

(n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结中载流子 输运性质的研究

彭英才^{1,2)} 徐刚毅³⁾ 何宇亮⁴⁾ 刘 明⁵⁾ 李月霞²⁾

¹⁾ 河北大学电子信息工程学院,保定 071002)

²⁾ 中国科学院半导体研究所,半导体超晶格国家重点实验室,北京 100083)

³⁾ 中国科学院上海冶金研究所,上海 200050)

⁴⁾ 南京大学物理系,南京 210093)

⁵⁾ 中国科学院微电子中心,北京 100029)

(2000 年 4 月 29 日收到,2000 年 6 月 16 日收到修改稿)

采用常规等离子体增强化学气相沉积工艺,以高 H₂ 稀释的 SiH₄ 作为反应气体源和 PH₃ 作为磷原子的掺杂剂,在 p 型(100)单晶硅((p)c-Si)衬底上,成功地生长了施主掺杂型纳米硅膜((n)nc-Si:H),进而制备了(n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结,并在 230—420 K 温度范围内实验研究了该异质结的 I-V 特性.结果表明,(n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结为一典型的突变异质结构,具有良好的温度稳定性和整流特性.正向偏压下,该异质结的电流输运机理为复合-隧穿模型.当正向偏压 V_F<0.8 V 时,电流输运过程由复合机理所支配,而当 V_F>1.0 V 时由隧穿机理决定.反向偏压下,该异质结具有良好的反向击穿特性.

关键词:(n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结,能带模型,电流输运机构,温度特性

PACC:7335,7340L

1 引 言

由具有不同物理参量(如禁带宽度、晶格常量、折射率与吸收系数等)的两种半导体材料组成的异质结,显示出许多不同于常规同质结的物理性质,使其在高速逻辑器件、各类传感器件以及光电子器件中展示出潜在的应用前景.而在半导体异质结物理性质的研究中,载流子的输运特性是人们所关注的一个重要侧面.20 多年来,对以 AlGaAs/GaAs 为主的 III-V 族异质结和以 Ge/Si(或 SiGe/Si)为主的 IV-IV 族异质结,已进行了大量的理论与实验研究,并在各类新型功能器件中开始获得成功应用.

近 10 余年来,随着非晶硅(a-Si)研究的不断深化,多孔硅(ps-Si)和纳米硅(nc-Si:H)膜等硅基纳米材料研究的逐渐兴起,人们也已开始关注由这些材料与单晶硅(c-Si)形成的异质中载流子输运性质及其相关器件应用的研究.1996 年 Marsal 等^[1]研究了 a-Si/c-Si 异质结的 I-V 特性.结果指出,当正向偏压小于 0.4 V 时,电流输运过程由异质结空间电荷区中 a-Si 一侧的载流子复合所支配.而当正向偏压大

于 0.6 V 时,电流输运过程成为空间电荷限制的.1998 年 Narasimhar^[2]研究了 ps-Si/c-Si 异质的电流输运机理.实验证实,当 c-Si 的电阻率大于 4Ω·cm 时,异质结的 I-V 特性呈现出弱温度依赖性,他们用电子的隧穿模型解释了这一实验现象.

近年,我们的研究小组系统研究了由等离子体增强化学气相沉积(PECVD)制备的本征与掺杂 nc-Si:H 膜的结构与物性,发现它具有许多相异于 c-Si,a-Si 以及 ps-Si 的新颖物理性质^[3-6].本文主要报道了我们采用掺磷的 n 型 nc-Si:H 膜((n)nc-Si:H)和 p 型 c-Si 衬底((p)c-Si),所制备的(n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结中载流子输运性质和该异质结温度稳定性的研究结果.

2 样品制备与测量方法

本实验采用电阻率为 1Ω·cm 的 p 型 c-Si 作为衬底材料.首先采用常规高温热氧化工艺在其上生长一层厚度为 200 nm 的 SiO₂ 膜,再使用平面光刻技术将 SiO₂ 层蚀刻成方孔面积为 100 μm×100 μm 的阵列式窗口.然后以高 H₂ 稀释的 SiH₄ 作为反应

气体源和以 PH_3 作为施主掺杂剂,在常规 PECVD 系统中沉积厚度为 150 nm 的 (n)nc-Si:H 膜. 应该注意到 (n)nc-Si:H 膜的质量如何,对 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结的电学特性具有至关重要的影响,因此在膜层生长时必须同时满足两个条件. 一是所形成的薄膜应具有适宜的纳米相(如均匀的 Si 微晶粒尺寸,趋于有序的晶粒排布以及合理的晶态百分比等)结构,二是要实现磷原子的有效掺杂. 对于本实验采用的 (n)nc-Si:H 膜,其中的 Si 微晶粒尺寸约为 3 nm,磷原子的有效掺杂浓度为 $(3-5) \times 10^{17}/\text{cm}^3$. 待 (n)nc-Si:H 膜的沉积完成并进行热退火处理后,再次使用光刻技术腐蚀掉窗口以外的 (n)nc-Si:H 膜层,而仅保留方孔窗口以内的 (n)nc-Si:H 薄膜,以此作为异质结的工作区. 最后采用真空镀膜技术蒸发 Al 电极,以形成如图 1 所示的 Al/(n)nc-Si:H/(p)c-Si/Al 异质结构,其 Al 电极面积为 $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$. 将制备好的异质结样品封装在陶瓷管壳中,利用 H4140 测试仪在 230—420 K 温度范围内测量

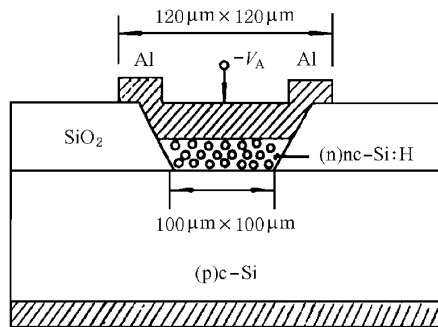


图 1 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结的剖面图

该异质结的正反向 $I-V$ 特性.

3 实验结果与讨论

3.1 异质结的能带模型

为了便于说明 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结中载流子的输运性质,首先考虑如图 2 所示的理想异质

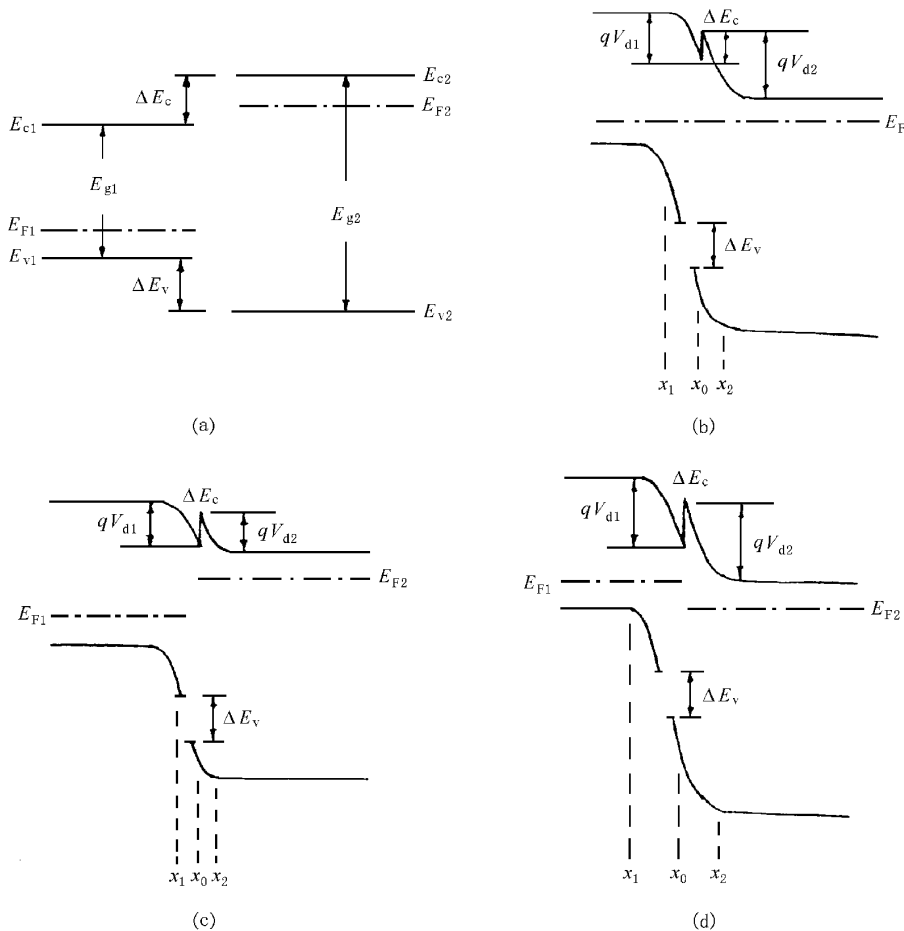


图 2 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结的能带模型

结,即无界面态存在时的异质结能带模型.图 2(a)表示(n)nc-Si:H膜和(p)c-Si衬底没有形成异质结前各自的热平衡能带图.其中 $E_{g1}=1.12\text{ eV}$ 和 E_{F1} 分别表示(p)c-Si衬底的禁带宽度和费密能级, $E_{g2}=1.85\text{ eV}$ 和 E_{F2} 分别表示(n)nc-Si:H薄膜的禁带宽度和费密能级.这里需要说明的是,图 2(a)右侧的(n)nc-Si:H能带模型是其简化示意图, $E_{g2}=1.85\text{ eV}$ 严格而言是其光学能隙值(E_{g2}^{opt}).在我们以前的研究中曾经指出,由于nc-Si:H膜是一种由不规则排列的Si纳米晶粒和无序非晶界面组成的特殊形态硅材料,所以对其能带结构的表征既不同于c-Si,而且也相异于a-Si.换言之,nc-Si:H的能带图具有更为复杂的形式^[7].关于(n)nc-Si:H膜光学能隙的大小虽然目前仍无确切的值可选用,但我们认为取其值为 1.85 eV 是合理的^[8].事实上,最近Delerue等^[9]采用有效质量近似(EMA)和局域密度近似(LDA)方法,理论计算了球形Si纳米团簇的光学带隙.结果指出, E_{g2}^{opt} 的值强烈依赖于Si团簇粒径尺寸 d 的大小.即随着 d 的减小, E_{g2}^{opt} 急剧增加.当 $d=3\text{ nm}$ 时, $E_{g2}^{\text{opt}}=1.8\text{--}1.9\text{ eV}$.而本实验中所采用的(n)nc-Si:H膜,则是由排布较为有序和尺寸大小约为 3 nm 的Si细微晶粒组成的纳米膜层,这意味着取(n)nc-Si:H膜的光学能隙值为 1.85 eV 是可信的.

当(n)nc-Si:H薄膜与(p)c-Si衬底紧密接触形成异质结时,便构成了如图 2(b)所示的热平衡能带模型.很显然,由于两者在接触后费密能级的不同而产生电荷转移,最后形成统一的费密能级.与此同时,由于两者的禁带宽度不同,能带在界面上发生导带不连续性,即出现所谓的尖峰势垒,其能量大小为 ΔE_c .尖峰势垒的形成是异质结能带模型的一个突出特征.当该异质结加有正向偏压时,接触势垒高度 V_{dl} 降低,空间电荷层厚度变窄,两者不再具有统一的费密能级,且有 E_{F2} 高于 E_{F1} ,如图 2(c)所示.而当该异质结加有反向偏压时,接触势垒高度 V_{dl} 升高,空间电荷层厚度加宽.此时两者不仅不再具有统一的费密能级,而且 E_{F1} 高于 E_{F2} ,如图 2(d)所示.下面,我们将依据以上给出的能带模型,分析该异质结在不同温度范围和正反向偏压条件下的 J - V 特性,并阐述其电流输运机理.

3.2 电流输运机构

图 3 示出在 $230\text{--}420\text{ K}$ 温度范围内,测得的一个典型(n)nc-Si:H/(p)c-Si异质结的 J - V 特性曲

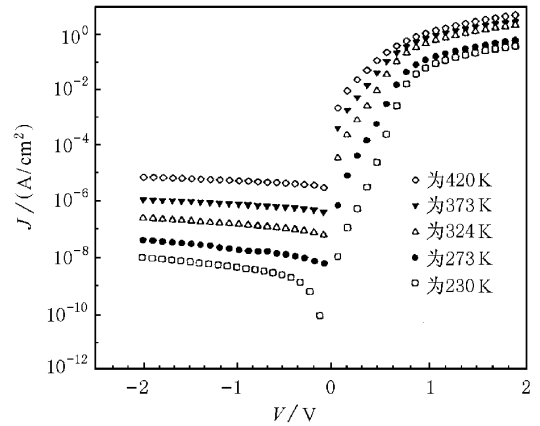


图 3 不同温度下异质结的 J - V 特性曲线

线.由图 3 可见,在正向偏压条件下, J - V 特性曲线可分为两个不同的区域.当正向偏压 $V_F < 0.8\text{ V}$ 时,电流密度随外加偏压呈指数增加,而当正向偏压 $V_F > 1.0\text{ V}$ 时,电流密度与外加偏压呈幂指数依赖关系.在反向偏压条件下,反向电流几乎不随外加偏压而变化.230 K 时的反向漏电流大小仅有几十纳安.依据测得的实验结果和半导体异质结的载流子输运理论,我们提出了如下关于(n)nc-Si:H/(p)c-Si异质结的电流输运机理:在正向偏压条件下,由隧穿-复合模型支配着载流子的输运过程.但在两个不同的电压区域内,并非隧穿和复合两种机理同时起主导作用.当 $V_F < 0.8\text{ V}$ 时,由通过存在于空间电荷区中位于(n)nc-Si:H膜一侧界面态的复合电流占主导地位, $\log J$ - V 曲线的斜率表现出与温度有关的特性;而当 $V_F > 1.0\text{ V}$ 时,由(n)nc-Si:H膜中具有足够能量的电子通过尖峰势垒区的隧穿电流起支配作用, $\log J$ - V 曲线的斜率表现出与温度无关的特性.在反向偏压条件下,由空间电荷区内产生的少数载流子隧穿过程起支配使用.反向电流基本上不随外加偏压而变化,同时受温度的影响也很小.下面,我们将通过图 4 给出的一个实际(n)nc-Si:H/(p)c-Si异质结能带图,对其电流输运机理进行具体分析.

1) 小正向偏压情形 ($V_F < 0.8\text{ V}$)

如上所述,当正向偏压 $V_F < 0.8\text{ V}$ 时,由通过异质结空间电荷区(n)nc-Si:H膜一侧界面态的电子-空穴复合过程支配着电流输运.界面态的深能级瞬态谱(DLTS)测试结果指出,(n)nc-Si:H/(p)c-Si异质结的界面态由两部分组成.一是由于(n)nc-Si:H膜与(p)c-Si衬底在结构形态和热膨胀系数的不同和工艺技术方面的原因,会在两者的交界面处出

现某种程度的晶格失配,以致于产生悬挂键而引入界面态.二是在(n)nc-Si:H膜中的无序非晶界面组织内,存在着一定数量的H悬挂键、Si悬挂键以及界面缺陷,这些经退火处理尚未消除掉的悬挂键也会引入界面态.这些界面态将成为有效的复合中心.当(n)nc-Si:H/(p)c-Si异质结加有 $V_F < 0.8\text{ V}$ 的正向偏压时,来自于(n)nc-Si:H区的电子和来自于(p)c-Si区的空穴,便会通过这些界面态形成复合电流,如图4中的路径B所示.由于在小正向偏压时,(n)nc-Si:H膜中的大部分电子不具有足够的能量隧穿过尖峰势垒区,故此时隧穿模型将不会起主导作用.

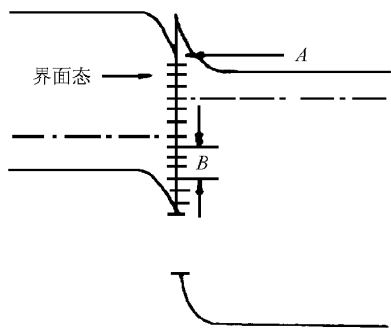


图4 隧穿-复合模型的能带结构

按照异质结的整流模型,其电流密度 J 与外加偏压 V 之间的关系可由下式表示^[10]:

$$J = J_0 [\exp(AV) - 1], \quad (1)$$

式中 J_0 为饱和电流密度, A 为一常量,同时 J_0 和 A 的具体表达形式由异质结的电流输运机理决定.当电流输运过程主要由通过空间电荷区的界面态复合完成时, A 满足如下关系:

$$A = \frac{q}{\eta kT} \quad (\eta = 1-2), \quad (2)$$

J_0 可表示为

$$J_0 = B \exp(-qV_d/kT), \quad (3)$$

其中 B 为与异质结特性有关的一个参量,其值在1—2之间, V_d 为异质结的接触电势差.因此,在小正向偏压下通过空间电荷区界面态的复合电流 J_r 与外加偏压 V 的关系最终表示为

$$J_r = B \exp(-qV_d/kT) \left[\exp\left(\frac{q}{\eta kT} V - 1\right) \right]. \quad (4)$$

由(4)式可知,复合电流 J_r 的大小直接与温度相关,即随着温度升高而呈指数增加.这一物理事实在 $\log J-V$ 关系上的反映是曲线的斜率与温度有关,正如图3所示.很显然,复合电流 J_r 与温度 T 的依赖

关系主要来自于 A .由图5可知, A 与 $1/kT$ 呈很好的线性关系.对于(n)nc-Si:H/(p)c-Si异质结而言,由(2)式可知 $\eta \approx 1.6$.另一方面,由于温度变化也会引起界面电荷状态的变化,因此随着温度升高而导致的某些新生界面态,也会对复合电流产生一定的贡献.

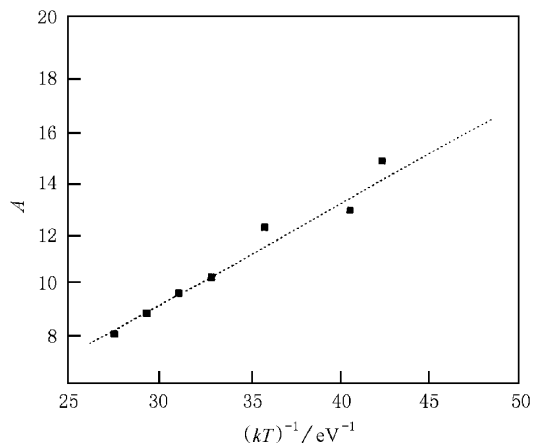


图5 A随温度的变化关系

2) 大正向偏压情形 ($V_F > 1.0\text{ V}$)

当正向偏压 $V_F > 1.0\text{ V}$ 时,异质结的电流输运机理将由隧穿模型所支配.这是因为随着外加偏压升高(n)nc-Si:H区中大部分以“单电子输运方式”进行传输的电子,将具有足够的能量到达异质结尖峰势垒区的底部,并在正向偏压作用下以隧穿方式通过势垒尖峰而进入(p)c-Si衬底.这里所谓的“单电子输运方式”,正如我们以前对nc-Si:H膜的电导模型所描述的那样,单电子在Si纳米微粒中是以弹道方式进行的,在界面区域是以隧穿方式通过的^[11].这样,大正向偏压下的隧穿模型也可以表述为,在(n)nc-Si:H膜中以单电子输运方式传输的电子,在具有足够的能量条件下穿过尖峰势垒区形成了隧穿电子流,如图4中的路径A所示.当然也不排除存在其他形式的隧穿过程,但对于我们的实验而言,上述隧穿过程将起主要作用.由于在这种情形中,电子与空穴通过界面态的复合过程已基本完成,所以此时复合模型不会在电流输运过程中占据主导地位.

研究指出,电子隧穿电流的大小取决于(n)nc-Si:H区中的有效电子浓度和隧穿概率,此关系可由下式表示^[12]

$$J_t \approx n_e P, \quad (5)$$

其中 n_e 为(n)nc-Si:H区中的有效电子浓度和 P 为

电子通过异质结尖峰势垒区的隧穿概率, 而 P 又可以由下式给出:

$$P \approx C \exp \left[- \left(\frac{16\pi}{3h} \right) \left(\frac{\epsilon_2 m_e}{N_d} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\epsilon_1 N_a}{\epsilon_1 N_a + \epsilon_2 N_d} \right) (V_d - V) \right], \quad (6)$$

式中 C 为与异质结性质有关的参量; m_e 为电子的有效质量; ϵ_1 和 ϵ_2 分别为 (p)c-Si 和 (n)nc-Si:H 的介电常量; N_a 和 N_d 分别为两个区域中的受主与施主掺杂浓度. 因此, 隧穿电流密度为

$$J_t \approx C n_e e^{\beta V}, \quad (7)$$

式中

$$\beta = \left(\frac{16\pi}{3h} \right) \left(\frac{\epsilon_2 m_e}{N_d} \right)^{1/2} \left(\frac{\epsilon_1 N_a}{\epsilon_1 N_a + \epsilon_2 N_d} \right). \quad (8)$$

由 (7) 式可以明显看出, 对于隧穿模型而言, $\log J$ - V 关系为典型的线性依赖关系, 曲线的斜率表现出与温度无关. 即对在不同温度下作 $\log J$ - V 曲线其斜率都相同, 正如图 3 所示.

3) 反向偏压情形

由图 3 还可以看出, 当对 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结加有反向偏压时, 在 230—420 K 温度范围内, 反向电流密度基本上不随外加偏压而发生较大变化, 而且反向漏电流极小, 仅有 10^{-9} — 10^{-7} A. 这反映在 $\log J$ - V 关系上, 各条曲线几乎与反向电压轴平行. 它意味着, 此时的载流子输运亦为隧穿模型. 但反向偏压条件下的隧穿电流不是由 (n)nc-Si:H 区中的电子所造成, 而是由空间电荷区中产生的少数载流子, 即电子与空穴分别隧穿过 ΔE_c 和 ΔE_v 而导致的.

4 异质结的温度特性

前已说明, 与 a-Si/c-Si 和 ps-Si/c-Si 异质结相比 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结具有更优异的特性, 这其中之一就是该异质结具有良好的温度稳定性. 由图 3 可以看出, 当温度从 230 K 增加到 420 K 时, 温度上升了 190 K, 而正反向电流密度仅变化了 1.5 个量级. 但对于 a-Si/c-Si 异质结而言, 当温度从 309 K 增加到 394 K 时, 温度仅上升了 80 K, 正向电流密度却增加了一个多量级, 而反向漏电流增加了近 4 个量级^[1]. 该实验结果直接反映出, 我们制备的 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结具有很好的温度稳定性. 这一物理事实也可以由如图 6 所示的在 300, 350 和 400 K 下测量的一典型 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结

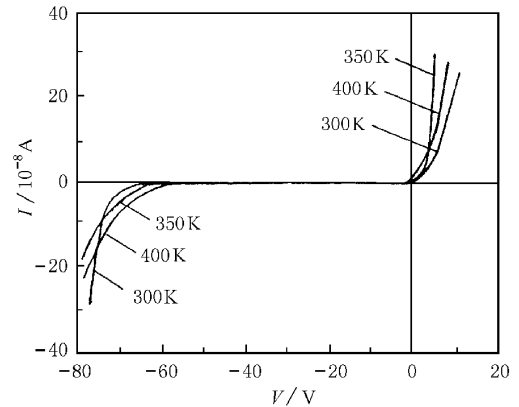


图 6

样品的 I - V 特性所证实. 可以看出, 该异质结样品不仅具有良好的温度特性, 而且有很好的反向击穿特性. 这种良好的温度稳定性主要由以下几个因素所导致. 一是对于我们所采用的 (n)nc-Si:H 膜而言, 由于使用了生长参量优化的沉积工艺, 获得了 Si 微晶粒大小趋于一致 (约为 3 nm) 和排布更有秩序, 并且有适宜晶态百分比和有效施主掺杂的纳米膜层, 因而大大提高了膜层电导率和降低了电导激活能, 这有利于实现 (n)nc-Si:H 膜层中的单电子输运过程和大正向电压下载流子通过尖峰势垒区的隧穿过程发生. 而这些输运过程是与温度无关的, 或者说是具有弱温度依赖的. 二是由于 (n)nc-Si:H 膜具有 1.85 eV 的光学能隙值, 远大于 (p)c-Si 衬底的 1.12 eV 禁带宽度, 所以在一定温度下来自 (n)nc-Si:H 区 Si 纳米晶粒中的本征载流子激发也显著减少. 三是 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结为一典型的突变异质结. 虽然接触区有一定数量悬挂键, 但我们的实验证实, 在经过适当清洁处理后的 c-Si 衬底上能直接生长成 nc-Si:H 膜, 同时不存在非晶界面过渡层^[13], 这也是导致电流密度具有弱温度依赖性的一个原因.

5 结 论

本文中我们采用常规 PECVD 工艺生长了高质量的 (n)nc-Si:H 膜, 进而制备了 (n)nc-Si:H/(p)c-Si 异质结, 并给出了该异质结在零偏压和正反向偏压下的能带模型. 通过在 230—420 K 温度范围内异质结 I - V 特性的测量, 证实该异质结具有很好的温度稳定性和整流特性. 对该异质结的电流输运机理进行了定性分析, 指出在正向偏压下由隧穿-复合模型支配着载流子输运过程. 但在 $V_F < 0.8$ V 的正向偏压下由通过异质结空间电荷区中 (n)nc-Si:H 一侧

界面态的载流子复合起主导作用,而在 $V_F > 1.0$ V 的大正向偏压下,由(n)nc-Si:H区中具有足够能量

的电子通过异质结尖峰势垒的隧穿起主导作用,在反向偏压下该异质以具有良好的反向击穿特性。

- [1] L. F. Marsal, J. Pallare, X. Correig, *J. Appl. Phys.*, **79** (1996), 8493.
- [2] K. L. Narasimhan, *Phil. Mag.*, **B77**(1998), 75.
- [3] Y. C. Peng, M. Liu, M. B. Yu *et al.*, *Chinese J. Semiconductors*, **19**(1998), 583 [in Chinese] 彭英才、刘明、余明斌等, *半导体学报*, **19**(1998), 583.]
- [4] Y. C. Peng, Y. L. He, M. Liu, *Chinese J. Vacuum and Technology*, **18**(1998) 283 [in Chinese] 彭英才、何宇亮、刘明, *真空科学与技术学报*, **18**(1998) 283.]
- [5] Y. L. H, G. Y. Hu, M. B. Yu *et al.*, *Phys. Rev.*, **B59** (1999), 15352.
- [6] Y. C. Peng, M. Liu, Y. L. He *et al.*, *Chinese J. Semiconductors*, **21**(2000) 308 [in Chinese] 彭英才、刘明、何宇亮等, *半导体学报*, **21**(2000), 308.]
- [7] Y. L. He, C. Z. Yin, L. C. Wang *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **75** (1994), 797.
- [8] Y. C. Peng, M. Liu, Y. L. He, *Chinese J. Rare Metals*, **23** (1999) 42 [in Chinese] 彭英才、刘明、何宇亮, *稀有金属*, **23**(1999) 42.]
- [9] C. Delerue, G. Allan, M. Lannoo, *J. Lumin.*, **80**(1999), 65.
- [10] L. S. Yu, *Semiconductor Heterojunction Physics* (Science Press Beijing, 1990), Chap. 4 [in Chinese] 虞丽生编著, *半导体异质结构物理*(科学出版社,北京,1990)第4章.]
- [11] Y. L. He, M. B. Yu, Y. W. Lü *et al.*, *Progress of Natural Science* **6**(1996), 700 [in Chinese] 何宇亮、余明斌、吕燕武等, *自然科学进展*, **6**(1996), 700.]
- [12] L. X. Ye, *Semiconductor Physics (the First Volume)* (Higher Education Publishers, Beijing, 1983) [in Chinese] 叶良修编著, *半导体物理学(上册)*(高等教育出版社,北京,1983).]
- [13] Y. L. He, M. B. Yu, G. Y. Hu *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **46** (1997), 1836 [in Chinese] 何宇亮、余明斌、胡根友等, *物理学报*, **46**(1997), 1836.]

CARRIER TRANSPORT PROPERTIES OF THE (n)nc-Si:H/(p)c-Si HETEROJUNCTION

PENG YING-CAI^{a,b)} XU GANG-YI^{c)} HE YU-LIANG^{d)} LIU MING^{e)} LI YUE-XIA^{b)}

^{a)} College of Electronic and Informational Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China)

^{b)} State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

^{c)} Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

^{d)} Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

^{e)} Microelectronic Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 29 April 2000; revised manuscript received 16 June 2000)

ABSTRACT

Phosphor-doped nano-crystalline silicon ((n)nc-Si:H) films are successfully grown on the p-type (100) oriented crystal silicon ((p)c-Si) substrate by conventional plasma-enhanced chemical vapor deposition method. The films are obtained using high H₂ diluted SiH₄ as a reaction gas source and using PH₃ as the doping gas source of phosphor atoms. Furthermore, the heterojunction diodes are also fabricated by using (n)nc-Si:H films and (p)c-Si substrate. I-V properties are investigated in the temperature range of 230—420K. The experimental results demonstrate that (n)nc-Si:H/(p)c-Si heterojunction is a typical abrupt heterojunction having good rectifying and temperature properties. Carrier transport mechanisms are tunneling-recombination model at forward bias voltages. In the range of low bias voltages ($V_F < 0.8$ V), the current is determined by recombination at the (n)nc-Si:H side of the space charge region, while the current becomes tunneling at higher bias voltages ($V_F > 1.0$ V). The present heterojunction has high reverse breakdown voltage (> -75 V) and low reverse current (\approx nA).

Keywords: (n)nc-Si:H/(p)c-Si heterojunction, band model, carrier transport mechanisms, temperature properties

PACC: 7335, 7340L