

吸收层与倍增层分离的 4H-SiC 雪崩光电探测器

朱会丽¹ 陈厦平¹ 吴正云^{1,2,†}

(1 厦门大学物理系, 361005 厦门)

(2 厦门大学微机电中心, 361005 厦门)

摘要: 设计和制备了吸收层和倍增层分开的 4H-SiC 穿通型雪崩紫外光电探测器. 设计器件的倍增层和吸收层厚度分别为 0.25 和 1 μm . 采用 multiple junction termination extension (MJTE) 方法减少器件的电流集边效应和器件表面电场. 对器件的暗电流、光电流和光谱响应进行了测量. 器件在 55V 的低击穿电压下获得了一个高的增益 ($> 10^4$); 穿通前器件暗电流约为 10pA 数量级; 0V 偏压下器件光谱响应的紫外可见比大于 10^3 . 光谱响应的峰值波长随反向偏压的增大而向短波方向移动, 在击穿电压附近光谱响应的峰值波长移到 210nm, 此波长远远小于在 0V 时的响应峰值. 结果显示器件在紫外光探测中具有优良的性能.

关键词: 4H-SiC; 紫外光; 雪崩光电探测器

PACC: 2940P; 7340L; 7850G

中图分类号: TN364

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0284-05

1 引言

4H-SiC 具有宽带隙、高热导率和高击穿电场等优点, 使其成为第三代半导体研究的热点^[1~5]. 另外, 4H-SiC 是间接带隙半导体材料, 其空穴与电子的离化率之比约为 $10^{[6]}$, 使其成为制备具有比较低的暗电流和高的倍增因子的雪崩光电探测器的最好材料之一^[2,7,8]. 雪崩光电探测器具有内部增益, 它适用于小信号和单光子探测^[9]. 在实际应用中, 要求探测器在较低的偏压下工作. 当然, 从交流/直流转换器的体积及可靠性的要求来说, 更低的工作电压是合乎要求的. 一般来说, 在保证倍增因子的前提下, 击穿电压越低越好. 吸收层与倍增层相互分离的雪崩型探测器既可以提高器件的量子效率又可以降低器件的击穿电压, 是雪崩探测器中一种比较好的设计结构. Yan 等人^[7] 曾经报道了此种结构的 4H-SiC 雪崩光电探测器, 探测器的击穿电压大于 90V. 另外, 最近 Guo 等人^[10] 也对 4H-SiC 的此种类型光电探测器进行了报道, 在器件的击穿电压大于 190V 时其倍增因子约为 10^3 . 但是国内对 4H-SiC 材料及其器件的研究还处于起步阶段, 很多只是在做理论的模拟. 2004 年, 吴正云等人^[11] 制备了性能比较好的金属-半导体-金属 4H-SiC 紫外光电探测器. 但是, 作为 APD 结构的光电探测器, 要想获得高的倍增因子和好的光谱响应度, 器件设计时需要增加边缘保护以防止器件在高电场下边缘提前击穿. 所以

APD 型探测器与其他探测器相比较, 其结构更加复杂, 对材料的要求也更高. 目前国内还没有报道 4H-SiC 雪崩光电探测器的研制. 本文对高性能的 4H-SiC 雪崩光电探测器进行了设计和制备, 采用了吸收层与倍增层相互分离的穿通型紫外光电探测器结构, 并对器件的暗电流、光电流和光谱响应进行了系统的测量与深入的分析. 测试结果显示, 本文制备的 4H-SiC 雪崩探测器在紫外光波段探测中具有良好的性能.

2 器件设计与制备

2.1 器件设计

在 4H-SiC 雪崩光电探测器设计中采用了吸收层与倍增层分离的设计方法, 这种设计有以下几个优点: (1) 使倍增层尽量小, 倍增处电场比较均匀, 可以减小不可控制的局域雪崩击穿; (2) 吸收层厚度尽量大, 使入射的光子大部分被吸收, 以提高器件的量子效率; (3) 在穿通状态下, 吸收层和倍增层分开以降低器件的击穿电压 (作为雪崩型光电探测器在倍增因子达到要求的情况下击穿电压越低越好). 具体的器件结构如图 1 所示. 4H-SiC 材料从美国 Cree 公司购买. 在 n^+ 型 4H-SiC 衬底上生长了三层外延层, 分别为 n^- , n 和 p^+ 外延层, 其中 p^+ 外延层是通过离子注入然后高温退火得到的. 这三种外延层的掺杂浓度和厚度分别为: $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, $1\mu\text{m}$; < 4

† 通信作者. Email: zhywu@xmu.edu.cn

2006-07-26 收到, 2006-09-18 定稿

$\times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, 0.25 \mu\text{m}; 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}, 0.3 \mu\text{m}$. p^+ 外延层的作用一是形成 p 型欧姆接触,二是与 n 型外延层形成 p-n 结;n 和 n^- 外延层分别是器件的倍增层和吸收层,根据文献[10,12]报道的 4H-SiC 的吸收系数值,吸收层与倍增层厚度分别设计为 1 和 $0.25 \mu\text{m}$.光线从器件正面入射,光敏面直径为 $220 \mu\text{m}$.

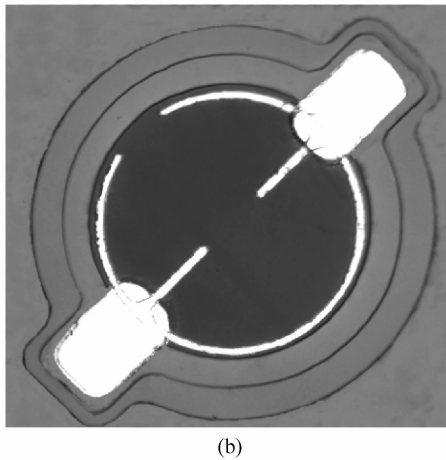
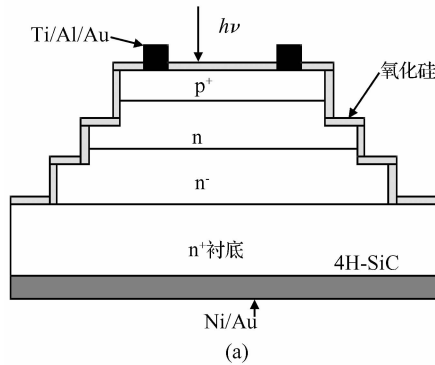


图 1 4H-SiC 雪崩光电探测器结构图 (a) 截面图;(b) 俯视图

Fig. 1 Schematic of 4H-SiC avalanche photodiode (a) Cross section; (b) Top view

图 2 显示了 4H-SiC 雪崩光电探测器正常工作时的电场分布.此电场强度分布是由三个外延层的类型与掺杂浓度的大小决定的.0 点的位置即为 p-n 结处,此处电场强度最大. L_a 和 L_d 分别为器件的雪崩长度与漂移长度.随着反向电压的升高,电场区越来越宽.当电压升高到一定的值时,电场区从 p^+ 外延层扩展到衬底 n^+ ,器件处于穿通状态,而此时的电压也被称为穿通电压.随着反向电压继续增大,在 p-n 结处的电场强度达到材料的临界电场强度,器件就开始雪崩.此时的电压被称为击穿电压.穿通电压与击穿电压的计算是采用电场强度在长度(位置)上的积分获得的.理论计算得出本文设计的 4H-

SiC 雪崩探测器的穿通电压与击穿电压分别为 48.75 和 57.7V.

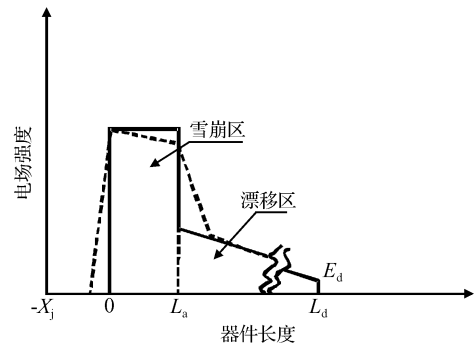


图 2 4H-SiC 雪崩探测器的电场强度分布 实线为电场强度的简化模型;虚线为电场强度的实际分布.

Fig. 2 Electric-field distribution of 4H-SiC APD Solid line is simplified model; dotted line is reality electric-field distribution.

2.2 器件制备

样品制备前经过严格的 RCA 标准工艺清洗.采用等离子体诱导耦合干法刻蚀 (inductively coupled plasmas) 制备一个高度为 $1.55 \mu\text{m}$ 的台面作为器件之间的隔离.然后用同样的方法刻蚀两个台阶的 MJTE 台面,台面宽度为 $25 \mu\text{m}$,分别位于 n 和 n^- 外延层.已经证明 MJTE 可以有效减少器件边缘的电场集边效应和器件的表面电场^[13].为了获得干净的样品表面,氧化层的制备分两步进行.首先通过热氧化制备牺牲层,将氧化后的样品放入缓冲 HF 酸溶液腐蚀牺牲层,得到干净的样品表面;然后再通过干氧/湿氧/干氧交替热氧化在器件的表面生长一层厚度约为 60nm 的氧化层作为器件钝化层,防止器件老化并降低器件的暗电流.随后光刻 p 型电极区,用缓冲 HF 酸溶液将电极区氧化层去掉,然后采用磁控溅射的方法分层溅射 Ti/Al/Au 三种金属作为 p 型欧姆接触.去掉样品背面氧化层,在背面溅射 Ni/Au 两种金属作为 n 型欧姆接触.新制备的金属与 SiC 之间的金-半接触是肖特基接触,为了形成良好的欧姆接触,p 型和 n 型接触金属同时在 900°C 的温度下退火 12min.最后光刻焊盘区,溅射 Ti/Au 作为焊盘金属.

3 测试结果与讨论

图 3 是 4H-SiC 雪崩探测器的暗电流、280nm 波长光照下的光电流和倍增因子随外加偏压的变化曲线.由暗电流曲线可以看出,电压较小时暗电流在 10pA 量级,随着电压的升高没有明显增大的趋势.当电压继续升高时,在一个弯曲处暗电流明显增加

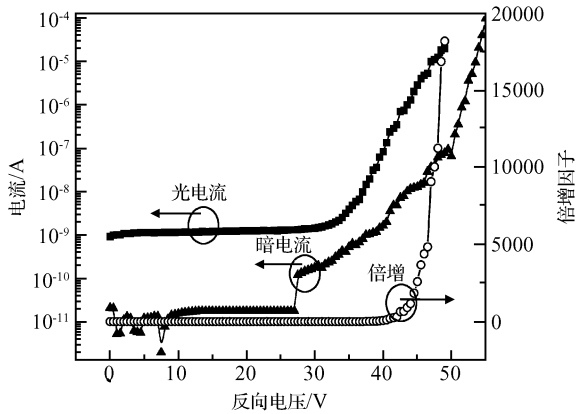


图 3 4H-SiC 雪崩探测器的反向 I - V 特性曲线和倍增因子
Fig.3 I - V characteristics and gain of 4H-SiC APD

一个数量级,此时的电压即为器件的穿通电压,大小为 27.5V.此值比理论计算的结果稍小,可能是因为 n 型外延层的掺杂浓度的不确定性导致的. n 型外延层是器件设计最重要的一层,它决定了器件的穿通电压和击穿电压.器件穿通后,暗电流随电压的增大有稍微增大的趋势,当外加电压接近击穿电压时,器件暗电流明显增大,实验测得的击穿电压的实际值为 55V.当外加电压小于穿通电压时,器件的暗电流略大于以前报道的最好的结果^[5,14],这可能是由于腐蚀氧化层的过程中某些地方光刻胶保护不好出现了钻蚀而引起的.光电流是在 280nm 特定波长光照下获得的,由光电流曲线可以看出,在 35V 以前,光电流要比暗电流大两个数量级,而且光电流比较稳定.当反向偏压达到 45V 以后,光电流有明显的倍增,由倍增因子曲线也可以看出在偏压大于 45V 以后,倍增因子有一个非常陡峭的上升.计算倍增因子的过程如下:首先用光电流曲线值减去暗电流,作为绝对的光电流.对于光电流曲线认为反向偏压较小时(一般选择小于 5V)电流无倍增效应,其倍增因子为 1.对于光电流曲线上反向电压小于 5V 时的光电流取平均值,然后用绝对光电流除以无倍增效应时计算出的光电流平均值即为光电流的倍增因子.通过计算得出本文制备的 4H-SiC 雪崩探测器在击穿电压附近雪崩倍增因子大于 10^4 .所制备的 4H-SiC 穿通雪崩探测器在低的击穿电压下可以获得较高的倍增因子,结果明显优于以往同类探测器的结果^[7,10],同时在低击穿电压下获得高的倍增因子也说明采用吸收层与倍增层分离的雪崩型光电探测器结构能够满足器件设计的要求.

器件在不同反向偏压下的相对光谱响应曲线如图 4 所示.测量光谱响应所用的光源为 450W 功率的氙弧灯,由于单色仪的限制,测量的波长范围为 200~400nm.光源通过一个型号为 System S380

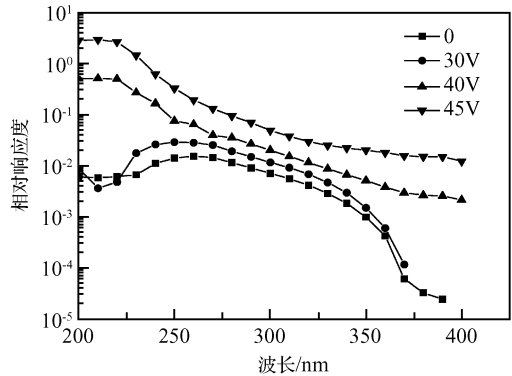


图 4 4H-SiC 雪崩探测器在不同偏压下的光谱响应曲线
Fig.4 Spectral responsivities of 4H-SiC APD measured under various biases

Dual-Channel Laboratory Photometer 紫外增强标准的硅 222 探测器进行测量与校准.由图 4 可以看出,在零偏压下,器件的响应波长在 200~380nm 之间,响应峰值位于 260nm.260nm 处的光谱响应值比 380nm 处的光谱响应大三个数量级,这说明在零偏压下,器件的紫外可见比约为 10^3 .对于紫外光电探测来说,其紫外可见比是表征探测性能好坏的重要参数,大的紫外可见比说明器件对紫外光比较敏感,而对可见光基本上没有响应.所以 4H-SiC 基探测器在对紫外光的探测过程中,不像硅基紫外光电探测器一样需要附加一个复杂的滤波系统而可以直接对紫外光进行有效的探测.当外加偏压为 45V 时,器件的响应波长峰值移动到 210nm,相对响应强度也明显增强,截止波长也相应地向短波方向移动到 290nm.器件在 210 与 290nm 处响应度的比值接近 200.在击穿电压附近 4H-SiC 探测器的响应波长峰值和截止波长向短波方向移动,使 4H-SiC 探测器的响应波长范围由长波长紫外光区移向日盲区,所以 4H-SiC 雪崩探测器可以在不加滤光片的情况下对日盲区的紫外光进行探测.出现此种现象可能是因为吸收长度随入射波长的减小而减小.对短波长入射光来说,光线大部分在器件表面被吸收,在低电压下,载流子复合时间一定,因为耗尽区比较薄,在器件表面吸收光子后产生的光生载流子不能被有效地扫向器件的两端形成电流,而是在器件表面被复合掉,所以在反向电压较低时短波长入射光的响应度比较小.随着反向偏压的升高,耗尽层变宽,靠近器件表面被吸收的短波长入射光产生的光生载流子能够在复合前漂移到临近的耗尽层,在电场的作用下以饱和漂移速度移向器件的两端,空穴经过雪崩形成光电流,探测器对短波长入射光的响应度提高^[15].而对于长波长的入射光,光子的吸收主要在吸收层,吸收层在耗尽区内或者靠近耗尽区,

所以由吸收长波长而产生的光生载流子都可以漂移到耗尽区并在电场的作用下形成光电流,所以长波长区的响应度没有非常明显的变化.由于器件设计的结构不同,随着反向偏压的升高可能出现相反的现象.Yan 等人^[1]报道 4H-SiC 雪崩探测器光谱响应峰值随反向偏压的升高而向长波长方向移动,原因是他们设计的器件 p-n 结比较靠近表面.对于短波长入射光来说吸收区主要在样品表面,所以在低电压下由吸收短波长产生的光生载流子可以在电场的作用下于复合之前形成光电流,电压的升高对短波长入射光的响应峰值没有明显的改变;而长波长入射光的吸收区离耗尽区比较远,低压下部分光生载流子在形成光电流前被复合掉;而高压下耗尽区变宽,电场可以将吸收长波长产生的电子-空穴对有效地扫向器件的两端形成光电流.所以电压的升高使响应波长向长波方向移动.这两种不同的现象主要是由于耗尽层的位置不同引起的.以前报道的 4H-SiC 探测器都是可见盲探测器^[1,3,4,7,8,16].而本文设计的 SiC 雪崩紫外光电探测器在击穿电压附近响应峰值波长移到 210nm,截止波长蓝移到 290nm,使 4H-SiC 雪崩探测器的响应波长由整个紫外光波段移向波长小于 290nm 的短波长紫外光,即所谓的日盲区.这对于波长小于 290nm 的日盲区紫外光探测有重要意义.

4 结论

本文设计和制备了吸收层与倍增层分离的 4H-SiC 雪崩紫外光电探测器并对其 $I-V$ 特性和 200~400nm 波段的光谱响应进行了测量与分析.结果表明在低击穿电压下(55V)获得了比较高的倍增因子(10^4),这说明吸收层与倍增层分离的雪崩探测器结构能够满足器件设计的要求.零偏压下,器件在紫外光波段具有很好的紫外可见比(约为 10^3).耗尽层厚度随反向偏压的改变而变化,导致了器件的光谱响应峰值波长随反向偏压的升高向短波长移动.零偏压下,光谱响应峰值在 260nm,而当电压升高到 45V 时,响应峰值波长移动到 210nm,此时 210nm 处的响应度比 290nm 处响应度大两个数量级.这对于波长小于 290nm 的日盲光探测具有重要意义.

参考文献

- [1] Yan F, Zhao J H, Olsen G H. Demonstration of the first 4H-SiC avalanche photodiodes. *Solid-State Electron*, 2000, 44: 341
- [2] Ng B K, Yan F, David J, et al. Multiplication and excess noise characteristics of thin 4H-SiC UV avalanche photodiodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14: 1342
- [3] Ng B K, David J, Tozer R C, et al. Performance of thin 4H-SiC UV avalanche photodiodes. *IEE Proc Optoelectron*, 2003, 150: 187
- [4] Guo X Y, Beck A, Yang B, et al. Low dark current 4H-SiC avalanche photodiodes. *Electron Lett*, 2003, 39: 1673
- [5] Guo X Y, Beck A, Li X, et al. Study of reverse dark current in 4H-SiC avalanche photodiodes. *IEEE J Quantum Electron Lett*, 2005, 41: 562
- [6] Konstantinov A, Wahab Q, Nordell N, et al. Ionization rates and critical fields in 4H silicon carbide. *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 90
- [7] Yan F, Luo Y, Zhao J H, et al. 4H-SiC Visible blind UV avalanche photodiodes. *Electron Lett*, 1999, 35: 929
- [8] Yan F, Qin C, Zhao J H, et al. Low-noise visible-blind UV avalanche photodiodes with edge terminated by 2° positive bevel. *Electron Lett*, 2002, 38: 335
- [9] Xin X, Yan F, Sun X, et al. Demonstration of 4H-SiC UV single photon counting avalanche photodiode. *Electron Lett*, 2005, 41: 212
- [10] Guo X Y, Rowland L B, Dunne G T, et al. Demonstration of ultraviolet separate absorption and multiplication 4H-SiC avalanche photodiodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2006, 18: 136
- [11] Wu Z Y, Xin X B, Yan F, et al. Fabrication of MSM structure UV photodetector on 4H-SiC. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, 21: 269 (in Chinese) [吴正云, Xin Xiaobin, Yan Feng, 等. 金属-半导体-金属结构 4H-SiC 紫外光电探测器的研制. *量子电子学报*, 2004, 21: 269]
- [12] Sridhara S G, Eperjesi T J, Devaty R P, et al. Penetration depths in the ultraviolet for 4H, 6H and 3C silicon carbide at seven common laser pumping wavelengths. *Materials Science and Engineering*, 1999, 61/62: 229
- [13] Li X, Tone K, Fursin L, et al. Multi-step junction termination extension for SiC power devices. *Electron Lett*, 2001, 37: 392
- [14] Guo X Y, Beck A L, Campbell J C, et al. Spatial nonuniformity of 4H-SiC avalanche photodiodes at high gain. *IEEE J Quantum Electron Lett*, 2005, 41: 1213
- [15] Sze S M. *Physics and process of semiconductor devices*. Beijing: Science Press, 1992 (in Chinese) [施敏. *半导体器件物理与工艺*. 北京: 科学出版社, 1992]
- [16] Yan F, Qin C, Zhao J H, et al. Demonstration of 4H-SiC avalanche photodiodes linear array. *Solid-State Electron*, 2003, 47: 241

Separate Absorption and Multiplication 4H-SiC Ultraviolet Avalanche Photodetector

Zhu Huili¹, Chen Xiaping¹, and Wu Zhengyun^{1,2,†}

(1 *Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

(2 *MEMS Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China*)

Abstract: A 4H-SiC avalanche photodetector (APD) with separate absorption and multiplication layers was designed and fabricated. The thicknesses of the absorption and multiplication epilayers were designed as 0.25 and 1 μm , respectively. A multiple junction termination extension (MJTE) was used to eliminate the electric field crowding effect at the edge and to reduce the surface electric field. Dark current, photocurrent, and spectral responsivity were measured. High gain ($>10^4$) was achieved at a low breakdown voltage, and the dark current was on the order of about 10 pA before device was punched through. The ratio of responsivity at 260 nm to that at 380 nm was higher than 10^3 . A new phenomenon was observed in its spectral responsivity. The response wavelength peak shifted to shorter wavelength as the reverse bias was increased. Near breakdown voltage the peak of the response wavelength was located at 210 nm, which was shorter than that at 0 V. These results show that the samples have good performance for ultraviolet detection.

Key words: 4H-SiC; ultraviolet; avalanche photodetector

PACC: 2940P; 7340L; 7850G

Article ID: 0253-4177(2007)02-0284-05

† Corresponding author. Email: zhywu@xmu.edu.cn

Received 26 July 2006, revised manuscript received 18 September 2006