

掺氮 6H-SiC 单晶的电阻率、迁移率及自由载流子浓度*

杨晶晶^{1,†} 何秀坤² 曹全喜¹ 施亚申²

(1 西安电子科技大学, 西安 710071)

(2 天津电子材料研究所, 天津 300192)

摘要: 测试了国产和美国 Cree 公司生产的 n 型 6H-SiC 低温下的电学参数,包括电阻率、迁移率和自由载流子浓度,并用 FCCS 软件数据拟合分析得到两种 SiC 的杂质浓度和能级. 实验结果表明:杂质浓度和补偿度对低温下 SiC 的电性能有很大影响,轻度补偿的掺氮 6H-SiC 是施主氮的两个能级共同起作用;而重度补偿的 6H-SiC 在低温时则是受主能级起作用,并且后者迁移率随温度变化曲线的峰值降低并右移. 同时发现重度补偿的 SiC 在较低温度时由 n 型转变成了 p 型,并从理论上分析了产生这种现象的原因.

关键词: 自由载流子浓度; FCCS; 施主; 受主; 补偿度; 分布函数

EEACC: 2520

中图分类号: TN304.2⁺4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)03-0530-06

1 引言

SiC 作为一种宽禁带半导体材料,具有宽带隙、高热导率、比较小的介电常数和良好的抗辐射能力等特点,适合制造耐高温、大功率、高频器件,同时亦可用在短波发光器件和光电器件上. 介电常数较小决定了 SiC 器件在高频器件方面应用具有很大潜力. SiC 材料较高的击穿场强和热导率,使器件功率承受能力大大提高,在高温大功率领域具有前景. 抗辐射 SiC 器件可以大大增强军事电子系统的寿命. SiC 具有同质多型特性,3C-SiC, 4H-SiC 和 6H-SiC 是这族材料中比较成熟的宽禁带半导体,特别是其中的 6H-SiC 制作的高频大功率器件能使固态电路的功率密度至少提高 4 个数量级,并大大提高器件的工作温度^[1].

目前,生长 SiC 单晶的方法主要是物理气相传输法(physical vapor transportation, PVT)^[2]. 我国在 SiC 单晶生长方面与美国、日本相比还存在一定的差距,其中一个重要的问题就是 SiC 材料中掺杂浓度的控制,包括生长过程中氮和硼的污染. 在 SiC 中硼是受主杂质,对施主杂质氮起到了补偿作用,从而影响到 SiC 材料在不同温度下的迁移率和自由载流子浓度. 迁移率和载流子浓度是表征材料质量优劣的重要参数,这与材料的能带结构和散射

机构有关. 本文工作就是通过对国产和美国 Cree 公司生产的 n 型 6H-SiC 进行低温霍尔对比测试,得到电阻率、迁移率、自由载流子浓度随温度的变化关系,并利用 FCCS (free carrier concentration spectroscopy) 对结果进行分析,以及讨论低温下施主杂质和受主杂质浓度对 6H-SiC 的影响.

2 测试与分析

2.1 实验

测量样品为我国生长的掺氮 n 型 6H-SiC (1[#]) 和 Cree 公司生产的掺氮 n 型 6H-SiC (2[#]),用 Au/NiCr 材料分别制备欧姆接触电极^[3]. 采用 Heliplex 4 型氦闭环制冷器构成的低温变温 Hall 测量系统. 在测量过程中,样品阻抗随温度的变化呈现出高低不同的状况,根据阻抗的变化选择不同的测量仪器. 高温低阻状态下采用浮地测量模式,由 Keithley 220 恒流源、Keithley 181 纳伏表、Keithley 706 扫描器等构成测量单元. 低温高阻状态下采用共地测量模式,由 Keithley 220 恒流源、Keithley 619 静电计、Keithley 706 扫描器等构成测量单元.

2.2 测试与分析

常温下测得两块 SiC 样品均为 n 型,2[#] 比 1[#] 的

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号:51327020102)

† 通信作者. Email: muyiluri@126.com

2005-08-10 收到,2005-10-20 定稿

迁移率高、电阻率小。变温测量控制样品室的温度从 8 K 到 293 K, 测得电阻率、迁移率和载流子浓度在不同温度下的值并作图。对 1[#] SiC 由测试结果得出温度在 140 K 以上时仍然呈 n 型, 在 140 K 以下变成了 p 型。而 2[#] 在变温的过程中始终为 n 型。由此可见, 在 140 K 以下, 1[#] SiC 已经由施主杂质电离导电转化为受主杂质电离导电。由于国内生长 SiC 的技术相对国外还有差距, 除了生长温度、生长环境压力等热力学因素外, 诸如籽晶表面极性、应力状态等动力学因素都影响到掺杂浓度。特别是杂质的污染, 除了坩埚中释放的硼以外, SiC 源粉中则可能混有铝或其他电负性比较小的金属受主杂质。温度比较低时, 杂质未完全电离, 电离浓度除了取决于掺杂浓度、电离能外, 还和温度有关, 受主杂质的存在若超过一定的限度就会影响低温下 SiC 的导电类型。

对 1[#] SiC, 首先分析温度低于 140 K 的数据, 其载流子浓度的变化数据可用 FCCS 拟合。FCCS 是用图形顶点分析法计算 SiC 中的施主杂质浓度 N_D 或受主杂质浓度 N_A 和杂质能级 (E_D 或 E_A), 甚至在不知道含有多少种杂质类型的情况下也可以获得计算结果^[4,5]。对于 p 型 SiC, 考虑到受主杂质的激活状态影响到不同温度下的空穴浓度 $P(T)$, 对于空穴占据受主能级的规律将采用两种不同的分布函数来计算, 一种是费米-迪拉克 (Fermi-Dirac) 分布函数, 适合轻度掺杂受主杂质的样品, 另一种是考虑到受主杂质激发状态受温度影响的分布函数, 既适合于轻度掺杂也适合于重度掺杂^[4~6]。

假定 p 型 SiC 含有 n 种受主杂质, 考虑有一种受主高于测量温度时完全电离, 浓度为 N_A , 且只含一种施主杂质, 根据电中性条件可得空穴浓度 $P(T)$ 为^[5,6]:

$$P(T) = \prod_{i=1}^n N_{Ai} F(E_{Ai}) - N_{com} \quad (1)$$

其中补偿度 N_{com} 为:

$$N_{com} = N_D - N_A \quad (2)$$

(1) 式中 $F(E_{Ai})$ 是 Fermi-Dirac 分布函数, 定义为:

$$f_{FD}(E_{Ai}) = \frac{1}{1 + g_A \exp\left(-\frac{E_F(T) - E_{Ai}}{kT}\right)} \quad (3)$$

式中 $E_F(T)$ 是费米能级 $E_F(T)$ 与价带 E_V 的差值; g_A 是受主简并因子, 对于 6H-SiC, $g_A = 4$ ^[5,6]; k 是玻尔兹曼常数。

另一种考虑受主激发状态的分布函数, 有效简并因子受不同温度下激发态的影响, 定义为:

$$f(E_{Ai}) = \frac{1}{1 + g_{Ai}(T) \exp\left(-\frac{E_F(T) - E_{Ai}}{kT}\right)} \quad (4)$$

式中 $g_{Ai}(T)$ 是有效受主简并因子, 它比 (2) 式的简并因子多了由温度和不同能量间隙构成的修正因子, 定义为:

$$g_{Ai}(T) = g_A \left[1 + \frac{g_r \exp\left(-\frac{E_r - E_{Ai}}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{E_{exi}(T)}{kT}\right)} \right] \times \quad (5)$$

式中 E_r 是位于价带和第 $r-1$ 激发能级之间的能量间隙, 定义为:

$$E_r = \frac{q^4 m_p^*}{8 h^2 \epsilon_s^2 \epsilon_0^2 r^2} = 13.6 \times \frac{m_p^*}{m_0 \epsilon_s^2 r^2} \quad (6)$$

式中 $E_{exi}(T)$ 是受主杂质基态和激发态能级的总体均值, 定义为:

$$\frac{E_{exi}(T)}{kT} = \frac{\sum_{r=2}^{\infty} (E_{Ai} - E_r) g_r \exp\left(-\frac{E_{Ai} - E_r}{kT}\right)}{1 + \sum_{r=2}^{\infty} g_r \exp\left(-\frac{E_{Ai} - E_r}{kT}\right)} \quad (7)$$

式中 g_r 是第 $r-1$ 激发态的简并因子; q 是电子电量; m_0 是真空电子质量; m_p^* 是空穴有效质量; h 是普朗克常数; ϵ_0 是真空介电常数; ϵ_s 是半导体相对介电常数。

另外, 用价带有效状态密度 $N_V(T)$ 表示空穴浓度 $P(T)$ 为:

$$P(T) = N_V(T) \exp\left(-\frac{E_F(T)}{kT}\right) \quad (8)$$

其中价带有效状态密度 $N_V(T)$ 为:

$$N_V(T) = N_{V0} k^{3/2} T^{3/2} \quad (9)$$

$$N_{V0} = 2 \times \left(\frac{2p m_p^*}{h^2}\right)^{3/2} \quad (10)$$

通过 (1) ~ (8) 式, 可以引入一个普遍的计算 N_{Ai} 和 E_{Ai} 的函数公式来表达 FCCS 图形顶点分析法的意义, 定义为^[5,6]:

$$H(T, E_{ref}) = \frac{P(T)^2}{(kT)^{5/2}} \times \exp\left(\frac{E_{ref}}{kT}\right) \quad (11)$$

此函数对每一个受主能级都对应了一个峰值温度, 其中 E_{ref} 是在温度测量范围内改变 H 函数峰值温度的参考量。分别将 (1) 式和 (8) 式的 $P(T)$ 代入 (11) 式中的 $P(T)$ 可得:

$$H(T, E_{ref}) = \prod_{i=1}^n \frac{N_{Ai}}{kT} \exp\left(-\frac{E_{Ai} - E_{ref}}{kT}\right) I(E_{Ai}) - \frac{N_{com} N_{V0}}{kT} \exp\left(\frac{E_{ref} - E_F(T)}{kT}\right) \quad (12)$$

其中:

$$I(E_{Ai}) = N_{V0} \exp\left(-\frac{E_{Ai} - E_F(T)}{kT}\right) F(E_{Ai}) \quad (13)$$

(12) 式中的 $\frac{N_{Ai}}{kT} \exp\left(-\frac{E_{Ai} - E_{ref}}{kT}\right)$ 在峰值温度

$T_{peak i} = \frac{E_{A_i} - E_{ref}}{k}$ 时得到峰值 $N_{A_i} \exp(-1/kT_{peak i})$. (13) 式中的 $F(E_{A_i})$ 代入 (3) 式或 (4) 式两种不同的分布函数可以得到相似的 $H(T, E_{ref})$ 曲线和相同的峰值. 通过控制测量的温度范围, E_{ref} 可以改变 $H(T, E_{ref})$ 的峰值, 就能计算出准确的 N_{A_i} 和 E_{A_i} . 对于 n 型 SiC, 计算 N_{D_i} 和 E_{D_i} 与 p 型 SiC 的计算公式类似^[7,8].

图 1 是在 140 K 温度以下实际测试的 1# SiC 载流子浓度变化曲线. 图 2 是通过 FCCS 拟合的 H 函

数与温度的关系曲线.

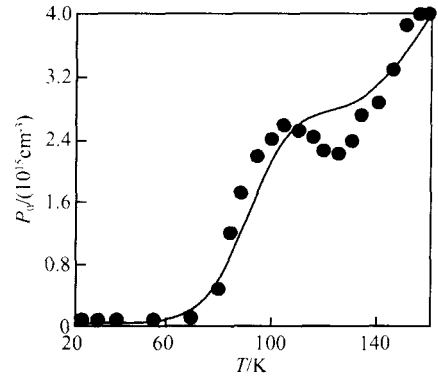


图 1 1# SiC 自由载流子浓度曲线

Fig. 1 Free carrier concentration curve of 1# SiC

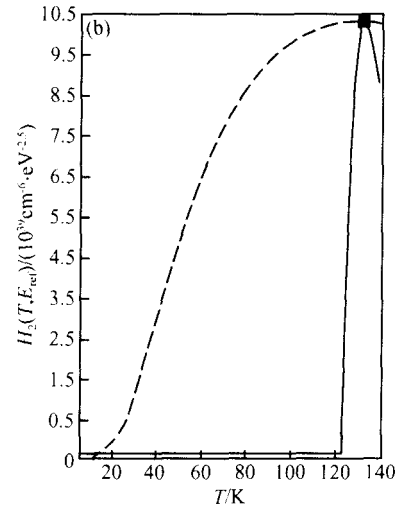
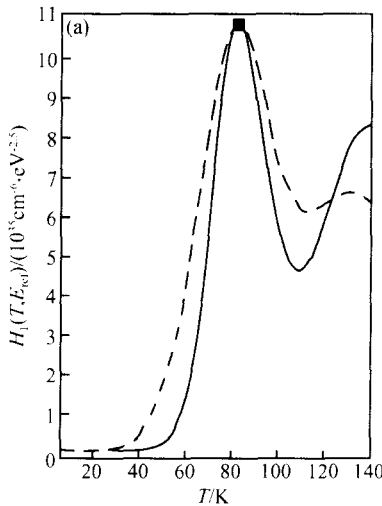


图 2 (a) FCCS 拟合的 $H_1(T, E_{ref})$ 曲线; (b) FCCS 拟合的 $H_2(T, E_{ref})$ 曲线

Fig. 2 (a) $H_1(T, E_{ref})$ curve fitting from FCCS; (b) $H_2(T, E_{ref})$ curve fitting from FCCS

温度在 77 ~ 293 K 之间的 2# SiC 载流子浓度变化曲线和通过 FCCS 拟合的结果分别如图 3 和图 4 (a), (b) 所示 (77 K 以下浓度比较小).

由 FCCS 根据上述的计算公式, 给出两种 SiC 的杂质浓度和能级列于表 1.

表 1 两种 SiC 样品的杂质浓度和能级计算结果

Table 1 The calculated impurity concentration and levels of two kinds of SiC

杂质	$N_A, N_D / \text{cm}^{-3}$	$E_A, E_D / \text{eV}$
1# SiC 受主 1	2.89×10^{15}	0.0348
1# SiC 受主 2	2.04×10^{17}	0.139
2# SiC 施主 1(N)	2.29×10^{16}	0.163
2# SiC 施主 2(N)	1.14×10^{16}	0.107

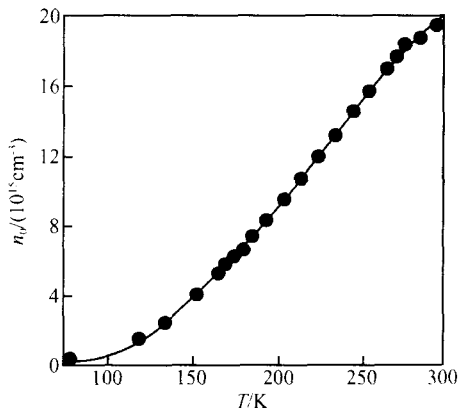


图 3 2# SiC 自由载流子浓度曲线

Fig. 3 Free carrier concentration curve of 2# SiC

图 1 是 1# SiC 在 140 K 以下测得的自由载流子浓度曲线, 尽管施主杂质 N 的浓度比自身的受主杂质浓度高 (常温下呈 n 型), 但在低温下 (140 K 以下), 半导体由 n 型变成了 p 型, 并且由图看出空穴浓度随温度升高呈不完全上升趋势, 施主杂质仍存在一定程度的影响. 图 2 是 FCCS 通过前述的系列

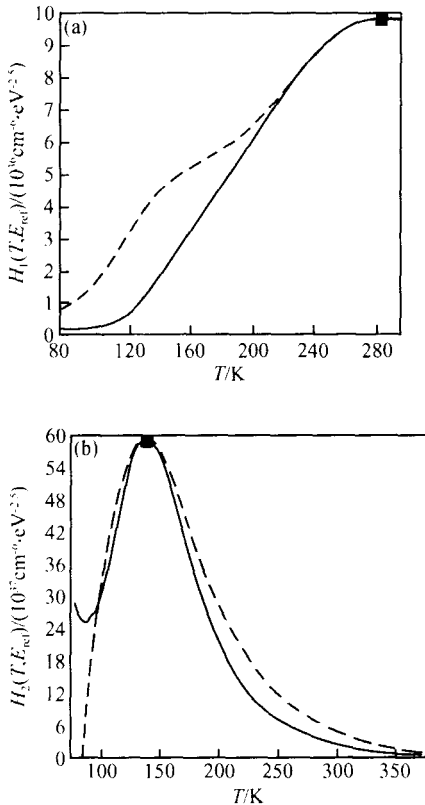


图 4 (a) FCCS 拟合的 $H_1(T, E_{ref})$ 曲线; (b) FCCS 拟合的 $H_2(T, E_{ref})$ 曲线
 Fig. 4 (a) $H_1(T, E_{ref})$ curve fitting from FCCS; (b) $H_2(T, E_{ref})$ curve fitting from FCCS

公式拟合出的 $H(T, E_{ref})$ 与温度的关系曲线, 两种类型的受主杂质分别用 $H_1(T, E_{ref})$ 和 $H_2(T, E_{ref})$ 表示, 实线是代入 Fermi-Dirac 分布函数 ((2) 式) 做出的曲线, 虚线是代入 (3) 式的分布函数做出的曲线, 图 2(a) 中两种曲线拟合得比较好, 图 2(b) 拟合了表 1 中浓度较高的受主杂质 2, 虽然虚线和实线的出入反应了 Fermi-Dirac 分布函数只适用于轻度掺杂的样品, 但两种曲线的顶点仍然相同. 图 3 是 2[#] SiC 在 77 ~ 293 K 之间测得的自由载流子浓度, 且一直为 n 型, 电子浓度随温度升高呈明显的上升趋势, 受主杂质影响很小. 图 4 拟合出的 $H(T, E_{ref})$ 实线和虚线符合得比较好, 图 4(a) 和 (b) 分别代表位于不同能级的施主杂质, 浓度和能级如表 1 中所列的 2[#] SiC 数据, 这两种杂质都为氮. 表 1 中的 0.107 和 0.163 eV 分别为氮处于不同位置 (立方位和六角位) 时的能级^[7,8], 较小能级起到对受主杂质能级的补偿作用, 较大能级产生电离向导带激发电子^[9]. 1[#] SiC 是一种高度补偿的 SiC, 由表 1 看出由于它掺入了浓度比较高且电离能较小的受主杂质 (0.0348 和 0.139 eV), 分别比施主杂质氮的两种电离能小. 温度较低时, 杂质只有很小一部分电离, 起

主要导电作用的是电离能较小的受主杂质, 电离能大的施主杂质氮作用很小, SiC 呈 p 型. 温度较高时, 杂质电离度大, 受主杂质能级被完全补偿, 掺杂浓度大的施主杂质氮的电离起主要的导电作用, SiC 呈 n 型. 根据低温下电子和空穴的电离公式同样可以证明.

低温弱电离区的电子浓度和空穴浓度分别为^[10]:

$$n_0 = \left(\frac{N_D N_{C0}}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_D}{2kT}\right) \quad (14)$$

$$p_0 = \left(\frac{N_A N_{V0}}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_A}{2kT}\right) \quad (15)$$

式中 N_{C0} 和 N_{V0} 分别为导带有效状态密度和价带有效状态密度, N_{V0} 由 (10) 式给出, 对于 6H-SiC, 电子有效质量 $m_n^* = 0.6$ ^[11], 空穴有效质量 $m_p^* = 1.2$ ^[11], 因此 $N_{V0} > N_{C0}$, 不同杂质又分别有 $E_A < E_D$, 尽管 N_D 高于 N_A , 但当 N_A 超过一定的浓度, 计算出的空穴浓度有可能大于电子浓度, 对于硅、锗等半导体, $N_{C0} > N_{V0}$, 因此低温下不容易出现像 SiC 这种电性变化的情况.

2[#] SiC 样品纯度比较高, 生长时污染的受主杂质很少, 因此低温下受主杂质对 SiC 的自由载流子浓度影响小, 电性不会改变. 对两种 SiC 采用 SIMS 检测出 1[#] SiC 的氮含量为 10^{19} cm^{-3} , 其他杂质浓度为 10^{17} cm^{-3} , 2[#] SiC 只检测出了杂质氮含量为 10^{16} cm^{-3} , 其他杂质浓度在检测限 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下.

再对两种 SiC 的电阻率和迁移率进行分析, 电阻率随温度的变化关系如图 5 所示.

从图 5 中可以看出电阻率随温度变化存在一个转折温度, 约在 40 ~ 70 K 附近出现明显变化. 高于转折温度时电阻率随温度变化较缓, 甚至基本不变; 而低于转折温度时电阻率随温度变化较快. 尽管 1[#] SiC 样品氮的含量比 2[#] SiC 样品高, 但是高度补偿, 受主杂质浓度较高, 载流子浓度小, 因此电阻率高于 2[#] SiC. 半导体材料补偿度越高, 材料纯度越低, 迁移率就会降低, 这是不利于制造器件的. 图 6 显示了两种 SiC 迁移率随温度的变化关系.

温度比较低时, 电离杂质散射成为主要贡献, 晶格振动散射与前者比, 影响不大, 所以迁移率随温度的升高而增大. 温度较高时, 尽管杂质浓度变大, 但起主导作用的是晶格振动散射, 包括光学声子散射和声学声子散射, 故迁移率有所下降. 尽管两种 SiC 的施主杂质含量都比较高, 但 1[#] SiC 样品的受主杂质浓度要远远大于 2[#] SiC 样品, 从图 6 中可以看出, 1[#] SiC 样品迁移率随温度变化的峰值点位置要比 2[#] SiC 样品降低并右移, 从而也证明了 1[#] SiC 样品的杂质浓度和补偿度都比 2[#] SiC 要大^[11]. 要

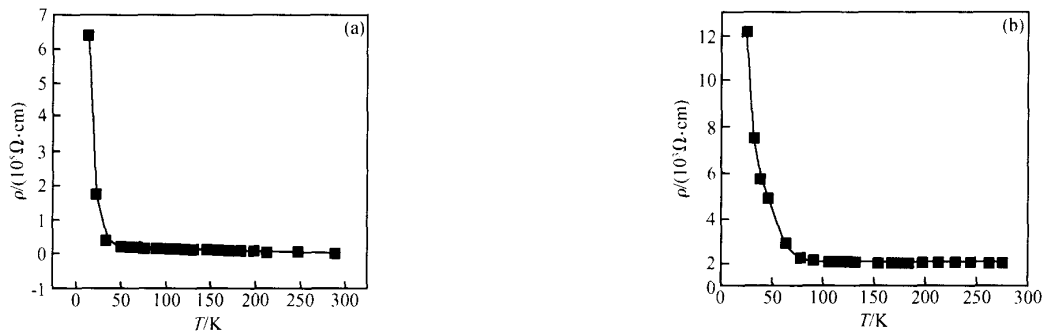


图 5 (a) 1# SiC 电阻率随温度的变化关系; (b) 2# SiC 电阻率随温度的变化关系

Fig. 5 (a) Resistivity of 1# SiC varies with temperature; (b) Resistivity of 2# SiC varies with temperature

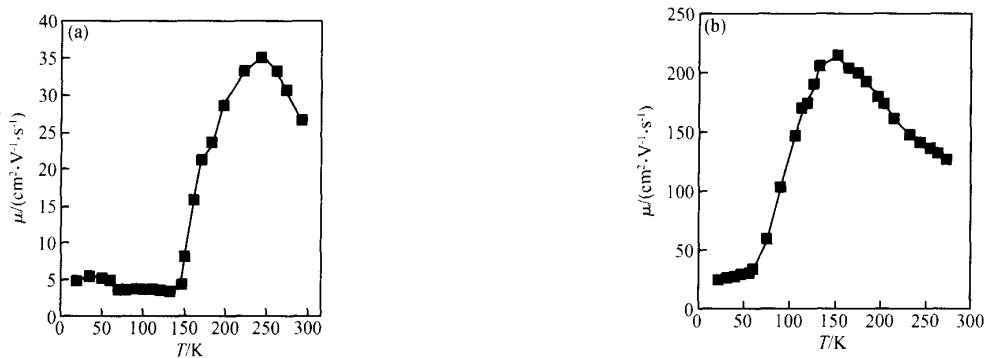


图 6 (a) 1# SiC 迁移率随温度的变化关系; (b) 2# SiC 迁移率随温度变化关系

Fig. 6 (a) Mobility of 1# SiC varies with temperature; (b) Mobility of 2# SiC varies with temperature

提高 SiC 单晶的迁移率, 生长过程中尽量减少杂质污染是很关键的一步. 图 6(a) 中 140 K 以下迁移率的不规则变化和载流子浓度受温度影响的不规则变化对应.

3 结论

(1) 通过对掺氮 6H-SiC 低温霍尔测试可知, 当 SiC 中电离能较小的受主杂质浓度高于一定限度时, n 型 SiC 在低温下会转变为 p 型, 这与 SiC 生长时的污染有关, 生长过程中会吸附空气中的氮, 还会在高温时掺入坩锅材料里的硼, 另外 SiC 源粉中也含有种类比较复杂的受主杂质, 尽管总的施主杂质的浓度高于受主杂质的浓度, 在常温下显示 n 型, 但在低温下能带结构就不能简单认为受主能级被电子完全填充, 事实上起导电作用的是电离受主杂质, 而施主杂质影响很小.

(2) 为了得到性能稳定的 n 型 SiC, 仅仅提高 SiC 的氮掺杂量是远远不够的, 要严格控制生长中的污染, 由于 SiC 是在接近 2500 的高温下生长, 系统中的杂质很容易挥发而沾污晶体, 另外气化工艺的生长环境也造成均匀掺杂的难度, 因此 SiC 晶

体的纯度研究至关重要.

(3) SiC 电阻率和迁移率随温度的变化也与掺杂浓度和补偿度有很大的关系. 迁移率随温度变化关系受杂质浓度和补偿度的影响在低温端表现明显, 特别是在高补偿下尤为突出, 它表现在迁移率曲线峰值的降低和右移.

参考文献

- [1] Hao Yue, Peng Jun, Yang Yintang. SiC semiconductor technology. Beijing: Science Press, 2000: 2 (in Chinese) [郝跃, 彭军, 杨银堂. 碳化硅宽禁带半导体技术. 北京: 科学出版社, 2000: 2]
- [2] Selder M, Kadinski L, Makarov Y, et al. Global numerical simulation of heat and mass transfer for SiC bulk crystal growth by PVT. J Cryst Growth, 2000, 211: 333
- [3] Zhang Yuming, Luo Jinsheng, Zhang Yimen. Ohmic-contacts to n-type 6H-SiC carbide. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(9): 718 (in Chinese) [张玉明, 罗晋生, 张义门. n 型 6H-SiC 体材料欧姆接触的制备. 半导体学报, 1997, 18(9): 718]
- [4] Matsuura H. Investigation of a distribution function suitable for acceptors in SiC. J Appl Phys, 2004, 95(8): 4213
- [5] Matsuura H, Sugiyama K, Nishikawa K, et al. Occupation

- probability for acceptor in Al-implanted p-type 4H-SiC. *J Appl Phys*, 2003, 94(4): 2234
- [6] Matsuura H, Komeda M, Kagamihara S, et al. Dependence of acceptor levels and hole mobility on acceptor density and temperature in Al-doped p-type 4H-SiC epilayers. *J Appl Phys*, 2004, 96(5): 2708
- [7] Chen X D, Fung S, Ling C C, et al. Deep level transient spectroscopic study of neutron-irradiated n-type 6H-SiC. *J Appl Phys*, 2003, 94(5): 3004
- [8] Matsuura H, Kimoto T, Matsunami H. Nitrogen donor concentrations and its energy levels in 4H-SiC uniquely determined by a new graphical method based on Hall-effect measurement. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38(7): 4013
- [9] Iwata H, Itoh K M. Donor and acceptor concentration dependence of the electron Hall mobility and the Hall scattering factor in n-type 4H- and 6H-SiC. *J Appl Phys*, 2001, 89(11): 6228
- [10] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. *Semiconductors physics*. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 138 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生, 等. 半导体物理学. 北京: 国防工业出版社, 2002: 138]
- [11] Wang Liang, Zheng Qingyu, Sun Yizhi. Measurement and analysis on temperature dependence of electrical properties for nitrogen doped 6H-SiC material. *Magazine of Semiconductors*, 1998, 23(4): 7 (in Chinese) [王良, 郑庆瑜, 孙毅之. 掺氮 6H-SiC 材料电学性质温度依赖关系测量与分析. 半导体杂志, 1998, 23(4): 7]

Resistivity, Mobility, and Free Carrier Concentration of 6H-SiC Crystal Doped by Nitrogen*

Yang Jingjing^{1,†}, He Xiukun², Cao Quanxi¹, and Shi Yashen²

(1 *Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(2 *Tianjin Electronic Materials Research Institute, Tianjin 300192, China*)

Abstract: Electric parameters including resistivity, mobility, and free carrier concentration are measured at low temperatures for n-type 6H-SiC from China and Cree corporation. Their impurity concentration and levels are obtained from the fitting data of FCCS. The experimental results show that the concentration and compensation level of the impurity greatly affect the electric properties of SiC at low temperatures. The two different levels of nitrogen donor work together for 6H-SiC with a low compensation, but the acceptor levels work at low temperatures for 6H-SiC with a high compensation. The peak of the mobility curve of the latter decreases and moves to the right as temperature increases. At the same time, the highly compensated SiC is transformed from n-type to p-type at low temperatures, which is analyzed theoretically.

Key words: free carrier concentration; FCCS; donor; acceptor; compensation level; distribution function

EEACC: 2520

Article ID: 0253-4177(2006)03-0530-06

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 51327020102)

† Corresponding author. Email: muyiluri@126.com

Received 10 August 2005, revised manuscript received 20 October 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics