 晶片另一面时的光强为

$$I_1 = (1-r)I_0 \exp[-\alpha(T)d], \quad (2)$$

经过 GaAs 晶片的剩余光强为

$$I_T = I_0(1-r)^2 \exp[-\alpha(T)d], \quad (3)$$

设经过反射镜(反射率为  $R$ )后,再次通过 GaAs 晶片,同上可推导得到最终的出射光强为

$$I_{RT} = \frac{P_0}{\pi r_0^2} (1-r)^4 \exp[-2\alpha(T)d] \times R, \quad (4)$$

则有

$$r = [(n - n_{\text{glass}})/(n + n_{\text{glass}})]^2, \quad (5)$$

式中  $n$  为 GaAs 晶片的折射率,  $n_{\text{glass}}$  为光纤或透镜与半导体晶片接触部位的折射率, 取  $n_{\text{glass}} = 1.5$ 。根据(5)式可知, 反射系数随 GaAs 晶片材料折射率的增大而增大。并且有<sup>[3]</sup>

$$\alpha(T) = \alpha(0)[hf - E_g(T)]^{1/2}, \quad (6)$$

$$E_g(T) = E_g(0) - \beta T^2/(T + 300), \quad (7)$$

取普朗克常量  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , 绝对零度下吸收系数  $\alpha(0) = 2.462 \times 10^4 \text{ cm} \cdot \text{eV}^{[3]}$ ,  $\beta = 5.8 \times 10^{-4} \text{ eV/K}^{[3]}$ ,  $E_g(0) = 1.522 \text{ eV}^{[3]}$ , 则有

$$\alpha(T) = \alpha(0)\{hf - [E_g(0) - \beta T^2/(T + 300)]\}^{1/2}, \quad (8)$$

(8)式表明, 吸收系数与温度和光谱宽度有关。

### 3 光源辐射谱对测量的影响

随温度的升高, 禁带宽度  $E_g$  将逐渐变窄<sup>[9]</sup>。因为  $\lambda_L = hc/E_g$ , 所以  $\lambda_L$  增大。而入射所有光子波长  $\lambda \leq \lambda_L$ , 因此相应的吸收光子的波长红移; 又因入射光子能量  $E \geq E_g$ , 推得所吸收光子的最小能量降低, 从而导致吸收增强, 吸收系数增大。

(8)式中,  $\alpha(0)$ ,  $E_g(0)$ ,  $\beta$  为常数, 温度  $T$  和频率  $f$  是变量<sup>[10]</sup>。在某特定温度  $T$  时,  $f$  是光源发出的频谱, 其取值在 830~930 nm 的范围内变化, 可通过积分计算得到。因此,  $\alpha-T$  曲线非线性单调上升。当温度一定时,  $hf$  的积分随光谱的展宽及输入功率的提高而增大, 吸收系数  $\alpha$  也随之增大, 吸收效果越明显。

在红外波段, 吸收系数随波长的增加而线性减小<sup>[11]</sup>; 根据(6)式, 并结合前面所推得的透射光强随吸收系数的减小而增大的结论, 可得透射光强随波长的增加而增加, 将与温度-光谱效应共同作用, 引起温度测量线性度的起伏。

根据以上讨论, 为了拓宽测温线性区域, 所选光源需同时满足两个条件: 1) 光功率在 3 dB 带宽内需足够高, 以保证光功率-温度输出曲线的线性; 2) 光源的光谱宽度需足够宽, 使得光源光谱完全覆盖所关注的温度(波长)范围。图 3 为所选择的光源超发光二极管(SLED)的输出光谱图。探测器直接检测测量为透射光功率, 故可通过计算极限波长的右边光谱区域如图 3 中阴影部分所示, 得到透射光强的大小。

由以上的理论分析可知, 随着温度的升高, GaAs 的光谱透射率逐渐减小。在高温部分透射率

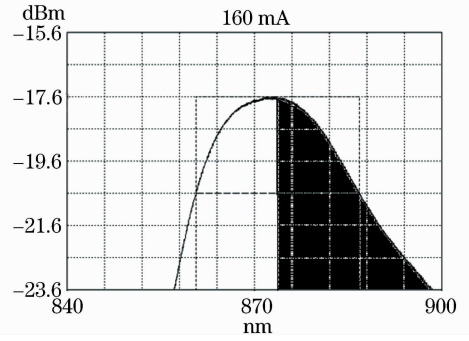


图 3 出射光功率为 7 mW 的 SLED 光源光谱图  
Fig. 3 SLED spectrogram whose output light power is 7 mW

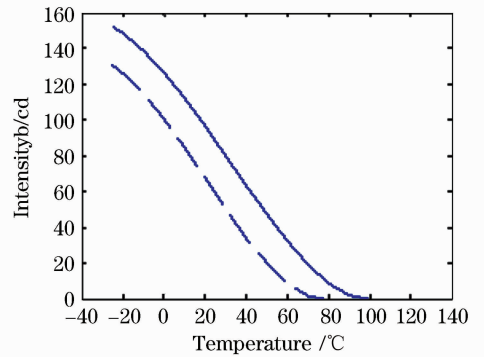


图 4 光强随温度的变化图

Fig. 4 Impact curve of temperature on light intensity 的变化幅度变小, 灵敏度迅速下降。因此, 传感器的测温范围和灵敏度是作为一对矛盾出现的, 需折中考虑。

### 4 理论计算结果与讨论

以 GaAs 片反射式传感探头为模型, 探测器灵敏度  $a = 0.4 \text{ A/W}$ , 转换电阻  $R = 50 \text{ k}\Omega$ , 光纤半径  $r_0 = 1.8 \text{ mm}$ , GaAs 晶片厚度  $d$  取  $0.135 \text{ mm}$ , 反射镜反射率为 99.5%; 并分别令入射光功率  $P_0$  为  $0.4 \text{ mW}$ ,  $0.8 \text{ mW}$  和  $1 \text{ mW}$ , 代入(4)式计算得到最后的透射光强随温度变化曲线如图 4 所示。其中取入射光功率  $hf = 7 \text{ mW}$  代入(8)式和(4)式, 得到以温度为自变量的透射光强公式

$$I_{RT} = 3.98 \times 10^{-4} \times (3 \times 10^{-5} T + 0.8256)^4 \times \exp\left(-4.155 \times 10^{17} \sqrt{7 \times 10^{-3} + \frac{9.28 \times 10^{-23} T^2}{T + 300}}\right), \quad (9)$$

由(9)式显见,  $I_{RT}-T$  曲线非线性单调下降。

使用 Matlab 计算透射光强随温度的变化趋势, 并绘出相应的温度-光强曲线如图 4 所示。其中实线、虚线分别表示当入射光功率分别为  $12 \text{ mW}$  和

7 mW时的曲线。

## 5 实验数据讨论

利用自制的基于 GaAs 材料的反射式探头和信号处理系统,对  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度范围进行测量。调节光源输出功率,分别为 0.4 mW, 0.8 mW 和 1 mW 时,进行 3 组测试。图 6 为不同光源功率所对应的温度测量曲线。

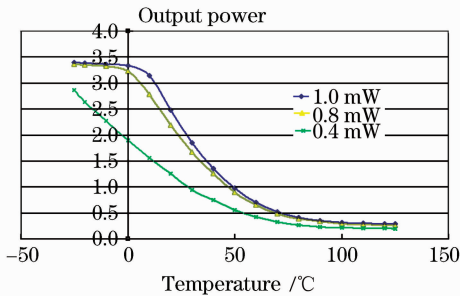


图 5 实验中不同输出电流下的探测器接收光功率值比较  
Fig. 5 Comparison of output light power under different electric currents

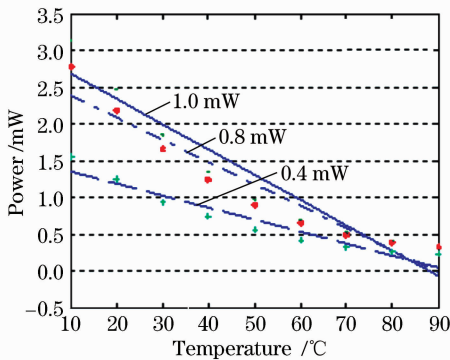


图 6  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  的线性拟合

Fig. 6 Linear fitting of  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

根据理论计算结果和实验测量数据可得到以下结论:

1) 由图 4 知,光源功率为 12 mW 时,线性度较好的区域是  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;透射光强的变化范围是  $0\sim 160\text{ cd}$ ;入射功率为 7 mW 时,线性度较好的区域是  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;透射光强的变化范围是  $0\sim 140\text{ cd}$ 。

2) 由图 5 知,随光源功率的增大,在相同的温度下,透射通过 GaAs 的光功率也会增加,从而提高了高温区的测量灵敏度。

3) 光源输出光功率越大,在  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  的斜率也会增大,这个测量区间的灵敏度随之增大,其线性拟合误差见图 6。

由以上实验数据可得,随入射功率的减小,在  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内的线性误差也随之减小;与此同时曲线斜率减小,灵敏度降低。

4) 比较图 5 和图 6 数据可看出,提高入射光功率,线性区域增大,系统分辨率提高。

## 6 结 论

由半导体吸收式光纤传感头反射结构出发,利用半导体的吸收谱随温度变化的测温原理,从光源的发射光谱特性和选用半导体材料的吸收谱线两个方面着手,实验验证和详细讨论了两者的综合作用对测量线性度的影响,得出通过选择宽谱高功率光源,提高输出光功率,可改良线性的结论。实验对比验证了不同输入光功率的影响。理论分析和实验表明,提高光源功率可将测量线性区域扩展到  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为半导体吸收型光纤温度传感器性能的提高提供参考。

## 参 考 文 献

- 1 M. M. Salour, G. Schoner, M. Kull *et al.*. Semiconductor-platelet fibre-optic temperature sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(4): 135~136
- 2 Tingyun Wang, Chengmu Luo. Fiber-optic semiconductor absorption temperature sensor for electrical power system applications [C]. IMTC 2004—Instrumentation and Measurement Technology Conference Como, Italy. 2004. 2375~2379
- 3 Zhang Ying, Wang Hairong, Jiang Zhuangde. Temperature fiber sensor based on semiconductor IR absorption [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2007, (4): 389~391
- 张英,王海容,蒋庄德. 半导体吸收式光纤温度传感器的研究 [J]. *压电与声光*, 2007, (4): 389~391
- 4 Daniel C H. Infrared Window and Dome Materials [M]. Washington: SPIE Optical Engineering, 1992
- 5 William L W. The Infrared Handbook [M]. New York: Vibrational Spectroscopy, 1978
- 6 T. S. Moss, T. D. F. Hawkins. Infrared absorption in gallium arsenide [J]. *Infrared Physics*, 1961, **1**(2): 111~115
- 7 Shu Xiaoping, Yu Huaizhi, Zhu Nailin *et al.*. The application and infrared optical property of semiconductor [J]. *Rare Metal*, 1997, **11**: 470~474
- 苏小平,余怀之,褚乃林等. 半导体材料的红外光学特性及应用 [J]. *稀有金属*, 1997, **11**: 470~474
- 8 Qiu Guanyuan. Electricity [M]. 4th ed., Beijing: Higher Education Press, 2002
- 邱关源. 电路 [M]. 第四版,北京:高等教育出版社,2002
- 9 Miu Jiading, Xu Wenjuan, Mou Tongsheng. Photoelectronics Technology [M]. Hangzhou: Zhenjiang University Press, 1994
- 缪家鼎,徐文娟,牟同升. 光电技术 [M]. 杭州:浙江大学出版社,1994
- 10 A. A. Wronkowska, A. Wronkowski, A. Bukaluk *et al.*. Characterization of In/Pd and Pd/In/Pd thin films by ellipsometric, XRD and AES methods [J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**: 3367~3371
- 11 Paul Klocek. Scintillating fiber technology and applications [C]. SPIE, 1994, **2286**: 70