

金刚石膜M SM 紫外探测器光谱响应拟合分析*

程翔 周海文 陈朝

(厦门大学物理系, 361005)

20011225 收稿, 20020403 收改稿

摘要: 应用M SM 结构光电探测器相对光谱响应的理论公式, 得到金刚石膜M SM 紫外光电探测器相对光谱响应理论曲线, 与实验曲线进行比较, 发现两者吻合得很好。探测器光谱响应的截止波长都在 220~ 230 nm 范围, 紫外光与可见光的相对响应度相差一个数量级。根据M SM 结构光电探测器光谱响应曲线拟合出金刚石薄膜厚度、少子扩散长度等表征参数, 探讨金刚石膜吸收层反射率、吸收系数、金刚石的晶粒大小及金属电极叉指宽、指距等参数对金刚石膜M SM 光电探测器光谱响应和量子效率的影响。

关键词: 金刚石膜; 金属-半导体-金属; 光谱响应度曲线

中图分类号: TN 364.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2002)04-479-04

The Simulation and Analysis on Spectrum Response for Diamond M SM Ultraviolet Detector

CHEN G Xiang ZHOU Haiwen CHEN Chao

(Physics Department, Xiamen University, 361005, CHN)

Abstract: By the theoretical formulation of spectrum response to calculate the theoretical value of diamond M SM ultraviolet detector, we find that the theoretical curve is in good agreement with the experimental one. The cut-off wavelength of spectrum response is around 220~ 230 nm and the normalized response of ultraviolet light is one magnitude order higher compared with that of visible light. Based on the simulation of spectrum response curve of diamond M SM ultraviolet detector, the characteristic parameters, such as the depth and the diffusion length of diamond, are gained. After that, we discuss the factors which are of great importance for the spectrum response, such as the diamond absorption coefficient and reflectivity, the diamond grain size, finger widths and finger spacings.

Key words: diamond film; M SM; spectrum response

EEACC: 7230C

1 引言

随着各种化学气相沉积技术的日益成熟, 现已可制备出各种大面积、高质量、低成本的金

金刚石膜具有优异的电学性能, 如禁带宽度大(5.45 eV)、电子饱和速度大、击穿电压高、电阻率高、高掺杂性等, 所以近来金刚石膜作为新兴的高温半导体材料备受瞩目。国内对金刚石膜在半导体器件中的应用研究还较少, 国外在研制金刚石薄膜 X-射线探

* Email: chengflying@163.com

测器、紫外探测器等光电器件方面已有所进展。

本文对金刚石膜紫外探测器的制备和光响应特性进行了初步探索。采用热丝辅助化学汽相沉积技术,在Si衬底上合成了含少量受主型杂质的近于本征的金刚石膜,然后在金刚石膜上沉积指状金属电极,形成M SM结构的紫外光电探测器。由于金刚石膜的耐高温、抗腐蚀性,金刚石膜的紫外探测器有诸多实用价值,可应用于空气污染的监测、生物医学分析、海底通讯、高分辨率影像技术及紫外光谱分析等。与Si、GaN等材料的紫外探测器相比,金刚石膜紫外探测器有其自身优良特性。由于金刚石膜的禁带宽度比GaN大,在短于230 nm的紫外光部分,金刚石膜探测器有很大的光谱响应;且具有很强的可见光盲性,它的光生电流比Si探测器高得多,信噪比及信号稳定性也比Si的强。这些优点再加上M SM这种平面性器件结构简单、容易制备,因此金刚石膜紫外探测器有广泛的实用前景。

2 实验

采用热丝辅助化学气相沉积技术在Si衬底上合成厚为10 μm,含少量受主型杂质的近于本征的金刚石膜。样品经有机溶剂清洁处理后,在饱和K₂Cr₂O₇与浓H₂SO₄沸腾混合溶液中处理10分钟,然后在NH₄OH与H₂O₂混合液煮10分钟,以便去除金刚石膜表面的非金刚石碳及其它杂质,降低其表面态。蒸发0.3 μm的Al与金刚石膜形成肖特基势垒,采用剥离工艺制备出指宽5 μm、指距5 μm的金刚石膜平面型M SM紫外光探测器。结构如图1所示。

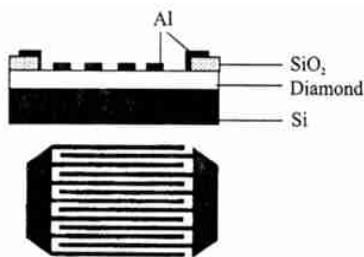


图1 器件结构

Fig 1 The structure of the device

3 光谱响应的拟合分析

光谱响应是M SM光电探测器性能的一个重

要参数,对优化器件的性能有很大的指导作用。国内外关于M SM研究的报道侧重于频率特性、瞬态响应、暗电流等方面,而对于光谱响应的理论、实验测量和结果分析的报道较少。

通过求解M SM结构光生载流子连续性方程,得到M SM光电探测器量子效率 η 的理论公式^[1]:

$$\eta = (1 - r) \left(\frac{S}{S + W} \right) (1 - e^{-\alpha d}) \quad (1)$$

式中:W是每个指状金属电极叉指的宽度,S是叉指的间距, α 是吸收系数,d是金刚石膜层厚度,r为反射率。

根据响应度R与量子效率 η 的关系

$$R = I_{ph}/P = \left(\frac{q}{h\nu} \right) \eta \quad (2)$$

其中: I_{ph} 为光生电流,P为入射光功率,q为电子电量,h ν 为光子能量,R为响应度。

$$R(\lambda) = \lambda(1 - r) \left(\frac{S}{S + W} \right) (1 - e^{-\alpha d}) \left(\frac{q}{hc} \right) \quad (3)$$

由于实验数据^[2]为相对光谱响应度 $R_{nor}(\lambda)$,从(3)式可以得到相对光谱响应公式:

$$R_{nor}(\lambda) = R(\lambda)/R(\lambda_0) = \frac{\lambda}{\lambda_0} \frac{(1 - r)}{(1 - r_0)} \frac{(1 - e^{-\alpha d})}{(1 - e^{-\alpha_0 d})} \quad (4)$$

式中: $R(\lambda_0)$ 为理论值中最大的一个。

对于不同方法生长的金刚石膜的反射率、吸收系数有些差异。用CVD方法生长的金刚石膜的反射率^[3]及吸收系数曲线^[4]如图2、图3所示。

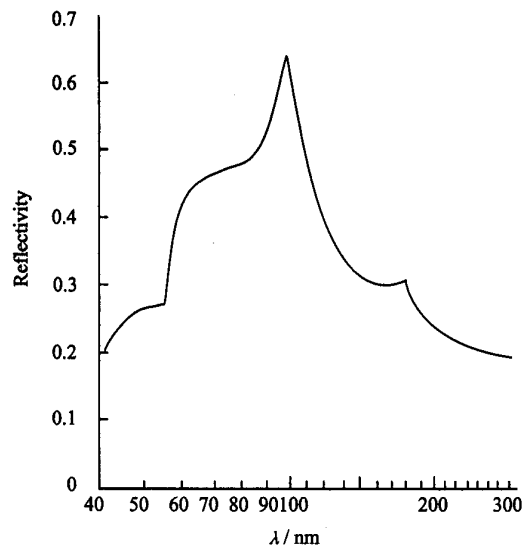


图2 金刚石膜反射率曲线

Fig 2 The reflectivity curve of diamond

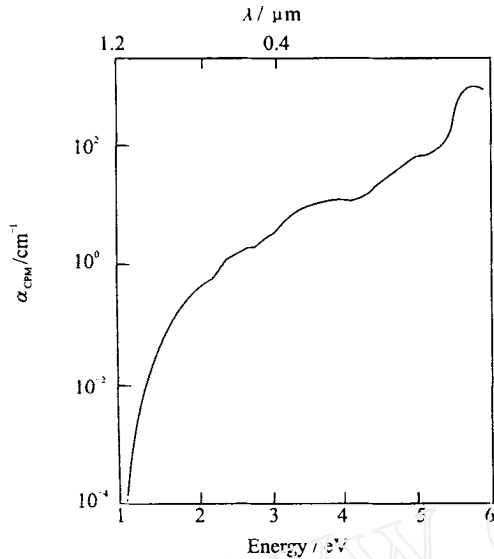


图3 金刚石膜吸收系数曲线

Fig. 3 The absorption coefficient curve of diamond

根据金刚石的反射率和吸收系数曲线, 通过计算可作出如下曲线, $R_{\text{nor}}(\lambda)$ 则为相对响应值。其中 λ 取 200~310 nm, $d=10 \mu\text{m}$ 。

图 4 中, (a) (b) (c) 三条实验曲线的实验条件^[2]各有差异, 平均晶粒大小分别为 10 μm 、3 μm 、1 μm , (d) 为金刚石膜 MSM 的相对光谱响应理论

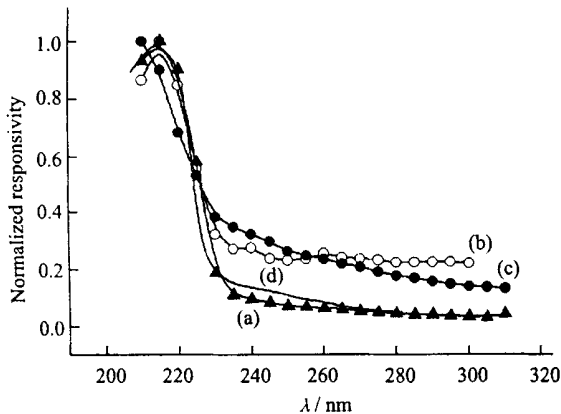


图4 金刚石膜紫外探测器的光谱响应曲线

Fig. 4 The spectrum response curve of diamond-based UV detector

曲线。可以看出: 理论曲线与实验曲线吻合得较好, 每条曲线的截止波长都在 220~230 nm 范围, 大于截止波长的响应度与小于截止波长的响应度相差一个数量级, 说明金刚石膜可见光盲性很高。由公式及理论曲线可以看出, 相对光谱响应与金刚石膜的材料性能有很大关系。在紫外光探测区, 金

刚石膜的反射系数 r 越小, 吸收系数 α 越大, 则响应越高。在制作器件中需尽量增加紫外光透射率, 一方面要在表面涂上抗反射膜, 另一方面则要使蒸发的金属尽可能的薄, 最终提高响应, 增强器件的可见光盲性。

利用公式(3)可以优化器件的性能, 还可将它应用于光响应度光谱曲线的拟合, 从而得出材料的厚度 d 、少子扩散长度 L 等材料的表征参数。

对公式(3)进行近似计算, 可以得出金刚石膜 MSM 光电探测器的吸收层理论厚度 d , 并与实验数据 $d=10 \mu\text{m}$ 进行比较,

当 λ 在截止波长附近时, $\alpha d \ll 1$, 所以可以将 $1 - e^{-\alpha d}$ 近似为 αd , (3)式可简化为

$$R(\lambda) = (\lambda(1-r)) \left(\frac{S}{S+W} \right) \alpha d \left(\frac{q}{hc} \right) \quad (5)$$

可得厚度 d 为:

$$d = \left(\frac{S+W}{S} \right) \left(\frac{hc}{q} \right) \frac{R(\lambda)}{\lambda(1-r)\alpha} \quad (6)$$

将(a)曲线中实验数值代入公式(6), 其中 λ 取 200~310 nm, $S=5 \mu\text{m}$, $W=5 \mu\text{m}$, 则平均厚度 $\bar{d}=8.246 \times 10^{-4} \text{cm}$ 。

进行分析可发现, 若考虑光生载流子在器件平面叉指电极指距间的收集率, 对于 MSM 双肖特基势垒的光电探测器的光生电流与公式(3)有点差异。根据光生载流子收集模型, 光生电流^[5]可表示为

$$I_{\text{ph}} = qF_0\eta G \quad (7)$$

其中: q 为电子电量, F_0 为单位时间内入射光子数, η 为量子效率, G 为光收集率。

$$\eta = (1-r)(1 - e^{-\alpha d}) \quad (8)$$

这是以往 Salvatori 对光电探测器计算时所采用的量子效率。但考虑到对于 MSM 光电探测器, 金属电极叉指指间距部分是作为光敏面, 叉指部分存在反射, 若叉指部分相对光敏面较大, 会影响到器件表面光吸收的量子效率, 所以计算时 η 采用(1)式。

(7)式较(2)式中的 I_{ph} 增加一项叉指电极指距间的光收集率 G_{ph} ^[6], 表示为:

$$G_{\text{ph}} = K\mu TE/S \quad (9)$$

其中: E 为所加电场强度, K 为比例系数, 当金属与金刚石接触为整流接触时 $K=1$, 即

$$G_{\text{ph}} = \mu TE/S = L_{\text{dr}}/S \quad (10)$$

其中: L_{dr} 为少子漂移长度。

综合两方面的考虑, MSM 光电探测器光谱响应 R 可表示为

$$R(\lambda) = \lambda(1-r) \left(\frac{S}{S+W} \right) (1-e^{-\alpha d}) \left(\frac{q}{hc} \right) \frac{\mu TE}{S} \quad (11)$$

当 λ 在截至波长附近时, $\alpha d \ll 1$, 所以可以将 $1-e^{-\alpha d}$ 近似为 αd , (11) 式可简化为

$$R(\lambda) = \lambda(1-r) \left(\frac{S}{S+W} \right) \alpha d \left(\frac{q}{hc} \right) \frac{\mu TE}{S} \quad (12)$$

应用上式, 其中 λ 取 200~310 nm, $S=5 \mu\text{m}$, $W=5 \mu\text{m}$, $E=V/S=1 \times 10^4 \text{ V/cm}$, 可从实验测得的光谱响应曲线(a)拟合出的 $\mu\tau=4.0 \times 10^{-8} (\text{cm}^2/\text{V})$

$$\text{又: 少子扩散长度 } L_{\text{diff}} = \sqrt{\frac{kT}{q} \mu\tau} = 0.32 \mu\text{m}$$

根据实验测得的光谱响应拟合出的 $\mu\tau$ 的数量级与 Salvatori 等人算出的数量级^[6]相当。但都偏小, 以至少子扩散长度也偏小。对不同晶粒大小的实验曲线拟合比较, 可以看出晶粒大小不同, $\mu\tau$ 也不同。从(10)式可看出 $\mu\tau$ 大, L_{diff}/S 即器件的光收集率将得到提高, 也可达到提高响应度的目的。所以金刚石晶粒的大小会影响器件性能。

由(2)式和(11)式可以理论计算得量子效率 η

$$\eta = I_{\text{ph}}/P \times \left(\frac{h\nu}{q} \right) = 1.241 \times R/\lambda$$

其中取 $\lambda=221.4 \text{ nm}$, $S=5 \mu\text{m}$, $W=5 \mu\text{m}$, $E=V/S=1 \times 10^4 \text{ V/cm}$, 可得 $\eta=17.1\%$, 这与 Jaeshine A hn 等人实验得到的数据^[7]相近。虽然金刚石膜紫外探测器的量子效率还不高, 但通过计算可以看出要提高量子效率还需优化器件的设计参数 S, W 。一方面增大器件的光敏面, 即减小 W/S 。另一方面, 还必须考虑到金刚石晶粒的大小。由于金刚石膜晶体中可分为两个区: 一为晶体区含金刚石微晶, 含低缺陷; 另一为晶界区, 晶界能级相当于一附加势垒, 必然引起金属与金刚石膜间的势垒高度变化。如果金刚石膜的光生载流子在被收集前无需逾越晶界, 则可以提高器件的响应。所以在设计器件时又指电极指距要尽量小于金刚石晶粒大小。

4 结 论

在进行金刚石 MSM 光电探测器制备前, 对探测器件的光谱响应进行拟合分析, 进而优化器件设计。从理论曲线与实验曲线对比可以看出, 相对光

谱响应与金刚石材料性质有很大关系。在紫外光探测区, 金刚石膜的反射系数 r 越小, 吸收系数 α 越大, 则响应越高。在制作器件中需尽量增加紫外光透射率, 除可在表面涂上抗反射膜外, 还应使蒸发的金属尽可能的薄, 以提高光响应, 增强器件的可见光盲性。通过对 MSM 器件绝对光谱响应理论公式的推导分析, 光谱响应和量子效率与金刚石膜的表征参数 $\mu\tau$ 器件参数 S, W 相关。所以在器件设计时, 可优化器件参数以提高响应, 一方面增大器件的光敏面, 即减小 W/S , 另一方面要考虑到金刚石晶粒的大小, 金属叉指电极间距应与晶粒大小相当。

参 考 文 献

- 1 Julian B D Soole, Schumacher Hemann. InGaAs metal-semiconductor metal photodetectors for long wavelength optical communications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991; 27(3): 737~752
- 2 Salvatori S, Rossi M C, Galluzzi F, et al. Performance of diamond-based photoconductive devices in the UV range. *Diamond and Related Materials*, 1998; 7(6): 811~816
- 3 Pace E, Pini A, Corti G. CVD diamond optics for ultraviolet. *Diamond and Related Materials*, 2001; 10(3~7): 736~743
- 4 Rohrer E, Nebel C E, Stutzmann M. Photoconductivity of undoped, nitrogen- and boron-doped CVD- and synthetic diamond. *Diamond and Related Materials*, 1998; 7(6): 879~883
- 5 Salvatori S, Pace E, Rossi M C, et al. Photoelectrical characteristics of diamond UV detectors: dependence on device design and film quality. *Diamond and Related Materials*, 1997; 6(2~4): 361~366
- 6 Salvatori S, Rossi M C, Galluzzi F. Minority-carrier transport parameters in CVD diamond. *Carbon*, 1999; 37(5): 811~816
- 7 Wei Jiang, Jaeshine A hn. Conceptual development and characterization of a diamond-based ultraviolet detector. *Review of Scientific Instruments*, 1999; 70(2): 1333~1339



程翔(CHENG Xiang) 女, 1977年出生, 厦门大学物理系凝聚态物理专业博士研究生, 研究方向为集成光电子学, 目前主要从事宽禁带半导体光电器件的研究。