



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 104201211 B

(45) 授权公告日 2016. 03. 30

(21) 申请号 201410427072. 4

CN 1254442 A, 2000. 05. 24,

(22) 申请日 2014. 08. 27

审查员 唐俊峰

(73) 专利权人 温州大学

地址 325000 浙江省温州市瓯海区东方南路
38 号温州市国家大学科技园孵化器

(72) 发明人 韦文生

(74) 专利代理机构 温州瓯越专利代理有限公司

33211

代理人 陈加利

(51) Int. Cl.

H01L 29/861(2006. 01)

H01L 29/06(2006. 01)

H01L 21/329(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102820323 A, 2012. 12. 12,

JP 7-97659 B2, 1995. 10. 18,

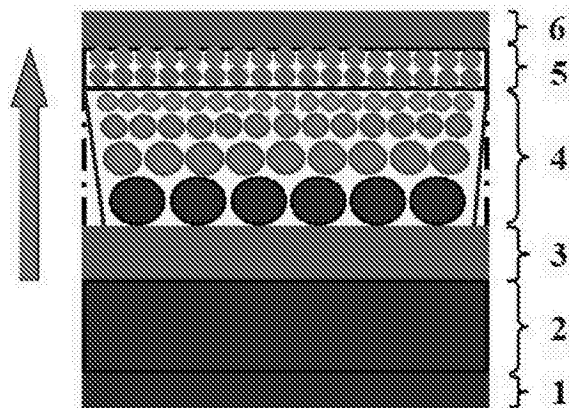
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

制备 SiC 超快恢复二极管及工艺

(57) 摘要

本发明公开了一种在 4H 型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变 P⁺-N-N⁺ 型 SiC 超快恢复二极管及工艺, 其结构为: 阳极电极 / (P⁺) 4H-nc-SiC / (N) 渐变 6H-nc-SiC / (N) 4H-c-SiC / (N⁺) 4H-c-SiC / 阴极电极; 包括有 N⁺ 型 4H-c-SiC 衬底、N 型 4H-c-SiC 外延层、N 型 6H-nc-SiC 梯度掺杂且晶粒渐变多层膜、P⁺ 型 4H-nc-SiC 单层膜, 所述的于 N⁺ 型 4H-c-SiC 衬底和 P⁺ 型 4H-nc-SiC 单层膜外侧分别欧姆连接有阴极电极 NiAu 和阳极电极 TiAu。本发明的器件结构使用 PECVD 技术进行制备, 优点是缩短了反向恢复时间, 抑制了浪涌电流, 降低了工艺温度。



1. 一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管,其特征为:阳极电极/P⁺型4H-nc-SiC/N型缓变6H-nc-SiC/N型4H-c-SiC/N⁺型4H-c-SiC/阴极电极;

包括有N⁺型4H-c-SiC衬底(2)、从N⁺型4H-c-SiC衬底一侧面外延生长的N型4H-c-SiC外延层(3)、沉积于N型4H-c-SiC外延片上的N型缓变6H-nc-SiC多层膜(4)、沉积于N型6H-nc-SiC多层膜外侧的P⁺型4H-nc-SiC单层膜(5),所述的N⁺型4H-c-SiC衬底(2)和P⁺型4H-nc-SiC单层膜(5)外侧分别有欧姆连接的阴极电极(1)和阳极电极(6);

沿着阴极电极(1)至阳极电极(6)方向的各层的N型掺杂浓度逐渐减小;

所述的N型缓变6H-nc-SiC多层膜(4)中包括有4层,且沿阴极电极(1)至阳极电极(6)方向,设置的N型6H-nc-SiC多层膜(4)中的N型掺杂浓度、纳米晶粒尺寸逐渐变小。

2. 根据权利要求1所述的一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管,其特征为:所述N⁺型4H-c-SiC衬底(2)的多数载流子为电子,浓度 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 $250 \pm 2 \text{ } \mu\text{m}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管,其特征为:所述的N型4H-c-SiC外延层(3),它在N⁺型4H-c-SiC衬底(2)上生长,多数载流子为电子,浓度 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 $10 \text{ } \mu\text{m}$,偏离(0001)面 8° ,表面微管密度低于 $30 \text{ } \mu\text{P} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管,其特征为:所述N型缓变6H-nc-SiC多层膜(4)中的各层在沉积过程中,沿着生长方向按掺杂浓度从高到低逐渐降低、纳米晶粒从大到小逐层生长,共4层。

5. 根据权利要求4所述的一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管,其特征为:所述N型6H-nc-SiC多层膜(4)为磷掺杂,沿着生长方向第1——第4层的载流子浓度分别为 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$;第1——第4层的纳米晶粒尺寸分别为 12.0 nm 、 10.0 nm 、 8.0 nm 、 6.0 nm ,每层厚度 $1.0 \text{ } \mu\text{m}$ 。

6. 根据权利要求1所述的一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管,其特征为:所述P⁺型4H-nc-SiC单层膜(5)的P⁺型掺杂为硼掺杂,载流子浓度为 $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 $0.5 \text{ } \mu\text{m}$ 。

7. 根据权利要求1所述的一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管,其特征为:所述的阴极电极(1)为AuNi合金电极薄膜;所述的阳极电极(6)为AuTi合金电极薄膜。

8. 一种如权利要求1-7之一所述的在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管的制备工艺,其特征为包括以下步骤:

(一)选择衬底,厚度 $250 \pm 2 \mu\text{m}$ 、载流子浓度为 1.0×10^{19} 的N⁺型4H-c-SiC衬底(2)上外延厚度为 $10 \text{ } \mu\text{m}$ 、载流子浓度 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的N型4H-c-SiC外延层(3),并且双面抛光,外延层表面偏离(0001)面 8° ,微管密度低于 $30 \text{ } \mu\text{P} \cdot \text{cm}^{-2}$;

(二)衬底预处理,在室温下,采用刻蚀液蚀掉N⁺型4H-c-SiC衬底(2)和N型4H-c-SiC外延层(3)表面的SiO₂层;

(三)N型缓变6H-nc-SiC多层膜(4)的制备,采用PECVD法,以H₂为稀释气,以SiH₄和CH₄

为混合反应源气,以 PH_3 为掺杂气,在PECVD系统反应室内的N型4H-c-SiC外延层(3)上,逐次生长多层N型6H-nc-SiC薄膜,其工艺参数是:

- 稀释比: $\text{H}_2/(\text{H}_2+\text{CH}_4+\text{SiH}_4)=(90-99) \text{ vol}\%$;
- PECVD反应室极限真空度:不低于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$;
- 混合反应源气掺杂比: $\text{PH}_3/(\text{CH}_4+\text{SiH}_4)=0.1-10.0 \text{ vol}\%$;
- 薄膜生长时选用射频电源的频率:13.6—95.2 MHz;
- 薄膜生长射频功率密度: $0.3 - 0.8 \text{ W/cm}^2$;
- 薄膜生长衬底温度: $T_s=823 \pm 10 \text{ K}$;
- 薄膜生长负直流偏压: $V_b=-50 - -250 \text{ V}$;
- 薄膜生长时反应气体压力: $P=0.7 - 1.0 \text{ Torr}$;

缓变6H-nc-SiC多层膜的结构:沿着生长方向第1至4层的载流子浓度/纳米晶粒尺寸分别为 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}/12.0 \text{ nm}$ 、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}/10.0 \text{ nm}$ 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}/8.0 \text{ nm}$ 、 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}/6.0 \text{ nm}$,每层厚度 $1.0 \mu\text{m}$;

(四) P^+ 型4H-nc-SiC单层膜(5)的制备,采用PECVD法,以 H_2 为稀释气,以 SiH_4 和 CH_4 为混合反应源气,以 B_2H_6 为掺杂气,在PECVD系统反应室内于N型缓变6H-nc-SiC多层膜(4)之上沉积 P^+ 型4H-nc-SiC单层膜(5),其工艺参数是:

- PECVD反应室极限真空度:不低于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$;
- 稀释比: $\text{H}_2/(\text{H}_2+\text{CH}_4+\text{SiH}_4)=(90-99) \text{ vol}\%$;
- 混合反应源气掺杂比: $\text{B}_2\text{H}_6/(\text{CH}_4+\text{SiH}_4)=0.5-5.0 \text{ vol}\%$;
- 薄膜生长时选用射频电源的频率:13.6—95.2 MHz;
- 薄膜生长射频功率密度: $0.3 - 0.8 \text{ W/cm}^2$;
- 薄膜生长衬底温度: $T_s=673 \pm 5 \text{ K}$;
- 薄膜生长负直流偏压: $V_b=-50 - -250 \text{ V}$;
- 薄膜生长时反应气体压力: $P=0.7 - 1.0 \text{ Torr}$;
- 薄膜厚度: $0.5 \mu\text{m}$;

(五)阴极电极和阳极电极制备,采用电子束蒸发法,分别在 N^+ 型4H-c-SiC衬底(2)、 P^+ 型4H-nc-SiC单层膜(5)的外侧对应蒸镀AuNi合金电极薄膜、AuTi合金电极薄膜,分别形成AuNi合金电极薄膜/ N^+ 型4H-c-SiC、AuTi合金电极薄膜/ P^+ 型4H-c-SiC欧姆接触;

其工艺参数是:

- 电子束蒸发室极限真空度:不低于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$;
- 灯丝直流电流: $I=5-10 \text{ A}$;
- 衬底温度: $T_s=573 \pm 5 \text{ K}$;
- 材料: AuNi合金; AuTi合金;
- 电极薄膜的厚度: $1.0 \mu\text{m}$;

(六)最终形成AuTi合金电极薄膜/ P^+ 型4H-nc-SiC/N型缓变6H-nc-SiC/N型4H-c-SiC/ N^+ 型4H-c-SiC/AuNi合金电极薄膜结构的基区渐变 $\text{P}^+-\text{N}-\text{N}^+$ 型SiC超快恢复二极管。

制备 SiC超快恢复二极管及工艺

技术领域

[0001] 本发明属于功率半导体器件领域,具体是指一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变P⁺-N⁻-N⁺型SiC超快恢复二极管及工艺。

背景技术

[0002] 用于功率变换或控制、通信领域的快速恢复二极管(Fast Recovery Diode, 简称FRD),通常与绝缘栅门控双极型晶体管(IGBT)等三端功率开关器件配合或单独使用,能导通负载中的无功电流,缩短电容的充电时间,并抑制因弥散电感而引起的电磁干扰,具有广泛的研发、应用价值。

[0003] 已有P⁺-N⁻-N⁺型晶体碳化硅(3c-SiC、4H-SiC、6H-SiC等结构类型)、晶体硅(c-SiC)材料的商用FRD,一般均采用外延、扩散、离子注入等工艺制造。这些器件内的基区(亦称为漂移区)掺杂是均匀的,也没有纳米晶SiC(Nanocrystalline SiC, nc-SiC)结构。c-SiC材料的FRD的反向恢复时间(T_{rr})降低到50纳秒(50ns),软化因子(S) ≥ 0.8。在研制过程中形成了发射率控制及少子寿命控制两大关键技术。

[0004] 张甲阳等用ISE-TCAD软件设计了基区掺杂渐变的4H-SiC单晶材料PIN二极管[4H-SiC PIN二极管开关特性研究,西安电子科技大学硕士学位论文,2010年],将传统的漂移区划分成三层,掺杂浓度依次渐变,分别是 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 、 $7 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 和 $8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。模拟显示,改进后的二极管的正向I-V特性基本不变,反向恢复速度提高约10%,软化因子S增大30%,器件的反向击穿电压发生退化。对比发现,漂移区三层渐变掺杂结构比漂移区两层渐变掺杂结构具有更为优越的性能。

[0005] 刘静等人采用数值拟合的方法[SiGeC/Si异质结快速软恢复功率二极管的研究,西安理工大学博士学位论文,2009年],提出了SiGeC材料的迁移率模型和能带结构模型,将SiGeC/Si异质结技术用于功率二极管反向恢复特性的改进。阐述了Si基应变材料的压应变和张应变的形成机理,分析了SiGeC/Si能带结构特点,依据导带、价带、带隙变化量 ΔE_c 、 ΔE_v 、 ΔE_g 的关系,得出SiGeC/Si异质结能带结构属于“负反向势垒”。基于异质结电流传输机理,SiGeC/Si功率二极管实现了低通态压降下高电流密度的传输,改善了二极管的反向恢复特性,同时具有较低的反向漏电流。与少子寿命控制技术相比,SiGeC/Si异质结能带工程更有效地协调功率二极管中通态压降、反向漏电流和反向恢复时间三者之间的矛盾,获得性能优良的器件。

[0006] 以色列人German A. Ashkinazi等提出基区渐变的AlGaAs及GaAsP大功率P⁺-N⁻-N⁺型超快恢复二极管[IEEE Transactions on Electron Devices, 40 (1993): 285.]。他们用改变AlGaAs及GaAsP材料组分的办法来调节P⁺-N⁻-N⁺型二极管基区的能带分布,形成“辅助的”及“阻碍的”准电场并调控二极管内载流子的输运。结果显示,具有“辅助”准电场的二极管的正向导通电压降低,反向恢复的峰值电流降低,反向恢复特性变软。

[0007] 现有的3c-、4H-、6H-、nc-SiC薄膜,它由无序组织(a-SiC)以及嵌在其中的纳米级nc-SiC晶粒构成。采用PECVD在600°C下研制的6H-nc-SiC薄膜[半导体学报,27 (2007):

1765.;无机材料学报,23(2008):540.],发现样品发光谱的谱峰分别位于363nm、366nm和368nm,峰值波长对应能量均大于6H-SiC的体带隙能量,可通过改变氢的流量来调节6H-nc-SiC的晶粒大小和有序度、带隙能量。采用PECVD在350°C下制备的B、P掺杂4H-SiC单层薄膜[半导体学报,23(2002):722.],Hall电子迁移率达到 $10^4\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级。由于nc-SiC薄膜的结构不同于c-SiC、多晶碳化硅(pc-SiC)、非晶碳化硅(a-SiC)和微晶碳化硅薄膜($\mu\text{c-SiC}$)对的结构,它们的导电性能差别很大。

[0008] 过去的研究表明,改善FRD反向恢复特性研究的手段是阳极发射率控制和基区少子寿命控制。另外,前人用外延、扩散或离子注入等方法制造的 $\text{P}^+-\text{N}^--\text{N}^+$ 型FRD,因为需要1000°C高温处理,能耗很大。

[0009] 虽然尚未见采用SiC外延片和nc-SiC研制基区渐变的 $\text{P}^+-\text{N}^--\text{N}^+$ 型FRD的报道,但nc-SiC在信息与通信、电力电子技术方面的应用前景引起了重视。本发明人过去设计了阳极及阴极缓变、基区不变的二极管,申请了“纳米碳化硅/晶体碳化硅双缓变结快速恢复二极管及其制备方法”专利(专利申请号201210329426.2),但未使用6H-nc-SiC结构。本次根据半导体能带剪裁思想,利用4H-c-SiC外延片,研制了阳极及阴极不变、基区缓变的二极管,反向恢复效果更佳。

发明内容

[0010] 本发明的目的是为了克服现有技术存在的缺点和不足,而提供一种在4H型单晶碳化硅外延层上制备的基区渐变 $\text{P}^+-\text{N}^--\text{N}^+$ 型SiC超快恢复二极管。比较过去的器件,该器件的反向恢复时间 T_{rr} 缩短至20 ns,反向恢复峰值电流 I_{rrm} 很小,反向恢复特性更软。

[0011] 本发明的另一目的是提供一种在外延层上制备基区渐变 $\text{P}^+-\text{N}^--\text{N}^+$ 型纳米晶/单晶碳化硅FRD的方法。

[0012] 为实现本发明的第一个目的,本发明的技术方案是其结构为:阳极电极/(P^+)4H-nc-SiC/(N)缓变6H-nc-SiC/(N)4H-c-SiC/(N^+)4H-c-SiC/阴极电极;

[0013] 包括有 N^+ 型4H-c-SiC衬底(2)、从 N^+ 型4H-c-SiC衬底一侧面外延生长的N型4H-c-SiC外延层(3)、沉积于N型4H-c-SiC外延片上的N型6H-nc-SiC梯度掺杂且晶粒尺寸变化的多层膜(4)、沉积于N型6H-nc-SiC多层膜外侧的 P^+ 型4H-nc-SiC单层膜(5),所述的于 N^+ 型4H-c-SiC单晶衬底(2)和 P^+ 型4H-nc-SiC单层膜(5)外侧分别对应欧姆连接有阴极电极(1)和阳极电极(6);

[0014] 沿着阴极电极(1)至阳极电极(6)方向的各层的N型掺杂浓度逐渐减小;

[0015] 所述的N型6H-nc-SiC多层膜(4)中包括有多层N型梯度掺杂的6H-nc-SiC薄膜,且该多层膜(4)中各层的掺杂浓度、纳米晶粒尺寸沿阴极电极(1)至阳极电极(6)方向逐渐变小,共分4层。

[0016] 进一步设置是所述 N^+ 型4H-c-SiC衬底(2)的多数载流子为电子,浓度约 $1.0\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$,厚度为 $250\pm 2\ \mu\text{m}$ 。

[0017] 进一步设置是所述的N型4H-c-SiC外延层(3),它在 N^+ 型4H-c-SiC衬底(2)上生长,多数载流子为电子,浓度约 $1.0\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$,厚度为 $10\ \mu\text{m}$,偏离(0001)面 8° ,表面微管密度低于 $30\ \mu\text{P}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

[0018] 进一步设置是所述N型6H-nc-SiC梯度掺杂多层膜(4)为磷掺杂,沿着生长方向第

1——第4层的载流子浓度分别为 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ；第1——第4层的纳米晶粒尺寸分别为12.0 nm、10.0 nm、8.0 nm、6.0 nm，每层厚度1.0 μm 。

[0019] 进一步设置是所述P⁺型4H-nc-SiC单层膜(5)的P⁺型掺杂为硼掺杂，载流子浓度为 $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度为0.5 μm 。

[0020] 进一步设置是所述的阴极电极(1)为NiAu合金电极薄膜；所述的阳极电极(6)为TiAu合金电极薄膜。

[0021] 本发明的工作原理是：首先是，从器件阴极N⁺型4H-c-SiC衬底到阳极P⁺型4H-nc-SiC单层膜之间的基区是一种N型掺杂浓度逐渐减低的渐变型基区，即从阴极→阳极的基区多数载流子——电子逐步减少。则根据能带窄化技术思想，就是在器件内部从阴极→阳极的基区能带逐渐变宽。其次为，沿同一方向，位于二极管内靠近阳极的基区一侧的N型6H-nc-SiC梯度掺杂多层膜中的纳米晶粒尺寸逐渐变小，效果也是能带逐渐变宽。本来，6H-c-SiC体材料的带隙比4H-c-SiC的带隙要小，6H-c-SiC/4H-c-SiC异质结的能带应有带阶，会产生载流子复合，影响正向导通性能。N型6H-nc-SiC梯度掺杂多层膜、P⁺型4H-nc-SiC单层膜中，带隙与掺杂及纳米颗粒的大小有关。通过精心设计和制作，使(P⁺)4H-nc-SiC/(N⁻)缓变6H-nc-SiC/(N)4H-c-SiC的能带平滑，而且沿(N)4H-c-SiC→(N⁻)缓变6H-nc-SiC→(P⁺)4H-nc-SiC方向逐步增宽，如说明书附图2所示。

[0022] 根据半导体器件理论，能带变宽将激发与内建电场同向的辅助电场，加速扫除少子，缩短反向恢复时间 T_{rr} ，不影响正向导通性能。而且，N型6H-nc-SiC梯度掺杂多层膜有大量缺陷，相当于少子寿命控制区，缩短其中少子的寿命，加快少子复合，抑制浪涌电流。

[0023] 为实现本发明的第二个目的，提供技术方案，包含以下步骤：

[0024] (一)选择衬底，厚度 $250 \pm 2 \mu\text{m}$ 、载流子浓度约为 1.0×10^{19} 的N⁺型4H-c-SiC衬底(2)上外延厚度为10 μm 、载流子浓度 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的N型4H-c-SiC外延层(3)，并且双面抛光，外延层表面偏离(0001)面 8° ，微管密度低于30 $\mu\text{P} \cdot \text{cm}^{-2}$ ；

[0025] (二)衬底预处理，在室温下，采用刻蚀液蚀掉N⁺型4H-c-SiC衬底(2)和N型4H-c-SiC外延层(3)表面的SiO₂层；

[0026] (三) N型缓变6H-nc-SiC多层膜(4)的制备，采用PECVD法，以H₂为稀释气，以SiH₄和CH₄为混合反应源气，以PH₃为掺杂气，在PECVD系统反应室内的N型4H-c-SiC单晶外延层(3)上，逐次生长多层N⁻型6H-nc-SiC薄膜，其工艺参数是：

[0027] 稀释比： $\text{H}_2 / (\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{SiH}_4) = (90 - 99) \text{ vol}\%$ ；

[0028] PECVD反应室极限真空度：不低于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ ；

[0029] 混合反应源气掺杂比： $\text{PH}_3 / (\text{CH}_4 + \text{SiH}_4) = 0.1 - 10.0 \text{ vol}\%$ ；

[0030] 薄膜生长时选用射频电源的频率：13.6——95.2 MHz；

[0031] 薄膜生长射频功率密度： $0.3 - 0.8 \text{ W/cm}^2$ ；

[0032] 薄膜生长衬底温度： $T_s = 823 \pm 5 \text{ K}$ ；

[0033] 薄膜生长负直流偏压： $V_b = -50 - -250 \text{ V}$ ；

[0034] 薄膜生长时反应气体压力： $P = 0.7 - 1.0 \text{ Torr}$ ；

[0035] (四) P⁺型4H-nc-SiC单层膜(5)的制备，采用PECVD法，以H₂为稀释气，以SiH₄和CH₄为混合反应源气，以B₂H₆为掺杂气，在PECVD系统反应室内于N型缓变6H-nc-SiC多层膜(4)之

上沉积P⁺型4H-nc-SiC单层膜(5),其工艺参数是:

[0036] PECVD反应室极限真空度:不低于 1.0×10^{-4} Pa;

[0037] 稀释比: $H_2/(H_2+CH_4+SiH_4)=(90-99)$ vol%;

[0038] 混合反应源气掺杂比: $B_2H_6/(CH_4+SiH_4)=0.5-5.0$ vol%;

[0039] 薄膜生长时选用射频电源的频率:13.6—95.2 MHz;

[0040] 薄膜生长射频功率密度:0.3 — 0.8 W/cm²;

[0041] 薄膜生长衬底温度: $T_s=673 \pm 5$ K;

[0042] 薄膜生长负直流偏压: $V_b=-50 - -250$ V;

[0043] 薄膜生长时反应气体压力: $P=0.7 - 1.0$ Torr;

[0044] (五)阴极电极和阳极电极制备,采用电子束蒸发法,分别在N⁺型4H-c-SiC衬底(2)、P⁺型4H-nc-SiC单层膜(5)的外侧分别蒸镀AuNi合金电极薄膜、AuTi合金电极薄膜,分别形成AuNi/(N⁺)4H-c-SiC、AuTi/(P⁺)4H-c-SiC欧姆接触结。其工艺参数是:

[0045] 电子束蒸发室极限真空度:不低于 1.0×10^{-4} Pa;

[0046] 灯丝直流电流: $I=5-10$ A;

[0047] 衬底温度: $T_s=573 \pm 5$ K;

[0048] 电极薄膜的厚度:0.5—1.0 μm;

[0049] (六)最终形成TiAu电极/(P⁺)4H-nc-SiC/(N)缓变6H-nc-SiC/(N) 4H-c-SiC/(N⁺)4H-c-SiC/NiAu电极——基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管。

[0050] 从制备6H-nc-SiC、4H-nc-SiC、TiAu和NiAu电极的先后顺序来看,其工艺温度逐渐降低。因此,后续材料的加工不会改变先前已制作材料的结构和特性,工艺能够保障设计器件结构和性能的实现。

[0051] 本发明的技术特色与创新

[0052] 本发明的(电极)TiAu/(P⁺)4H-nc-SiC/(N)缓变6H-nc-SiC/(N)4H-c-SiC/(N⁺)4H-c-SiC/NiAu(电极)——基区渐变P⁺-N-N⁺型纳米晶/单晶碳化硅快恢复二极管,所述的N型4H-c-SiC外延层与掺杂浓度逐步降低同时纳米晶粒逐步变小的N型6H-nc-SiC多层膜(multilayer,ML)的作用分为以下几个方面。

[0053] 缓变基区结构实质是基区半导体能带剪裁,反向恢复时激发与内建电场同向的辅助电场,加速扫除残余少子

[0054] 如说明书附图1所示,从器件(N⁺)4H-c-SiC到(P⁺)4H-nc-SiC之间的基区是一种N型掺杂浓度逐渐减小的渐变型基区,即从阴极→阳极的基区多数载流子——电子逐步减少。根据能带窄化技术思想,就是从阴极→阳极的基区能带逐渐变宽[Journal of Applied Physics, 86 (1999): 4419.],如说明书附图2所示。同时,6H-nc-SiC多层膜中,纳米晶粒逐步变小,则6H-nc-SiC的能带随纳米晶粒逐步变小而逐渐变宽[Journal of Applied Physics, 111 (2012): 034307-1.].这样,基区的能带逐渐变宽相当于在反向恢复过程中激发与内建电场同向的辅助电场[IEEE Transactions on Electron Devices, 40 (1993): 285.],增强扫除少数载流子的电场。因此在反向恢复过程中,缩短了基区内少子的迁移时间,实际上就是缩短了反向恢复时间 T_{rr} 。

[0055] 基区靠近阳极的一端, N型缓变6H-nc-SiC多层膜相当于引入少子寿命控制区

[0056] 基区渐变P⁺-N-N⁺型纳米晶碳化硅FRD的(N)6H-nc-SiC多层膜以及阳极(P⁺)4H-nc-

SiC薄膜的内部、6H-nc-SiC/4H-nc-SiC界面存在大量的晶界缺陷,相当于在器件内部设置了少子寿命控制区。同时,从阳极→阴极的少数载流子——空穴逐步减少,改善了少子的分布。在反向恢复过程中,少子在这些区域因大量的缺陷中心而复合,不会被扫除基区;在反向恢复末期,需要电场扫除的位于阴极附近的少子很少,因而反向恢复电流变小且不形成浪涌电流(snappy current),呈现软恢复,抑制了电磁干扰,降低了能耗。

[0057] 技术制备的(P⁺)4H-nc-SiC阳极发射效率可控

[0058] 本发明中,用PECVD技术制备阳极(P⁺)4H-nc-SiC薄膜,实现了P型掺杂浓度、纳米晶粒尺寸、阳极厚度的调节,实际上是对阳极发射率进行控制,最终为器件的工作电流、反向恢复性能与正向导通性能的折衷提供了可控的办法。

[0059] 采用(N)4H-c-SiC/(N⁺)4H-c-SiC外延片,降低了阴极结附近的缺陷及反向恢复末期的复合电流

[0060] 高温下外延生长的(N)4H-c-SiC/(N⁺)4H-c-SiC,有效杂质会在从阴极(N⁺)4H-c-SiC扩散到外延层(N)4H-c-SiC,多数载流子浓度沿N→N⁺方向逐渐升高,少数载流子浓度逐渐减少;而且外延形成的N/N⁺结缺陷很少。这就降低了反向恢复末期的漂移电流和复合电流,抑制了浪涌电流,呈现软恢复,降低了反向恢复过程的电磁干扰及能耗。

[0061] 工艺温度低,可节约能源

[0062] 选择外延片,节约了用PECVD生长器件基区的时间,因为PECVD相对于外延工艺而言沉积速度更慢。本发明采用的PECVD技术相对于传统的外延、扩散、离子注入并退火等方法,所有流程的工艺温度不超过900K,低于外延、扩散、离子注入并退火等需要的高温,因此在制造工艺中可节约能源。

[0063] 本发明有益效果

[0064] 缩短了反向恢复时间,抑制了浪涌电流,降低了工艺温度

[0065] 本发明FRD反向恢复时,缓变6H-nc-SiC多层膜的每一层内晶粒边界缺陷实质就是缺陷复合中心,可以成为P⁺-N-N⁺型快恢复二极管的少子寿命控制区。另外,(P⁺)4H-nc-SiC薄膜/(N)6H-nc-SiC多层膜缓变结代替突变结,结电容变小,耗尽层宽度增加,两者的综合效果使得T_{rr}缩短,如说明书附图3所示。同时,靠近阴极的(N⁺)4H-c-SiC/(N)4H-SiC结界面因为(N⁺)4H-c-SiC和(N)4H-SiC的多子浓度高而少子密度很低,因而反向恢复时的I_{rrm}小。本发明FRD经历偏置电压从“+”→“-”过渡的瞬间,电流、电压都缓慢变化,这是器件内(P⁺)4H-nc-SiC薄膜/6H-nc-SiC多层膜/4H-nc-SiC外延层之间的厚度大,降低了少子迁移率,增加了少子复合所致。如同海浪遇到沙滩,浪涌很快消除,不像遇到峭壁那样。所以浪涌电流很快消失,有效避免了器件的开关损耗、电磁干扰甚至器件损坏。

[0066] 如说明书附图4所示,本发明FRD正向导通时,导通电压约3.0 V——3.5V,比单晶材料器件的要稍微高一些[Journal of Power Electronics, 11 (2011): 381.],原因是本发明器件内使用了nc-SiC材料,其中的纳米晶粒周围被非晶无序成份包围,因为nc-SiC材料的带隙比单晶材料的要宽,所以本FRD的导通电压比传统器件的要高。导通电压达到4.5V——6.5V时,工作电流密度比单晶材料器件的要高,这是由于阳极、阴极的掺杂浓度高——载流子浓度高引起。如说明书附图4所示,当正向电压达到6.5V以上时,正向的I—V关系偏离直线,电流值略有下降,出现饱和迹象,也可归结为器件内无序成份中缺陷符合机制所致。

[0067] 综上所述,本发明的有益效果是,比较过去其它方法制成的FRD,其反向恢复时间 t_{RR} 缩短至20 ns以内,实现了快速开关;反向恢复时浪涌电流非常小,减少了损耗和电磁干扰。工艺温度低,可节约时间和能源。

[0068] 下面结合说明书附图和具体实施方式对本发明做进一步介绍。

附图说明

[0069] 图1, TiAu电极/(P⁺)4H-nc-SiC/(N)渐变6H-nc-SiC/(N)4H-c-SiC/ (N⁺)4H-c-SiC/ NiAu电极——基区渐变P⁺-N-N⁺型SiC超快恢复二极管示意图。

[0070] 在图1中, 1—AuNi合金电极薄膜; 2—N⁺型4H-c-SiC衬底, 电子浓度约 $1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$; 3—N型4H-c-SiC外延层, 电子浓度约 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$; 4—N型渐变6H-nc-SiC多层膜, 沿图1中箭头方向第1—第4层, 电子浓度、纳米晶粒尺寸递减, 每层厚约1.0 μm ; 5—P⁺型4H-nc-SiC单层膜, 空穴浓度约 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 厚约0.5 μm ; 6—AuTi合金电极薄膜;

[0071] 图2, 器件核心——(P⁺)4H-nc-SiC/(N)渐变6H-nc-SiC/(N)4H-c-SiC/(N⁺)4H-c-SiC能带图;

[0072] 在图2中, 1—(N⁺)4H-c-SiC衬底的能带; 2—(N)4H-c-SiC外延层的能带; 3—(N⁻)渐变6H-nc-SiC多层膜的能带; 4—(P⁺)4H-nc-SiC薄膜的能带; 5—内建电场; 6—基区能带渐变激发的辅助电场。

[0073] 图3, 本发明器件的反向恢复波形;

[0074] 在图3中, 1—反向恢复电流波形; 2—反向恢复电压波形, 测试条件为 $di/dt=200 \text{ A}/\mu\text{s}$, $I_F=10 \text{ A}$, $V_R=30 \text{ V}$ 。

[0075] 图4, 本发明器件的正向电流——电压曲线。

具体实施方式

[0076] 下面通过实施例对本发明进行具体的描述, 只用于对本发明进行进一步说明, 不能理解为对本发明保护范围的限定, 该领域的技术工程师可根据上述发明的内容对本发明作出一些非本质的改进和调整。

[0077] 如图1所示的本发明的具体实施步骤(一), 选择商用的4H-SiC外延片, N⁺型衬底, 电子浓度约 $1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 厚度 $250 \pm 2 \mu\text{m}$, 以及其上的N型外延薄膜, 电子浓度约 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 厚度为10 μm , 偏离(0001)面 8° , 表面微管密度低于 $30 \mu\text{P} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。当然本发明中4H-c-SiC的N⁺衬底的电子浓度可以在 5.0×10^{18} — $1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 范围, 厚度可以薄至5 μm ; 外延薄膜的电子浓度可以在 5.0×10^{17} — $5.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 范围, 厚度可以薄至5 μm , 表面微管密度可以更低。所述N⁺型4H-c-SiC衬底构成P⁺-N-N⁺二极管的阴极区。

[0078] 如图1, 本发明的具体实施步骤(二), 在4H-SiC外延层表面沉积N型6H-nc-SiC多层膜, 沿图1箭头方向, 掺杂浓度逐渐降低, nc-SiC晶粒尺寸逐渐减小。

[0079] 具体采用PECVD法, 以H₂为稀释气, 以SiH₄和CH₄为混合反应源气, 以PH₃为掺杂气, 在PECVD系统反应室内的N型4H-c-SiC外延层上, 逐次生长N型6H-nc-SiC多层膜, 其工艺参数是:

[0080] 稀释比: $\text{H}_2 / (\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{SiH}_4) = (90-99) \text{ vol}\%$;

[0081] PECVD反应室极限真空度: 不低于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$;

- [0082] 混合反应源气掺杂比： $\text{PH}_3/(\text{CH}_4+\text{SiH}_4)=0.1-10.0 \text{ vol}\%$;
- [0083] 薄膜生长时选用射频电源的频率： 13.6 MHz ;
- [0084] 薄膜生长射频功率密度： $0.3-0.8 \text{ W/cm}^2$;
- [0085] 薄膜生长衬底温度： $T_s=823\pm 5 \text{ K}$;
- [0086] 薄膜生长负直流偏压： $V_b=-50-250 \text{ V}$;
- [0087] 薄膜生长时反应气体压力： $P=0.7-1.0 \text{ Torr}$;
- [0088] 6H-nc-SiC多层膜的结构：沿着生长方向第1—第4层的载流子浓度/纳米晶粒尺寸分别为 $5.0\times 10^{16} \text{ cm}^{-3}/12.0 \text{ nm}$ 、 $1.0\times 10^{16} \text{ cm}^{-3}/10.0 \text{ nm}$ 、 $1.0\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}/8.0 \text{ nm}$ 、 $1.0\times 10^{14} \text{ cm}^{-3}/6.0 \text{ nm}$ ，每层厚度 $1.0 \mu\text{m}$ 。
- [0089] 所述N型4H-SiC外延层与N型6H-nc-SiC多层膜构成 $\text{P}^+-\text{N}-\text{N}^+$ 二极管的缓变基区(也称为缓变漂移区)。
- [0090] 如图1,本发明的具体实施步骤(三),在6H-nc-SiC多层膜最外层上沉积掺硼的 P^+ 型4H-nc-SiC单层薄膜。
- [0091] 具体采用PECVD法,以 H_2 为稀释气,以 SiH_4 和 CH_4 为混合反应源气,以 B_2H_6 为掺杂气,在PECVD系统反应室内于6H-nc-SiC多层膜之上沉积 P^+ 型4H-nc-SiC薄膜,其工艺参数是:
- [0092] PECVD反应室极限真空度:不低于 $1.0\times 10^{-4} \text{ Pa}$;
- [0093] 稀释比： $\text{H}_2/(\text{H}_2+\text{CH}_4+\text{SiH}_4)=(90-99) \text{ vol}\%$;
- [0094] 混合反应源气掺杂比： $\text{B}_2\text{H}_6/(\text{CH}_4+\text{SiH}_4)=0.5-5.0 \text{ vol}\%$;
- [0095] 薄膜生长时选用射频电源的频率： 13.6 MHz ;
- [0096] 薄膜生长射频功率密度： $0.3-0.8 \text{ W/cm}^2$;
- [0097] 薄膜生长衬底温度： $T_s=673\pm 5 \text{ K}$;
- [0098] 薄膜生长负直流偏压： $V_b=-50-250 \text{ V}$;
- [0099] 薄膜生长时反应气体压力： $P=0.7-1.0 \text{ Torr}$;
- [0100] P^+ 型4H-nc-SiC薄膜的厚度： $0.5 \mu\text{m}$ 。
- [0101] 所述 P^+ 型4H-nc-SiC薄膜构成 $\text{P}^+-\text{N}-\text{N}^+$ 二极管的阳极区。
- [0102] 如图1,本发明的具体实施步骤(四),用电子束蒸发技术在 P^+ 型4H-nc-SiC薄膜上蒸镀AuTi合金薄膜欧姆电极。其制备工艺参数是:
- [0103] 电子束蒸发室极限真空： $1.0\times 10^{-4} \text{ Pa}$;
- [0104] 灯丝直流电流： $I=10 \text{ A}$;
- [0105] 衬底温度： $T_s=573\pm 5 \text{ K}$;
- [0106] 材料：AuTi合金;
- [0107] 电极薄膜的厚度： $1.0 \mu\text{m}$ 。
- [0108] 所述 P^+ 型4H-nc-SiC薄膜与AuTi合金薄膜形成欧姆接触。
- [0109] 如图1,本发明的具体实施步骤(五),与步骤4不同,用电子束蒸发技术在 N^+ 型4H-nc-SiC单晶基片上蒸镀AuNi合金薄膜欧姆电极。其制备工艺参数是:
- [0110] 电子束蒸发室极限真空： $1.0\times 10^{-4} \text{ Pa}$;
- [0111] 灯丝直流电流： $I=10 \text{ A}$;
- [0112] 衬底温度： $T_s=573\pm 5 \text{ K}$;
- [0113] 材料：AuNi合金;

[0114] 电极薄膜的厚度1.0 μm 。

[0115] 所述 N^+ 型4H-c-SiC衬底与AuNi合金薄膜形成欧姆接触。

[0116] 如图1,所述具体实施步骤(六),按 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 切割基片,制备出TiAu/ (P^+) 4H-nc-SiC/(N)缓变6H-nc-SiC/(N)4H-c-SiC/ (N^+) 4H-c-SiC/ NiAu的基区渐变 $\text{P}^+ \text{-N-N}^+$ 型SiC超快恢复二极管样品。

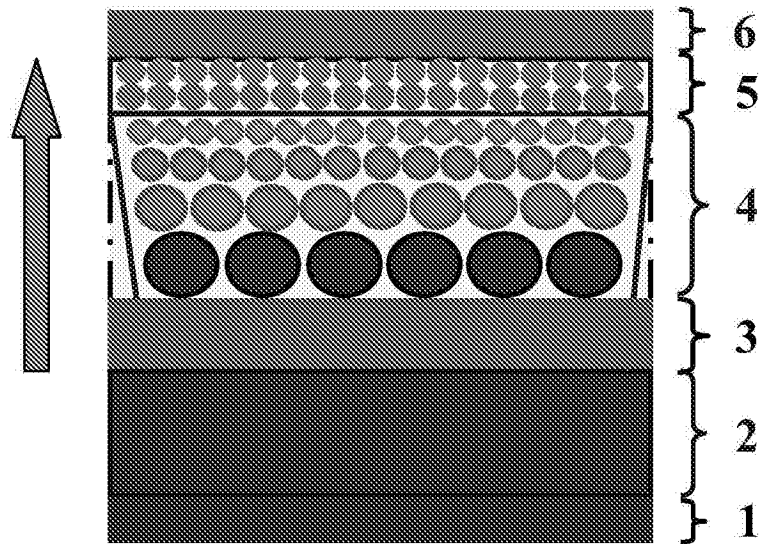


图1

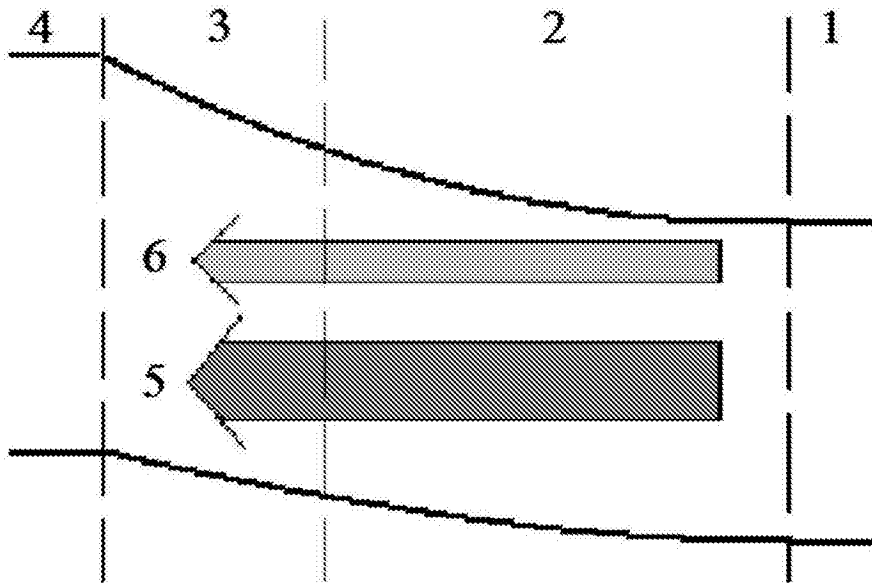


图2

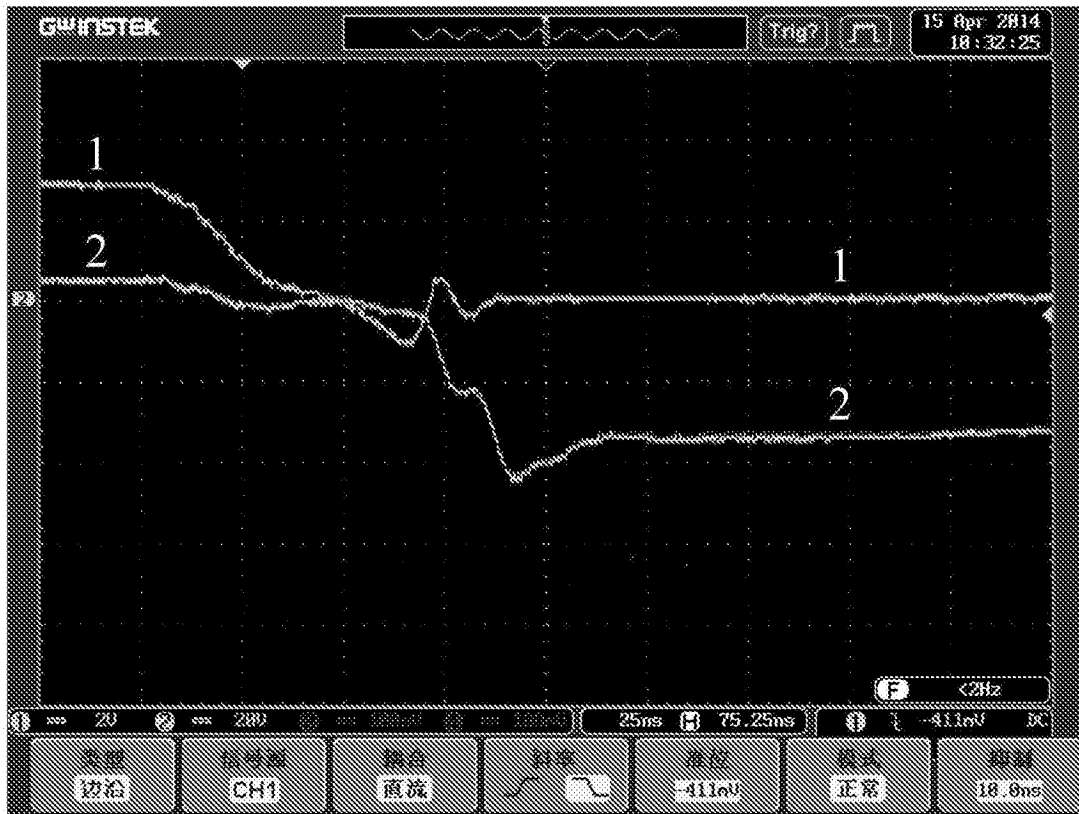


图3

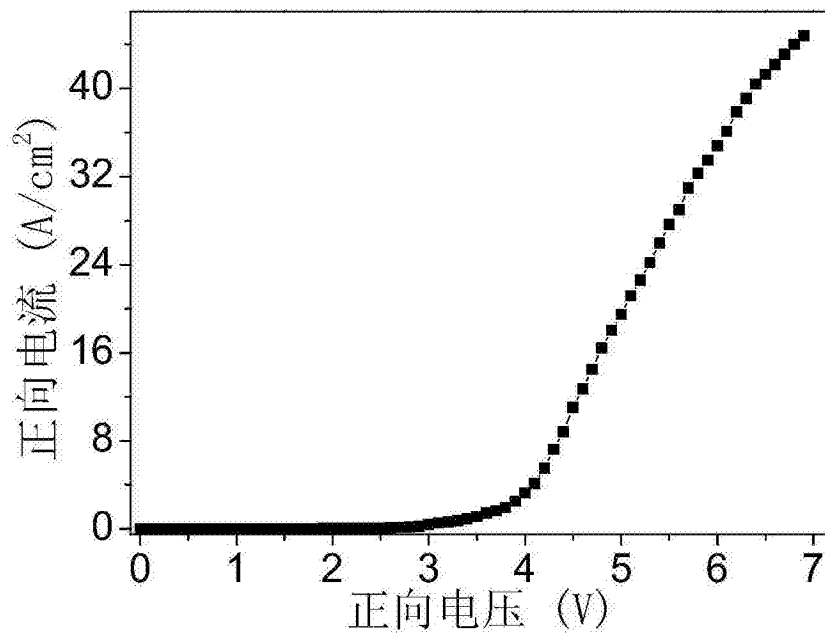


图4