

共振腔增强型光电探测器^{*}

傅竹西

(中国科学技术大学物理系 合肥 230026)

摘要 共振腔增强型光电探测器是近十年发展起来的新型探测器. 它是在探测器内制备微共振腔并在中间插入激活层构成的. 在这种结构中, 由于共振腔对非共振波长的抑制及对共振光场的放大作用, 使探测器的量子效率在共振波长处被增强, 带宽 - 量子效率之积比传统的光电二极管提高了近 3 倍. 由于它同时具备对波长的选择作用和高频响应特性, 因而是光通信理想的探测器件.

关键词 共振腔增强型光电探测器

RESONANT CAVITY ENHANCED PHOTODETECTORS

Fu Zhuxi

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract Resonant - cavity - enhanced (RCE) photodetectors are a new type of detectors developed over the past decade. The performance of these devices is enhanced by placing the active layer structure inside a Fabry - Perot resonant microcavity. In such a structure, the quantum efficiency of the detector at the resonant wavelength is markedly enhanced due to rejection of the off - resonance wavelengths and amplification of the resonant optical field. The bandwidth - efficiency product can be almost three times greater than that of conventional photodiodes. Both wavelength selectivity and high - speed response make RCE detectors ideal for optical communications.

Key words resonant - cavity - enhanced photodetector

1 半导体光电探测器的工作原理和主要性能

光电探测器是将入射光信号转变为电信号的器件. 在半导体光电探测器中, 入射光子激发出的光生载流子在外加偏压作用下进入外电路后, 形成可测量的光电流. 由于单位时间内光生载流子的产生率正比于探测器响应时间内几个光振荡周期的平均光子数, 显然, 每个入射光子在半导体内产生一对载流子(电子和空穴)的概率越大, 单位光强产生的光电流越大. 因此, 将一个入射光子产生一对载流子的概率定义为量

子效率, 它是衡量光电探测器性能的重要指标. 在传统的光电探测器中, 量子效率随探测器中对入射光的吸收层厚度 d 和吸收系数的增加而增加.

因为光生载流子只有在进入外电路后才可能成为光电流, 而在进入外电路之前有可能由于载流子(电子和空穴)的复合而湮灭, 也可能由于碰撞离化而增加, 所以光电流不仅和量子效率有关, 还和载流子的复合速率、外加电场的大小以及载流子进入外电路前在半导体内的渡越时间等有关. 光生载流子在探测器内的渡越

^{*} 国家自然科学基金、安徽省自然科学基金资助项目
1998 - 07 - 14 收到初稿, 1998 - 11 - 10 修回

时间越长,在半导体内被复合的可能性就越大,相应地减少了进入外电路的光电流.尤其在测量高频光信号时,由于受到载流子输运速率的限制,进入外电路的交变光电流将随信号频率增加而下降.探测器的响应速度在光通信中是极其重要的,按通常的定义,信号光电流强度下降到直流光电流强度的 70% 时所对应的信号频率 f_s 为带宽.

量子效率和带宽是一对相互制约的参数,若想增加探测器的响应带宽就要减少载流子渡越时间 t_d ,因此要减少吸收层厚度 d ,但这样做势必会降低量子效率,反之,通过增加吸收层厚度来提高量子效率又会使带宽下降.基于上述量子效率和带宽之间的矛盾,在制备光电探测器时必须对两者进行折中选择.为此引入带宽和效率的乘积 (bandwidth - efficiency product) 作为衡量光电探测器性能的重要指标.

光通信中常用的高速响应的光电探测器,一般采用 PIN 结构或金属 - 半导体肖特基结组成的光电二极管 [参见图 1(a)]. 在结区内插入本征的吸收层 I,其厚度近似于结区的厚度,入射光在 I 层内被吸收并产生光生载流子.在外加负偏压所形成的高电场作用下,光生电子和光生空穴被分别扫向 N 区和 P 区.光电子一旦渡越结区进入 N 区后,破坏了 N 区的电中性,使得外电路立即向 N 区提供一个正电荷以保持 N 区的电荷平衡,相当于只要光电子渡越结区便对外电路贡献了一个电荷.同样,光生空穴渡越结区后也立即对外电路贡献一个电荷.

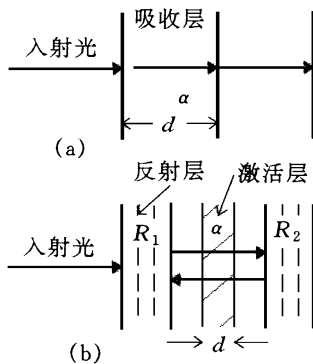


图 1 光电探测器结构示意图

(a) 普通光电探测器; (b) RCE 光电探测器

所以,光生载流子的渡越时间 t_d 仅取决于结区的厚度 d . 因为光电二极管的响应带宽取决于载流子输运因子:
$$|f_s| = \frac{1 - \exp(-i \omega_s t_d)}{i \omega_s t_d}$$
,

其中 ω_s 为信号圆频率, t_d 为载流子渡越时间^[1],而结区厚度最多是微米量级,载流子平均迁移速率 \bar{v} 可达 10^7 cm/s. 根据带宽的定义,由 $|f_s| = 0.7$ 计算出光电二极管的响应频率高达 $f_{tr} = 0.45 / t_d = 0.45 \bar{v} / d \sim 10$ GHz.

光电二极管的量子效率取决于吸收层内产生的载流子数的对数值与入射的光子数之比. 设入射光功率为 P , 二极管入射面的反射率为 R , 吸收层的厚度为 d , 吸收系数为 α , 则在吸收层内可产生的光生载流子数为

$$N = P(1 - R)(1 - e^{-\alpha d}) / h \nu_0$$

由于吸收层很薄 ($\alpha d \ll 1$), 则量子效率可近似表示为

$$\eta = N / (P / h \nu_0) = (1 - R)(1 - e^{-\alpha d}) / (\alpha d)$$

由此导出光电二极管的带宽和效率的乘积:

$$f_s \cdot \eta = f_{tr} \cdot \eta = 0.45 \bar{v} (1 - R)$$

对一般的 GaAs 探测器 ($\alpha = 10^4$ cm⁻¹, $\bar{v} = 6 \times 10^6$ cm/s), 这一乘积大约是 27 GHz^[2].

2 共振腔增强型光电探测器 (RCE)

为了进一步提高效率 - 带宽积, 必需克服增益和带宽针对吸收层厚度所出现的矛盾. 所以近十年来, 国外发展了一种新的共振腔增强型光电探测器 (resonant - cavity - enhanced devices).

2.1 共振腔增强型光电探测器的结构和原理

这种新型的 RCE 光电探测器是在法布里 - 珀罗微共振腔中插入激活层以增强探测器的性能. 图 1 画出了传统的光电探测器与 RCE 探测器结构的差别. 在 RCE 结构中, 由于共振腔对共振波长的选择吸收和光场放大作用, 大大增加了共振波长处的量子效率; 而且, 光场增强后, 探测器可以做得薄一些, 使响应速度更快. 这种结构的探测器同时具有波长选择性和高响

应速度,因而成为一种理想的光通信探测器。

RCE探测器的量子效率及其与光谱的关系已有详细论述^[3]。一个共振腔长为 L 、吸收区厚度为 d 、吸收系数为 α 、腔的两个端面的反射率为 R_1 和 R_2 的 RCE 探测器的量子效率可表述为

$$\eta = \frac{\alpha d (1 + R_2 e^{-\alpha d})}{1 - 2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d} \cos(2L + \phi_1 + \phi_2) + R_1 R_2 e^{-2\alpha d}} \times (1 - R_1)(1 - e^{-\alpha d})$$

式中 ϕ_1, ϕ_2 是光进入端面反射镜所产生的位相损失, $\beta = 2\pi n / \lambda_0$ 为传输常数 (λ_0 是真空中波长, n 是折射率)。因为传输常数 β 是波长的函数,所以 η 周期性地共振波长处达到最大值(见图 2):

$$\eta_{\max} = \frac{1 + R_2 e^{-\alpha d}}{1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d}} \times (1 - R_1)(1 - e^{-\alpha d})$$

与常规的探测器相比,一个结面积为 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 的 GaAs 光电二极管,其带宽-效率积可预期提高 3 倍^[3]。

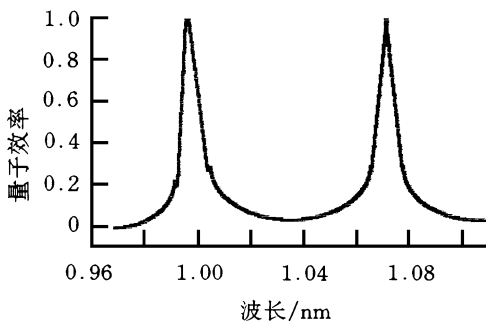


图 2 RCE 探测器量子效率随波长的变化

2.2 RCE 光电探测器的设计指标

RCE 结构可以在很宽的波长范围内工作。它的优良特性依赖于低损耗的共振腔,这就要求共振腔材料和组成端面反射镜的材料在探测波长处几乎没有吸收,同时也使反射镜有较高的反射率。

微共振腔的反射镜是由多种材料周期组合而成,每个周期的厚度为 $\lambda/4$,组合成的总厚度约微米量级。形成镜面的材料间必须有很好的

晶格匹配以避免将缺陷引进激活层中。另外,为了减少镜周期 (mirrior periods) 的数目,以便简化生长和减少器件的串联电阻,希望镜面材料间有尽可能大的折射率差。

激活层材料的禁带宽度应该小于反射材料(镜面)和共振腔材料的禁带宽度,但也不能小到使异质结能带的突起阻挡了光生载流子的运动。激活层的吸收系数应该选择适当 ($1 \times 10^3 \text{cm}^{-1} < \alpha < 5 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$),以便充分发挥 RCE 的作用。

3 共振腔增强型探测器的应用

共振增强型探测方式尤其对肖特基光电探测器有用,目前已得到工作波长为 900nm 的极高速 RCE 肖特基光电探测器^[4],其结构如图 3 所示。

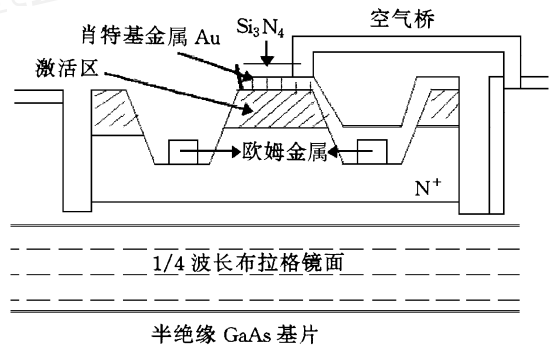


图 3 RCE 肖特基光电二极管结构示意图

半透明的金属可以作为顶部的反射器,在由 GaAs/AlAs 布拉格反射器和 GaAs 接触区组成的共振腔中,有一层很薄的 InGaAs 类晶状膜形成吸收层。器件用标准的光刻工艺制备,它具有平台隔离区,用金丝空气桥将顶部的接点与共面的导线连接起来。测量时采用调谐到共振波长的掺钛蓝宝石皮秒锁模激光器,通过单模光纤照射探测器,在 50 GHz 取样示波器上观察到由此所产生的脉冲光电流。根据计算结果,估计出器件的响应时间为 $\tau_{\text{actual}} = 4.1 \text{ps}$,正好对应 100 GHz 的带宽。这种 RCE 肖特基光电二极管的共振峰处量子效率计算值为 $\eta_{\max} = 70\%$,实验结果为 50%。带宽-效率积超过

50 GHz.

用 MBE 生长的二元或三元化合物半导体 (如 GaAs 系列的 AlGaAs 和 InGaAs 等), 可通过能带工程设计出特殊的 RCE 结构. 用现有的半导体材料制备的 RCE 的探测范围, 覆盖了从紫外到红外的光谱波段. 作为一种高速度、高效率探测器 RCE 必将在光通信中得到广泛应用.

参 考 文 献

- [1] 傅竹西. 固体光电子学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998
- [2] Bowers J E, Burrus C A Jr. IEEE J. Lightwave Technol., 1987, 5: 1339—1342
- [3] Unlu M S, Strite S. J. Appl. Phys., 1995, 78: 607—611
- [4] Onat B M *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10(5): 707—709

软 X 射线多层膜及多层膜光栅的研究进展 *

熊 刚 刘文汉 吴自勤

(中国科学技术大学物理系 合肥 230026)

摘 要 对目前的几种软 X 射线光学元件的性能作了简要的阐述和分析. 综合介绍了多层膜作为软 X 射线光学元件的新进展. 同时对多层膜光栅这种新型软 X 射线光学元件的原理、性能、制作工艺进行了详细的说明.

关键词 多层膜, 多层膜光栅、软 X 射线

MULTILAYER FILMS AND GRATINGS FOR THE SOFT X-RAY REGION

Xiong Gang Liu Wenhan Wu Ziqin

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract An outline is given of the properties of various commonly used soft X-ray optical equipment. Recent development of multilayers in soft X-ray optics is described, with a detailed account of the theory, properties and manufacture of a new type of soft X-ray optics, multilayer gratings.

Key words multilayer, multilayer gratings, soft X-ray

1 引言

软 X 射线波长介于可见光与硬 X 射线之间, 前者可用常规透镜或平面镜、球面镜以及光栅、波带片来充当光学元件; 后者由于其波长与晶体内晶面间距接近, 故可以很方便地采用加工过的晶体作为光学器件. 而对于软 X 射线来说, 则由于其高的吸收特性和弱的反射特性, 使得寻找适合在该波段使用的光学元件变得尤为

困难. 而软 X 射线在光刻、微区特征谱分析、等离子体诊断、天文学、显微学 (包括在生物上最激动人心的水窗波段 (2.3—4.4 nm)) 的广泛应用前景, 使得软 X 射线光学元件的研制越来越成为人们关注的焦点^[1].

由于常规材料对软 X 射线的反射率很低, 早期人们不得不采用像差很大的掠入射全外反

* 国家自然科学基金资助项目

1998-06-29 收到初稿, 1998-08-18 修回