

# 量子点场效应晶体管单光子探测器的设计与特性分析

王红培 王广龙 邱鹏 高凤岐 卢江雷

(军械工程学院纳米技术与微系统实验室, 河北 石家庄 050003)

**摘要** 量子信息技术的发展对单光子探测器提出了更高的性能要求,新型的量子点单光子探测器具有很好的性能和发展潜力。研究了一种基于量子点场效应晶体管(QDFET)的单光子探测器,介绍了 QDFET 的光电导增益原理,对 QDFET 进行了材料选择和结构设计,并重点对 QDFET 的量子化光电导和增益的噪声平衡进行了实验分析,结果表明 QDFET 单光子探测在灵敏度、光子响应、光子分辨等方面具备很好的特性。

**关键词** 探测器;单光子;量子点场效应晶体管;异质结;量子点接触

**中图分类号** O433;TN312.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0118001

## Design and Characteristics Analysis of Single Photon Detector Based on Quantum-Dot Field Effect Transistor

Wang Hongpei Wang Guanglong Qiu Peng Gao Fengqi Lu Jianglei

(Laboratory of Nanotechnology and Microsystems, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

**Abstract** The developing of quantum information technology calls for single photon detector to have higher capability. As a new-style single photon detector, quantum-dot based single photon detector has good potential. A single photon detector based on quantum-dot field effect transistor (QDFET) is researched. The photoconductive gain mechanism of QDFET is introduced. Then the material is chosen and the structure is designed. It's laid stress on the experimental analysis of photoconductance quantization and noise equations. The results indicate that the single photon detection based on QDFET has great characteristic in sensitivity, photon response and photon resolution ratio.

**Key words** detectors; single photon; quantum-dot field effect transistor; heterostructure; quantum point contact

**OCIS codes** 040.5570; 270.5570; 040.1880

### 1 引言

单光子探测作为一项重要的极微弱信号检测技术,是量子保密通信的关键和核心技术,它决定了通信系统的安全传输距离及误码率等重要性能指标。近年来,包括量子计算、量子密钥分发等在内的量子信息技术飞速发展<sup>[1,2]</sup>,对单光子探测器提出了极其苛刻的性能要求,如探测效率、计数率、光谱响应范围和光子数分辨率等都远远超出现有器件性能<sup>[3,4]</sup>。为满足这些日益增长的需求,量子点单光子探测器作为新型高性能单光子探测器的代表之

一,展现出了很好的性能和发展潜力,受到国内外研究者的极大关注。

量子点单光子探测技术主要是利用量子点来捕获单光子并产生光生载流子达到探测的目的。基于这一原理,目前研究中主要有基于量子点场效应晶体管(QDFET)结构的单光子探测<sup>[5,6]</sup>和基于量子点共振隧道二极管(QDRTD)结构的单光子探测<sup>[4,7]</sup>两种方案。本文以 QDFET 单光子探测器为研究对象,对 QDFET 进行材料的选择和结构设计,并对其光电导增益的相关特性进行了分析。

**收稿日期**: 2012-08-20; **收到修改稿日期**: 2012-09-26

**作者简介**: 王红培(1987—),男,博士研究生,主要从事单光子探测技术方面的研究。E-mail: realwhp@163.com

**导师简介**: 王广龙(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事微纳器件设计加工和量子通信等方面的研究。

E-mail: glwang2005@163.com

## 2 QDFET 单光子探测的光电导增益原理

QDFET 单光子探测主要是利用场效应晶体管内部的光电导增益原理。如图 1 所示,在 QDFET 内,当光子照射进来以后,产生光生载流子,光生载流子首先在导电沟道附近被俘获,使沟道内的能带结构发生了变化,并导致电子密度呈离散型的增大。在源极电场的的作用下,过剩的电子快速地迁移到漏极,同时,通过光生载流子的俘获使源极载流子密度得到了不断的补充。

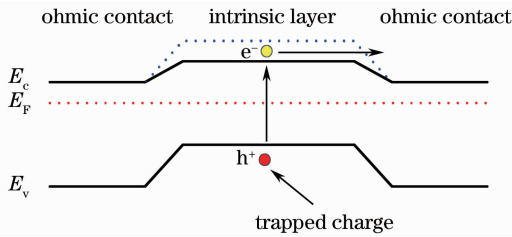


图 1 QDFET 的光电导增益

Fig. 1 Photoconductive gain mechanism of QDFET

与其他一些具有内部增益的光电导器件相似, QDFET 的这种增益实际上主要是源自于光生载流子的复合时间远远大于迁移时间。假设 QDFET 的入射光通量为  $\Phi$ , 光生自由电子的稳定态为  $R = \Phi\tau_r$ , 其中  $\tau_r$  是指自由电子的复合寿命。那么,当对结点外加偏压时,光电流  $I_p$  可表示为

$$I_p = \frac{R_c}{T_t} = \Phi \left( \frac{\tau_r}{T_t} \right), \quad (1)$$

式中  $T_t$  表示自由电子在结点之间的迁移时间。可以看出,与复合寿命相比,较短的迁移时间更有利于光电导增益。同样可以这样理解,一个光生载流子,在复合寿命内被捕获,同时电子迁移渡越了整个器件,而电中和的需要使结点瞬时产生了另外一个电子,也就是说单个光子的吸收导致了沟道内大量电子的迁移从而实现了增益。

本文所研究的 QDFET 单光子探测器,主要是利用人工势阱来俘获单个光生载流子,利用场效应晶体管的光电导增益实现单光子的探测。为此,探测器将采用量子点接触(QPC)和人工势阱的结构,并且通过调制掺杂异质结来产生稳态的电子。

## 3 QDFET 单光子探测器的材料选取及结构设计

### 3.1 材料选取

远距离单光子量子纠缠分发要求单光子探测器

具备将光子偏振信息转化成光电子自旋信息的能力。探测器仅仅对单光子具有灵敏度是不够的,重要的是将量子信息从光子传送到电子。相关研究表明,高光学效率的 III-V 族半导体异质结已经能够实现光子偏振信息到光电子自旋转换<sup>[8]</sup>,并且电子能够通过异质结进行相干转换并保留自旋信息<sup>[9]</sup>,这就为 QDFET 单光子探测器的材料选取提供了一个很好的选择。

在目前 III-V 族半导体异质结的研究过程中,关注较多的是  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  半导体异质结。对于  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , 当  $y \leq 0.3$  时,其晶格与 GaAs 相匹配。同时,  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  和 GaAs 的热膨胀系数相同,在两者之间可以形成理想的接口。另外,室温环境下, GaAs 的带隙为 1.4 eV, 而  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  的带隙为 1.7 eV, 两者之间的差异达到了导带能量的 60%, 正是这种能隙差异,使它们在电子学和光电子学方面得到了很大的应用。例如, AlGaAs/GaAs 异质结已经在自旋相干单光子探测方面展现出了很大的潜能<sup>[8]</sup>。

因此在 QDFET 的材料选取上,选择 AlGaAs 和 GaAs 构造了一个特殊的异质结-调制掺杂 AlGaAs/GaAs 异质结场效应管。在调制掺杂 AlGaAs/GaAs 异质结内,掺杂剂位于 AlGaAs 势垒层中,同时在其迁移电子和离子化施主之间,本征隔离层形成了一个分离空间,其材料结构和能带结构分别如图 2 和图 3 所示。另外,由于 AlGaAs 和 GaAs 之间的导带偏移,在调制掺杂 AlGaAs/GaAs 异质结接口处形成了一个三角势阱,当电子由施主 AlGaAs 层迁移到 GaAs 层中时,就被势阱所俘获。这时电子在生长方向的运动是受限的,但在异质结平面方向的运动是自由的,从而在交接处形成了一个二维电子层,即二维电子气(2DEG)。同时, AlGaAs 和 GaAs 掺杂层之间是未掺杂层,使沟道内的电子具有很高的迁移率。QDFET 的材料构成

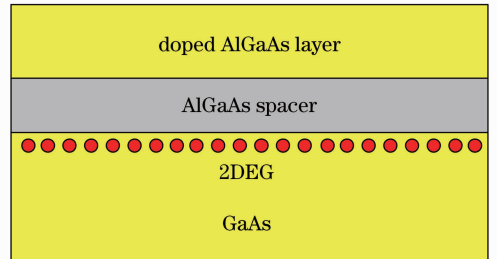


图 2 调制掺杂 AlGaAs/GaAs 异质结的材料结构  
Fig. 2 Material structure of doping AlGaAs/GaAs heterostructure

如表 1 所示。

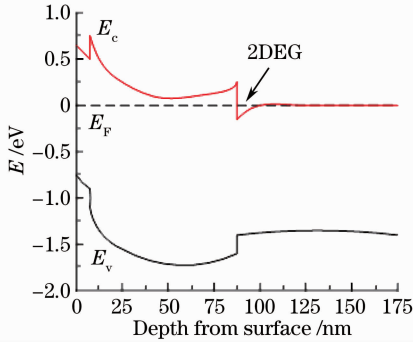


图 3 调制掺杂 AlGaAs/GaAs 异质结的能带结构

Fig. 3 Conduction band of doping AlGaAs/GaAs heterostructure

表 1 QDFET 的材料构成  
Table 1 Material of QDFET

No.	Material	Thickness / nm	Doping / ( $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )
1	GaAs	5	1
2	n-AlGaAs	60	1
3	i-AlGaAs	30	
4	GaAs buffer	500	
5	Si GaAs substrate		

### 3.2 结构设计

为了使 QDFET 具有高的灵敏度,在其结构设计中采用了一个 QPC 结构。运用分裂栅技术,可以在调制掺杂 AlGaAs/GaAs 异质结场效应管的栅极之间形成一个压缩空间,也就是通常所说的量子点接触,其宽度与 2DEG 中电子的费米波长相当。在目前 QPC 的研究中,一般有横向和垂直两种结构, QDFET 的设计采用的是横向的 QPC 结构。在 QPC 结构中,电子迁移的一个典型特征是其电导呈现  $2e^2/h \sim 1/13 \text{ k}\Omega$  的阶梯型量子化<sup>[10]</sup>,图 4 是其量子化电导示意图。从图中可以看出,随着栅极电压的负偏置递增,沟道宽度随着增加,同时由于在生

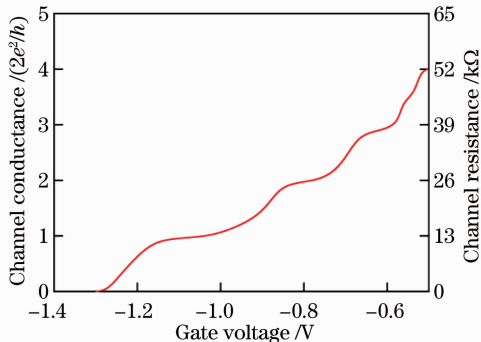


图 4 QPC 的量子化电导示意图

Fig. 4 Photoconductance quantization of QPC

长方形的空间限制,垂直于迁移方向的电子动量呈现类似于量化的离散值,而在迁移方向,电子动量呈现连续值。

## 4 实验分析

QPC 结构的采用和量子化光电导增益是 QDFET 的典型特征,同时也决定着器件的整体性能,因此首先对 QDFET 的光电导量子化进行了实验分析。另外,同其他探测器件一样,暗噪声也是影响 QDFET 性能的重要因素,因此光电导增益的噪声平衡分析也是必不可少的,以期对 QDFET 的暗噪声特性和光子分辨能力有一定的了解。

### 4.1 实验设计

图 5 为 QDFET 探测器的实验原理图,从中可以大致看出器件的 QPC 结构和材料构成。在实验设计上,使用了一个钨丝电灯泡作为光源,其发出的白光首先经过一个光栅光度计发生衍射,然后经过分光计得到波长为 550 nm (或 700 nm) 的单色光,最后经过 20 dB 的中性滤光片进行衰减,并通过纤芯为 200  $\mu\text{m}$  的阶跃折射光纤,以直径为 1 nm 的光点照射到样品上,同时将温度保持在 4.2 K。如图 5 所示,两个分裂栅极之间的区域(有效面积为  $3 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ ),是吸收光生载流子的敏感区域。如果入射光以直径为 1 nm 的最大值全波点服从高斯分布,则分裂栅极之间狭小的有效区域的实际光通量为  $7 \times 10^{-9}$ ,小于总通量。用一个硅探测器对光纤端口的功率进行测量,在波长为 550 nm 时将其调整为 9 pW,使分裂栅之间实现微弱的光通量,其大小为  $9 \text{ pW} \times 7 \times 10^{-9} / (h\nu) = 0.175 \text{ s}^{-1}$ 。

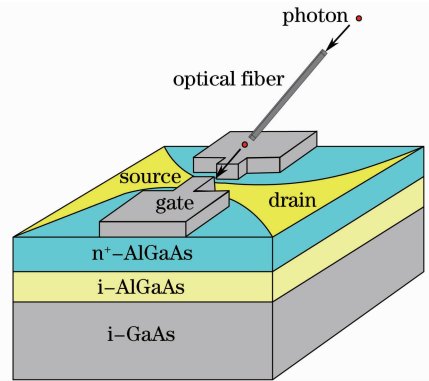


图 5 QDFET 探测器的实验原理图

Fig. 5 Schematic diagram of QDFET operation

另外,器件两端加有一个恒定的 0.5 mV 的源漏电压;一个低噪声室温电流前置放大器 (SR 570),其增益设置为 50 nA/V,用以源漏电流

的放大;一个低噪声电压源,用以给分裂栅加偏压;输出电压通过一个高精度数字多用表读出。

### 4.2 光电导量化

QPC 的电导,根据波长呈现阶梯型变化,使沟道的电导率增加或减小,同时许多研究表明,电导率的量化是由栅极电压的调制引起的<sup>[10,11]</sup>。通过实验,得到 QDFET(长度 100 nm,宽度 300 nm)的电导曲线如图 6 所示,包括 700 nm 和 550 nm 两种不同波长的电导函数。从图中曲线可以看出,电导率的变化主要有两个阶段,一个在  $2e^2/h$  附近,另一个在  $2 \times 2e^2/h$  附近。随着栅极电压的增加,由于 QPC 沟道的电子波导态的连续迁移,可以看出器件的电导率同预期一样呈现阶梯型的增大。

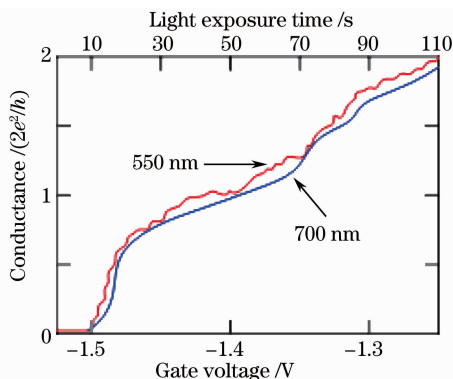


图 6 QDFET 的电导函数曲线

Fig. 6 Conductance function curve of QDFET

在图 6 中,上侧的横轴表示的是照射时间,下侧的横轴表示的是持续增大的栅极电压。当栅极电压大于阈值  $-1.5$  V 时,电子沟道开始产生电导阶梯。可以看出,在波长 700 nm 的弱光源照射下,固定偏压下正电荷被俘获,电子波导沟道开通,产生与 550 nm 波长照射时几乎相同的电导阶梯。另外,在图 6 中,当光开始照射后,自  $t=0$  开始的一段区域内,随着栅极外加电压的增大,电导率却为一固定值。这主要是由于光子的吸收在电子沟道附近产生受限制的正电荷,然后正电荷被俘获并逐渐地累积,从而使栅极电压减小。其实,在光照射刚开始的一段时期内,如果照射过早地终止,电导率将会是恒定不变的。

### 4.3 光电导增益的噪声平衡

为了解光电导增益的噪声平衡,对 QDFET 光电导输出的一个信号阶梯进行分析。随着一个光子的吸收,从图 6 中可以看出,输出信号开始上升,其时间相关性为

$$D(t) = \Delta D u(t) + D_0, \quad (2)$$

式中  $\Delta D$  为阶梯振幅,  $u(t)$  为赫德赛德函数,当  $t=0$  时为光子脉冲的到达时间。QDFET 输出信号阶梯持续仅仅数秒时间,运用一个平均相差过滤器,可得到其脉冲响应为

$$w(t) = -u(t + T/2)u(-t) + u(t)u(T/2 - t), \quad (3)$$

根据标准信号处理理论,阶跃信号  $S(t) = w(t=0)$   $D, t=0$  时,输出时间序列达到峰值,可得到

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} D(t)w(t)dt = \Delta D T / 2, \quad (4)$$

和预期的一样,阶跃振幅随着测量周期呈线性增大。

表面看起来,QDFET 的测量周期  $T$  越长,测量结果的平均值与实际值越接近,其实最佳的平均周期还与噪声的性质有关。所以先对噪声结果进行分析,特别是噪声光谱影响下的输出结果。一般来讲,低频噪声源的光谱密度为  $1/f$ ,在一个系数为  $B$  的  $1/f$  噪声影响下,QDFET 的输出噪声光谱密度  $N(f) = B^2/f$ 。运用平均相差滤波器以增加噪声的频率成分,得到

$$W(f) (2\pi f/i) \sin^2(\pi f T / 2), \quad (5)$$

也就是  $W(t)$  的傅里叶变换。应用平均相差滤波器,对噪声影响下 QDFET 输出的一系列的信号阶梯进行处理,以对阶跃信号进行一个完整的测量。对于阶跃信号的测量结果,其振幅分布有一个平均的大小  $S$  和标准偏差  $\sigma$ ,其中  $\sigma$  主要取决于平均相差滤波器中的光谱含量和噪声光谱密度,通过噪声光谱可以计算出来

$$\sigma = \left[ \int_0^{\infty} W^2(f) N(f) df \right]^{1/2}, \quad (6)$$

于是得出

$$\sigma = B T \sqrt{\ln 2}, \quad (7)$$

可以看出,  $\sigma$  代表着信号噪声,随着  $T$  呈线性的增大。因此,探测器的信噪比(SNR)与  $T$  无关:

$$f_{\text{SNR}} = \frac{S}{\sigma} = \frac{\Delta D}{2B \sqrt{\ln 2}}, \quad (8)$$

因此,只要  $1/f$  噪声是主导噪声源,QDFET 可以运行得很快,且其对单光子的敏感度没有任何减弱。当然,在某些频段,相比于热杂讯层,  $1/f$  噪声会更大地削弱 QDFET 的敏感度,但是对于高电子迁移率 QDFET 而言,噪底的转角频率能够达到千兆赫的范围。

对于 QDFET,阶跃信号输出结果  $S_1/\sigma$  比率的大小决定了其区分单光子信号和噪声信号的能力,

其中  $S_1$  表示一个单光子所产生阶跃信号的平均振幅。测量结果表明,当  $S_1/\sigma = 3$  时,噪声信号开始从单光子信号中分离出来。因此对于 QDFET 而言,  $S_1/\sigma = 3$  相当于一个评判标准,能够很好地评定其对单个光子的敏感度。相应地,  $1/f$  噪声的系数  $B(S_1/\sigma = 3)$ , 可由(8)式计算得出

$$B(S_1/\sigma = 3) = \frac{\Delta D_1}{6 \sqrt{\ln 2}} \approx 0.2 \Delta D_1, \quad (9)$$

式中  $\Delta D_1$  表示一个单光子产生的信号的振幅。那么,受噪声光谱密度所影响,此时 QDFET 的单光子敏感度(SPS)为

$$N_{\text{SPS}}(f) = \frac{(\Delta D_1)^2}{36 \ln 2 f}, \quad (10)$$

显而易见,若  $S_1/\sigma = R$ , 则噪声光谱密度影响下的单光子敏感度为

$$N_{\text{R}}(f) = \frac{(\Delta D_1)^2}{4R^2 \ln 2 f}. \quad (11)$$

图 7 所示是对 QDFET 输出噪声光谱密度进行放大后的平方根。如图中所示,实线为 SPS 线,表示在给定频率下单光子探测的最大允许噪声。由(6)式可知,  $\sigma$  是被  $W(f)$  加权的,  $W(f)$  在频率  $f_m = 1/T$  左右时达到峰值最大值,此时噪声对  $\sigma$  影响较大。因此,如果  $f_m$  左右的噪声光谱在 SPS 线下面,低于频率  $f_m$  时 QDFET 有很好的单光子敏感度。当然,这种结论不太适用于高共振噪声和时间相关噪声。

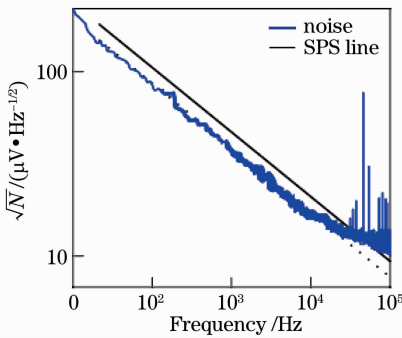


图 7 QDFET 输出噪声光谱密度的平方根

Fig. 7 Square root of the noise spectral density for QDFET detector amplified output

## 5 结 论

介绍了 QDFET 单光子探测的光电导增益原

理,然后对 QDFET 进行了材料选择和结构设计,选取调制掺杂 AlGaAs/GaAs 异质结来产生稳态的电子,采用 QPC 和人工势阱的结构俘获和束缚光生载流子,利用场效应晶体管的光电导增益实现单光子的探测。最后,对 QDFET 单光子探测实验进行了设计,重点对 QDFET 的量子化光电导和增益的噪声平衡进行了深入分析。相比传统的光电探测器, QDFET 单光子探测器在灵敏度、光子响应、光子分辨等方面都拥有很好的性能,具有广阔的应用前景和巨大的研究价值。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Shuai, Wang Jindong, Zhong Pingping *et al.*. Influence of time jitter on quantum bit error rate of phase-coding quantum key distribution system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0727001
- 2 Lü Hongjun, Jie Guangjun. Coding and correcting circuits for two-quantum errors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0527001
- 3 Lin Yandong, Lü Liang, Bai Shan. Determination of spectral quantum efficiency of silicon photodetector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1212005
- 4 H. W. Li, P. Simmonds, H. E. Beere *et al.*. Quantum dot resonant tunneling diodes for telecom wavelength single photon detection [C]. *SPIE*, 2007, **6766**: 67660N
- 5 M. A. Rowe, E. J. Gansen, M. Greene *et al.*. Single-photon detection using a quantum dot optically gated field-effect transistor with high internal quantum efficiency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(25): 253505
- 6 B. E. Kardynal, S. S. Hees, A. J. Shields. Photon number resolving detector based on a quantum dot field-effect transistor [J]. *Appl. Phys.*, 2007, **90**(18): 181114
- 7 J. C. Blakesley, P. See, A. J. Shields *et al.*. Efficient single photon detection by quantum dot resonant tunneling diodes [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(6): 067401
- 8 R. Vrijen, E. Yablonovitch. A spin-coherent semiconductor photodetector for quantum communication [J]. *Physica E*, 2011, **10**(4): 569~575
- 9 I. Malajovich, J. M. Kikkawa, D. D. Awschalom *et al.*. Coherent transfer of spin through a semiconductor heterointerface [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(5): 1015~1018
- 10 D. A. Wharam, M. Pepper, H. Ahmed *et al.*. Addition of the one-dimensional quantised ballistic resistance [J]. *J. Phys. C*, 1988, **21**(24): 887~891
- 11 B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker *et al.*. Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **60**(9): 848~850