

新型量子点场效应增强型单光子探测器*

王红培^{1)2)†} 王广龙¹⁾ 倪海桥²⁾ 徐应强²⁾ 牛智川²⁾ 高凤岐¹⁾

1)(军械工程学院, 纳米技术与微系统实验室, 石家庄 050003)

2)(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

(2013年4月2日收到; 2013年5月20日收到修改稿)

针对量子点场效应单光子探测器 (QDFET) 光吸收效率低下的问题, 提出了一种新型量子点场效应增强型单光子探测器 (QDFEE-SPD). QDFEE-SPD 增加了共振腔的设计, 并采用了 GaAs/AlAs 多层膜作为下反射镜; 对 QDFEE-SPD 的光吸收增强效应和光响应度进行了理论分析和模拟, 结果表明, 与没有共振腔时相比, QDFEE-SPD 的吸收效率和光相应度都有了大幅度的提升, 同时为了光吸收的最优化, 吸收层厚度一般应在 0.1—0.5 μm ; 对 QDFEE-SPD 的材料样品进行了生长和测试实验, 反射谱测试和 PL 谱测试结果表明, QDFEE-SPD 对入射光的吸收具有了明显的增强效应. 文章成果为高效率量子点场效应单光子探测技术的研究提供了新的思路.

关键词: QDFEE-SPD, 共振腔, 吸收效率, 光吸收增强效应

PACS: 42.60.Da, 85.30.Tv, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.62.194205

1 引言

随着信息技术的发展, 对光信号探测的灵敏度要求越来越高. 作为微弱信号探测的极限, 单光子探测是量子密钥分发^[1,2]、量子计算协议^[3,4]等量子信息科学领域快速发展的主要推力之一, 也在生物化学等学科中发挥着重要作用. 同时新材料技术^[5,6]、生长技术^[7]和微纳加工技术^[8,9]等相关领域的发展, 为实现高精度的单光子探测提供了技术保证. 1999年 Shields 小组^[10]成功研制了一种量子点场效应单光子探测器 (quantum-dot gated field effect transistor, QDFET), 具有较高的量子效率、极低的暗计数率和工作电压, 从而引起了广泛的关注^[11–13].

QDFET 具有很高的内部增益, 然而其单光子探测的整体效率却只有 2%—3%^[11]. 究其原因主要是由于探测器的光吸收效率低下, 光入射以后仅有一小部分被吸收层所吸收, 其余很大一部分入射光在经过隔离层以后, 直接进入了衬底, 这大大影响了器件整体效率的提升. 针对此问题, 本文

提出了一种新型的量子点场效应增强型单光子探测器 (quantum-dot gated field effect enhanced single-photon detectors, QDFEE-SPD), 通过共振腔的引入和优化设计, 提高探测器对入射光的吸收效率.

2 QDFEE-SPD 的方案设计

如图 1 所示为 QDFEE-SPD 的基本结构示意图, 在顶部栅极和场效应管沟道之间有一层量子点层, 沟道下面有一层 Si 掺杂层为沟道提供电子形成二维电子气 (2DEG). 其探测原理与 QDFET 类似, 工作时对栅极加负压, 光子入射后在 GaAs 沟道中被吸收, 产生电子空穴对, 空穴被量子点捕获, 电子进入导电沟道, 从而利用量子点捕获空穴对沟道的调控作用来实现单光子探测. 与 QDFET 相比最大的不同之处在于, QDFEE-SPD 的吸收层和 2DEG 外围增加了一个 DBR 共振腔, 使入射光进入腔内以后得到共振增强, 从而提高吸收层的光吸收效率.

另外, 由图 1 中也可以看出, QDFEE-SPD 的共振腔只有一组下反射镜, 这主要是由于 DBR 反射镜增加的同时也会带来很大的串联电阻^[14,15],

* 国家自然科学基金 (批准号: 61274125) 和北京市自然科学基金 (批准号: 11DB1262) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: realwhp@163.com

对于极微弱信号探测器 QDFEE-SPD 而言, 其光电增益和高速响应等性能会受到严重的影响. 因此, QDFEE-SPD 共振腔的设计采用了一种无上反射镜的结构, 实际上也就是利用空气/半导体界面作为上反射镜. 同时下反射镜置于衬底之中, 与顶层的空气/半导体界面之间形成一个共振腔, 这样的设计就避免了给探测器带来额外的电阻.

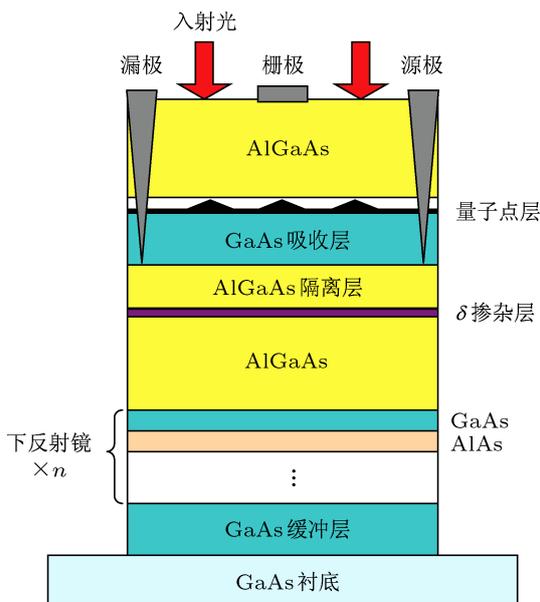


图 1 QDFEE-SPD 的基本结构

3 QDFEE-SPD 共振腔的设计和理论模拟

3.1 下反射镜的设计

QDFEE-SPD 共振腔的下反射镜采用的是高低折射率交替生长的 GaAs/AlAs 多层膜结构, 每层膜厚 $\lambda_0/4$ (λ_0 为 DBR 的中心波长)^[16]. 选用 GaAs/AlAs 材料主要是由于它们和 QDFEE-SPD 的 GaAs 衬底及它们彼此之间拥有良好的晶格匹配, 同时这两种材料具有较大的折射率差, 有利于高反射率的实现.

首先采用光学传输矩阵法对 GaAs/AlAs 多层膜的光学特性进行分析. 对于单层介质薄膜而言, 如果定义薄膜界面的电场向量和磁场向量分别为

E 和 H , 则其薄膜和衬底组合的特征矩阵^[17]可表示为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{j}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, η_1, η_2 为有效折射率 (修正导纳), δ_1 为薄膜的光学相位差, 光学导纳 $B = \frac{E_0}{E_2}$, $C = \frac{H_{\text{切向}} E_0}{E_{\text{切向}} E_2}$. 则对于 m 层 GaAs/AlAs 多层膜而言, 可以推导出其多层膜和衬底组合的组合矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_i & \frac{j}{\eta_i} \sin \delta_i \\ j\eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{m+1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 δ_i 为第 i 层的光学相位差. 从而, 根据特征矩阵可求得 m 层 GaAs/AlAs 多层膜的反射率 R 为

$$R = \frac{(\eta_0 B - C)(\eta_0 B - C)^*}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}. \quad (3)$$

以中心波长为 800 nm 为例, 根据上面公式, 对不同对数 GaAs/AlAs 多层膜的反射率进行了模拟. 通过计算得到, 800 nm 时 GaAs, AlAs 的厚度分别为 61.05 nm, 59.95 nm, 折射率分别为 3.65, 3.02. 模拟过程中温度设为 300 K, 模拟结果如图 2 所示.

由图 2 中可以看出, 随着 GaAs/AlAs 多层膜对数的增加, 中心波长处的反射率逐渐增大. GaAs/AlAs 多层膜对数为 5 时, 反射率只有 45%, 当对数为 10 时, 反射率增加到 85%, 当增多到 20 对时, 反射率已经高达 99.9%. 上述结果表明, GaAs/AlAs 多层膜的对数增加到 20 对时可以得到反射率接近 100% 的下反射镜. 同时, 从图中也可以看出, 随着 GaAs/AlAs 多层膜对数的增加, 反射谱的高反带边变化越来越陡直, 其高反带也逐渐趋于平整.

3.2 QDFEE-SPD 的光吸收增强效应

根据腔体内的光场理论^[18], 对于 QDFEE-SPD 的共振腔而言, 如果定义其上下反射镜的反射率分别为 R_t 和 R_b , 则吸收层的吸收效率 ρ 可表达为

$$\rho = \frac{P_{\text{吸}}}{P_{\lambda}} = \frac{1 + R_b e^{-\alpha d}}{1 - 2\sqrt{R_t R_b} e^{-\alpha d} \cos(2\beta L + \psi_t + \psi_b) + R_t R_b e^{-2\alpha d}} (1 - R_t)(1 - e^{-\alpha d}), \quad (4)$$

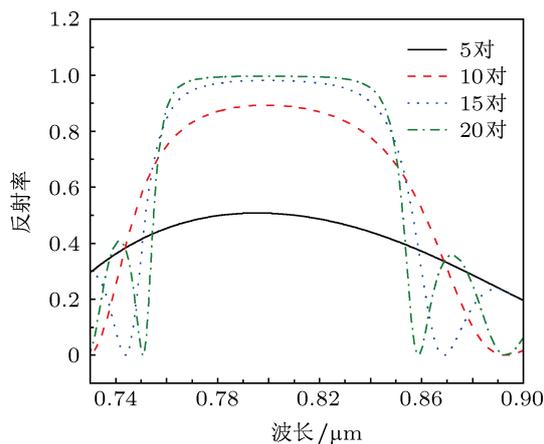


图2 中心波长 800 nm 的 GaAs/AlAs 多层膜反射谱

其中, L 为腔长, d 为吸收层厚度, α 为吸收层材料的吸收系数, ψ_t, ψ_b 为入射光在上下反射镜处的相位移, 传播常数 $\beta = 2n\pi/\lambda_0$ (n 为材料折射率). 根据共振腔的共振条件, 当 $2\beta L + \psi_t + \psi_b = 2m\pi$ 时 ($m = 1, 2, 3, \dots$), 即在中心波长 λ_0 处, 入射光发生共振增强, 那么此时吸收层光的吸收效率达到峰值.

$$\rho_{\max} = \frac{(1 + R_b e^{-\alpha d})}{(1 - \sqrt{R_t R_b} e^{-\alpha d})^2} (1 - R_t)(1 - e^{-\alpha d}). \quad (5)$$

通过 (5) 式可以发现, 实际上探测器的光增强效应主要体现在公式中包含有 R_t 和 R_b 的项, 那么将 (5) 式中的 R_t 和 R_b 项合在一起, 可以定义其为探测器的最大光吸收增强因子 f ,

$$f = \frac{(1 + R_b e^{-\alpha d})}{(1 - \sqrt{R_t R_b} e^{-\alpha d})^2} (1 - R_t). \quad (6)$$

根据本文 QDFEE-SPD 的共振腔的设计, 上反射镜为空气/半导体材料, $R_t = 0.3$, 理想状况下下反射镜反射率 $R_b = 1$, 则 (5) 式和 (6) 式为吸收层厚度 d 的函数. 一般情况下, 吸收层材料的吸收系数 $\alpha = 5000\text{--}10000 \text{ cm}^{-1}$, 在 $\alpha = 5000 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\alpha = 10000 \text{ cm}^{-1}$ 两种条件下, 我们对 QDFEE-SPD 吸收层厚度分别与入射光的最大吸收效率和光吸收增强因子的关系规律进行了模拟.

图 3 为 QDFEE-SPD 的光吸收增强因子与吸收层厚度的关系. 从图中可以看出, 当 QDFEE-SPD 的吸收层厚度 d 为 $0.01 \mu\text{m}$ 时, 光吸收增强因子的大小接近于 7, 当 d 逐渐增大时, f 迅速减小, 最小甚至降到 1 以下. 这主要是由于随着 QDFEE-SPD 的吸收层厚度的增大, 吸收层对入射光的吸收能力也逐步增强, 大部分入射光在吸收层内就会被吸收, 到达下反射镜的入射光大幅度减弱, 导致 QDFEE-SPD 的光增强效应也迅速下降. 可以看出, 实际

上光吸收增强因子 f 直接反映了共振腔引入以后 QDFEE-SPD 的光吸收增强效应的大小.

图 4 为最大光吸收效率与吸收层厚度的关系. 图中把 QDFEE-SPD 的最大光吸收效率与没有共振腔时探测器的最大光吸收效率进行了对比, 其中虚线和实线分别表示 $\alpha = 5000 \text{ cm}^{-1}$ 和 10000 cm^{-1} 时的模拟结果. 由图中可以发现, 当吸收层厚度小于 $1 \mu\text{m}$ 时, 与没有共振腔时相比, 共振腔的引入使 QDFEE-SPD 的最大光吸收效率有了大幅度的提高, 其最大值甚至接近于 1; 当吸收层厚度大于 $1 \mu\text{m}$ 时, 光吸收增强效应迅速减弱, 导致 QDFEE-SPD 的最大光吸收效率也开始下降.

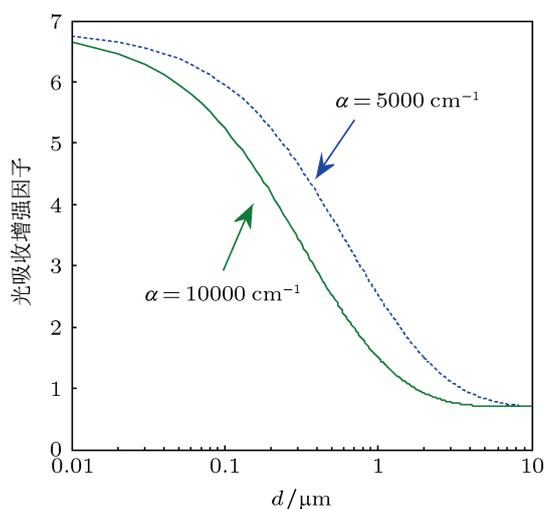


图3 QDFEE-SPD 的光吸收增强因子与吸收层厚度的关系

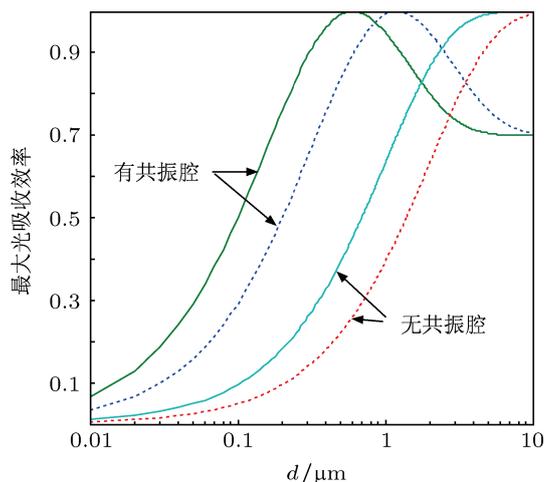


图4 最大光吸收效率与吸收层厚度的关系

由上述模拟结果可以看出, 吸收层的厚度并不是越大越好, 应该综合考虑吸收层厚度对光吸收增强效应和光吸收效率的影响. 所以, QDFEE-SPD 的吸收层厚度一般应在 $0.1\text{--}0.5 \mu\text{m}$, 此时最大光吸

收效率能达到峰值左右,同时也具有明显的光吸收增强效应.

3.3 QDFEE-SPD 的光响应度

QDFEE-SPD 的探测效率主要取决于光吸收效率和内部增益的大小,因此,光吸收效率的提高也就意味着 QDFEE-SPD 探测效率的提高.为了进一步说明共振腔对 QDFEE-SPD 探测性能的影响,接下来将对 QDFEE-SPD 的光响应度进行分析.

QDFEE-SPD 的光响应度可定义为^[19]:单位入射光功率(P_λ)作用到探测器后在外电路产生的光电流大小(ΔI),用 R 来表示: $R = \Delta I/P_\lambda$. 而 $\Delta I = g_m \frac{eW}{\epsilon'A} N^{[13]}$, 其中 g_m 为跨导, W 为顶部栅极与量子点层之间的距离, ϵ 和 A 分别为介电常数和光吸收面积, N 为量子点束缚的光生空穴数.理想状态下,光生空穴全部被量子点所束缚, $N = P_{\text{吸}}/(h\nu/\lambda)$, 则 R 可表示为

$$R = g_m \frac{eW}{\epsilon'A} \cdot \frac{N}{P_\lambda} = g_m \frac{eW}{\epsilon'A} \cdot \frac{P_{\text{吸}}}{\lambda P_\lambda} = g_m \frac{eW\lambda}{\epsilon'Ah\nu} \rho. \quad (7)$$

由于 QDFEE-SPD 的吸收层采用的是 GaAs 材料,通过计算可知其本征吸收长波限为 867 nm.在本征吸收限内,当吸收层厚度为 150 nm 时,对 QDFEE-SPD 的响应度与波长的关系进行了模拟,模拟过程中相关参数大小借鉴于 Gansen1 等^[13]的研究成果,模拟结果如图 5 所示.从图中可以看出,有共振腔时, QDFEE-SPD 的光响应度最大达到了 2.4×10^8 A/W,在探测的中心波长 800 nm 处为 2.2×10^8 A/W,是没有共振腔时的 2 倍左右.可见,共振腔的增加使 QDFEE-SPD 的光响应度有了很大的提高,这也就意味着 QDFEE-SPD 的单光子探测能力的大幅度提升.

4 QDFEE-SPD 样品的生长测试与结果讨论

在前面理论分析结果基础上,对探测器进行了材料样品的生长和测试实验.实验过程中采用半绝缘(SI) GaAs (100) 为衬底,在 Veeco Gen II 分子束外延设备上进行样品的外延生长.针对 800 nm 的入射光波长,采用了 20 对 GaAs/AlAs DBR 作为下反射镜,样品的具体结构参数如表 1 所示.在 GaAs

衬底上依次生长 400 nm GaAs 缓冲层,20 对交替生长的 GaAs/AlAs 多层膜,400 nm 的 $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 势垒层, Si- δ 掺杂层, $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 隔离层,150 nm 的 GaAs 二维电子气沟道层, InAs 量子点层,5 nm 的 GaAs 浸润层,30 nm 的 $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 阻挡层,掺杂浓度为 $1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 厚度为 120 nm 的 $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ 势垒层,掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 GaAs 接触层.

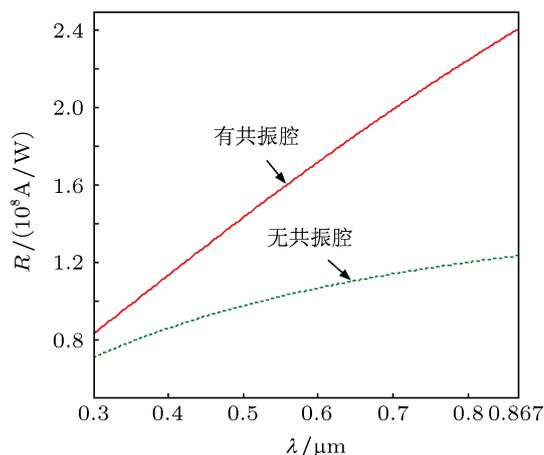


图 5 光响应度与波长的关系

表 1 QDFEE-SPD 的样品材料结构

材料	材料层参数	
GaAs	10 nm	Si: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	120 nm	Si: $1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
$\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	30 nm	
GaAs	5 nm	
InAs 量子点	2.063 ML	
GaAs	150 nm	
$\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	30	
δ 掺杂层		Si: $7.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
$\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$	563.67 nm	
GaAs	54.86 nm	
	$\times 20$	
AlAs	66.20 nm	
GaAs	400 nm	
GaAs 半绝缘衬底 (100)		

外延生长完样品后,在室温 300 K 的条件下,进行了反射谱测试和 PL 谱测试.如图 6 和图 7 所示,反射谱测试和 PL 谱测试的测试结果显示,共振腔的高反带中心为 796.8 nm,腔模中心为 801.45 nm,与预期设计基本相符合.反射谱测试结果也显示出,腔模中心两侧的高反带宽度并不对称,这可能是由于材料生长的不均匀所引起的.

由测试结果可以发现, 在腔模中心处的反射率相比于峰值反射率有一个明显低谷, 说明器件对光吸收有了一个明显的增强, 但增强效果还不是特别大. 我们分析这是由于在设计过程中忽略了驻波效应影响的原因, 实际上共振腔内光场的分布是不均匀的, 共振腔的光吸收增强效应与吸收层在腔内的空间位置有着密切的关系. 一般来讲, 驻波效应^[18]可以用下式来表示:

$$\text{SWE} = \frac{\alpha_{\text{eff}}}{\alpha} = \frac{1/d \int_{L_1}^{L_1+d} |E^2|(z, \lambda) dz}{2/\lambda \int_0^{\lambda/2} |E^2|(z) dz}, \quad (8)$$

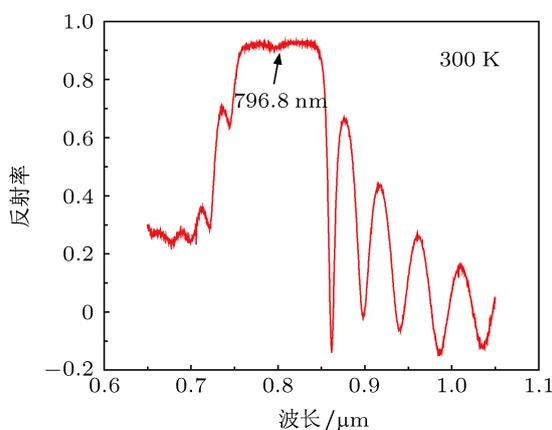


图6 QDFEE-SPD 材料样品的反射谱

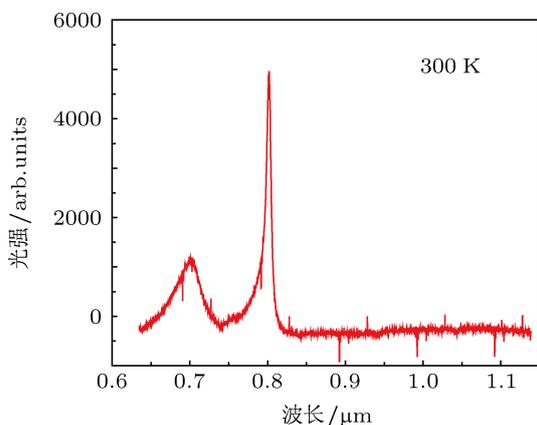


图7 QDFEE-SPD 材料样品的 PL 谱

其中 z 为材料生长方向. 对于 QDFEE-SPD 所采用的共振腔, 当中心波长为 800 nm 时, 理想状态下, 下反射镜反射率为 100%, 吸收层位于腔体正中, 则其驻波效应可以简化为

$$\text{SWE} = 1 \pm \left(\frac{0.8}{2n\pi d} \right) \sin \frac{2n\pi d}{0.8}, \quad (9)$$

其中, “+” 和 “-” 分别表示吸收层中心位于驻波最大和最小处. QDFEE-SPD 共振腔的驻波效应如图

8 所示. 可以看出, 当吸收层厚度小于 30 nm 时, 探测器共振腔的驻波效应相当大; 当吸收层厚度大于 30 nm 逐渐增加时, 驻波效应迅速下降; 当吸收层厚度大于 1000 nm 时, 驻波效应的波动已经很小, 此时其影响基本可以忽略.

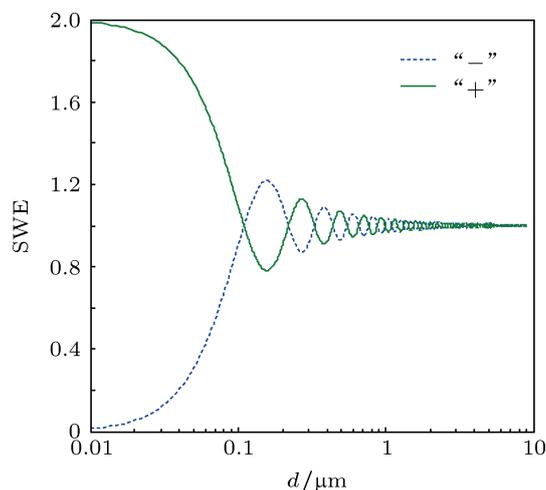


图8 QDFEE-SPD 共振腔的驻波效应 ($\lambda_0 = 800 \text{ nm}$)

5 结论

针对量子点场效应单光子探测器吸收效率低下的问题, 本文提出了一种新型的量子点场效应增强型单光子探测器 (QDFEE-SPD), 通过在吸收层和 2DEG 外围增加一个 DBR 共振腔的设计, 使器件对光吸收有了一个增强效应. 文章采用了 GaAs/AlAs 多层膜作为 QDFEE-SPD 共振腔的下反射镜, 对不同对数 GaAs/AlAs 多层膜的光学特性进行了分析, 分析结果表明当 GaAs/AlAs 多层膜的对数增加到 20 对时, 可获得高达 99.9% 的反射率; 对 QDFEE-SPD 共振腔的光吸收增强效应和光相应度进行了理论模拟, 模拟结果表明, 与没有共振腔相比, 采用共振腔设计后光吸收得到了明显的增强, 吸收效率和光响应度有了大幅度的提升, 同时为达到光吸收的最优化目的, QDFEE-SPD 的吸收层厚度一般应在 0.1—0.5 μm ; 对 QDFEE-SPD 的材料样品进行了生长和测试实验, 室温下的反射谱测试和 PL 谱测试结果表明, 腔体的设计符合预期的设计目的, QDFEE-SPD 的光吸收有了明显的增强效应, 但受到驻波效应的影响, 与预期的设计还有些差距, 还有待进一步优化. 文章的结果为 QDFEE-SPD 的进一步研究奠定了基础, 为高效率量子点场效应单光子探测技术的研究提供了新的思路.

- [1] Bennett C, Brassard G 1984 *International Conference on Computers, Systems & Signal Processing* Bangalore, India December 10–12, 1984 p175
- [2] Zhao N, Pei X C, Liu D, Quan D X, Sun X N 2011 *Acta Phys. Sin.* **9** 090307 (in Chinese) [赵楠, 刘丹, 权东晓, 孙晓楠 2006 物理学报 **9** 090307]
- [3] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C 2008 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [4] Ye B, Gu R J, Xu W B 2011 *Acta Phys. Sin.* **9** 3709 (in Chinese) [叶宾, 谷瑞军, 须文波 2006 物理学报 **9** 3709]
- [5] Lita A E, Miller A J, Nam S W 2008 *Optics Express* **16** 5
- [6] Rowe A M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 253505
- [7] Li H W 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 073516
- [8] Rosfjord K M, Yang J K W, Dauler E A 2006 *Opt. Express* **14** 527
- [9] Gol'tsman G N, Korneev A, Rubtsova I 2005 *Phys. Stat. Sol.* **5** 1480
- [10] Shields A J, O'Sullivan M P 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3673
- [11] Rowe M A, Gansen E J, Greene M, Hadfield R H, Harvey T E, Su M Y, Nam S W, Mirin R P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 253505
- [12] Kardynal B E, Hees S S, Shields A J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 181114
- [13] Gansen E J, Rowe M A, Greene M B, Rosenberg D, EHarvey T 2007 *Nature Photonics* **1** 585
- [14] Tong C Z, Niu Z C, Han Q, Wu R H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3651 (in Chinese) [佟存柱, 牛智川, 韩勤, 吴荣汉 2006 物理学报 **54** 3651]
- [15] Yoffe G W 1991 *Appl. Phys.* **70** 1081
- [16] Jewell Jack L, Harbison J P, Scherer A 1991 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **27** 1332
- [17] Yabl onovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [18] Ünlü M S, Strite S 1995 *Appl. Phys. Rev.* **78** 607
- [19] George Henry H 1989 *IEEE Transaction on Electron Devices* **36** 1390

Quantum-dot gated field effect enhanced single-photon detectors*

Wang Hong-Pei^{1)2)†} Wang Guang-Long¹⁾ Ni Hai-Qiao²⁾ Xu Ying-Qiang²⁾
Niu Zhi-Chuan²⁾ Gao Feng-Qi¹⁾

¹⁾ (Laboratory of Nanotechnology and Microsystems, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

²⁾ (National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 2 April 2013; revised manuscript received 20 May 2013)

Abstract

In order to solve the problem of low light absorption efficiency of single photon detectors based on quantum-dot gated field effect transistor (QDFET), a new type of quantum-dot gated field effect enhanced single-photon detectors (QDFEE-SPD) was proposed. QDFEE-SPD was designed with a resonant cavity, and the GaAs/AlAs multilayer was used as the basic mirror. The light absorption efficiency and responsivity of QDFEE-SPD were analyzed and simulated. Results show that, compared with that without cavity, the absorption efficiency and responsivity of the QDFEE-SPD is greatly improved. Also for the optimization of light absorption efficiency, the thickness of the absorption layer should normally be 0.1–0.5 μm . Then the material samples of QDFEE-SPD were grown and tested. Reflection spectroscopy and PL spectroscopy testing results show that the light absorption efficiency has been significantly enhanced. The achievements in this article provide a new way for researching high-efficiency single-photon detection technology based on QDFET.

Keywords: QDFEE-SPD, resonant cavity, absorption efficiency, optical absorption enhancement effect

PACS: 42.60.Da, 85.30.Tv, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.62.194205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61274125), and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 11DB1262).

† Corresponding author. E-mail: realwhp@163.com