

纳米硅/单晶硅异质结二极管的 $I-V$ 特性*

刘 明¹⁾ 刘 宏²⁾ 何宇亮³⁾

¹⁾中国科学院微电子中心,北京 100029)

²⁾苏州科技大学应用物理系,苏州 215000)

³⁾南京大学物理系,南京 210093)

(2002 年 12 月 20 日收到,2003 年 1 月 24 日收到修改稿)

用纳米硅(nc-Si:H)薄膜制成了纳米硅/单晶硅(nc-Si:H/c-Si)异质结二极管,对 nc-Si:H/c-Si 异质结的特性进行了研究,它具有很好的温度稳定性.温度从 20℃ 上升到 200℃, $I-V$ 曲线只有很小的漂移.对 nc-Si:H/c-Si 异质结二极管的输运机理进行了讨论.

关键词:异质结二极管,纳米硅薄膜,输运机理

PACC: 7360F, 6150C, 6114H, 6855

1. 引 言

两种材料禁带宽度的不同以及其他特性的不同使异质结具有一系列同质结没有的特性,在器件设计上将得到某些同质结不能实现的功能.如在异质结晶体管中用宽带一侧做发射极可得到很高的注入比,因而可获得较高的放大倍数.如果在异质结中两种材料的过渡是渐变的,则禁带宽度的渐变就相当于存在一个等效电场,使载流子的渡越时间减少,器件的响应速度增加.此外,同质异质结是一种多数载流子器件,速度比少子器件高,更适合做成高速开关器件.正因为以上特点,早在 20 世纪 60 年代初期,当 pn 结晶体管刚刚取得巨大成功时,人们就开始了异质结的研究^[1,2].

目前对异质结的研究主要集中在对异质结的能带图、载流子在异质结中的输运过程以及异质结的光电特性等方面,提出了各种物理模型并做出理论计算.同时在实验上也生长了一些异质结,并测量了它们的特性,其中做得较多的是 Ge-Si, Ge-GaAs 及其他 III-V 族异质结.

非晶硅/单晶硅异质结在异质结双极晶体管^[3]、太阳能电池^[4]、薄膜场效应晶体管^[5]、微波^[6]及开关器件^[7]等领域得到了广泛应用.但不同实验室做出的结果完全不同,因而难以分析其输运机理.nc-Si:

H 作为一种具有新颖特性的材料,对其研究主要集中在材料制备和结构上^[8,9].

本文将报道 nc-Si:H/c-Si 异质结二极管及其 $I-V$ 特性,并对其输运机理进行定性解释.

2. nc-Si:H/c-Si 异质结二极管

nc-Si:H/c-Si 异质结二极管截面示意图如图 1 所示.衬底材料为 p 型(100)c-Si,掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.用干法氧化生长 100nm 左右的 SiO_2 层,然后在 SiO_2 薄膜上光刻 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 的窗口,将已刻出图形的 Si 衬底放入 PECVD 生长室,淀积一层 20nm 左右的 nc-Si:H 薄膜.用热蒸发方法在 nc-Si:H 上蒸一层约 $1\mu\text{m}$ 厚的 Al 作为下电极.霍尔效应测量表明 nc-Si:H 是弱 n 型半导体.而本文选用的衬底为 p 型单晶硅,可以认为本文制备的是 np 型异质结.

图 2 给出 nc-Si:H/c-Si 异质结二极管在 77K 下的电流-电压特性.在施加 0—1.5V 的正向偏压时(nc-Si:H 上 Al 电极接正,c-Si 衬底接负)随电压增大,电流基本不变.当偏压 $V > 1.5\text{V}$ 后,电流随电压指数式增大.在反向偏压下,0—4V 随电压增大,电流无变化,而当外加电压 $V > 4\text{V}$ 时,电流陡然增大,表现出极好的开关特性.图 3 是不同温度下,nc-Si:

* 国家自然科学基金(批准号 60236010)资助的课题.

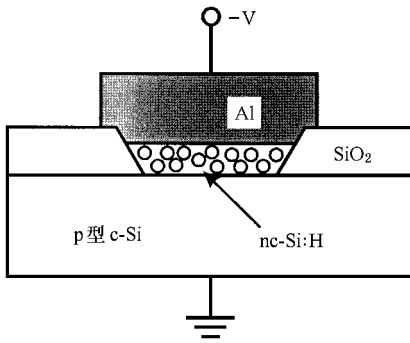


图1 nc-Si:H/c-Si 异质结二极管截面示意图

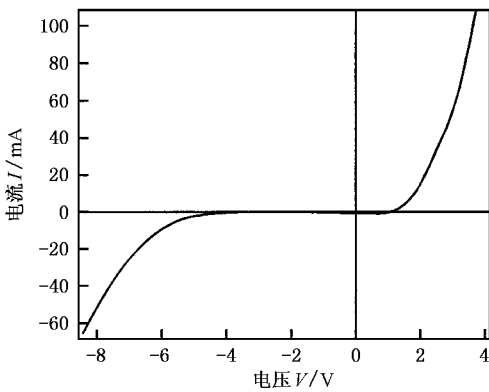


图2 异质结二极管在 77K 下电流-电压(I-V)曲线

H/c-Si 异质结二极管的 $I-V$ 曲线. 它表明这种类型的异质结具有很好的温度效应, 即使测试温度高达 200°C , 其 $I-V$ 曲线相对室温只有极小偏离.

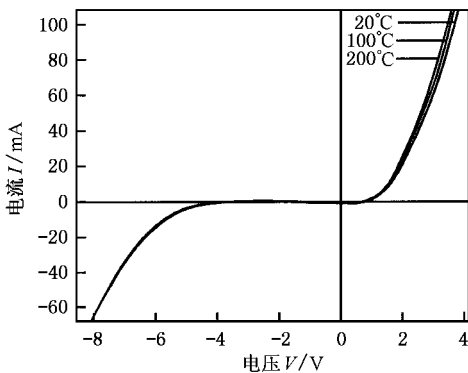


图3 不同温度下 nc-Si:H/c-Si 异质结的电流-电压(I-V)曲线

3. nc-Si:H/c-Si 异质结的运输机理

伏安特性是 pn 结的基本特性之一, 伏安特性反映了载流子通过结时的运输过程. 描述 pn 结伏安特

性的模型有扩散模型、热电子发射模型、隧道模型(包括直接和多阶的隧道效应)和复合模型等. 这些理论也可应用到半导体异质结上. 按一般结的整流模型^[10]有以下关系:

$$I = I_0 [\exp(AV) - 1], \quad (1)$$

I_0 为饱和电流, A 为一个依赖于温度的系数. 对 pn 结突变异质结的运输一般有以下理论模型.

3.1. 扩散模型

该模型认为: 由于界面上能带是断续的, 因而载流子越过结时应克服的势垒高度不同, 故一般只有一种载流子起主要作用. 对该模型:

$$A = q/kT, \quad I_0 \propto \exp(-E_g/kT). \quad (2)$$

3.2. 热电子发射模型

$$A = \frac{q}{kT}, \quad I_0 \propto \left[\exp\left(\frac{-\phi_B}{kT}\right) \right] kT^{3/2}, \quad (3)$$

ϕ_B 为发射时的势垒高度. 该模型认为电子流不是以扩散的方式而是以热运动方式工作.

3.3. 隧穿模型

这时 A 与温度无关, $I_0 \propto \exp(-E_{ac}/kT)$, k 为玻尔兹曼常数, E_{ac} 为激活能. 为了阐明哪种运输机理起主要作用, 计算了不同温度下的 $\ln I-V$ 曲线(见图4). 当 $V > 1.5\text{V}$ 时, $\ln I-V$ 曲线的斜率与温度无关. 因此我们认为, 对 nc-Si:H/c-Si 异质结, 在 $V > 1.5\text{V}$ 时, 隧穿模型是其主要运输机理.

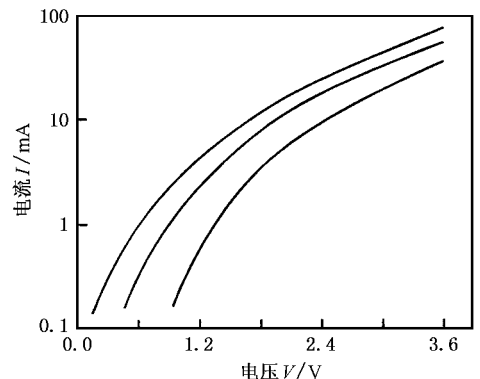


图4 不同温度下 nc-Si:H/c-Si 异质结的对数电流-电压($\ln I-V$)曲线

考虑图 5 所示异质结能带图 ,c-Si 导带边的能量比 nc-Si:H 导带边能量低 ,nc-Si:H 中的电子向 c-Si 中转移而造成能带弯曲. 界面上的三角形势阱中将形成二维电子气. 由于 nc-Si:H 是弱 n 型, 电离杂质中心主要存在于 c-Si 中. 此时当外加偏压时 ,c-Si 中只有那些能量达到三角形势垒底部的电子才有可能以隧穿的方式穿透势垒尖进入 nc-Si:H 区, 因而隧道电流和热电子发射同时存在, 并具有串联性质. 当正向电压较小时, 只有少数电子到达势垒尖区, 总电流受热电子发射电流限制. 当正向电压增大时, 大量电子都可到达势垒尖区, 总电流受到隧穿概率的限制.

图 2 和图 3 的 nc-Si:H/c-Si 异质结的 $I-V$ 曲线在 $-4V$ 到 $+1.5V$ 之间有一平坦的区域, 即在该区域, 改变外加电压, 电流并不随之变化. 我们认为这是由于 nc-Si:H/c-Si 界面存在大量界面态造成的. 在某些情况下, 界面能级本身并不参与载流子的输运. 但当有外加电压时, 界面能级上的电荷的变化会影响外加电压在界面两侧的分配, 从而影响伏安特性.

在图 5 的 np 异质结中设界面态密度均匀地分布在 nc-Si:H 的禁带内, 密度为 D_s (eV/cm²). 零偏压时, 界面态中的电荷为 Q_0 , 它决定了平衡时的势垒 qV_{D1} 和 qV_{D2} . 有外加电压时, 界面态中的电荷由 Q_0 变为 Q_s .

$$\begin{aligned} Q_s &= Q_0 + \Delta Q_s(V), \\ \epsilon_1 E_1 &= Q_s + \epsilon_2 E_2, \end{aligned} \quad (4)$$

ϵ_1, ϵ_2 为 nc-Si:H, c-Si 的介电常数, E_1, E_2 分别为 nc-Si:H, c-Si 中的电场, 可由下式表示:

$$\begin{aligned} E_1 &= \left[\frac{2QN_{D1}}{\epsilon_1} (V_{D1} - V_1) \right]^{1/2}, \\ E_2 &= \left[\frac{2qN_{A2}}{\epsilon_2} (V_{D2} - V_2) \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (5)$$

V_1, V_2 为外加电压在界面两侧的分配. 界面电荷随电压的改变可表示为^[11]

$$\Delta Q_s(v) = -q \left[\left(\frac{n\sigma_n}{n\sigma_n + p\sigma_p} \right) V_1 - \left(\frac{p\sigma_p}{n\sigma_n + p\sigma_p} \right) V_2 \right], \quad (6)$$

其中 σ_n 和 σ_p 分别为界面态对电子和空穴的俘获截面, n, p 分别为界面相应侧的自由电子和自由空穴的浓度. 此时由 p 向 n 区发射的热空穴流为^[11]

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\beta kT}\right) - 1 \right]. \quad (7)$$

没有界面态时

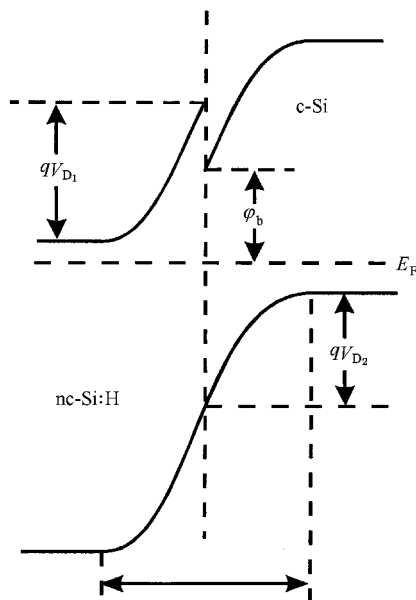


图 5 nc-Si:H/c-Si 异质结能带图

$$\beta = \beta_0 = 1 + \frac{N_{A2} \epsilon_2}{N_{D1} \epsilon_1}. \quad (8)$$

有界面能级时, β 值可由上述公式推导出来. 一般有两种情况 (1) $n\sigma_n \gg p\sigma_p$, 界面态主要和宽带中(nc-Si:H)的电子交换. (2) $p\sigma_p \gg n\sigma_n$, 界面态主要和窄带一侧(c-Si)的空穴交换. 界面态密度越大, 宽带一侧的势垒越小, β 值越大. 界面态密度大到一定值后, 费米能级被界面能级所钉扎住, 但当界面能级密度较大时, 外加电压增大到一定程度会破坏 $p\sigma_p \gg n\sigma_n$

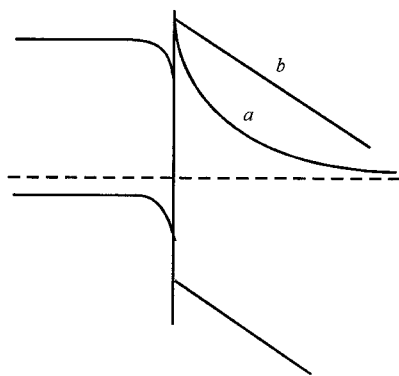


图 6 界面能级的电离对势垒形状的影响

的条件, 界面能级将同时和两边的载流子达到平衡, $n\sigma_n = p\sigma_p$. 当界面能级较大时, 它的电离还会较严重地影响能带的形状, 如图 6 所示^[12]. 当界面能级中没有电荷时, 能带如图 6 曲线 b 所示, 此时势垒

较厚,表现出很强的整流特性.界面能级电离后能带如图6曲线a所示,势垒变窄,电子可以以隧穿方式穿透势垒而使整流特性减弱.大反向偏压下的强电场可以使界面能级产生碰撞电离,从而使异质结产生开关效应,见图2和图3.

$I-V$ 特性具有很好的温度效应,温度从 20°C 上升到 200°C ,其 $I-V$ 曲线几乎没有漂移.同时由于大量界面态的存在,使得其整流特性明显减弱,但表现出很好的开关特性.对这一现象进行了解释.

4. 结束语

用 nc-Si:H 薄膜制成了 nc-Si:H/c-Si 异质结,其

- | | | | |
|-------|--|--------|--|
| [1] | Sharma B L and Purohit R K 1974 <i>Semiconductor Heterojunction</i> (Oxford : Pergamon) p23 | [7] | Wen Y , Fang Y , Lee H and Chan C 1990 <i>Appl. Phys. Lett.</i> 56 1034 |
| [2] | Milnes A G and Faucht D L 1972 <i>Heterojunction and Metal-Semiconductor Junction</i> (New York :Academic) p112 | [8] | Liu M and Wang Z O 2000 <i>Acta Phys. Sin.</i> 49 983(in Chinese) [刘 明、王子欧 2000 物理学报 49 983] |
| [3] | Symons J , Nijis J and Mertns R P 1989 <i>IEEE Trans. Electron Devices</i> 36 2889 | [9] | Liu M and He Y L 1998 <i>Acta Phys. Sin.</i> 47 864(in Chinese) [刘 明、何宇亮 1998 物理学报 47 864] |
| [4] | Matsumoto Y , Hitara G , Takakura H , Okamoto H and Hamakana Y 1990 <i>J. Appl. Phys.</i> 67 6538 | [10] | Sze S M 1981 <i>Physics of Semiconductor Devices</i> (New York :Wiley) p36 |
| [5] | Powell M J 1989 <i>IEEE Trans. Electron Devices</i> 36 2753 | [11] | Card H C 1979 <i>J. Appl. Phys.</i> 50 2822 |
| [6] | Zhu E , Zhang S S , Sheng W W , Zhao B Z , Xiong C K and Wang Y S 1989 <i>IEEE Electron Device Lett.</i> 10 4 | [12] | Lin S M and Wang Q M 1982 <i>Chin. J. Semicond.</i> 3 175 |

The $I-V$ characteristics of nano-silicon/crystal silicon hetero-junction^{*}

Liu Ming¹⁾ Liu Hong²⁾ He Yu-Liang³⁾

¹⁾(Microelectronics Research and Development Center , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 ,China)

²⁾(Department of Applied Physics , Suzhou University of Science and Technology , Suzhou 215000 ,China)

³⁾(Department of Physics , Nanjing University , Nanjing 210093 ,China)

(Received 20 December 2002 ; revised manuscript received 24 January 2003)

Abstract

The nc-Si:H/c-S hetero-junction is fabricated and studied using nc-Si:H films. Its $I-V$ curves have good thermal stability and change little in the temperature range from 20 to 200°C . The existence of a large amount of interfacial states is responsible for the good switch characteristics of the nc-Si:H/c-Si hetero-junction.

Keywords : hetero-junction , hydrogenated nano-silicon film , transporting mechanism

PACC : 7360F , 6150C , 6114H , 6855

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.60236010).