

新原理光电探测阵列的微光响应测试研究

刘晓艳,王明甲,郭方敏

(华东师范大学 教育部极化材料与器件实验室,上海 200241)

摘要:针对暗电流低、灵敏度高等优点的新原理量子效应光电探测器,设计和加工了增益可调 CTIA 读出电路,以获得宽动态范围读出。读出电路芯片与 1×64 元量子效应光电探测器集成封装,在室温 (300K) 条件下进行读出测试研究。光源采用 633nm He-Ne 激光器,直径 $50 \mu\text{m}$ 光斑聚焦照射。测试结果表明:器件偏压为 -0.1V ,激光功率 150pW ,积分时间 $78 \mu\text{s}$,响应电压 55mV ,电压响应率达到 $3.67\text{E}+08\text{V/W}$ 。根据测试结果,提出了进一步降低暗电流影响的改进测试方案。

关键词: 微光读出; 量子效应器件; 高灵敏度; 增益可调读出电路; 暗电流

中图分类号: TN4; TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2546-06

Test study on weak-light level response for new quantum effect photo-detector array

Liu Xiaoyan, Wang Mingjia, Guo Fangmin

(Key Laboratory of Polar Materials & Devices, Ministry of Education,
East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: For new quantum effects photo-detector array which has small dark current and high sensitivity, a gain adjustable readout circuit based on CTIA structure and sampling and holding circuit with correlated double sampling (CDS) technique was designed and fabricated in order to obtain a application of wide dynamic range. The 633 nm laser beam with radiation intensity tunable which is calibrated by a power meter shoots on the photo-detector cell one by one with a 50 m diameter facula. The test results show that the readout response voltage can reach to 55 mV and responsivity $3.67\text{E}+08\text{V/W}$ when biased voltage up to -3V and radiation intensity 150pW at 300 K and integration time $78 \mu\text{s}$. The test system is improved to reduce dark current further.

Key words: weak-light readout; quantum effect photo-detector; high sensitivity;
gain adjustable readout circuit; dark current

收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-01-25

基金项目: 国家科技部重大科研项目(2006CB932802, 2011CB932903); 上海市科委配套(078014194, 118014546)

作者简介: 刘晓艳(1988-), 女, 硕士生, 主要从事光电探测器集成电路设计方面的研究。Email: sharonlx@126.com

通讯作者: 郭方敏(1957-), 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事为半导体器件物理、弱信号读出电路设计等方面的研究。

Email: fmguo@ee.ecnu.edu.cn

0 引言

近年来,光电探测器已经在医疗、生物分子科学、环境监测等领域得到进一步的开发和应用,因为这些领域常常需要探测极微弱的光信号。而 PIN 等光电探测二极管由于自身的结构所致在微光下具有较差的灵敏度导致不能探测微光,高灵敏度的雪崩二极管工作偏压又比较高。新原理光电探测器不同于硅基 CCD 和 CMOS 器件工作原理,它是 n-i-n 型光探测器,其中插入 InGaAs/GaAs/AlAs 量子点-量子阱结构,通过调节化合物半导体材料体系的组分、掺杂浓度、阱宽和垒高,可以设计出不同响应波长的光电探测器^[1-6]。

读出电路是光电探测阵列和后续信号处理电路之间的接口电路^[7-9],可以将探测到的微弱电流、电压或电阻变化转换成后续信号处理电路可以处理的电信号。针对新原理量子效应光电探测器的高灵敏度特性,专门设计了 CTIA-CDS 结构的增益可调读出电路。通过与 1×64 元新原理量子效应光电探测阵列对接封装,室温下采用 633 nm He-Ne 激光,50 μm 直径的光斑聚焦,逐个照射到新原理光电探测阵列的光敏单元上,测试分析不同偏压下的输出影响以及各电容增益的微光读出特性及其相应的响应电压和响应率,并测试分析了暗电流随偏压的影响。

1 新原理光电探测器特性

新原理量子效应光电探测器件^[4]是采用分子束外延技术 (MBE) 生长的 n-i-n 型新原理光电探测器,其中插入了独特的量子阱-量子点结构,具体是在两个 n+GaAs 缓冲层之间生长 GaAs/AlAs/i/In_{0.5}Ga_{0.5}As/GaAs/i/AlAs /GaAs/组合层。探测器的下电极置于器件底部,顶部的 2 个上电极之间制作一个 45 μm×500 μm 宽的窗口,作为入射光通道。

基于光电测试平台,采用 Keithley 4200-SCS 半导体特性分析仪和波长 633 nm 的氦氖激光器,经 Newport 功率计校准,测试新原理光电探测器的 IV 和 CV 特性参数,进一步计算分析探测器的响应率、光电特性、信噪比等,以获取探测器的最佳工作偏压等条件。图 1 表明,新原理光电探测器工作在低温条件下,暗电流随偏压变化,从 10⁻¹³~10⁻⁴ A,相差 9 个数量级。图 2 表明,当偏置电压设在 -2.25 V,信噪比最

大。综合对比图 1 与图 2,当激光功率为 50 pW 和 5 nW 时,信噪比分别达到 4.5×10⁴、1.25×10⁶。图 3 所示为应用单色仪,扫描波长 400 nm~1 μm,测试得到新原理光电探测器的响应光谱,可以看到波长响应范围从 400~900 nm,在 600~650 nm 之间有个光谱响应高峰。

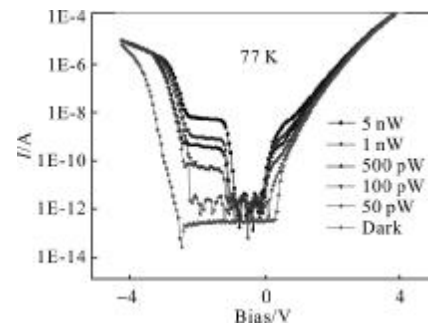


图 1 不同光功率下光电探测器的 I-V 特性

Fig.1 Characteristics of I-V photodetector with different light powers

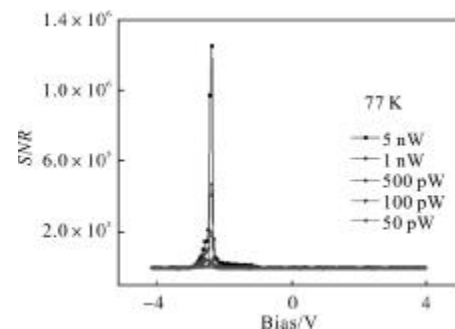


图 2 不同光功率下光电探测器的信噪比

Fig.2 Different signal-to-noise ratio optical power of photo detector under

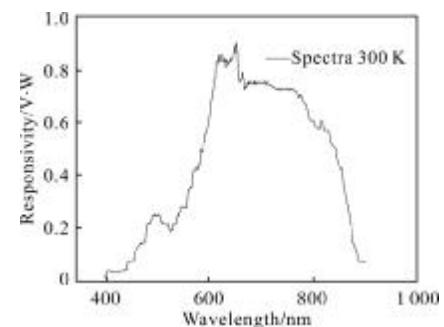


图 3 器件的光谱图

Fig.3 Photoelectric sensor spectra

2 读出设计

针对新原理探测器的独特性能,设计了图 4 读

出电路结构^[9-10]。其中第一级是像素级, 1×64 元新原理光电探测器阵列; 器件阵列与电路对接后连接到第二级 CTIA 积分输出级; 第三级是采样保持电路相关双采样(CDS)技术; 第四级是缓冲输出级。CTIA 单元由一个高增益的反相输入运算放大器和两个积分反馈电容 C1 和 C2 组成, 用来进行光响应电流积分。为了抑制读出过程器件与采样系统产生的热噪声、 $1/f$ 噪声、暗电流噪声和背景噪声电流, 采样保持电路采用相关双采样结构。

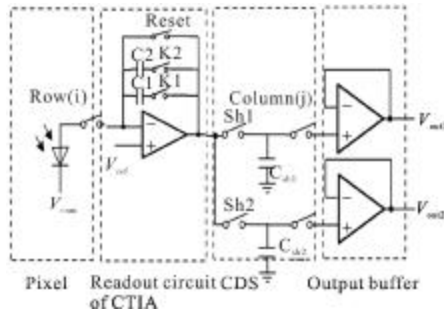


图 4 读出电路结构图

Fig.4 Structure of ROIC

读出电路工作时, 集成运放工作在线性区。先是复位开关 Reset 闭合, CTIA 积分放大单元被复位, 积分电容 C_{int} ($C_{int}=C1$ 或 $C2$ 或者 $C1+C2$) 通过 Reset 开关放电, 同时把输出电压 V_{out} 复位为 V_{ref} 。接下来开关 Reset 打开, CTIA 积分放大单元用积分电容 C_{int} 对光电探测器的响应电流积分, 得到的响应电压通过 V_{out} 输出。在 CTIA 单元积分时, 相关双采样(CDS)电路对其进行两次采样。积分开始进行第一次采样, 得到的是对暗电流积分的响应电压, 并被采样电容 C_{sh1} 保持。在积分结束时, 进行的第二次采样是对探测器响应电流积分的响应电压, 被采样电容 C_{sh2} 保持。在移位寄存器控制下, 将 1×64 阵列的 V_{out2} 和 V_{out1} 依次缓冲输出。探测器实际响应电压 V_{out} 表示为:

$$V_{out} = V_{out2} - V_{out1} \quad (1)$$

$$V_{out} = \frac{I_0 t}{C_{int}} \quad (2)$$

针对新原理量子效应光电探测阵列高灵敏度和宽动态响应特性, 设计了增益可调读出, 即图 4 中的 CTIA 采用两个开关 K1、K2 分别控制两个积分电容 $C1=2 \text{ pF}$ 、 $C2=10 \text{ pF}$, 从而使读出电路具有三种积分电容组合, 即 2 pF 、 10 pF 、 12 pF 。测试微弱光信号时

采用 2 pF 电容积分读出, 以求真实获得高灵敏度; 在测试自然光或更强光时, 采用 10 pF 和 12 pF 较大积分电容读出, 控制读出电路饱和读出, 增大动态读出范围。

3 测试分析

读出电路采用 CMOS $0.35 \mu\text{m}$ 混合集成电路工艺流片加工, 获得读出电路芯片后通过封装基板与探测器阵列对接, 管座固定在光学平台上, 连接测试电路和测试仪器。采用 633 nm He-Ne 激光光源聚焦照射到新原理光电探测器光敏元上, 光斑直径小于 $50 \mu\text{m}$ 。

3.1 偏压响应分析

根据图 4 读出结构, 读出过程器件的偏压表示为:

$$\Delta V = V_{ref} - V_{com} \quad (3)$$

探测器阵列与读出电路对接后, 工作偏压应尽量选择可以获得最小暗电流, 大响应率, 宽动态范围, 小动态阻抗的工作点。通过测得的响应电压, 计算探测器的电压响应率为:

$$R_v = \frac{V_p}{P_i} \quad (4)$$

式中: V_p 为响应电压; P_i 为激光光功率。

图 5 是常温条件下, 激光辐照功率为 10 nW , 积分电容 2 pF 时, 探测器阵列的电压响应率随器件偏压的变化。可以看出, 因为新原理探测阵列已经与读出电路对接封装, 相比图 1, 探测器件阵列的最优工作电压已经发生了明显偏移。当器件偏压从 -0.4 V 逐渐增加到 -0.2 V , 电压响应率逐渐增大, 并且在偏压 -0.18 V 时, 测得的器件电压响应率最大。当器件

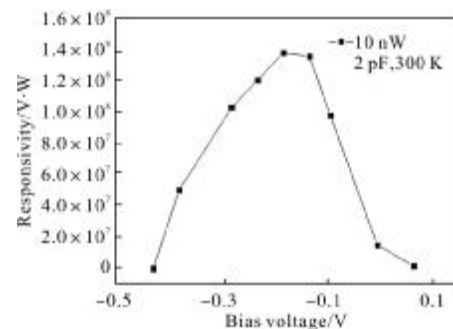


图 5 不同偏压下读出电路的电压响应率

Fig.5 Voltage responsibility under different bias voltage

偏压继续增大,由于探测器结构内的隧穿电流急剧增大,导致读出电压响应率减小。说明要得到新原理探测阵列的高灵敏度输出,需要选择合适的器件偏压。

3.2 光功率响应分析

为了获得新原理光电探测器的光功率响应范围和响应强度,选择器件偏压 $V_{bias} = -0.1\text{ V}$, 2 pF 积分电容, $78\text{ }\mu\text{s}$ 积分时间, 常温工作, 改变激光辐射功率 100 nW 、 60 nW 、 10 nW 、 1 nW 、 150 pW , 测试和计算得到新原理光电探测器的响应电压和响应率, 如表 1 所示。可以看出在激光辐照功率为 150 pW 时, 采用 Agilent DSO6052A 示波器测试, 仍然可以观察到明显的响应电压, 电压响应率最高达到 $3.67\text{ E}+08\text{ V/W}$ 。

表 1 不同光功率的响应电压和响应率
Tab.1 Response voltage and responsibility with laser power changed

Laser power/nW	Voltage/mV	Responsibility/V·W
100	1 275	1.275E+07
60	1 050	1.85E+07
10	530	8.00E+07
1	280	2.20E+08
0.15	55	3.67E+08

进一步测试表明, 激光功率小于 200 pW 的低功率辐照情况等一定测试条件下, 2 pF 积分电容读出的响应电压明显大于 10 pF 和 12 pF 积分电容读出; 但是当激光功率稍微增强至 200 pW 以上, 2 pF 积分电容的响应电压输出已经开始饱和, 而 10 pF 和 12 pF 积分电容可以继续积分读出。表 2 是在大背景噪声情况及室温条件下, 探测器偏压 -0.38 V 时, 分

表 2 大背景噪声和不同光功率的电压响应

Tab.2 Response voltage under changed laser power at big background light

Laser/mV	2 pF/mV	10 pF/mV	12 pF/mV
100	0	1 225	1 325
20	0	825	960
5	0	525	630
0.5	0	170	240

别测试得到的三种积分电容读出的响应电压对比。可以看到当激光辐照从 500 pW 增加至 1.3 mW 时, 需要选用 10 pF 或 12 pF 的积分电容工作, 因为在该工作条件下, 2 pF 积分电容读出早已经被采样系统产生的热噪声、 $1/f$ 噪声、暗电流噪声和背景噪声等饱和, 已无法正常读出。

3.3 暗电流分析

由于在 n-i-n 型新原理光探测器结构中插入了 InGaAs/GaAs/AlAs 量子点-量子阱结构等独特设计, 可以抑制基态隧穿电流, 热辅助声子隧穿电流和热电离发射电流的产生条件, 明显提高了器件对光响应的灵敏度。但是图 1 与图 2 的测试结果表明, 新原理光电探测器的隧穿暗电流是随偏压增加而增加, 如果工作偏压设置不当, 很容易使得积分电容读出饱和。如果减小暗电流读出, 就能够进一步增大读出动态范围。

图 6 表示在相同工作偏压下, 积分电容与读出的暗电流关系, 其中 V_0 表示响应电压饱和点, 3 个矩形分别表示 2 pF 、 10 pF 、 12 pF 积分电容容量。偏压相同, 读出的暗电流相同, 阴影部分表示暗电流分别占据的积分电容值, 空白部分表示还能读出的响应电压阈值。可以看出, 积分电容越大, 积分读出的响应电压阈值越大; 积分电容越小, 积分读出的响应电压阈值就越小。

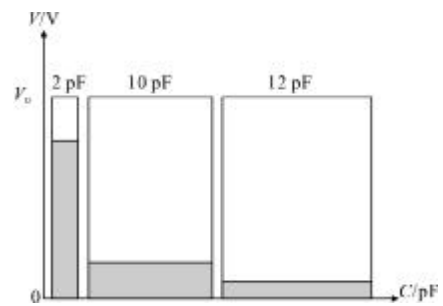


图 6 同一读出电压饱和点, 暗电流与积分电容值的关系
Fig.6 Relationship among dark current, integral capacity and threshold of response voltage

当探测器件偏压设在 -0.11 V , 没有光功率输入时, 测试到有较大的暗电流读出, 证明了暗电流占据了积分电容读出的一定容量, 直接导致积分读出的光电转换响应电压输出减小。图 7 进一步表明积分电容越大, 读出的饱和电压越大, 反之就越小。由此可知, 抑制暗电流读出有利于体现新原理光电探测

器阵列的高灵敏度特性。为此设计了改进测试装置，见图 8。在 Vcom 端设计滑动变阻器以分流暗电流

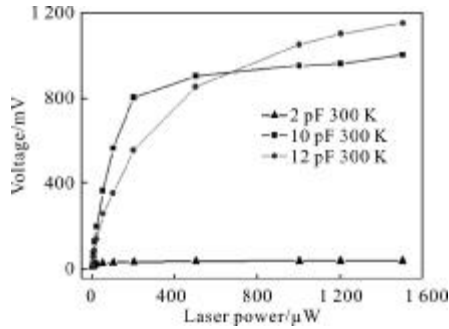


图 7 不同积分电容下,辐射功率与响应电压关系

Fig.7 Voltage response at changed laser power and integration capacitor

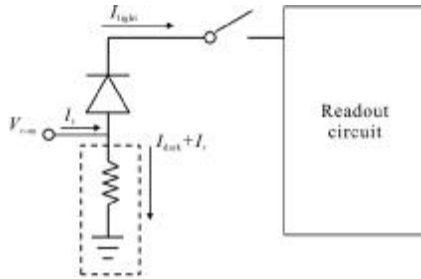


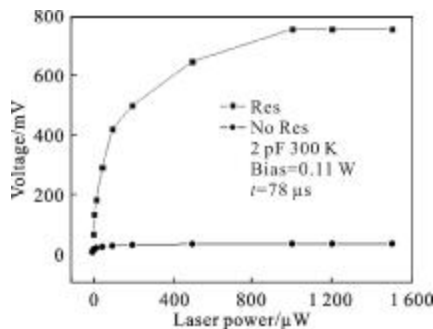
图 8 改进的测试电路原理

Fig.8 Changed test circuit

读出。测试时,调节到适合电阻,目的是降低暗电流输出率,使新原理探测阵列的输出电流仅保留公式(5)所示的 I_{light} :

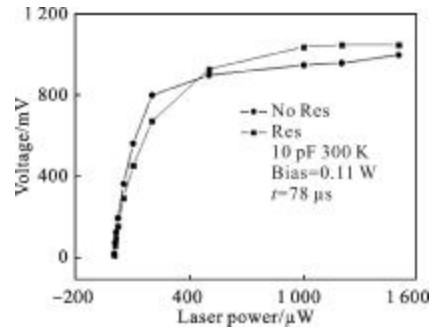
$$I = I_{dark} + I_{light} \quad (5)$$

通过片外测试系统在 Vcom 端并入电阻,积分输出电流经过电阻分流,使得器件端输出电流仅为 I_{light} ,以此降低暗电流的积分读出。图 9 是滑动变阻器电阻 Res=2.9 kΩ,偏压 $V_{bias}=-0.11 V$ 时,分别测试得到三种积分电容(2 pF, 10 pF, 12 pF)的响应电压输



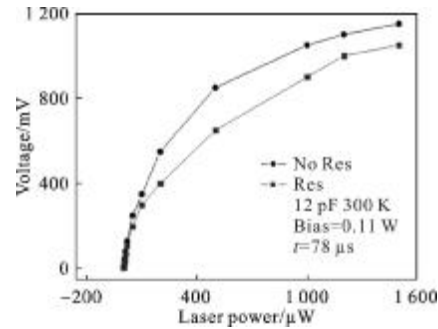
(a) 2 pF 积分电容

(a) 2 pF integral capacity



(b) 10 pF 积分电容

(b) 10 pF integral capacity



(c) 12 pF 积分电容

(c) 12 pF integral capacity

图 9 有无滑动变阻器的读出对比

Fig.9 Contrast test on changed test circuit

出。从图 9(a)可以看到,因为降低了器件的暗电流输出率,较小积分电容读出的响应电压的饱和点已经被提高;从图 9(b)和(c)可以看出,大积分电容读出在暗电流分流中的作用不够明显,还有待进一步测试研究。

4 结论

针对新原理量子效应光电探测器阵列的高灵敏度和宽动态范围特点,采用 CTIA-CDS 读出结构进行了增益可调设计,通过与新型探测阵列对接,在常温条件下,研究激光功率从 pW~mW 变化,新原理探测器阵列暗电流随偏压变化的输出,通过滑动变阻器电阻改进测试系统,获得了明显降低暗电流的读出响应输出。由于新原理探测器件在低温时的 I-V 性能更优越,暗电流更低,进一步研究在低温条件下的新原理探测器阵列的微光读出特性,提高数据采集精度,能够获得更精确、灵敏的微光读出响应。

参考文献:

[1] Levine B F. Quantum -well infrared photodetectors [J].

- Journal of Applied Physics, 1993, 74(8): R1-R81.
- [2] Sun X M, Zhang H, Zhu H, et al. High responsivity resonant -cavity -enhanced InGaAs/GaAs quantum -dot photo -sensor for wavelength of $\sim 1\mu\text{m}$ at room temperature [J]. Electronics Letters, 2009, 45(6): 329-331.
- [3] Shen S C. Comparison and competition between MCT and QW structure material for use in IR detectors [J]. Microelectronics Journal, 1994, 25(8): 713-739.
- [4] Bing Hu, Xia Zhou, Yan Tang, et al. Photocurrent response in a double barrier structure with quantum dots - quantum well inserted in central well[J]. Physica E, 2006, 33: 355-358.
- [5] Bian Songbao, Tang Yan, Li Guirong, et al. Photonstorage in optical memory cells based on a semiconductor quantum dots -quantum well hybrid structure [J]. Chinese Phys Lett, 2003, 20(8): 1362-1365. (in Chinese)
- [6] W Lu, H J Ou, M H Chen, et al. Application of GaAs/AlGaAs multiple -quantum well infrared detector array [J]. International Journal of Infrared Millimeter Waves, 1994, 15:137-144.
- [7] Liang Pingzhi, Jiang Meiling, Zhang Xuemin, et al. Design and fabrication of readout integrated circuits for 64×64 InSb IR focal plane array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(5): 424-427. (in Chinese)
- [8] Li Ning, Guo Fangmin, Xiong Dayuan, et al. 256×1 very long wavelength QWIP FPAS [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 756-758. (in Chinese)
- [9] Guo F M, Xiong D Y, Zhang W E, et al. Analysis and comparison of n -AlxGal -xAs/GaAs QWIP with different device structures and optical coupling[J]. Infrared Physics & Technology, 2009(52): 276-280.
- [10] Sang Gu Kang, Doo Hyung Woo, Hee Chul Lee. Multiple integration method for high signal -to noise ratio readout integrated circuit [C]//IEEE 2004 Custom Integrated Circuits Conference, 2004: 99-302.