

文章编号: 1006-4710(2011)01-0001-06

4H-SiC 紫外光光电晶体管模拟与分析

史瑞, 陈治明

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 根据光电晶体管的物理机理和 SiC 材料参数, 建立了 4H-SiC 紫外光光电晶体管的数值模型, 利用 Silvaco 软件对其 I - V 特性和光谱响应等特性进行了模拟与分析; 通过研究 4H-SiC 紫外光光电晶体管不同结构尺寸下的光谱响应特性, 对其各区掺杂浓度与厚度等参数进行优化设计。结果表明, 优化后的光电晶体管光谱响应范围为 200 ~ 380 nm, 峰值波长为 270 nm, 相应的响应度为 300 A/W, 而对可见-红外光的响应度均小于 2 A/W, 具有较高的紫外光分辨率, 可以实现在较强的红外及可见光背景下有效地进行紫外光探测。

关键词: 4H 碳化硅; 紫外光光电晶体管; 模拟; 光谱响应

中图分类号: TN335 **文献标志码:** A

Simulation and Analysis of 4H-SiC Ultraviolet Phototransistor

SHI Rui, CHEN Zhiming

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: SiC is the ideal material for making UV (ultraviolet) photodetector. In the paper, a statistics model of 4H-SiC UV phototransistor is calculated and established based on the physical principle of phototransistor and the parameters of SiC. The software of Silvaco is employed to simulate and analyze its I - V characteristics and spectral response. In order to optimize the device structure of 4H-SiC UV phototransistor and its parameters, such as doping concentration and doping depth of the different areas, the spectral response under different structural dimension is simulated and analyzed. The results indicate that the spectral response of 4H-SiC UV phototransistor is in the range of 200 ~ 380 nm with a maximum responsibility of 300 A/W around 270 nm, while its responsibility in the range from visible light to infrared light is not over 2 A/W. That indicates that the device has a high resolving power for ultraviolet light. The 4H-SiC UV phototransistor can detect ultraviolet light effectively under the infrared and visible light.

Key words: 4H-SiC; UV phototransistor; simulation; spectral response

紫外光光电探测器在国防、天文、公共安全等方面都有着广阔的应用前景, 具有极高的军事和民用价值, 是光电探测领域的研究热点。采用宽带隙半导体材料, 如碳化硅 (SiC)、氮化镓 (GaN)、金刚石 (C) 等制造紫外光探测器, 可以在很强的可见及红外线背景下检测 200 ~ 380 nm 波段的紫外光, 并具有耐高温及高效、高可靠性的特点, 是理想的紫外光探测器材料^[1-4]。因为金刚石膜目前还很难实现 n 型材料, 使其应用受限。所以用来制备紫外光探测器比较成熟的材料是 GaN 与 SiC, 其中

SiC 材料更具优势。目前生长的 SiC 材料质量比 GaN 要高, 其缺陷密度低于 GaN 的缺陷密度; SiC 自身有衬底, 而且可以在其上直接高温生长高质量的 SiO₂ 层, 器件的制备工艺比 GaN 材料成熟; 采用 SiC 材料制备的光电探测器对紫外光波段的响应较宽^[5-6]。

常见的光电探测器有 p-i-n 光电二极管、雪崩光电二极管 (APD)、金属-半导体-金属 (MSM) 型光电探测器等。p-i-n 和 MSM 结构具有很多优点, 但都没有内部增益, 对微弱光信号的响应度很低。APD

收稿日期: 2010-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61076011)。

作者简介: 史瑞 (1986-), 女, 陕西西安人, 硕士生, 研究方向为宽禁带半导体器件。E-mail: shi3040431038@163.com。

陈治明 (1945-), 男, 重庆人, 教授, 博导, 研究方向为宽禁带半导体材料与器件。E-mail: chenzm@xaut.edu.cn。

可以利用雪崩倍增机制实现内部增益和光电流放大,但其工作电压高、雪崩噪声大,制造工艺难度较大。光电晶体管是另一种具有光电流放大作用的光电器件,有光增益大、响应度高、无雪崩噪声、不需要高的偏置电压等优点^[7-8]。

本文设计了一种4H-SiC紫外光电晶体管,并应用二维器件仿真软件Silvaco对其I-V特性、光谱响应、光电流与光功率的关系及光电增益进行了仿真研究。

1 物理模型和材料参数的选取

1.1 迁移率模型

本文使用了软件的ANALYTIC模型(Analytic Low Field Mobility Model)和FLDMOB模型(Parallel Electric Field-Dependent Mobility)。ANALYTIC模型反映迁移率对杂质浓度和温度依赖关系,是一种低场迁移率模型。FLDMOB是对平行电场依赖的迁移率模型,实现了迁移率从低场和高场之间的平滑过渡。本文对这两个模型组合使用,组合依照Matthiessens原则, $1/\mu = 1/\mu_1 + 1/\mu_2 + 1/\mu_3 + \dots + 1/\mu_m$ 。

FLDMOB模型的表达式为:

$$\begin{cases} \mu_n(E) = \mu_n(T) \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_n(T) \cdot E}{V_{\text{satn}}} \right)^{\beta_n}} \right]^{\frac{1}{\beta_n}} \\ \mu_p(E) = \mu_p(T) \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_p(T) \cdot E}{V_{\text{satp}}} \right)^{\beta_p}} \right]^{\frac{1}{\beta_p}} \end{cases} \quad (1)$$

上式中的电子饱和速度 V_{satn} 在本文中取Cree公司报道的 $V_{\text{satn}} = 2 \times 10^7$ cm/s,并假设空穴饱和速度 V_{satp} 与电子相等,但取指数常数 $\beta_n = 1, \beta_p = 1.213$ 。 $\mu_n(T)$ 和 $\mu_p(T)$ 是温度依赖的迁移率模型,表达式如下:

$$\begin{cases} \mu_n(T) = \mu_{n0} \left(\frac{T}{300} \right)^{-\alpha_n} \\ \mu_p(T) = \mu_{p0} \left(\frac{T}{300} \right)^{-\alpha_p} \end{cases} \quad (2)$$

上式中 $\mu_{n0} = 460$ cm²/V·s和 $\mu_{p0} = 124$ cm²/V·s为300 K时的电子和空穴迁移率, $\alpha_n = 1.5$ 和 $\alpha_p = 1.5$ 为温度常数, T 表示由于晶格振动产生的温度。

1.2 复合模型

模拟中考虑了SRH(Shockley-Read-Hall)复合和俄歇(Auger)复合。其表达式为:

$$R_{\text{SRH}} = \frac{p_h n_e - n_{ie}^2}{\tau_p(n_e + n_{ie}) + \tau_n(p_h + n_{ie})} \quad (3)$$

式中, n_e 为电子浓度, p_h 为空穴浓度, n_{ie} 为本征载流子浓度。与掺杂浓度有关的电子寿命 τ_n 和空穴寿命 τ_p 分别表示为:

$$\begin{cases} \tau_n = \frac{\tau_{n0} \times \left(\frac{T}{300} \right)^{1.72}}{1 + \left(\frac{N_i}{3 \times 10^{17}} \right)^{0.3}} \\ \tau_p = \frac{\tau_{p0} \times \left(\frac{T}{300} \right)^{1.72}}{1 + \left(\frac{N_i}{3 \times 10^{17}} \right)^{0.3}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, τ_{n0} 和 τ_{p0} 是300 K无掺杂半导体中的电子寿命和空穴寿命,不同的材料取值不同。目前还没有看到关于 τ_n, τ_p 这两个参数的实验值的报道,所以,利用文献[9]中掺杂浓度为 1×10^{15} cm⁻³的三组不同厚度n型4H-SiC外延层少数寿命的实验数据,假设少数寿命与外延层厚度有关。由于外延层厚度分别为40 μm、10 μm、0.1 μm时,对应的少数寿命分别为2 μs、0.2 μs、0.001 μs,我们用MATLAB软件通过多项式拟合,建立了4H-SiC少数寿命同外延层厚度的关系式:

$$\tau = 0.01d + 0.001d^2 \quad (5)$$

式中, d 为外延层厚度, τ 为少数寿命。本文即根据该式估算器件各层电子和空穴的寿命。

带间俄歇复合在窄禁带半导体中和高温情况下起着重要作用,虽然本文模拟的是宽禁带的4H-SiC材料,但是考虑了高温情况,所以有必要使用俄歇复合模型,Silvaco中的俄歇复合模型AUGER表示为:

$$R_{\text{Auger}} = AUGN(p_n^2 - nn_{ie}^2) + AUGP(np^2 - pn_{ie}^2) \quad (6)$$

$AUGN, AUGP$ 为俄歇复合净复合率,取值为 $AUGN = 5 \times 10^{-30}$ cm⁶/s, $AUGP = 1 \times 10^{-30}$ cm⁶/s。

1.3 不完全电离模型

SiC材料的杂质电离率很低,在定义了INCOMPLETE(不完全电离)模型之后,ATLAS会自动获得离化杂质浓度并据此计算电荷密度。计算公式为:

$$\begin{cases} N_D^+ = \frac{N_D}{1 + g_{\text{cb}} \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon_{F_n} - (E_c - E_{\text{db}})}{kT}\right)} \\ N_A^- = \frac{N_A}{1 + g_{\text{vb}} \cdot \exp\left(\frac{E_v + E_{\text{ab}} - \varepsilon_{F_p}}{kT}\right)} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $g_{\text{cb}} = 2$ 和 $g_{\text{vb}} = 4$ 是导带和价带的简并因子, $E_{\text{db}} = 0.1$ eV和 $E_{\text{ab}} = 0.2$ eV是杂质激活能, ε_{F_n} 和

ε_{F_p} 分别为电子和空穴的准费米能级。

1.4 光吸收模型

需要建立 4H-SiC 对紫外光的吸收文件,软件默认的文件格式为不同波长对应的 n', k 值,其中 n' 为材料的折射率, k 为材料的消光系数。通过搜集实验数据计算每一个波长对应的 n', k 值。根据 300 K 时 4H-SiC 的 n' 与 λ 的关系图^[10] 拟合出公式:

$$n'(\lambda) = 2.55378 + 3.417 \times 10^4 \cdot \lambda^{-2} \quad (8)$$

通过上式计算不同波长所对应的 n' 值。由 300 K 时 4H-SiC 的折射率 n' 与波长的关系图可知, n' 值随波长不同而改变的趋势基本不变,在文献中尚未看到 450 nm 以下波长对应的 n' 值,所以文中涉及的 450 nm 以下波长对应的 n' 值也利用公式(8) 计算。根据 4H-SiC 材料吸收系数 α 与波长 λ 的关系曲线图^[10] 可得出 4H-SiC 对不同波长紫外光的吸收系数值,再根据公式(9) 计算不同波长对应的 k 值:

$$\alpha = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (9)$$

1.5 材料参数的选取

介电常数 $\varepsilon_r = 9.7$, 禁带宽度 $E_g(300 \text{ K}) = 3.23 \text{ eV}$, 电子亲和能 $\chi = 3.85 \text{ eV}$, 导带态密度 $N_c(300 \text{ K}) = 1.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 价带态密度 $N_v(300 \text{ K}) = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

2 器件结构与模拟结果

2.1 4H-SiC 紫外光光电晶体管结构设计

1) 衬底 4H-SiC 材料天然显 n 型,一般通过 n 施主掺杂获得 n^+ 型衬底,在模拟过程中我们采用 n^+ 型衬底,设计其掺杂浓度尽可能高,因其均匀性较好,易制备 n 型欧姆接触电极;

2) n 型发射区 晶体管的发射区掺杂浓度不能过低,厚度的设计要合理,太厚则表面的均匀性差,同时也增加了器件的体电阻,太薄则无法减小衬底缺陷对器件性能的影响;

3) p 型基区 由光电晶体管原理知,器件正常工作时需要一个反偏受光结,通常由集电结作为此受光结,则光电转换过程在集-基 pn 结内进行。因为衬底和受光层的掺杂浓度都远远大于 p 层,则集电结与发射结的耗尽区都是在 p 层展开,为确保器件不穿通, p 层不能设计的太薄,要满足 $W_p > x_{p1} + x_{p2}$;

4) n 型集电区 采用 n^+ 型集电区,因其低阻特性,可制备良好的 n 型欧姆接触电极。对于光从正面入射的光电晶体管而言,过厚的 n^+ 层使 200 ~ 380 nm 波段的紫外光在未达到集-基反偏 pn 结就被 n^+

层吸收,而且波长越短,吸收就越明显,将导致 4H-SiC 光电晶体管对特定波段紫外光的响应度下降。

分别取不同厚度的集电区和基区,对 4H-SiC 紫外光电晶体管的光谱响应进行模拟和分析。图 1 为改变集电区厚度 (W_{n^+}),其余尺寸不变的情况下器件的光谱响应曲线。

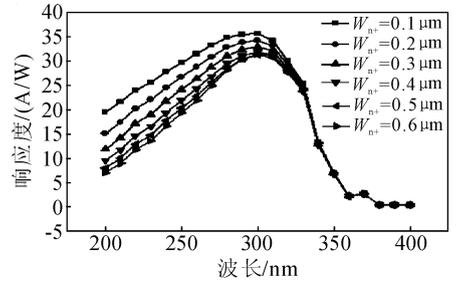


图 1 不同 W_{n^+} 下的器件的光谱响应曲线
Fig. 1 Curve of spectral response under different W_{n^+}

从图 1 可以看出,器件的光谱响应峰值波长固定为 300 nm,响应度随厚度的增大而变小,特别是在波长小于 350 nm 波段变化更加明显。所以,为了提高光电晶体管在短波段的响应度,其厚度值应尽量小。仿真设定为 0.2 μm 。集电结和发射结都是 n^+ 结,将其接触电势差 $V_{D1} = 1.914 \text{ V}$, $V_{D2} = 1.898 \text{ V}$ 分别代入集电结和发射结势垒宽度计算公式计算得: $x_{p1} = 0.51 \mu\text{m}$, $x_{p2} = 0.45 \mu\text{m}$ 。因此要使得基区不发生穿通,其厚度 W_p 为: $W_p > x_{p1} + x_{p2} = 0.96 \mu\text{m}$ 。通过仿真验证可知,在 $W_p \geq 1.4 \mu\text{m}$ 时, p 层没有发生穿通。

图 2 为 $W_{n^+} = 0.2 \mu\text{m}$ 固定不变时,取不同 W_p 时器件的光谱响应曲线。从图中可看出,器件的光谱响应峰值波长为 270 nm,对应响应度随着 W_p 的增大在 220 ~ 350 nm 波段呈减小趋势。所以,为了提高光电晶体管在该波段的响应度,其 W_p 值应尽量小 ($\geq 1.4 \mu\text{m}$),同时,综合考虑器件的响应时间不能太大,否则会使得频率特性变差,因此,我们将 p 层的厚度定为 $W_p = 1.8 \mu\text{m}$ 。器件的结构图见图 3。

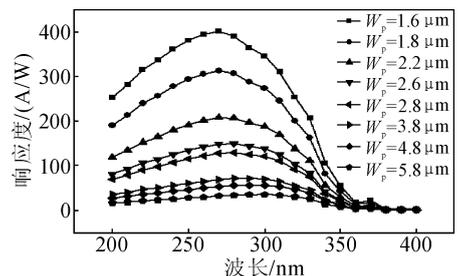


图 2 不同 W_p 下器件的光谱响应曲线
Fig. 2 Curve of spectral response under different W_p

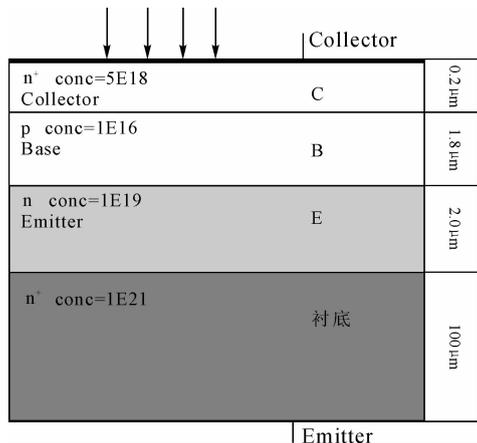


图3 4H-SiC 紫外光电晶体管结构示意图

Fig. 3 Structure schematic of 4H-SiC UV phototransistor

2.2 模拟结果及分析

4H-SiC 光电晶体管除了对入射光的波长有限制外,对入射光功率密度也有一定的检测范围,将入射光波长暂时定为 270 nm,模拟了光电流与光功率密度的关系如图 4。

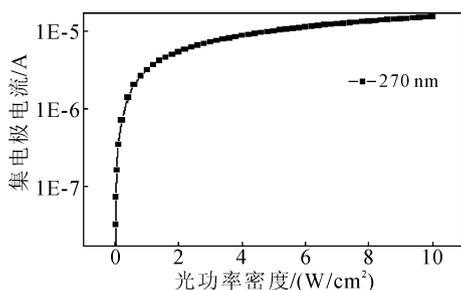


图4 光电流与入射光功率的关系曲线

Fig. 4 Relation curve of optical current and radiation power

从图 4 可以看出,当入射光功率密度超过 0.1

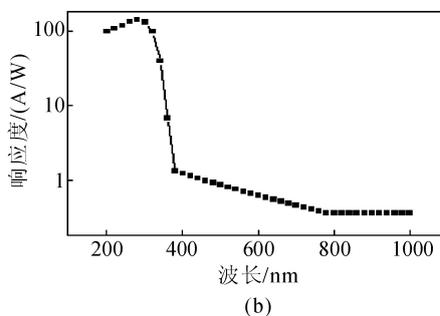
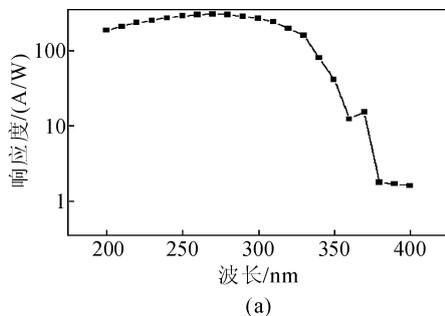


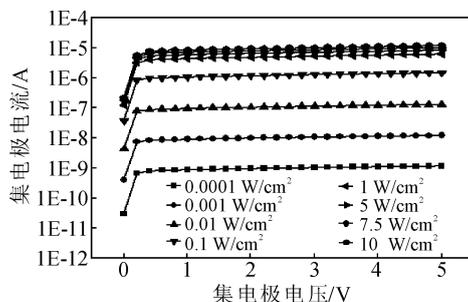
图6 4H-SiC 光电晶体管的光谱响应曲线

Fig. 6 Spectral response curve of 4H-SiC phototransistor

图 6(a)为其中 200 ~ 400 nm 波段的光谱响应曲线。图中可见,该光电晶体管的峰值响应波长位于 270 nm,对应的峰值响应度为 300 A/W,并且在 200 ~ 330 nm 波长范围呈现出较为平坦的光谱响应,响应度均大于 100 A/W,没有出现类似于 GaN

W/cm²时,光电流和光功率密度将不成正比,产生非线性失真。用非线性饱和原理解释这一现象,对于光探测放大电路,随着入射光功率和输出电流的增大,检测电路中负载电阻上的压降增大,光电探测器实际压降减小,耗尽区内电场减弱,当内电场不足以使光生载流子达到饱和和漂移速度时,单位光功率产生的光电流将变小,光电流和光功率密度将不成正比,则当入射光功率密度太大时,就会产生非线性失真。图中可以看出紫外光电晶体管有非常宽的线性工作区。

图 5 为不同光功率密度下,光电晶体管的 $I-V$ 特性曲线,也可看出在光功率密度大于 0.1 W/cm² 时,光电流的增长趋势放缓,光功率密度增加到 10 W/cm²,光电流并没有增加超过一个数量级。说明光电晶体管对强入射光的探测非常稳定,对弱输入光也有很强的响应。

图5 不同光功率下的 $I-V$ 特性曲线Fig. 5 $I-V$ curve under different radiation power

确定入射光功率后,在集电极加 5 V 偏压下对光电晶体管的光谱特性进行模拟,图 6 为 4H-SiC 光电晶体管的光谱响应曲线。

基光电探测器的陡峭光谱响应截止边,这是由于 4H-SiC 是间接带隙半导体材料,在带边截止波长 ($\lambda_c \approx 380$ nm) 处不会出现锐截止。图 6(b)为 380 ~ 1000 nm 波长范围内的光谱响应曲线。图中可见,此波长范围内的可见-红外光的响应度均小于 2

A/W,其紫外-可见响应比超过两个数量级。说明此结构4H-SiC紫外光电晶体管具有较高的紫外分辨率,可以在较强的红外及可见光背景下有效地进行紫外光探测。

入射光波长小于270 nm时,器件的响应度随波长的减小而降低,其解释为:对于波长小于270 nm的入射光,其在4H-SiC材料内的吸收长度相对较短,因此,大部分的入射光子将无法在集-基反偏pn结被吸收,导致器件在该波段的响应度下降。4H-SiC紫外光电晶体管的长波截止波长约为380 nm,因此,对于波长大于380 nm的入射光,理论上该光电晶体管不存在光谱响应。由模拟结果得出,器件对波长大于380 nm的入射光响应很弱,基本上接近于零,之所以还存在很小的响应是因为当半导体被外加电场作用时,其本征吸收限向长波方向移动,对光子能量小于 E_g 的入射光将引起吸收,此效应称为Franz-Keldysh效应,从物理上理解为光子协助隧穿过程。因此,4H-SiC光电晶体管的光谱响应在大于380 nm的波段将出现“带尾”现象。

光电晶体管的另一重要参数是光增益系数。图7为4H-SiC光电晶体管在光、暗状态下的 $I-V$ 特性曲线。根据图中所得的平均光、暗电流值,除以器件面积 $1\ \mu\text{m}^2$ 得4H-SiC光电晶体管的平均光电流密度为 $10^8\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$,平均暗电流密度为 $10^{-5}\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$,并计算可得器件光增益为460,且随着电压变化光电流与暗电流差值基本保持不变,即光增益在5 V偏压内恒定为460。

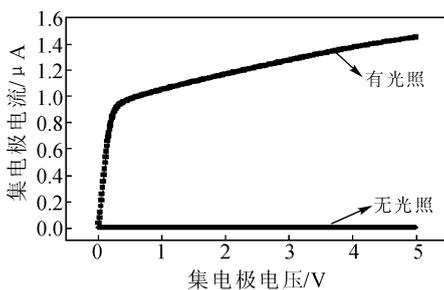


图7 4H-SiC光电晶体管光、暗状态下的输出特性曲线
Fig. 7 Output characteristic curve of 4H-SiC phototransistor under optical and dark situation

图8是光电流的瞬态特性。可以看出在1 ns时,光电流达到最大值,可见这种探测器的响应速度非常快。图9是4H-SiC光电晶体管在不同温度下对相同功率入射光的探测响应曲线。从图中可以看出温度从300~700 K变化时,在紫外光范围内峰值响应度始终位于波长为270 nm处,且响应度随着温度的增大而明显增大,说明4H-SiC光电晶体管

在高温下性能稳定并且具有更高的探测灵敏度。

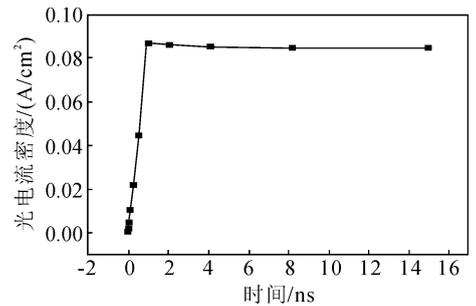


图8 光电流的瞬态特性

Fig. 8 Transient characteristics of optical current

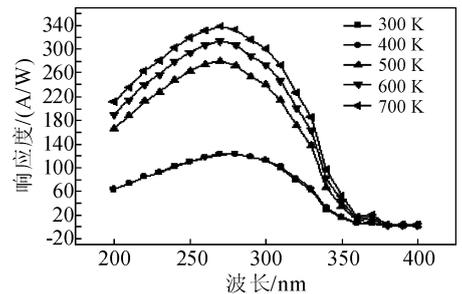


图9 探测响应度与温度的关系曲线

Fig. 9 Relation curve of detection responsibility and temperature

3 仿真模型的验证与结果对比

由于目前国内不具备制作复杂结构碳化硅器件的实验条件,而现有文献中也没有看到关于4H-SiC紫外光光电晶体管的报道,为了对仿真模型的可靠性进行验证,选择德国sglux公司制造的4H-SiC p-i-n结构紫外光光电二极管作为模拟对象,利用该器件的结构设计和相关参数,应用本文所建立的模型对其光谱特性进行了模拟,其结果如图10所示。由图可看出,该光电二极管的峰值响应波长也位于270 nm附近,对应峰值响应度约为130 mA/W。

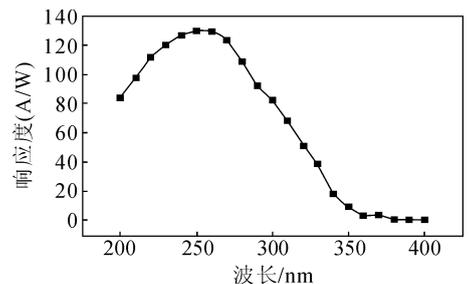


图10 4H-SiC p-i-n 光电二极管光谱响应曲线

Fig. 10 Spectral response curve of 4H-SiC p-i-n photodiodes

仿真结果与该公司发布的4种不同型号4H-SiC p-i-n结构紫外光光电二极管产品的特性相比相

当一致,但是模拟时设定的器件面积远小于实际器件的面积,因而探测灵敏度不一致。排除模型参数的选取比较理想、模拟中没有考虑材料缺陷以及杂质的非均匀分布等问题,我们认为此结果基本可以验证所建模型的可靠性。

图 11 是 4H-SiC 紫外光电晶体管和 4H-SiC p-i-n 结构紫外光电二极管对相同入射光的探测灵敏度的对比。从图中可知在 200 ~ 380 nm 响应范围内,4H-SiC 紫外光电晶体管的峰值响应为 300 A/W,而 p-i-n 紫外光电二极管的峰值响应为 130 mA/W,在相同探测波段内对相同强度的入射光,紫外光电晶体管的探测灵敏度要高 3 个数量级。

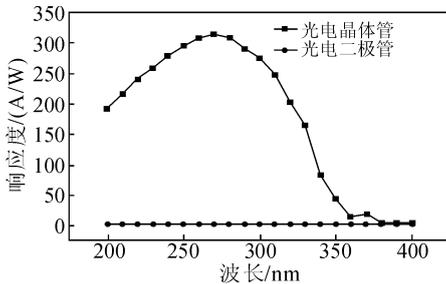


图 11 4H-SiC 紫外光电晶体管与 p-i-n 紫外光电二极管探测灵敏度对比

Fig. 11 Compare of detection responsibility between 4H-SiC UV phototransistor and p-i-n UV photodiodes

4 结论

对 4H-SiC 紫外光光电晶体管结构进行优化设计,结果表明,在 n^+ 集电区和 p 基区的宽度分别为 0.2 μm 和 1.8 μm ,掺杂浓度分别为 $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 和 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$,集电极偏压为 5 V,输入光功率密度为 0.1 W/cm^2 的条件下,其性能最佳。光电晶体管峰值响应波长位于 270 nm,最大响应度可达到 300 A/W,光增益为 460,探测波段为 200 ~ 400 nm,且在 270 nm 与 380 nm 处的响应度比值(紫外可见比)大于两个数量级,具有较高的紫外可见分辨率,可以在较强的红外及可见光背景下有效地进行紫外光探测。室温下的暗电流密度为 $10^{-5} \mu\text{A}/\text{cm}^2$,且随着电压变化光-暗电流比值基本保持不变,即光增

益在 5 V 偏压内恒定为 460。与市售 4H-SiC p-i-n 结构紫外光电二极管相比,紫外光电晶体管在相同波段内的探测灵敏度要高 3 个数量级。

参考文献:

- [1] BenMoussa A, Soltani A, Haenen K, et al. Recent developments of wide-bandgap semiconductor based UV sensors [J]. *Diamond and Related Materials*, 2009, 18(5-8): 860-864.
- [2] Yang Weifeng, Zhang Feng, Liu Zhuguang, et al. Effect of annealing on the performance of 4H-SiC metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2008, 11(2): 59-62.
- [3] Monroy E, Omnes F, Calle F. Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18(4): 33-51.
- [4] Pearton S J, Zolper J C, Shul R J, et al. GaN; Processing, defects and device [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(1): 1-78.
- [5] Yan F, Xin X B, Alexandrov P, et al. Development of ultra high sensitivity UV silicon carbide detectors [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2006, 529: 1461-1464.
- [6] Liu X F, Sun G S, Li J M, et al. Visible blind $p^+ - \pi - n^- - n^+$ ultraviolet photodetectors based on 4H-SiC homoepitaxial layers [J]. *Microelectronics Journal*, 2006, 37(11): 1396-1398.
- [7] Sze S M 著. 现代半导体器件物理 [M]. 第二版. 刘晓彦, 贾霖, 译. 北京: 科学出版社, 2001: 47-91.
- [8] Guo X Y, Rowland L B, Dunne G T, et al. Demonstration of ultraviolet separate absorption and multiplication 4H-SiC avalanche photodiodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 136-138.
- [9] Kordina O, Bergman J P. The minority carrier lifetime of n-type 4H- and 6H-SiC epitaxial layers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 69(5): 29-35.
- [10] Michael E L, Sergey L R, Michael S S, 著. 先进半导体材料性能与数据手册 [M]. 杨树人, 殷景志, 译. 北京: 化学工业出版社, 2003: 57-99.

(责任编辑 杨小丽)