

## 高灵敏表面光伏谱前置放大器的研制

蔡加法<sup>1</sup>, 刘志鑫<sup>2</sup>, 陈主荣<sup>1</sup>, 吴正云<sup>1</sup>

(1. 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学海洋系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 表面光伏技术可测量半导体材料的少数载流子的扩散长度、表面电荷等, 能表征半导体微结构。采用静电计管作为信号的前置放大器具有电压增益低、体积大等缺点。介绍了一种表面光伏谱前置放大器的设计原理、设计方案和应用实例。该前置放大器具有灵敏度高、响应时间短、截止频率低等优点, 并且体积小、使用成本低。

**关键词:** 表面光伏谱; 前置放大器; 电荷放大器

**中图分类号:** TN722.7; TB381 **文献标志码:** B **文章编号:** 1002-4956(2010)02-0047-03

## Development of high-sensitivity preamplifier of surface photovoltaic spectroscopy

Cai Jiafa<sup>1</sup>, Liu Zhixin<sup>2</sup>, Chen Zhurong<sup>1</sup>, Wu Zhengyun<sup>1</sup>

(1. Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The paper introduces the design and application of a new kind of surface photovoltaic spectroscopy preamplifier. This preamplifier has not only advantages of high sensitivity, low response time, low cut off frequency, but also smaller size and lower price.

**Key words:** surface photovoltaic spectroscopy; preamplifier; charge amplifier

表面光伏技术 (surface photovoltaic spectroscopy, SPV) 由 Bardeen 和 Brattain 于 1953 年首次提出<sup>[1]</sup>。表面光伏技术初期是作为研究半导体材料的表面势垒和光生载流子的扩散特性而产生的, 该测试技术具有光谱灵敏度高、非破坏性、样品制备简单 (不需要制作电极、引线或高温处理等)、不需要另外的光电探测器等优点, 在发展过程中, 其应用范围已得到极大扩展。利用 SPV 技术, 可以测量半导体材料的少数载流子扩散长度、表面电荷、氧化层厚度等, 以及表征半导体微结构, 如超晶格/量子阱、量子点、纳米晶体<sup>[2-4]</sup>等的子能级的电子态分布。

半导体材料的 SPV 信号具有输出幅度低 ( $\mu\text{V} - \text{mV}$  量级)、输出阻抗高 ( $> 10^9 \Omega$ ) 的特点<sup>[5]</sup>, 因而要求前置放大器具有 2 个作用: 信号放大和阻抗变换。目前通常使用静电计管作为 SPV 测量的前置放大器, 但它具有电压增益低 ( $< 2$ )、体积大、易碎、耗电大的缺

点。本文首次把基于电荷敏感的电荷放大器作为 SPV 谱的前置放大器, 通过巧妙的电路设计, 使该放大器具有极低截止频率、电荷-电压灵敏度高、体积小、成本低、易于实现等特点, 基本可以满足不同半导体材料和结构的 SPV 的测量要求。

## 1 基本设计原理

SPV 谱的基本测量原理如图 1(a) 所示, 被测半导体样品装在由透明电极 (由石英玻璃蒸镀上一层  $\text{ITO}$  (indium tin oxides) 组成) 和金属背电极组成的样品架上。当周期变化的单色光经透明电极照射样品时, 样品近表面处产生电子-空穴对, 该电子和空穴被内建电场分开从而产生表面光伏信号。因此, 从功能上看, 样品相当于一个对入射单色光敏感的电荷发生器。样品产生的表面光伏信号经透明电极和金属背电极形成的平行板电容器耦合输出。在理想条件下, SPV 的电传输特性可用电荷源模型等效, 如图 1(b) 所示, 这里  $C_e$  为样品的等效电容,  $R_e$  为样品的等效电阻。假设样品表面的光照面积为  $S$ , 样品厚度为  $d$ , 则有

$$C_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-02-28

基金项目: 厦门大学科技创新项目 (Xdkjcx20061028)

专利号 (ZL00620156385.1)

作者简介: 蔡加法 (1973-), 男, 福建省云霄县人, 硕士, 实验师, 主要从事半导体材料和器件的光电特性教学与研究工作。

这里  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ,  $\epsilon_r$  为 GaAs 材料的相对介电常数,  $\epsilon_r = 12.5$ 。当  $S = 5 \text{mm}^2$ ,  $d = 1 \text{mm}$  时,  $C_e = 0.55 \text{pF}$ 。若单色光的斩波频率为  $186 \text{Hz}$ , 则样品的等效输出阻抗约为  $1.6 \text{G}\Omega$ <sup>[6]</sup>。

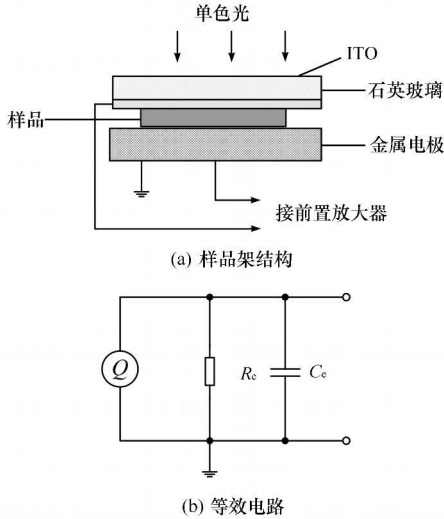


图1 SPV谱样品架结构及其等效电路图

由以上分析可知, SPV 信号具有输出电压幅度小、输出阻抗高的特点, 因而要求前置放大器有两个作用: 一是要实现阻抗变换, 把高输出阻抗变换为低阻抗输出; 二是要实现信号放大。一般的电压放大器无法同时满足上述要求, 因此, 目前常用静电计管放大电路作为前置放大器。静电计管具有输入阻抗高 ( $10 \text{T}\Omega$ )、输入偏流小 ( $\leq 80 \text{fA}$ )、噪声低<sup>[7]</sup>的优点, 因此很适合作为高输入阻抗、极微弱信号的前置放大器。但静电计管为电真空器件, 有体积大且易碎、电路较复杂、器件增益低 (约为 1.3) 等缺点。因此, 用静电计管组成的前置放大器实际上只起阻抗变换作用, 而信号放大的能力有限; 同时, 由于其灯丝电流较大 ( $55 \text{mA}$ ), 不适合用电池供电, 而使用普通直流稳压电源供电又会产生额外的噪声; 再者, 目前市场上已难以购买到此类的电真空器件。因此, 总体而言, 使用静电计管电路作为 SPV 谱的前置放大器虽然具有噪声低的优点, 但其使用不太方便, 特别是由于受到静电计管尺寸方面的限制, 电路难以小型化, 这对于光路的设计及调整均是很不利的。

另一种可行的办法是使用电荷放大器<sup>[8]</sup>。电荷放大器具有能消除由于电缆长度变化和低频响应等原因引起的测量误差的特点, 适合作为高阻抗、低电流传感器 (如压电传感器、电容传感器等) 的前置放大器, 其基本原理如图 2 所示。其中虚线部分为 SPV 样品架等效电路。  $C_i$  是电缆电容和放大器输入电容的总和,  $R_i$  为放大器的输入电阻,  $A$  为放大器的开环增益,  $C_f$  反馈电容,  $R_f$  为反馈电阻。若忽略  $R_e$ 、 $R_i$  和  $R_f$  的影响, 则电

荷放大器的电荷-电压灵敏度为

$$S_v = - \frac{\Delta U_o}{\Delta Q} = - \frac{(C_{IN}/C_f) \Delta U_i}{C_N \Delta U_i} = - \frac{1}{C_f} \quad (2)$$

式中  $\Delta U_o$ 、 $\Delta U_i$  分别为放大器的输出、输入电压,  $C_{IN}$  为样品等效电容  $C_e$  和放大器输入电容  $C_i$  之和。

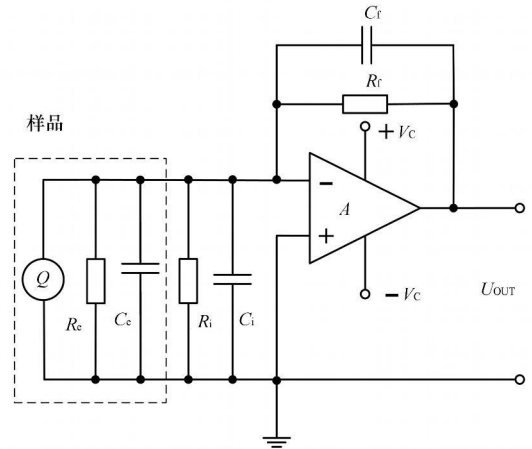


图2 一般电荷放大器电路原理图

由(2)式可知, 在理想情况下, 电荷放大器的电荷-电压灵敏度仅与电荷放大器的反馈电容有关, 电缆电容等其他因素的影响可以忽略不计。图 2 中电阻  $R_f$  的作用是为集成放大器的反相输入端提供一条偏置电流的直流通路以稳定直流工作点, 同时也为电容  $C_e$  和  $C_f$  提供一条放电通路。该电路的低频截止频率  $f_1$  和响应时间  $\tau_i$  主要由反馈电阻  $R_f$  和反馈电容  $C_f$  决定, 即:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (3)$$

$$\tau_i = R_f C_f$$

例如, 若取  $R_f = 1 \text{G}\Omega$ ,  $C_f = 1 \text{pF}$ , 则  $f_1 \approx 160 \text{Hz}$ ,  $\tau_i = 1 \text{ms}$ 。

但是, 在 SPV 谱测量中, 由于 SPV 谱对样品表面态很敏感, 而表面态复合是个慢过程 ( $\text{ms} - \text{s}$  秒量级)<sup>[9]</sup>, 因此调制频率不能太高, 一般在  $100 \sim 200 \text{Hz}$  之间。很明显, 若把此电路直接用于 SPV 谱测量中, 由于电路的低频截止频率与斩波器的工作频率很接近, 电路将无法工作于通频带之内, 这将导致电路工作不稳定。通过提高  $R_f$  值或  $C_f$  值均可降低  $f_1$ , 但这又会导致电路响应时间变; 另外极高阻值的电阻器不易获得, 而且对电路板的绝缘、安装要求也高; 而增加  $C_f$  值又将导致电路的灵敏度下降。

## 2 电路设计

基于以上分析, 在保证电路灵敏度和信噪比的前提下, 降低电荷放大器的低频截止频率成为其能否应用于 SPV 谱测量的关键。为达到此目的, 本文设计了

如图 3 所示的电路。在此电路中, 开环增益为  $A_1$  的集成运算放大器组成电荷灵敏放大级,  $C_f$  为反馈电容。开环增益为  $A_2$  的集成运算放大器组成同相电压放大级, 其放大倍数  $K = 1 + R_2/R_1$ , 本文  $K = 5$ 。  $R_f$  为反馈电阻。

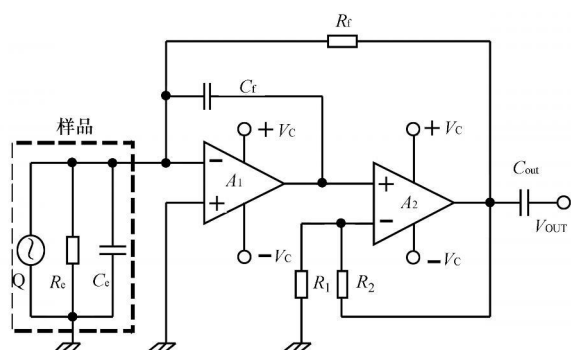


图 3 SPV 前置放大器电路原理图

与一般的电荷放大电路(见图 2)相比较, 本电路在反馈电阻  $R_f$  和电荷放大级之间串接了一级由  $A_2$  组成的电压放大级。采用该种连接方法的优点在于:

(1) 由于  $A_2$  的放大作用, 加在反馈电阻  $R_f$  上的电压是加在反馈电容  $C_f$  上的电压的  $K$  倍。故, 从  $A_1$  的输入端看, 等效反馈电阻增大到  $K$  倍, 即  $R_{f,eq} = KR_f$ 。这样, 在电路参数与一般电荷放大器相同的情况下, 电路的低频截止频率下降到  $1/K$ , 即  $f_{1c} = 1/(2\pi R_{f,eq} C_f) = 1/(2\pi K R_f C_f) \approx 32 \text{ Hz}$ , 此值基本可满足 SPV 谱的测量要求。

(2) 从电路响应时间方面考虑, 由于加在反馈电阻  $R_f$  上的电压是加在反馈电容  $C_f$  上的电压的  $K$  倍, 从而  $R_f$  上的电流也增大到  $K$  倍, 因此, 反馈电容  $C_f$  的放电时间将增加到  $K$  倍, 即  $\tau_d = R_f C_f / K = 20 \text{ ms}$ , 电路的响应速度更快了。

(3) 电路的电压-电荷灵敏度提高到  $K$  倍, 即

$$S_v = - \frac{\Delta U_o}{\Delta Q} = - \frac{\Delta U_{o2} \cdot \Delta U_{o1}}{\Delta Q} = - \frac{1}{C_f} K \quad (4)$$

图 3 中两集成运算放大器采用 Analog Devices 生产的 FET 输入、低噪声、低漂移、静电计级的 AD645, 其典型输入偏置电流为  $1.5 \text{ pA}$ , 输入阻抗为  $1 \text{ T}\Omega$ , 频率为  $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$  时输入噪声的峰峰值为  $1.0 \text{ }\mu\text{V}$ 。

### 3 结果与分析

图 4 为 InGaAs/GaAs 量子阱样品的表面光伏谱, 其中 (a) 采用静电计管前置放大器测量、(b) 采用本文设计的前置放大器进行测量。InGaAs/GaAs 样品采用分子束外延技术生长方法在半绝缘 GaAs(001) 衬底上生长。其中 GaAs 势垒层厚度为  $20 \text{ nm}$ , 量子阱宽度为  $25 \text{ nm}$ , In 的组分为  $0.12$ 。SPV 谱测量中,

250 W 的溴钨灯经 SP-750i 单色仪分光之后聚焦到样品上, 样品产生的表面光伏信号先由前置放大器放大再接到 SR830 锁定放大器进行放大。光学斩波器放在单色仪的出光狭缝处, 频率为  $186 \text{ Hz}$ 。锁定放大器输出的信号接到数据采集系统进行数据转换和处理。图 4 中的  $nmH$  和  $nmL$  分别表示导带第  $n$  个子能级到价带重空穴和轻空穴第  $m$  个子能级的跃迁,  $E_0$  为 GaAs 带边跃迁峰, 对样品子能级进行理论计算并与测量曲线比较从而确认各子能级跃迁峰的来源<sup>[10]</sup>。实验在室温下进行。

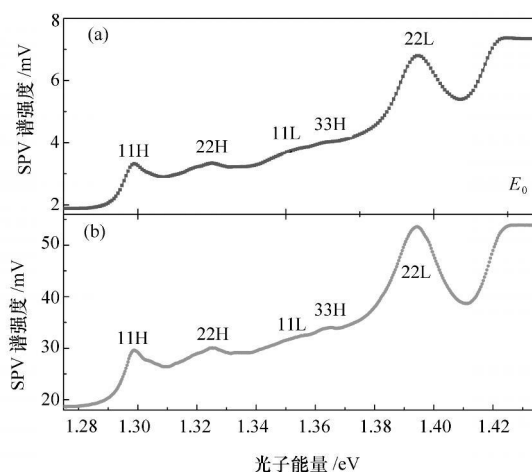


图 4 InGaAs/GaAs 量子阱样品的表面光伏谱

从图 4 中可以看出, 采用两种前置放大器均能测量到丰富的子能级跃迁峰, 这是表面光伏谱的突出优点之一。采用本文设计的前置放大器测量得到的信号幅度是用静电计管前置放大器测量到的 10 倍左右, 并且对于较微弱的跃迁峰如  $11L$ 、 $33H$  其谱形更加明显, 这点对于谱峰的指认具有重要的意义。另外, 测量曲线的信噪比更高, 表明该电路具有更强的噪声抵制能力。通过对测量数据进行数值微分, 更能体现出该前置放大器的优点, 如图 5 所示。在图 5(a) 中,  $11L$  和  $33H$  几乎被噪声所掩盖, 勉强可以分辨出来, 而在图 5(b) 中, 这两个峰具有明显的微分谱结构, 因此可以容易地分辨出来。

### 4 结论

本文在传统的电荷放大器的反馈电阻和电荷放大级之间插入一级电压放大级, 该电路结构不但能提高电路的响应时间及其电压电荷灵敏度, 并且可极大地降低电路的低频截止频率, 使之能应用于表面光伏谱测量中。实际应用表明, 该前置放大器比目前常用的静电计管前置放大器具有更高的测量灵敏度和更高的噪声抵制能力, 并且具有体积小、使用成本低等诸多优点。

(下转第 59 页)

## 4.2 电池充电电流测试

充电时指示灯亮,指示系统正在充电,此时系统关闭风扇,电路电流就主要为充电电流,大小为 260 mA。

## 4.3 其他功能测试

对人体检测、时钟、定时、照明、温度检测、键盘操作等系统功能进行了测试,达到预期目标。

## 5 结论

一体化多功能智能驱蚊扇的设计是基于节能、智能化、多功能等理念,提出一种基于嵌入式控制器的多功能驱蚊智能化设计。系统除具有传统风扇的功能外,同时具有驱赶蚊虫功能、无人自动关机功能、环境温度检测功能、便携功能、实时时钟的设置和显示功能以及定时工作功能,融合了多种知识与技术。实验结果表明,该系统达到了预期的功能要求,为学生的创新活动提供了很好的借鉴,为该系统的产品化开发提供了坚实的基础。

## 参考文献(References):

- [1] 沈文, Eagle I, 詹卫前. AVR 单片机 C 语言开发入门指导[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] Atmel Corporation. AVR Mega16 User Manual Datasheet PDF [Z]. 2008.
- [3] [佚名]. 电子驱蚊器的原理[EB/OL]. <http://www.amazon.cn/review/detail/813307>.
- [4] 张庆双. 实用电子线路 200 例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] BIS Corporation. BIS0001 User Manual Datasheet PDF[Z].
- [6] 基于单片机和 BIS0001 的无线监控报警系统设计[EB/OL]. [http://www.fpga-arm.com/technic\\_article/2008/0719/control676\\_1.html](http://www.fpga-arm.com/technic_article/2008/0719/control676_1.html).
- [7] Dallas Semiconductor Corporation. DS1302 User Manual Datasheet PDF[Z].
- [8] 微雪电子有限公司. LCD1602 WaveShare 使用手册[Z].
- [9] National Semiconductor Corporation. LM 35 User Manual Datasheet PDF[Z].

(上接第 49 页)

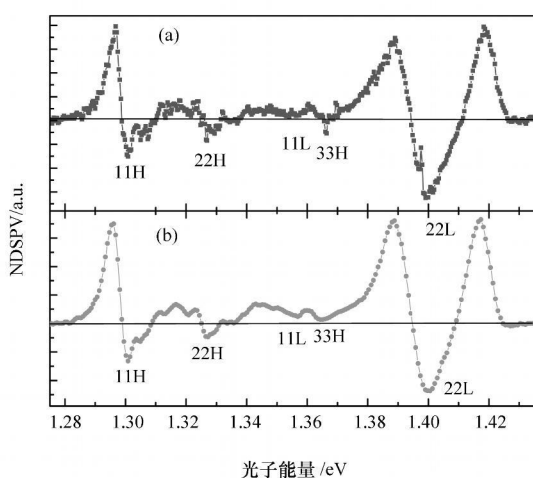


图 5 InGaAs/GaAs 量子阱样品表面  
光伏谱的数值微分谱

## 参考文献(References):

- [1] Brattain W H, Bardeen J. Surface properties of germanium [J]. Bell Syst Tech J, 1953(32): 441.

- [2] Nauka K, Contactless measurement of the Si buried oxide interfacial charges in SOI wafers with surface photovoltage technique [J]. Microelectronic Engineering, 1997(36): 351-357.
- [3] Kamieniecki E. Surface photovoltage measured capacitance: application to semiconductor/electrolyte system [J]. J Appl Phys, 1983, 54(11): 6481-6487.
- [4] Datta S, Ghosh S, Arora B M. Electroreflectance and surface photovoltage spectroscopies of semiconductor structures using an indium tin oxide coated glass electrode in soft contact mode [J]. Rev Sci Instrum, 2001, 72(1): 177-183.
- [5] 刘士毅, 孙志鹏, 黄景昭. 半导体光伏效应[J]. 厦门大学学报, 1965, 12(1): 51-63.
- [6] 蔡加法, 陈主荣, 吴正云. 新的电调制反射谱技术及其应用[J]. 光子·激光, 2005, 16(8): 969-972.
- [7] Pollak F H. Study of semiconductor surfaces and interfaces using electrochromodulation [J]. Surface and Interface Analysis, 2001(31): 938-953.
- [8] 《无线电通信真空器件手册》编写组. 无线电通信真空器件手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1976.
- [9] 高光天. 传感器与信号调理器件应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [10] 孔令民, 蔡加法, 林雪娇, 等. InGaAs/GaAs 应变量子阱的光谱研究[J]. 发光学报, 2002, 23(6): 549-553.