

锁相放大技术在大学光谱实验教学中的应用

邓冬梅 邵明珍

(南方科技大学物理系, 广东 深圳 518055)

摘要 目前大学物理实验中的光谱测量实验通常为针对氘灯、钠光灯等强信号的测量。在实际应用中,往往需要测量微弱的光信号。传统测量微弱光信号主要利用电荷耦合器件的长时间积分来实现,然而昂贵的价格使其不能大规模应用于本科实验教学。锁相放大技术是利用互相干方法在嘈杂背景环境中提取微弱信号,在半导体材料光谱测量技术上可以对微弱透射光信号进行探测。结合其相对低廉的价格,有望在本科光谱实验教学方面发挥优势。结合锁相放大技术和光谱测量技术搭建了半导体吸收光谱教学实验平台,向学生介绍基于锁相放大技术的微弱信号光谱测量方法。并利用实验结果分析半导体材料吸收系数随入射光子能量变化的规律,从而得出材料的禁带宽度。

关键词 锁相放大器;微弱信号检测;禁带宽度;光谱;半导体

THE APPLICATION OF LOCK-IN AMPLIFIER IN PHYSICS TEACHING OF COLLEGE SPECTROSCOPY EXPERIMENTS

DENG Dongmei SHAO Mingzhen

(Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055)

Abstract In current undergraduate physics experiment, the spectroscopy measurement mainly focuses on detecting the strong light signals from deuterium arc lamp or sodium-vapor lamp. However, in practice, it often needs to detect very weak light signal. Traditional technique, namely charge-coupled devices, was used to detect very weak light signals by a long-term integration. However, the high cost of this equipment makes it unable to be applied to undergraduate experimental teaching on a large scale. Lock-in amplifier uses a technique known as phase-sensitive detection to single out the component of the signal at a specific reference frequency and phase. It also can be used to collect the weak transmitted light signals in the semiconductor spectroscopy. Combined with its low price, it is expected to play an important role in undergraduate spectroscopy experiments. In the article, we built a semiconductor absorption spectroscopy based on the lock-in technique and spectrometer, and showed how to get weak signals in this setup. By analyzing and fitting the experimental data, we can get intensity of absorption as a function of energy of light, so that we can deduce the band gap of silicon materials.

Key words Lock-in amplifier; detection of weak signals; band gap; spectroscopy; semiconductor

收稿日期: 2022-06-18

基金项目: 广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目(SJZLGC202207)。

通讯作者: 邓冬梅,女,博士,主要从事大学物理实验教学工作,研究方向为半导体材料与器件,dengdm@sustech.edu.cn。

引文格式: 邓冬梅,邵明珍. 锁相放大技术在大学光谱实验教学中的应用[J]. 物理与工程, 2023, 33(3): 76-79, 87.

Cite this article: DENG D M, SHAO M Z. The application of lock-in amplifier in physics teaching of college spectroscopy experiments[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(3): 76-79, 87. (in Chinese)

光谱学的研究距今已有几百年的历史了。最早的研究可追溯到 1666 年,当时的牛顿利用玻璃棱镜将太阳光分解成从红光到紫光的各色光谱。如今,光谱的测量技术被广泛地应用于研究原子、分子等的能级结构、寿命、电子的组态、化学键的性质等多方面的物质结构知识^[1-4]。

在基础和综合物理实验阶段,学生对光谱测量已有一定的了解。但所测的信号大多为光源信号,信号较强、较易获得。在光谱测量技术的实际应用中,往往遇到的信号较为微弱,有些甚至掩埋在背景噪声中,这就需要借助锁相放大技术来实现微弱信号的提取。本文将以硅材料为例,来介绍微弱光信号的测量方法,原因如下:(1)硅材料具有价格低、易获得的特点,较适合实验教学的大量使用。(2)硅的光透射信号十分微弱,如利用学生之前掌握的光源光谱测量法,将无法得到可靠信号。(3)硅材料的研究较为成熟,适合在教学过程中讲解实验原理、分析实验现象、验证实验结果。

1 实验装置与原理

1.1 锁相放大器基本原理

锁相放大器(实物见图 1)内部主要由乘法器、锁相环、移位器、低通滤波器和输出放大器组成^[5],其工作原理图如图 2 所示。其中最核心的部分是相敏检测器(包括乘法器和低通滤波器),通过将待测信号和参考信号做乘法运算,然后再通过低通滤波器实现对待测信号的提取。对于淹没在噪声信号中的微弱待测信号而言,由于来自测试系统本身或者外部环境都是无规则、杂乱无章的,锁相放大技术既能对周期性待测信号提取,又能进一步对其进行放大。从而抑制噪声信号产生的干扰。



图 1 锁相放大器实物图

输入到锁相放大器的待测信号为具有固定频率的周期性信号。以正弦信号为例,可以表示为 $V_{sig} \sin(\omega_{sig}t + \theta_{sig})$, 其中 V_{sig} 、 ω_{sig} 和 θ_{sig} 分别为

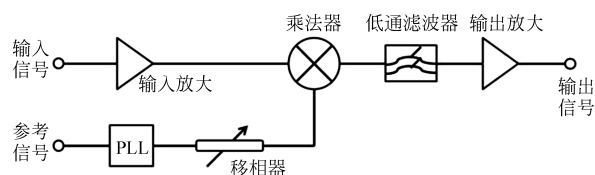


图 2 锁相放大器原理示意图^[5]

信号的幅值、频率和相位。锁相放大器在工作时会产生一个正弦参考信号,可表示为 $V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref})$, 其中 V_L 、 ω_L 和 θ_{ref} 分别为参考信号的幅值、频率和相位。输入信号经过放大后,与参考信号同时进入乘法器。输出的信号可以简单地表示成两个正弦信号的乘积,即

$$\begin{aligned} V_{output} &= V_{sig} V_L \sin(\omega_{sig}t + \theta_{sig}) \sin(\omega_L t + \theta_{ref}) \\ &= \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos([\omega_{sig} - \omega_L]t + \theta_{sig} - \theta_{ref}) - \\ &\quad \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos([\omega_{sig} + \omega_L]t + \theta_{sig} + \theta_{ref}) \end{aligned} \quad (1)$$

从上式可以看出,输出信号为两个交流信号,其中一个频率为两个频率之差,一个频率为两个频率之和。如果在这个乘法器之后加一个滤过交流信号的低通滤波器后,则没有信号输出。但是,如果当 ω_{sig} 与 ω_L 相等时,则频率差的那一项就会变为直流信号。这种情况下,经过低通滤波器后的输出信号则可以表示为

$$V_{output} = \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \quad (2)$$

从式(2)可以看出,输出信号与输入信号的幅值成正比。除此之外,要想得到稳定的直流信号,两个信号的相位差还需要满足不随时间而变。因此在锁相技术中还需要锁相环,其作用是通过反馈技术实现相位的实时同步,从而确保 $\cos(\theta_{sig} - \theta_{ref})$ 一项始终不随时间变化。这样,一路是首先经过放大后的输入信号,一路为与经过锁相环和移相器的参考信号,两路信号相乘后,再经过低通滤波、放大后即可得到与待测信号幅值成正比的直流输出信号。

1.2 光信号的调制

基于锁相放大器的原理,输入锁相放大器的信号需要是具有固定频率的周期信号。那么,在光信号测量方面,是如何提供周期性的参考信号呢? 实验上利用斩波器把连续光源变成固定频率的周期性信号。斩波器是一种电子控制的风扇式

轮叶,在一定转速下,可将连续光调制(斩断)成一定频率的周期性断续光,即把恒定光源改成交变的“方波”光源。这个方波光源照射到测试样品上后所采集到的信号与噪声信号一同输入到锁相放大器中。由于锁相放大器中的锁相环已经预置好与斩波器频率相同的参考频率,这样采集到的信号中,与参考频率(即斩波频率)相同的频率将会通过低通滤波器,其他频率的信号,如噪声信号则会被屏蔽掉。因此,输出信号就是所需要采集的测量信号了。

2 实验设计与操作

2.1 透射光谱测量平台的搭建

图3和图4分别为透射光谱的实验仪器示意图和实物图。实验上采用钨灯光源作为激发光源,其在350~2400nm的光谱范围内有连续稳定的光谱输出。可用于大部分半导体材料光吸收特性的研究。经过准直的光束经斩波器后照射进样品室。通过样品的微弱透射光再经过光谱仪分光后投射到GaAs探测器上。探测器的输出信号经跨导放大器初步放大后,电压信号将输入到锁相放大器的信号输入端(A/I接口),同时将斩波器的转动频率信号输入到锁相放大器的信号参考端(REF IN),这样锁相放大器所给出的就是只与斩波器具有相同频率的光强信号了,因此可以大大抑制背景噪声的影响。最终通过电脑读取实验数据。

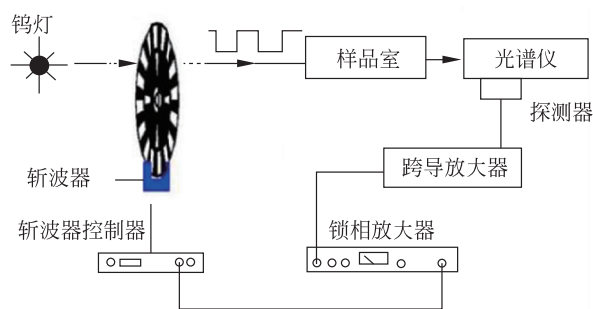


图3 实验仪器连接示意图



图4 透射光谱实验装置图

2.2 实验流程

(1) 将实验仪器按图3所示,依次搭建光路。并将锁相放大器的输出连接电脑;

(2) 准备两片厚度分别为300 μm 和500 μm 的硅片,并将其中一片放置在样品室的样品架上;

(3) 使样品的输出光照射在光谱仪的入射狭缝上;

(4) 观察锁相放大器上的相位、幅值显示,调节光路,使所显示的相位稳定、幅值适当;

(5) 打开电脑上的光谱记录软件,读取光谱数据;

(6) 更换样品,重复上述操作。

3 实验结果与分析

图5是在有、无锁相放大器情况下所得到的透射谱曲线对比图。采用锁相放大器时,信号强度在 10^{-5}V 量级,可以清楚地测量到有效的光强信号。而在无锁相放大器的情况,直接读取探测器的电压信号,信号噪声在 10^{-3}V 量级,远高于 10^{-5}V 的光强信号,无法获取任何光信号。

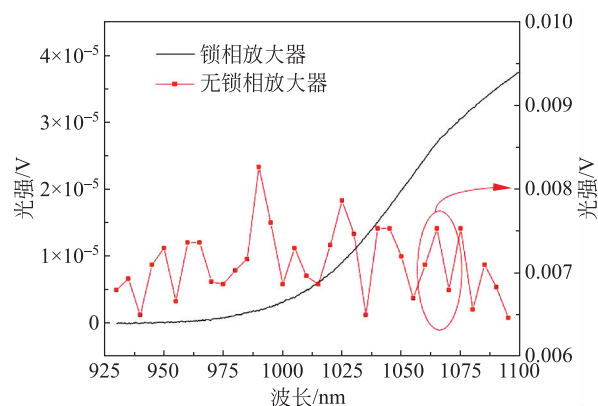


图5 有、无锁相放大器的透射谱线对比图

因此,需采用锁相放大器的光谱测量平台(见图3)来测量微弱的光信号。本实验得到了厚度分别为300 μm 和500 μm 的硅片的透射光谱图。如图6所示,在低于1000nm的波长范围内,透射光的信号微弱,表明大部分光被材料吸收。在1000~1100nm范围内,透射光的强度随着入射光波长的增加而增强,其主要来源于硅材料在禁带附近发生的本征吸收。大于1100nm的光谱范围内,透射光强趋于饱和。

在入射光源强度 I_0 不变的条件下,从材料透

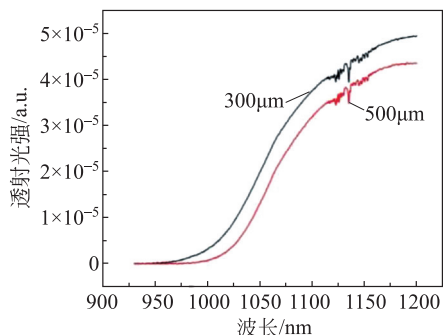


图6 300 μm 和500 μm 厚度硅片的透射光谱图

射的光强 I 随着厚度按照 e 指数衰减。其关系如式(3)所示。

$$I(x) = I_0 \exp(-ax) \quad (3)$$

为了更精确的得到材料的吸收系数,实验上通过比较不同厚度材料的相对吸收强度来得到吸收系数^[6],具体的吸收系数公式如式(4)所示。

$$\alpha = \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{d_2 - d_1} \quad (4)$$

其中, a 为吸收系数, d_1 和 d_2 分别为薄、厚两块硅片的厚度, $d_2 > d_1$ 。 I_1 、 I_2 为通过薄、厚两片硅片后的光强。

将图6光强随波长变化的曲线数据代入公式(4)进行计算,可得出吸收系数随波长变化的曲线,并将波长转化为光子能量,即可得到图7所示的材料吸收系数与入射光子能量之间的关系曲线,其中 $h\nu$ 为光子能量。

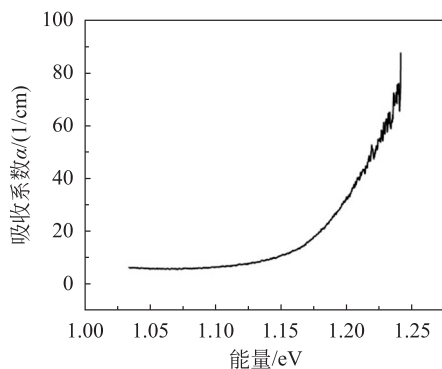


图7 吸收系数随光子能量变化图

由于硅材料为间接带隙半导体材料^[7],查阅文献可知,吸收系数和光子能量满足 $(\alpha \times h\nu)^{1/2} \propto (h\nu - E_g)^{1/2}$ ^[8]。以 $(\alpha \times h\nu)^{1/2}$ 为纵轴, $h\nu$ 为横轴作图(见图8)。取谱线中的直线部分,并延伸至横坐

标轴(如图中灰线所示),横轴截距即为所测硅材料的禁带宽度,即 1.13eV。查阅文献可知室温下硅的禁带宽度约为 1.12eV^[9-11]。本实验得出的禁带宽度与参考值的相对误差为 0.9%。

掌握了基于锁相放大器测量材料微弱光谱信号这项技术后,学生可拓展实验内容,用此系统来测量其他材料的光谱信号,并根据上述实验方法计算禁带宽度。如图9所示,是对新兴二维半导体材料二硫化钨(WS_2)的测量结果,从图中可得出其室温下的能隙约为 1.37eV。查阅文献可知室温下的二硫化钨的禁带宽度约为 1.32eV^[12],测量结果较为准确。

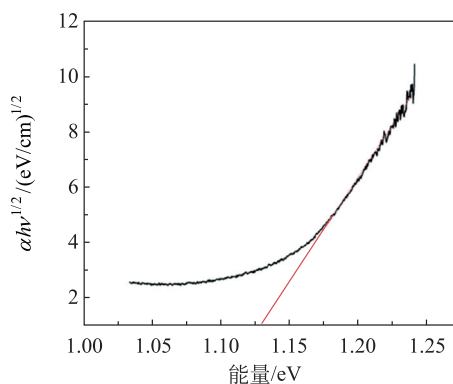


图8 $(\alpha \times h\nu)^{1/2} - h\nu$ 曲线

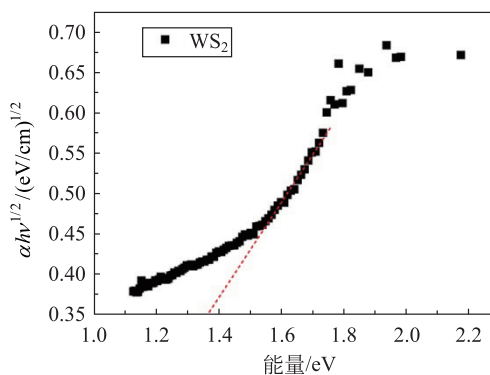


图9 WS_2 半导体的 $(\alpha \times h\nu)^{1/2} - h\nu$ 曲线

4 结语

本实验提出了将锁相放大技术引入大学物理实验教学中,并利用其测量微弱光谱信号。实验中通过对硅材料透射光谱的测量,求得了硅材料吸收系数随光子能量变化的曲线。并由该曲线进

(下转第87页)

出基于 PWM 调制控制的激光图案系统,能够完整地培养学生的电子技术综合设计和应用能力。基于开源系统的 Arduino 单片机实验很适合本科生,结合物理测量和光电技术,开展各种实际应用。

参 考 文 献

- [1] 洪澜,蔡修奋,陈敏. 基于自主设计的电子技术实验教学探索[J]. 实验室科学, 2013, 16(3): 78-81.
HONG L, CAI X F, CHEN M. Exploration and practice in self-designing electronic experiment teaching[J]. Laboratory Science, 2013, 16(3): 78-81. (in Chinese)
- [2] 蔡睿妍. Arduino 的原理及应用[J]. 电子设计工程, 2012, 20(16): 155-7.
CAI R Y. Principle and application of Arduino[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(16): 155-7. (in Chinese)
- [3] 吴汉清. 玩转 Arduino 电子制作[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [4] 陈吕洲. Arduino 程序设计基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.
- [5] 王旭卿. 面向 STEM 教育的创客教育模式研究[J]. 中国电化教育, 2015, (8): 36-41.
WANG X Q. The exploration of maker education oriented to STEM education [J]. China Educational Technology, 2015, (8): 36-41. (in Chinese)
- [6] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] 石义山,崔岩松. Arduino 中 PWM 技术的原理探究与实践[J]. 2019.
SHI Y S, CUI Y S. Principle exploration and practice of PWM based on Arduino[J]. 2019. (in Chinese)
- [8] 林远芳,黄元庆. 一种通过对电机可逆调速获得合成图案的激光投射仪[J]. 电子技术应用, 1999(10): 34-36.
LIN Y F, HUANG Y Q. The utility model relates to a laser projector which obtains a composite pattern by reversibly adjusting the speed of a motor[J]. Application of Electronic Technique, 1999(10): 34-36. (in Chinese)
- [9] 刘景铭. 基于 Arduino 红外控制的智能机械手的设计[J]. 科技风, 2019(12): 7-8.
LIU J M. The design of an intelligent manipulator based on Arduino infrared control[J]. Technology Wind, 2019(12): 7-8. (in Chinese)
- [10] 曹青松,成俊良. 无线式球形机器人控制系统设计[J]. 机床与液压, 2016, 44(17): 12-15.
CAO Q S, CHENG J L. Design of wireless spherical mobile robot control system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(17): 12-15. (in Chinese)
- [11] 梁忠,殷爱蕊. 激光图案自动变幻仪的成像分析[J]. 江西科学, 1997(1): 1-6.
LIANG Z, YIN A H. Analysis of the pattern of the automatic instrument of laser's romantic pattern[J]. Jiangxi Science, 1997(1): 1-6. (in Chinese)

(上接第 79 页)

一步计算得出硅材料的禁带宽度为 1.12eV。此外,还将此方法应用于测量新兴二维半导体材料二硫化钨的禁带宽度,得出其室温下的值为 1.37eV。

参 考 文 献

- [1] FERREIRA S L C, Bezerra M A, Santos A S, et al. TrAC trends in analytical chemistry 100 1 (2018).
- [2] TSUCHIKAWA S, KOBORI H. Journal of Wood Science 61, 213(2015).
- [3] LAGALANTE A F. Applied Spectroscopy Reviews 34, 173 (2004).
- [4] HARDY M, KELLEHER L, de Carvalho Gomes P, et al. Applied Spectroscopy Reviews 57, 177 (2022).
- [5] XU X, SUGANUMA Y, DHIRANI A-A. Journal of Chemical Education 97, 1167 (2020).
- [6] 刘恩科. 半导体物理学(电子工业出版社, 2011).
- [7] LOW J, KREIDER M, PULSIFER D, et al. American Journal of Undergraduate Research 7 (2008).
- [8] KLINGSHIRN C F. Semiconductor Optics (Springer, Berlin, Heidelberg, 2012), Graduate Texts in Physics.
- [9] KARAZHANOV S Z, DAVLETOVA A, ULYASHIN A. Journal of Applied Physics 104, 024501 (2008).
- [10] WU X-K, HUANG W-Q, HUANG Z-M, et al. Chinese Physics B 26, 037302 (2017).
- [11] PHILIPP H R, TAFT E A. Physical Review 120, 37 (1960).
- [12] ZHAO G-D, LIU X, HU T, et al. Physical Review B 103, 014438 (2021).