

6H-SiC pn 结紫外光探测器的模拟与分析

周拥华 张义门 张玉明 孟祥志

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

(2003 年 8 月 29 日收到, 2004 年 3 月 17 日收到修改稿)

运用器件模拟软件模拟了 pn 结 6H-SiC 紫外光探测器的光响应灵敏度特性, 讨论了不同掺杂浓度、不同器件结深对响应灵敏度的影响. 对于 p^+n 结器件, 当受光面为 p^+ 层, 且厚度约为 $0.2\mu\text{m}$ 、浓度约为 $9 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、n 层浓度约为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时, 器件有较大的响应灵敏度, $R = 167.2 \text{mA/W}$; 当受光面为 n^+ 层, 且厚度约为 $0.2\mu\text{m}$ 、浓度约为 $9 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、p 层浓度约为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时, 器件有较大的响应灵敏度, $R = 183.5 \text{mA/W}$. 通过比较可知, 模型能较好地反应实际情况, 与实验数据符合较好.

关键词: 6H-SiC, 紫外光探测, 吸收系数, 光响应灵敏度

PACC: 0762, 0765E, 7820

1. 引 言

紫外光探测是一种具有广泛应用前景的技术, 在空间技术、材料分析、天体物理、环境监测、医疗卫生等方面有着重要的应用前景. SiC (silicon carbide) 的紫外光探测器研究较早, 但由于材料和制作工艺的种种原因, 这方面的研究工作不是很多. 近年来随着材料制备以及对 SiC 材料器件研究工作的深入, 使得 SiC 材料在制作紫外光探测器方面的优势日益突出. 首先, 6H-SiC 作为宽禁带 (3.0 eV) 半导体材料, 它对红外光辐射的响应灵敏度很低. 这对于要在红外光辐射背景下探测紫外光很有意义. 其次, 由于 6H-SiC 的禁带宽度宽, 所以即使在高温下, 器件的二极管漏电流也很小. 这对于探测微弱光强的紫外光尤其重要. 与宽禁带 GaN 紫外光探测器相比, 它具有更低的反向漏电流密度 (约为 $10 \times 10^{-12} \text{A/mm}^2$) 并且在 300—400nm 范围内, 具有高得多的探测灵敏度. 这将成为 SiC 紫外光探测器优势所在.

本文的研究主要集中在 200—400nm 的近、中紫外光范围. 因为在高于 3.0 eV 的能量范围, 器件对这个波段的紫外光吸收较明显. 目前, 虽然实验研究工作已有一些报道^[1], 但是理论方面的研究亟待解决, 以便在设计和研制工作中提供理论依据.

本文利用器件模拟软件对 pn 结 SiC 光电二极管紫外光探测器进行了模拟研究. 针对不同掺杂浓度、不同器件厚度对光电流以及光电响应灵敏度的

影响进行了建模、模拟和分析, 得出一些可供进一步研究的重要数据. 与文献中的实验数据相比, 本文的模拟结果与实验结果符合较好, 从而证实了本文模型的正确性.

2. 物理模型

模拟分析的 6H-SiC pn 结二极管紫外光探测器的基本结构如图 1 所示. 其中衬底为 n (或 p) 型 6H-SiC, 厚度约为 300—400 μm . 衬底之上是一层厚度为 5 μm 的 p (或 n) 型 6H-SiC, 器件的表面则是一层厚为 0.2 μm 的 p (或 n) 型 6H-SiC, 是光电探测器的受光面.

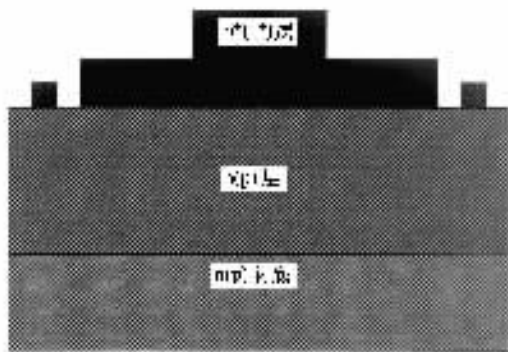


图 1 器件结构示意图

因为紫外光的短波段光子能量较高 (如波长为 0.25 μm 的光子能量约为 4.9eV) 6H-SiC 对该波长光的吸收系数较大, 所以入射到器件的光子在器件表

面很薄的一层就被吸收,产生的光生电子-空穴对,在到达耗尽层之前将有相当一部分被复合.考虑到增加对短波紫外光的吸收,所以将受光面电极以外的区域减薄 $0.1\mu\text{m}$ ^[1].模拟时两侧电极加 5—10V 的反向偏压.

对于光的入射以及光电流的产生主要分为两个部分:第一,表面层(SiO₂和界面)对入射光的反射和吸收;第二,器件内部各个区域中光的吸收.对于第一部分,采用 OD-AAM(光器件高级应用模块)模型^[2].该模型用菲涅耳公式(Fresnel formulae)对组成入射光的横向电波(TE)和横向磁波(TM)进行计算.对于第二部分,由于波长的不同,不同波长的光将会在器件的不同深度内被吸收,形成一个吸收带.入射光能由于吸收而随入射距离的增加呈指数规律减小,即

$$I_{\text{opt}}(x, \lambda) = I_{\text{opt}_0}(\lambda) e^{-\alpha_{\text{opt}}(\lambda)x}, \quad (1)$$

其中 $I_{\text{opt}_0}(\lambda)$ 为初始入射处的光能, $\alpha_{\text{opt}}(\lambda)$ 为材料对相应入射光波长的吸收系数.

本文主要通过求解泊松方程、电流连续性方程得到所需结果.通过求解这些偏微分方程组,得到器件在光照前后的电势分布,以及载流子分布.采用的泊松方程、电子电流和空穴电流连续性方程如下:

$$\begin{cases} \nabla^2 \psi = -\frac{\rho(x, y, z)}{\epsilon}, \\ \frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n, \\ \frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{q} \nabla \cdot J_p, \end{cases} \quad (2)$$

其中 ψ 为电势, $\rho(x, y, z)$ 为电荷密度, ϵ 为介电常数, n, p 分别为电子和空穴密度, J_n, J_p 分别为电子和空穴的电流密度, G_n, G_p 分别为光生电子和空穴的产生率, U_n, U_p 分别为电子和空穴的复合率,模拟中采用的产生率参数模型为

$$\alpha(x, \lambda) = \eta \left(\frac{\lambda}{hc} \right) I_{\text{opt}}(x, \lambda) \alpha_{\text{opt}}(\lambda), \quad (3)$$

其中 η 为量子效率,理想情况下 $\eta = 1$,考虑器件内部杂质的散射和陷阱俘获等因素,模拟过程中取 η 为 0.85.光吸收系数 $\alpha_{\text{opt}}(\lambda)$ 为决定量子效率的关键因素之一,因此是一个十分重要的参数.对 SiC 材料的光吸收系数的测量数据由于材料和测量手段的不同而有所区别,图 2 为 6H-SiC 光吸收系数 α 测量数据^[3],即 6H-SiC 的吸收系数随波长变化的曲线.

光生载流子在漂移和扩散过程中将会不断复合而消失.本文中考虑了两种复合机理,一种是 SRH

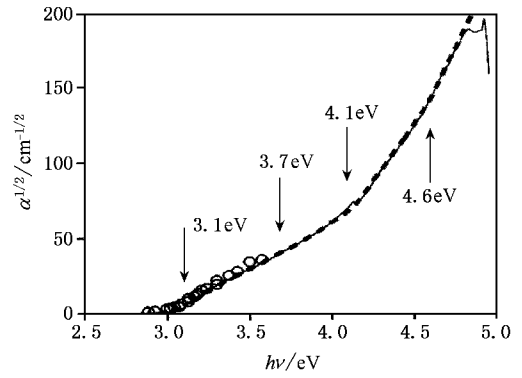


图 2 6H-SiC 不同光能范围的吸收系数 ——,——和○分别来自不同的文献数据^[3]

复合,另一种是俄歇(Auger)复合.对于 SRH 复合,其复合率 U_n, U_p 参数模型为

$$U_{\text{SRH}} = \frac{pn - n_{\text{ie}}^2}{\tau_p \left[n + n_{\text{ie}} \exp\left(\frac{\Delta E_1}{kT}\right) \right] + \tau_n \left[p + n_{\text{ie}} \exp\left(\frac{-\Delta E_1}{kT}\right) \right]}, \quad (4)$$

其中 ΔE_1 为复合中心能级 E_1 与本征费米能级 E_i 的差 ($\Delta E_1 = E_1 - E_i$), m_{ie} 为有效本征载流子密度,载流子寿命 τ_n, τ_p 采用浓度相关的载流子寿命模型^[2],即

$$\frac{T_{\text{un}}}{\tau_n(x, y)} = A_n + B_n \left(\frac{N_{\text{total}}(x, y)}{N_{\text{SRHn}}} \right) + C_n \left(\frac{N_{\text{total}}(x, y)}{N_{\text{SRHn}}} \right)^{D_n}, \quad (5a)$$

$$\frac{T_{\text{up}}}{\tau_p(x, y)} = A_p + B_p \left(\frac{N_{\text{total}}(x, y)}{N_{\text{SRHp}}} \right) + C_p \left(\frac{N_{\text{total}}(x, y)}{N_{\text{SRHp}}} \right)^{D_p}, \quad (5b)$$

$T_{\text{un}}, T_{\text{up}}$ 分别为电子和空穴的 Shockley-Read-Hall 寿命, $N_{\text{SRHn}}, N_{\text{SRHp}}$ 分别为电子和空穴的 Shockley-Read-Hall 浓度参数, A_n, B_n, C_n, D_n 为模型中考虑载流子寿命与浓度相关时的常数.对于俄歇复合:

$$U_{\text{俄歇}} = A_{\text{un}}(pn^2 - nn_{\text{ie}}^2) + A_{\text{up}}(np^2 - pn_{\text{ie}}^2), \quad (6)$$

其中 $A_{\text{un}}, A_{\text{up}}$ 分别为电子和空穴的俄歇复合的系数.

光生载流子在电场和浓度梯度的作用下产生漂移和扩散,到达耗尽层边界形成光电流.在连续性方程中,迁移率 μ_n, μ_p 采用低场迁移率模型^[2],即

$$\mu_n = M_{n, \min} + \frac{M_{n, \max} \left(\frac{T}{300}\right)^{N_n} - M_{n, \min}}{1 + \left(\frac{T}{300}\right)^{X_n} \left(\frac{N_{\text{total}}(x, y)}{N_m}\right)^{\alpha_n}}, \quad (7a)$$

$$\mu_p = M_{p, \min} + \frac{M_{p, \max} \left(\frac{T}{300}\right)^{N_p} - M_{p, \min}}{1 + \left(\frac{T}{300}\right)^{X_p} \left(\frac{N_{\text{total}}(x, y)}{N_p}\right)^{\alpha_p}}, \quad (7b)$$

上述迁移率模型中 $M_{n, \min}, M_{p, \min}, M_{n, \max}, M_{p, \max}$ 分别为电子和空穴的最低和最高迁移率, N_n, N_p, X_n, X_p 分别为电子和空穴的归一化温度系数, N_m, N_p 分别为电子和空穴用于低场迁移率模型的基准杂质浓度. 模拟中还考虑了 6H-SiC 杂质的不完全电离. 模拟中采用的部分器件参数见表 1^[6-8].

表 1 模拟中使用的参数

参数名	6H-SiC	参数名	6H-SiC
$M_{n, \min} / (\text{cm}^2/\text{Vs})$	0	$M_{n, \max} / (\text{cm}^2/\text{Vs})$	6.8
$M_{n, \max} / (\text{cm}^2/\text{Vs})$	415.0	$M_{n, \max} / (\text{cm}^2/\text{Vs})$	99.0
N_m / cm^{-3}	1.11×10^{18}	N_p / cm^{-3}	2.1×10^{19}
N_n	-1.8	N_p	-1.8
X_n	0	X_p	0
$A_{un} / (\text{cm}^6/\text{s})$	3.0×10^{-29}	$A_{up} / (\text{cm}^6/\text{s})$	3.0×10^{-29}
T_{un} / s	1.0×10^{-6}	T_{up} / s	6.4×10^{-7}
$N_{\text{SRH}_n} / \text{cm}^{-3}$	3.0×10^{17}	$N_{\text{SRH}_p} / \text{cm}^{-3}$	3.0×10^{17}
$\Delta E_m / \text{eV}$	0.127	$\Delta E_p / \text{eV}$	0.225

器件的光响应灵敏度是光电流与光功率之比, 通过求解上述方程组后得出器件的总电流, 总电流减掉暗电流再与光功率的比值即为光响应灵敏度:

$$R = \frac{I_p - I_d}{P_{\text{opt}}}, \quad (8)$$

其中 I_p 为总电流, I_d 为无光照时器件的暗电流, P_{opt} 为入射光功率.

3. 结果分析与讨论

模拟中器件采用图 1 所示结构. 入射光源为恒定的复色光点光源. 通过定义光源的坐标、入射光入射器件表面的角度与宽度、入射光起止波长范围、入射光波长数目, 以及入射光各波段光强, 从而确定光源的特性. 采用三角形网格对器件进行网格划分, 器件的纵向在不同区的交接处网格划分较密, 其他区域基本采用均匀网格划分. 器件的横向一律使用均匀的网格. 数值运算得出的模拟结果与实验结果比较如图 3 所示.

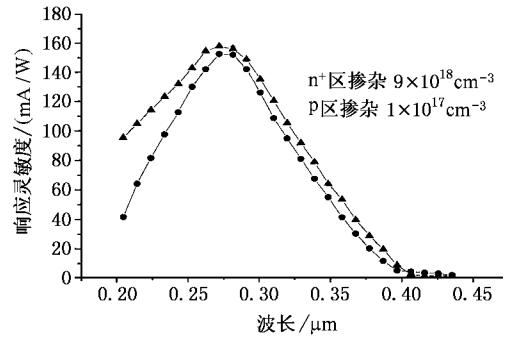


图 3 模拟曲线(▲)与实验曲线(●)的比较

通过比较可以看到模拟结果与实验结果符合得较好. 这说明本文的物理模型的正确性. 由于入射光在器件表面、电极、介质等处的损耗以及其他一些损耗因素在模型中没法预知, 所以模拟结果与实验结果在数值上有一定偏差.

不同的掺杂浓度对器件的光响应灵敏度有很大影响. 这对于设计性能优越的探测器必须考虑. 本文分别对不同 p 区掺杂浓度和 n 区掺杂浓度进行了模拟, 得出响应灵敏度与掺杂浓度以及波长的曲线 (见图 4).

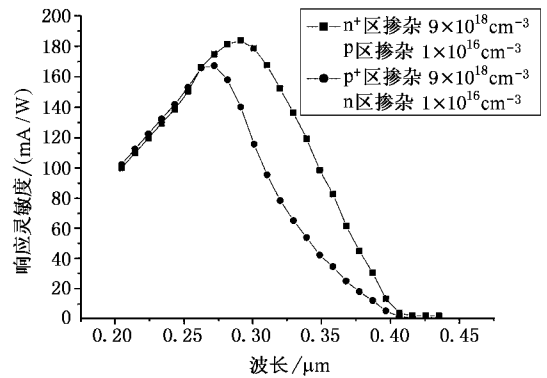


图 4 n^+p 和 p^+n 两种结器件各自的响应灵敏度与波长的关系曲线

从图 4 可以看到, n^+p 结器件响应灵敏度峰值相对 p^+n 结器件要大, 并且响应灵敏度峰值向长波方向偏移, 长波方面的响应灵敏度峰值明显比 p^+n 结器件要大. 这主要是因为电子和空穴的寿命不同引起的. 6H-SiC 中, 300K 时电子和空穴的寿命约在 $1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-9}$ s 之间, 而电子寿命比空穴寿命长^[6]. 扩散系数也比空穴的大, 所以光电流的主要组成部分是电子电流. 相对于 p^+n 结器件, n^+p 结器件对长波吸收较多的区是 p 区, 对光电流起作用的

光生载流子是电子,所以长波段光的响应灵敏度相对较大,使得峰值往长波方向偏移.也是因为长波在 n^+p 结器件的 p 区被充分吸收,使得更多的电子因为能到达耗尽层边缘而成为光电流,这样就使得光响应灵敏度峰值较 p^+n 结器件要大.

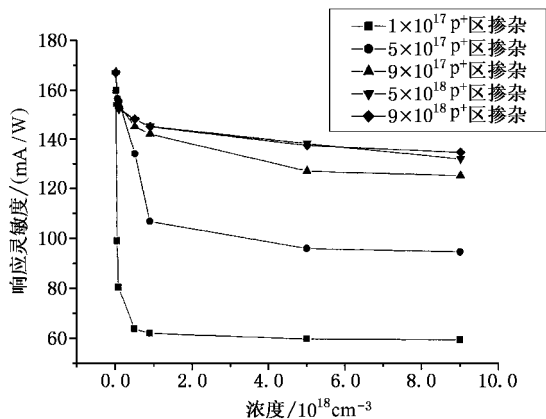


图5 p^+ 区取不同掺杂浓度时,响应灵敏度峰值随 n 区掺杂浓度的变化曲线

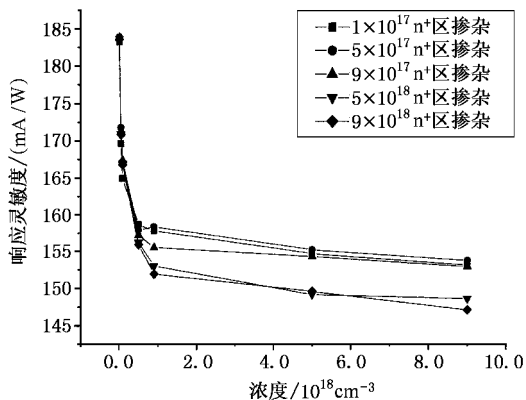


图6 n^+ 区取不同掺杂浓度时,响应灵敏度峰值随 p 区掺杂浓度的变化曲线

从图5和图6可以看出,当 $p^+(n^+)$ 区掺杂浓度不变时,响应灵敏度峰值的大小随 $n(p)$ 区浓度的增加而逐渐减小.这主要是因为耗尽层宽度的变化而引起的.当耗尽层较宽时,光子被吸收的概率增大,使得光响应灵敏度总体增加.因此,在响应时间容许的情况下,可以通过适当增大耗尽层的宽度来增加探测器的响应灵敏度.从图5和图6还可以看出, n^+p 结器件的响应灵敏度随高掺杂区浓度的变化没有 p^+n 结器件显著,这进一步说明光电流的主要组成部分是电子电流,所以改变 n^+ 区的浓度对响应灵敏度影响不大.

通过对不同区域、不同掺杂浓度的模拟还发现,

受光面区(p^+ 区或 n^+ 区)掺杂浓度较高 [$(1-9) \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$],低浓度区(n 区或 p 区)掺杂浓度较低 [$(1-5) \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$] 时,响应灵敏度较高.如对 p^+n 结器件,当 p^+ 区掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、 n 区掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时,光响应灵敏度峰值约为 98.97mA/W .而当 p^+ 区掺杂浓度为 $9 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 n 区掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时,光响应灵敏度峰值则增大到 167.14mA/W .对 n^+p 结器件也有同样结论.所以,通过分析上述模拟结果可知,要想得到较高的响应灵敏度值,应使受光面为高掺杂区,且掺杂的浓度一般应在 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上,同时适当降低另一个区的掺杂浓度.

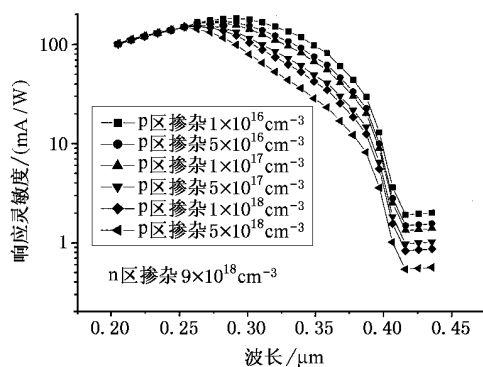


图7 6H-SiC pn 结的光谱响应灵敏度

从图7可以看出,在接近 $0.4 \mu\text{m}$ 附近仍然有较明显的光响应,这个特性对于长波段的紫外光的探测十分有利,对于弥补现有的其他紫外光探测器(如 GaN 紫外光探测器,光探测的波长上限仅为 $0.37 \mu\text{m}$)、在近紫外光波段的弱探测响应灵敏度十分重要^[5].

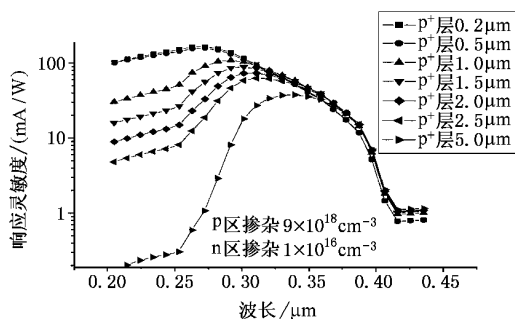


图8 响应灵敏度峰值波长随 p^+ 区厚度的变化曲线

除了浓度会影响响应灵敏度的分布外,器件结构尺寸对响应灵敏度的分布也有较大影响.响应灵敏度峰值波长与高掺杂区(p^+ 或 n^+ 区)的厚度有

关^[4] 随厚度的增加,峰值波长也会相应地增加,如图8所示.随 p^+ 区厚度由 $0.2\mu\text{m}$ 增加到 $5\mu\text{m}$,响应灵敏度峰值波长由 275nm 上升到 340nm .这种现象主要是因为,随 p^+ 层厚度的增加,短波长的光在器件表层产生的载流子因为复合的作用而难以到达耗尽层形成光电流,致使短波方面的响应灵敏度下降;而长波方面的吸收则由于器件厚度的增加有所提高,这样就使得响应灵敏度曲线的峰值往长波方向偏移,但响应灵敏度总体下降.因此,为了提高短波方面的光响应灵敏度,就需将器件表层做得很薄(约为 $10^{-1}\mu\text{m}$ 量级).

4. 结 论

本文研究了不同掺杂浓度、不同结深对 p^+n

结、 n^+p 结器件光响应灵敏度大小的影响,分析了响应灵敏度在波长上偏移的影响因素及其原因.从模拟结果得出:温度为 300K 时,对 p^+n 结器件,较大的响应灵敏度峰值约为 167 mA/W ,相应的峰值波长为 $0.275\mu\text{m}$;对 n^+p 结器件,较大的响应灵敏度峰值约为 183 mA/W ,相应的峰值波长为 $0.295\mu\text{m}$.响应灵敏度峰值会随掺杂浓度以及器件厚度的不同而在波长方向上有所偏移. pn 结的耗尽层宽度适当增大可以提高响应灵敏度.模拟结果与实验结果比较表明,本文的模拟结果与实验结果符合较好,证明了模型的正确性. 6H-SiC 的 pn 结光电探测器在紫外光波段的光谱响应范围很宽, $100\text{—}400\text{nm}$ 的波段范围内都有较大的响应灵敏度.并且在 $300\text{—}400\text{nm}$ 范围内,具有比 GaN 材料的探测器高得多的探测灵敏度,是很好的制作紫外光探测器的材料.

- [1] Brown D M, Downey E T, Ghezzi M, Kretchmer J W, Saia R J, Liu Y S, Edmond J A, Gati G, Pimbley J M and Schneider W E 1993 *IEEE Trans. ED* **40** 325
- [2] Avant Corporation 2001 Medici User's Manual
- [3] van de lagemaat J, Vanmaekelbergh D and Kelly J J 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 6089
- [4] Campbell R B and Chang H C 1967 *Solid-State Electron.* **10** 949

- [5] Torvik J T, Pankove J I and van Zeghbroeck B J 1999 *IEEE Trans. ED* **46** 1326
- [6] Lades M 2000 *PhD Thesis* Technischen Universität München
- [7] Ruff M, Mitlehner H and Helbig R 1994 *IEEE Trans. ED* **41** 1040
- [8] Fujihira K, Tamura S, Kimoto T and Matsunami H 2002 *IEEE Trans. ED* **49** 150

Simulation and analysis of 6H-SiC pn junction ultraviolet photodetector

Zhou Yong-Hua Zhang Yi-Men Zhang Yu-Ming Meng Xiang-Zhi

(*Microelectronic Institute , Xidian University , Xi 'an 710071 ,China*)

(Received 29 August 2003 ; revised manuscript received 17 March 2004)

Abstract

The spectral responsibility of 6H-SiC pn junction ultraviolet photodetector has been simulated by 2D numerical model. The effect of different impurity concentration and different junction-depth on the responsibility is discussed in this paper. For p^+n device , the responsibility can be as high as 167.2 mA/W when the width of p^+ -layer is about $0.2\mu\text{m}$, and the impurity concentrations are about $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ in p^+ -layer and n-layer , respectively. For n^+p device , the responsibility is as high as 183.5 mA/W when the width of n^+ -layer is about $0.2\mu\text{m}$, and the impurity concentrations are about $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ in n^+ -layer and p-layer , respectively. It is shown that the result of simulation agrees with the experimental data very well.

Keywords : 6H-SiC , detecting of ultraviolet , absorption coefficient , responsibility

PACC : 0762 , 0765E , 7820