

# 一种基于室温工作的量子点光电探测器的 微光读出和应用研究

茅 丰<sup>1</sup>, 王明甲<sup>2\*</sup>

1. 上海应用技术大学电气与电子工程学院, 上海 201418  
2. 青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266042

**摘 要** 针对量子点光电探测器阵列进行微光检测研究, 量子点探测器采用 AlAs/GaAs/AlAs 双势垒结构, GaAs 宽阱中分别有一个 InAs 量子点(QDs)和 In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As 量子阱(QW), 建立一个简单的器件模型进行分析。常温下, 在 632.8 nm He-Ne 激光照射下, 当光功率为 0.01 pW 时, 器件偏压 -0.5 V, 积分时间 80.2 μs, 电压响应率达到  $7.0 \times 10^{11} \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ , 具有非常高的灵敏度, 这种光电探测器在 300 K 温度下可以探测光功率小于  $10^{-14} \text{ W}$  极弱光。以这种量子点光电探测器为核心研制的高灵敏度光谱仪和分子超光谱系统结合对生物组织样本进行检测, 研制了一种图谱相互验证, 互为校正的生物组织光谱测量系统。

**关键词** 光电子学; 微光检测; 显微光谱; 高灵敏度

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0877-05

## 引 言

光电探测器在航天航空遥感、光电武器制导、医疗诊断、生物分子科学、导航、环境监测等领域得到广泛应用, 为了在上述领域探测非常微弱的光信号, 需要探测器具有很高的增益<sup>[1-3]</sup>。含有自组织量子点的 QD-RTD 因具有很高的光激发载流子倍增因子, 而备受关注并进一步研发应用<sup>[4-8]</sup>。近年来, 报道的具有单光子探测能力的 QD-RTD 工作温度都很低, 在液氮或液氦温度<sup>[4-8]</sup>。

本文报道的量子点探测器具有 AlAs 双势垒结构, GaAs 宽阱中分别嵌入 InAs QDS 和 In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As QW, 利用量子点和小量子阱附近的光生电荷对其能级的调整, 显著的提高器件的灵敏度。在室温工作下具有  $10^{-14} \text{ W}$  级别的微弱光检测能力。当器件工作在反向偏压下, 光激发电子与空穴分别存储在量子阱和量子点中, 产生内光生伏特效应, 改变了量子点和量子阱的势能, 使器件具有很高的光激发倍增电流<sup>[9]</sup>。通过 KEITHLEY 4200-SCS 和 632.8 nm 波长的激光进行 I-V 和 C-V 测试, 并建立一种简化的反映器件高灵敏度特性的器件物理模型, 根据所建立模型, 研究量子点探测器在微光条件下提高量子倍增效率的物理机制; 通过读出电路

和嵌入式数据采集系统, 获得了功率等于  $1 \times 10^{-14} \text{ W}$  光信号的响应电压。

通过硅通孔一孔四线技术将  $1 \times 64$  量子点光电探测器阵列和读出电路封装在一块硅基板上, 研制了常温工作的高灵敏度微型光谱仪。在分子超光谱系统上通过光学 C 口切换器将新型量子点光谱仪加装在系统上, 实现两种光谱测量系统相互验证, 互为校正。在微弱信号测试时发挥量子点光谱仪高灵敏度的特点, 将光谱成像技术应用于生物组织样本的检测, 从图谱结合的角度对样本进行分析。

## 1 实验部分

### 1.1 器件结构特性

量子点光电器件采用分子束外延技术(MBE)生长在  $n^+-(100)\text{GaAs}$  衬底上, 首先生长  $1 \mu\text{m}$  厚掺硅( $10^{-18} \text{ cm}^{-3}$ )的 GaAs 缓冲层, 然后依次生长 30 nm 的非掺杂 GaAs 隔离层, 25 nm 的 AlAs 势垒, 3 nm 的 GaAs 隔层, 6 nm 的 In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As 窄量子阱, 45 nm 的 GaAs 宽量子阱, 1.8 M 自组织 InAs 量子点层, 5 nm 的 GaAs 隔层, 25 nm 厚的 AlAs 势垒及 30 nm 非掺杂 GaAs 隔离层, 最后再覆盖一层 30 nm(掺硅  $10^{-18} \text{ cm}^{-3}$ )GaAs 盖层<sup>[9-10]</sup>, 下电极通过欧姆接触置于探测

收稿日期: 2018-03-08, 修订日期: 2018-06-28

基金项目: 国家重大基础研究计划项目(2011CB932903), 山东省高等学校科技计划项目(J17KA059)资助

作者简介: 茅 丰, 1978 年生, 上海应用技术大学电气与电子工程学院讲师 e-mail: masonmao@126.com

\* 通讯联系人 e-mail: mingjiawang@126.com

器阵列的两端，顶部的上电极边制作了  $45 \times 500 \mu\text{m}^2$  窗口，作为入射光通道，探测器工作在反偏状态下，能带图如图 1 (b) 所示(反偏是指下电极为正，上电极为负)。

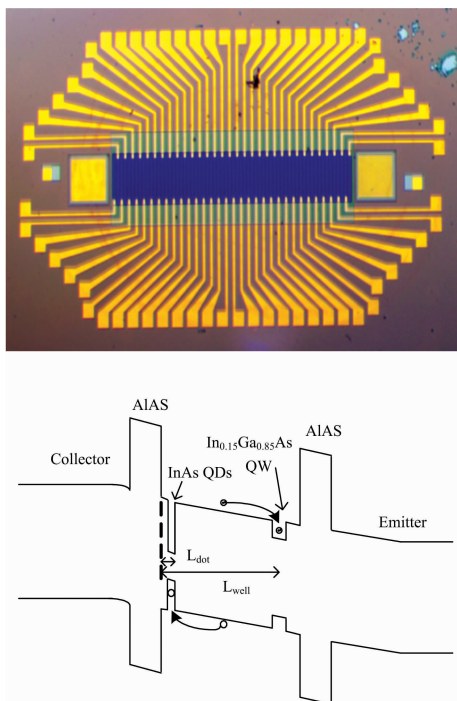


图 1 (a)  $1 \times 64$  光电探测器线列照片；  
(b) 探测器反偏时的能带图

Fig. 1 (a)  $1 \times 64$  Photoelectric detector line photo;  
(b) Bandmap of detector's reversed time

采用傅里叶光谱仪 FITR Vertex 80V 测试了器件常温下的光电流响应谱，如图 2 所示。探测器在  $600 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$  范围内有很好的光电响应。当器件在  $632.8 \text{ nm}$  激光照射下，在 AIAs 两侧产生电子空穴对，在电场作用下，载流子向相反的方向运动，当光激发载流子越过或隧穿 AIAs 势垒时产生电流。工作温度  $300 \text{ K}$ ，偏压在  $\sim \pm 1.5 \text{ V}$  时，电场强度达到  $1 \times 10^7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。利用 Keithley 4200-SCS 半导体特性分析仪分别测试了液氮温度和常温下探测器的 I-V 特性，如图 3 所示，虽然器件面积较大，但在低温下， $-0.5 \sim 0 \text{ V}$  工作电压范围内，暗电流很小，约为  $10^{-13}$  量级。实验采用的是

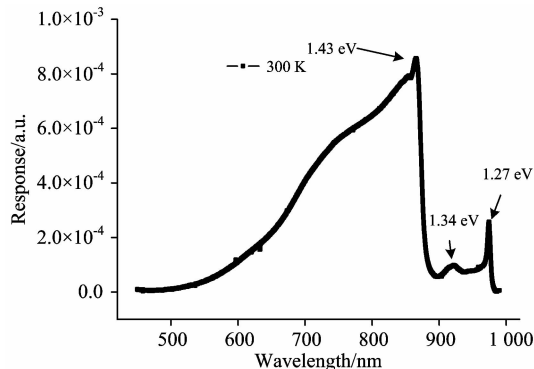


图 2 探测器的光电流谱

Fig. 2 Detector photocurrent spectrum

$632.8 \text{ nm}$  He-Ne 激光器作为光源进行微光检测，如果对  $870 \text{ nm}$  波段的光进行检测，灵敏度会提高数倍。

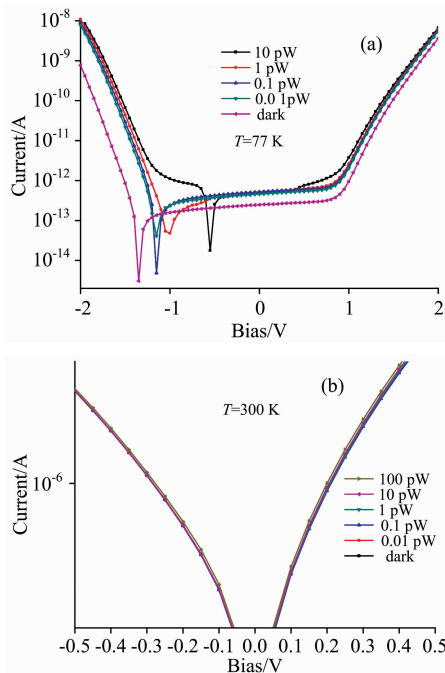


图 3 不同光功率下光电探测器的 I-V 特性图

(a): 液氮温度; (b): 常温

Fig. 3 I-V characteristics of photodetectors under different optical power

(a): Liquid nitrogen temperature; (b): Room temperature

常温下器件暗电流很大，但微光时器件仍有很大的电流响应率，器件工作在  $-0.5 \text{ V}$  时，暗电流  $3.88 \times 10^{-6}$ ，光功率为  $0.01 \text{ pW}$  时，光电流为  $1.2 \times 10^{-8}$ ，光电流探测器电流响应率  $R$  等于  $1.2 \times 10^{-6}$ ，假定量子效率  $\eta$  取理想值 1，当激光功率  $0.01 \text{ pW}$  时，器件工作在  $-0.5 \text{ V}$ ，通过式(1)得到探测器增益  $g$  超过  $2.35 \times 10^6$ 。通过精心选择读出电路结构和探测器工作点，可以对  $0.01 \text{ pW}$  进行微光读出研究。

$$\eta = \frac{I_p/e}{P/h\nu} = \frac{Ihc}{gPe\lambda} = \frac{R}{g} \frac{hc}{e\lambda} = \frac{R}{g} \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (1)$$

光电探测器具有这么高的增益，说明我们的器件在光照下产生的电子和空穴分别在  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  QW 和  $\text{InAs}$  QDs 中具有很长的存储时间；读出时，量子点和小量子阱的存储效应可通过施加一个正向电压脉冲进行擦除，电子和空穴分别进入  $\text{InAs}$  QDs 和窄  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  QW，并分别和光探测时存储的空穴和电子复合。

### 1.2 光电探测器工作原理分析

为了便于分析，建立一个简单的模型，不考虑  $\text{InAs}$  QDs 的宽度，空间分布的 QDs 用狄拉克函数  $\delta$  来表示。为了简化分析，窄的  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  QW 也用狄拉克函数  $\delta$  表示。 $L_{\text{dot}}$  和  $L_{\text{well}}$  分别是量子点、窄的  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  QW 和下电极侧 AIAs 势垒的距离，如图 1 所示，根据泊松方程和边界条件可以得到<sup>[9-11]</sup>

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\epsilon\epsilon_0} - \frac{ep_{\text{dot}}}{\epsilon\epsilon_0}\delta(x-L_{\text{dot}}) + \frac{en_{\text{well}}}{\epsilon\epsilon_0}\delta(x-L_{\text{well}}) \quad (2)$$

$$\varphi(\omega) = 0 \tag{3}$$

$$\left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=\omega} = 0 \tag{4}$$

式(2)中  $N_d$  是 GaAs 阱中的杂质浓度,  $p_{\text{dot}}$  和  $n_{\text{well}}$  分别是 QDs 和  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  QW 中存储的光生空穴和电子浓度, 根据边界条件式(3)和式(4), 式(2)可以得到

$$\varphi(x) \approx -\frac{eN_d}{\epsilon\epsilon_0}(x-\omega)^2 + \begin{cases} 0 & x > L_{\text{well}} \\ -\frac{ep_{\text{dot}}}{\epsilon\epsilon_0}(L_{\text{dot}}-x) & x < L_{\text{dot}} \\ \frac{en_{\text{well}}}{\epsilon\epsilon_0}(L_{\text{well}}-x) & L_{\text{dot}} < x < L_{\text{well}} \end{cases} \tag{5}$$

当较强的光照时, GaAs 宽阱中产生大量的电子空穴对, 负偏情况下, 空穴存储在 InAs QDs 中, 电子存储在  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  QW 中, 空穴存储在 InAs QDs 中, 使 InAs QDs 附近的电子势能降低, 电子存储在  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  QW 中, 使  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  QW 附近的电子势能增大, 增大了 AlAs 势垒上的压降, 增大了光电流。器件具有高的灵敏度, 意味着电子和空穴在量子点和窄的量子阱中存储的时间较长。外加  $\sim 1.5\text{ V}$  偏压下, 有源区 (120 nm) 的电场强度约为  $10^7\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ , 假定电子和空穴的迁移率分别为  $8000$  和  $400\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ , 相应的共振隧穿传输时间为  $1\times 10^{-14}$  和  $1\times 10^{-13}\text{ s}$ , 比 InAs 量子点中的电子空穴复合时间 ( $\sim 1\times 10^{-9}\text{ s}$ ) 小 4 个数量级<sup>[9-13]</sup>, 所以器件具有高的内增益。当光照增强时, 电子空穴对增加,  $p_{\text{dot}}$  和  $n_{\text{well}}$  增大, 则光照引起的内电势增大。当  $x=0$  时, 光生空穴在 AlAs 势垒一侧引起电势变化

$$\Delta V \approx -\frac{ep_{\text{dot}}}{\epsilon\epsilon_0}L_{\text{dot}} \tag{6}$$

根据式(6)和光照下的 I-V 特性曲线峰值对应的电压偏移可以估算出空穴浓度。当光照后电压偏移基本不变时, 大部分量子点和窄的量子阱分别充满了空穴和电子。

### 1.3 微光读出

#### 1.3.1 读出电路设计

读出电路主要结构如图 4 所示, 电路由三级组成, 第一级像素级,  $1\times 64$  阵列的量子点-量子阱光电探测器, 通过行扫描开关连到第二级 CTIA-CDS 读出级, 第三级是缓冲输出级。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。为了增加动态范围, 积分电容有 2, 10 和 12 pF

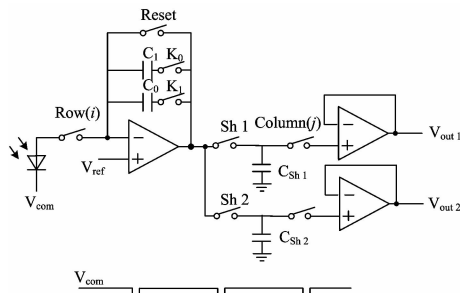


图 4 读出电路结构图

Fig. 4 Readout circuit structure

三种, 为了抑制量子点存储对光探测的影响, 采用周期性倒空技术, 在器件下电极端 (VCOM) 加周期性倒空信号, 在光读出前进行复位, 减小量子点存储电荷影响, 增大微光探测灵敏度<sup>[14-15]</sup>。

#### 1.3.2 微光读出

常温下, 激光功率 1 nW, 读出电路在不同积分时间下响应电压如图 5 所示, 由图可以看出, 响应电压随时间线性变化很好。当积分电容 2 pF, 积分时间超过 50  $\mu\text{s}$  时, 读出电路开始饱和, 因为常温下器件暗电流和系统产生的热噪声、 $1/f$  噪声、暗电流噪声和背景噪声等较大, 限制了读出电路的动态范围。

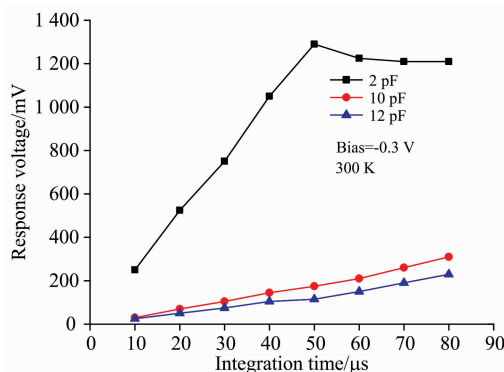


图 5 不同积分时间响应电压

Fig. 5 Different integration time response voltage

常温下, 器件暗电流和系统噪声较大, 为了增大动态范围, 采用 12 pF 积分电容, 图 6 为器件偏压  $-0.3\text{ V}$  时, 12 pF 积分电容, 80  $\mu\text{s}$  积分时间下, 读出电路响应电压随光功率的变化, 读出电路随光功率成亚线性变化, 且 30 nW 光照下, 读出电路饱和。

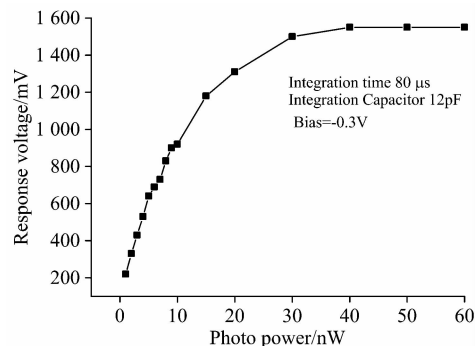


图 6 不同光功率下的响应电压

Fig. 6 Response voltage at different optical power

为了对更微弱的光信号进行读出测试, 632.8 nm He-Ne 激光功率经过 NewPort 功率计校准为 10 pW, 然后分别经 10%, 1% 和 0.1% 中性密度片进行衰减得到 1, 0.1 和 0.01 pW 光功率。通过进一步减小暗室内背景光, 对器件响应最大的像元进行读出测试, 得到常温下 632.8 nm 激光光功率低至 0.01 pW ( $10^{-14}\text{ W}$ ) 的微弱光信号, 接近单光子级别。常温下当偏压  $-0.5\text{ V}$  时, 积分时间 80  $\mu\text{s}$ , 积分电容 2 pF 时,

采用嵌入式数据采集系统对读出电路响应电压进行数据采集,分别测试暗环境和有光照两种情况下的输出电压,实际响应电压为两者之差。从图 7 可以看出当 0.01 pW 632.8 nm 激光照射时,读出电路响应电压为 7 mV,电压响应率达到  $7.0 \times 10^{11} \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ 。而根据器件光谱图(图 2)可以看出如果光源波长在 800~900 nm,器件具有更高的灵敏度,常温下有望测到光功率小于 0.01 pW 微弱光信号。

LineChart	BarChart	Data	WiFi	Configure
0- 5:	615,	0,	0,	39, 50
6-11:	45,1557,	532,	189,1048,	350
12-17:	128,	65,	55,	87, 43, 80
18-23:	79,1752,	620,1610,	623,	276
24-29:	166,	123,	133,	125, 146, 171
30-35:	181,	869,	444,	319, 291, 268
36-41:	311,	307,	370,	365, 136, 344
42-47:	493,	514,	613,	611, 721, 236
48-53:	688,	796,	947,	963,1111,1113
54-59:	1257,	1294,	404,1182,	2044,1907
60-63:	1960	623,	49,	0

(a)

LineChart	BarChart	Data	WiFi	Configure
0- 5:	616,	0,	0,	39, 49
6-11:	44,1563,	534,	190,1040,	346
12-17:	127,	64,	56,	87, 43, 80
18-23:	79,1755,	623,1612,	622,	276
24-29:	165,	123,	134,	125, 145, 171
30-35:	180,	852,	439,	316, 291, 267
36-41:	310,	306,	369,	363, 134, 342
42-47:	491,	511,	610,	609, 718, 235
48-53:	685,	792,	943,	958,1105,1106
54-59:	1253,	1288,	403,1178,	2043,1901
60-63:	1953	619,	42,	0

(b)

图 7 0.01 pW 激光照射和暗背景下读出电路输出电压

(a): 0.01 pW 激光照射时; (b): 暗背景下

Fig. 7 Readout circuit output voltage with 0.01 pW laser irradiation and dark background

(a): 0.01 pW laser irradiation; (b): Dark background

## 2 结果与讨论

以新原理量子点阵列和读出电路为核心,研制出高灵敏度嵌入式微型光谱仪。以高灵敏度微型光纤光谱仪为基础,将显微镜技术与光谱仪技术相结合,探索高灵敏度显微光谱成像系统的应用。相对于传统的光成像方法,光谱成像技术能获得组织、器官甚至细胞中更多的信息。光谱成像技术同时提供生物组织样本图谱两方面的信息,对检测目标进行定性、定量和定位的描述,可以实现对某些病理变化的早期诊断,相比较于其他医学成像技术,具有独特的优势。李庆利等研制了一种基于 AOTF 的分子超光谱成像系统,系统光谱范围 550~1 000 nm,空间分辨率可达 0.061 5  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率可达 2 nm。分子超光谱成像系统主要基于 AOTF 的分光计、显微镜、面阵 CCD(OK-AM1530,有效像元 1 024  $\times$  1 024)、图像采集卡和工业计算机构成<sup>[16]</sup>。分子超光谱系统可以得到图像上任意像素点的光谱。新型量子点探测器光谱仪通过 C 口安装在分子超光谱成像系统上,两种光谱系统可以通过光路切换对生物样品中心微区进行成像和光谱对比,

如图 8 所示。

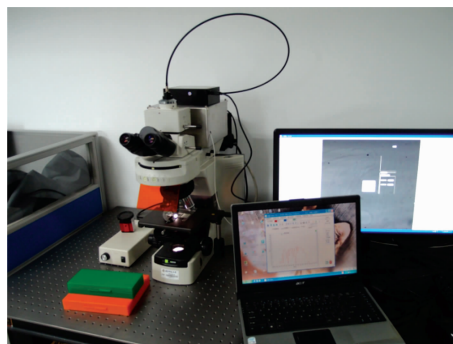


图 8 新型量子点光谱仪和分子超成像系统  
Fig. 8 New quantum dot spectrometer and molecular super-imaging system

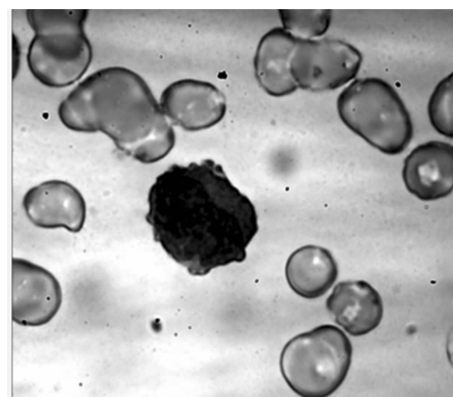


图 9 白血病人血细胞图像

Fig. 9 Leukemia human blood cell image

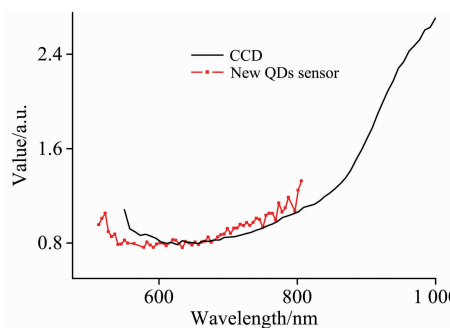


图 10 量子点光谱仪和分子超光谱成像系统测试的白血病人血细胞光谱对比

Fig. 10 Comparison of leukemia human blood cell spectra measured by quantum dot spectrometer and molecular hyperspectral imaging system

对白血病人异形淋巴核进行光谱测试和对比,白血病人血细胞图像如图 9 所示。通过新型量子点光谱仪和高光谱成像系统对白血病人血细胞进行光谱采集和对比,如图 10。两种光谱系统所测的白血病人细胞很接近,达到了相互验证,互为校正的目的。

### 3 结 论

对一种新型的光电探测器的工作原理和高灵敏度特性进行了研究,并建立一个简单的模型进行分析。常温下探测器

可以实现对  $0.01 \text{ pW}$   $632.8 \text{ nm}$  He-Ne 激光微光读出,在  $80.2 \text{ }\mu\text{s}$  积分时间下电压响应率达到  $7.0 \times 10^{11} \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ 。以探测器和自主设计的读出电路为核心研制成高灵敏度微型光谱仪,并与分子超光谱系统结合,实现生物样本光谱对比测试,实现了两种光谱测量系统的对比和校正。

### References

- [ 1 ] Vdovin E E, Levin A, Patane A, et al. *Science*, 2000, 290: 122.
- [ 2 ] Naser Faramarzpour, Jamal Deen M, Shahram Shiran, et al. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, 54(12): 3229.
- [ 3 ] Kartikeya Murari, Ralph Etienne-Cummings, Nitish V Thakor et al. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits And Systems*, 2011, 5 (5): 449.
- [ 4 ] Blakesley J C, See P, Shields A J, et al. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 067401.
- [ 5 ] Hees S S, Kardynal B E, Shields A J, et al. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(15): 153510.
- [ 6 ] Vdovin E E, Makarovskiy O, Patanè A, et al. *Physical Review B*, 2009, 79: 193311.
- [ 7 ] Wang Wangping, Hou Ying, Lu Wei, et al. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(2): 023508.
- [ 8 ] Weng Q C, An Z H, Lu W, et al. *Applied Physics Letters*, 2014, 105: 031114.
- [ 9 ] Wang M J, Yue F Y, Guo F M. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2015: 920805.
- [ 10 ] Hu B, Zhou X, Zheng H Z, et al. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2006, 33(2): 355.
- [ 11 ] Chiquito A J, Pusep Yu A, Mergulhão S, et al. *Physical Review B*, 2000, 61(7): 4481.
- [ 12 ] Lin S D, Ilchenko V V, Marin V V, et al. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(26): 263114.
- [ 13 ] Makarovskiy O, Vdovin E E, Patane A, et al. *Physical Review Letters*, 2012, 108(11): 117402.
- [ 14 ] Mehdi Habibi. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(3): 708.
- [ 15 ] Lundstrom T, Schoenfeld W, Lee H, et al. *Science*, 1999, 286: 2312.
- [ 16 ] Li Qingli, He Xiaofu, Guo Fangmin, et al. *Journal of Biomedical Optics*, 2013, 18(10): 100901.

## Low-Light-Level Readout Based on Quantum Dots-in-Well Photodetector at Room Temperature

MAO Feng<sup>1</sup>, WANG Ming-jia<sup>2\*</sup>

1. Electrical and Electronics Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

2. College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China

**Abstract** In this paper, the photoluminescence detection of quantum dot photodetector arrays is studied. The quantum dot detector adopts AlAs/GaAs/AlAs dual-barrier structure. In the wide GaAs well, there are InAs quantum dots (QDs) and  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  quantum Well (QW), and a simple device model for analysis is built. Under the irradiation of  $632.8 \text{ nm}$  He-Ne laser at room temperature, when the optical power is  $0.01 \text{ pW}$  and the bias voltage of the device is  $-0.5 \text{ V}$ , the integration time is  $80.2 \text{ }\mu\text{s}$  and the voltage response rate is  $7.0 \times 10^{11} \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ , which has a very high sensitivity. At the temperature of  $300 \text{ K}$ , this quantum dot detector can detect the very weak light whose power is less than  $10^{-14} \text{ W}$ . The high-sensitivity spectrometer and molecular hyperspectral system developed with this kind of quantum dot photodetector are used to detect biological tissue samples. A spectroscopic system for mutual verification and mutual calibration of biological tissues is developed.

**Keywords** Optoelectronics; Low-light-level; Microscopy hyperspectral; High-sensitivity

(Received Mar. 8, 2018; accepted Jun. 28, 2018)

\* Corresponding author