

SiC 衬底上 SiCGe 外延薄膜的结构*

李连碧 陈治明[†] 蒲红斌 林涛 李佳 陈春兰 李青民

(西安理工大学电子工程系, 西安 710048)

摘要: 用热壁 CVD 法在 6H-SiC 衬底上生长了 SiCGe 三元合金, 样品生长呈现出显著的岛状特征. 利用 SEM, TEM, EDS 和 PL 等分析手段对薄膜进行了特性研究. 发现样品包含两种特征相, 由随机分布的球形岛和岛周围较平坦的背景区域组成. EDS 结果表明两相组分不同: 球形岛为高 Ge 区, 组比分大于 30%; 背景区域 Ge 含量则低于 1%. 两种相的生长速率也不相同, 在生长时间相同的情况下, 背景区较薄, 且满布三角形堆垛层错. 样品的 PL 峰位于 2.2 和 2.7eV 处. 分析认为, 这两个峰分别来自球形岛和背景区域的带间辐射复合.

关键词: SiC; SiCGe; 岛状生长; LPCVD

PACC: 6855; 8115H

中图分类号: O484.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0123-04

1 引言

SiCGe/SiC 异质结在光电子和功率电子领域具有潜在的实用价值, 这是硅器件所不具备的(包括光敏器件和功率开关器件在高温条件下的应用). 然而, SiC 对可见光和近红外光不敏感, 这限制了它在这些领域的应用. 解决这个问题的可行方法之一就是采用 SiCGe/SiC 异质结结构. 具有适当组分的 SiCGe 三元合金可用作光吸收层, 使 SiC 器件在一定波长范围内具有光敏感性. 目前单晶 SiCGe 薄膜的生长技术尚不太成熟, 在 SiC 衬底上进行 SiCGe 三元合金异质外延生长的研究工作就更少了^[1]. 了解薄膜的生长机制, 是在 SiC 衬底上成功生长单晶 SiCGe 薄膜的基础. 在我们的前期研究中, 发现 SiCGe 三元合金在 SiC 衬底上大多为岛状生长模式^[2], 而生长温度、源气体流量等工艺条件的不同将会导致岛状生长特征的不同.

2 实验

SiC 衬底经适当的清洗处理后放入 LPCVD 生长室中. 首先, 进行 H₂ 高温清洗, 然后降至生长温度, 同时通入硅烷 (SiH₄, 10% 氢气稀释)、丙烷 (C₃H₈, 10% 氢气稀释) 和锗烷 (GeH₄, 5% 氢气稀释) 3 种源气体反应生成 SiCGe 薄膜. 生长系统的本底真空度为 1×10^{-3} Pa, 生长压力为 300 Pa, 具体情况请参考文献^[2].

为了了解其生长状态和模式, 在大量的样品中, 我们选择了一个具有典型的岛状形貌的样品用扫描电子显微镜 (SEM), X 射线能量色散谱仪 (EDS) 和荧光光谱仪 (PL) 等分析手段对薄膜的岛状结构进行了研究.

3 结果与讨论

图 1 是外延温度为 1100°C, 外延时间 2.5 h 的 SiCGe 薄膜的 SEM 照片. 从照片中可以清楚地观察到, 薄膜是由随机分布的球形岛和岛周围的背景区域组成. 球形岛的大小尺寸不同, 在 1~4 μm 之间, 且存在岛的联并现象. 岛周围区域也不完全光滑, 可以观察到数量很多的三角形堆垛层错, 层错具有方向性, 其取向主要有两种, 两者相差 180°, 高度低于球形岛, 但明显高于背景区域.

从样品 0602 的表面和截面形貌像中, 可以推断 SiC 上外延生长的 SiCGe 薄膜遵循 Stranski-Krastanov 生长模式 (2D 层状 + 3D 岛状模式). 由于生长的 SiCGe 材料和衬底 6H-SiC 材料之间的表面能相差不大, 在 6H-SiC 衬底上异质外延 SiCGe 薄膜将会强烈依赖于衬底材料和外延层之间的晶格匹配. 与 Si 上异质外延 SiGe 类似, 在一定的外延生长温度、Ge 组分和外延生长厚度范围内, 在 SiC 衬底上外延生长的 SiCGe 晶体薄层的晶格常数可以通过失配应力自行调节, 实现层状生长. 在该模式中, 外延生长的 SiCGe 层沿 SiC 衬底表面方向受到压应力, 与 SiC 衬底保持共面晶格常数, 沿垂直于 SiC

* 国家自然科学基金 (批准号: 60376011) 和教育部高校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20040700001) 资助项目

[†] 通信作者. Email: chenzm@xaut.edu.cn

2006-11-29 收到

衬底表面方向受到张应力,使该方向晶格常数增大.在晶格常数应变调节的同时,应变 SiCGe 层中逐步积累应变能量.当生长层的厚度小于其 2D 层状生长的临界厚度时,生长遵循 Frank-van der Merwe 生长模式(2D 层状),形成岛周围 2D 的 SiCGe 外延

层(又称浸润层),如图 1(d)所示,而图中 2D 生长层中大量的三角形层错是积累的应变能释放的结果.当 2D 生长层的厚度大于 SiCGe 浸润层临界厚度时,则晶格能量释放在浸润层上面,以形成 3D 岛的形式来释放应力,进行 SiCGe 薄膜的生长.

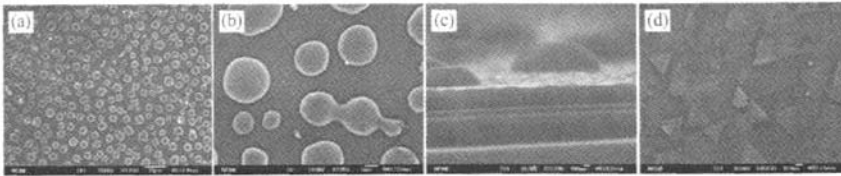


图 1 生长时间为 2.5h 的样品 0602 的 SEM 图像 (a)表面形貌像×1200;(b)表面形貌像×7000;(c)截面形貌像;(d)岛周围背景区域形貌像

Fig.1 SEM images of sample 0602 grown for 2.5h (a) Surface morphology ×1200; (b) Surface morphology ×7000; (c) Cross-section to show the raised islands; (d) Enlarged background in image to show the growth

为了进一步确定 SiC 衬底上 SiCGe 薄膜的生长模式,我们对样品进行了透射电镜(TEM)测试,如图 2 所示.图中左上深灰色区域为 SiC 衬底,与 SiC 衬底相连接的为 SiCGe 外延层.两者有着明显不同的衬度,界线清晰平直.外延层具有明显的岛状突起,宽度和高度分别在 2.3 和 0.8 μm 左右,这与 SEM 互相印证.但是形状并不是很圆滑,这可能和该岛所处的生长阶段有关.仔细观察会发现,岛的生长并不是直接从衬底开始的,在岛与 SiC 衬底之间有一层整齐且厚度均匀的 2D 生长层,该层贯穿整个 SiC 表面.在 2D 层上也可以观察到三角形层错的突起,如图中白圈所示.由以上分析可以确定 SiCGe 薄膜的岛状生长遵循 S-K 模式.

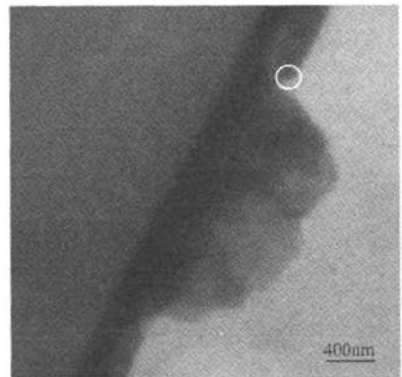


图 2 样品 0602 的 TEM 形貌像

Fig.2 TEM image of the sample 0602 grown at 1100 $^{\circ}\text{C}$ for 2.5h

为了进一步了解薄膜的内部结构,我们借助 EDS 对球形岛和岛周围背景区域的成分进行了表征,如表 1 所示.两者的 Ge 组分悬殊很大,球形岛为富 Ge 区,其原子组分高达 41.64%;球形岛间的背景区域为贫 Ge 区,组分低于 1%.

表 1 样品 0602 的 EDS 测试结果 (a) 球形岛;(b) 岛周围背景区域

Table 1 EDS conclusion of sample 0602 (a) Islands;(b) Background region

(a)	Element	Intensity	Wt%	At%	(b)	Element	Intensity	Wt%	At%
	C	0.2129	1.38	41.08		C	0.1683	1.56	59.73
	Si	0.4502	0.36	17.28		Si	1.1203	1.54	39.96
	Ge	0.9177	1.26	41.64		Ge	0.7394	0.38	0.31

借助 Soref Richard 的理论^[3],可以根据 SiCGe 生长层中的 Ge,C 组分来估算其禁带宽度,如图 3 所示.z 轴表示 $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ 合金禁带宽度,x 轴和 y 轴分别表示 Ge,C 含量.线(0,y),线(x,0)和线 $x+y=1$ 分别表示 $\text{Si}_{1-y}\text{C}_y$, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 和 $\text{Ge}_x\text{C}_{1-x}$.估算可得,球形岛区域的禁带宽度为

2.2eV 左右,而背景区域大约为 2.7eV.

图 4 是样品 0602 的 PL 分析结果.对结果进行拟合后得知,样品的 PL 峰位于 2.2 和 2.7eV 处.这个结果和该样品通过估算得到的禁带宽度基本吻合.所以初步确定这两个峰分别为球形岛和背景区域的带边吸收峰.

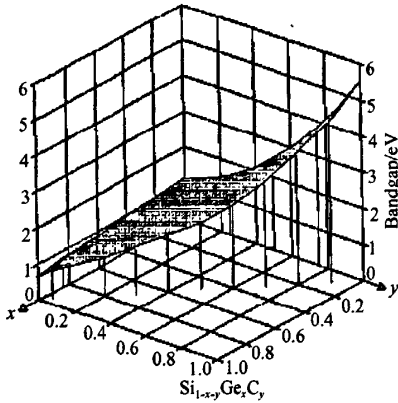


图3 Si_{1-x-y}Ge_xC_y 合金禁带宽度和 Ge,C 组分关系图
 Fig.3 Bandgap of Si_{1-x-y}Ge_xC_y as a function of composition x and y

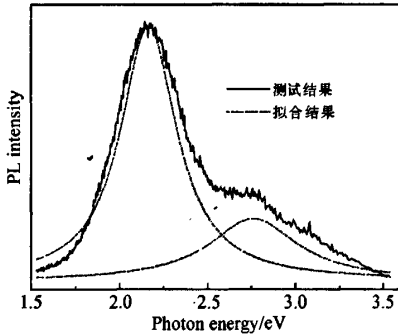


图4 样品 0602 的室温 PL 谱
 Fig.4 PL spectra of the sample 0602 at 300K

Boucaud 等人的理论^[4]进一步证实了该结论. 由于 C 原子半径比 Si 原子半径小 60%, 而 Ge 原子半径仅仅比 Si 原子半径大 4%. 在 SiCGe 系统中, 对于晶格结构来说, C 的影响比 Ge 的影响要大得多. 所以在 SiCGe 薄膜中, 禁带宽度与 C 组分关系

密切. Boucaud 等人的实验证明: 禁带宽度与 C 组分成线性关系, 每 1% 的 C 组分的增加会造成 SiCGe 合金的禁带 23.65meV 的宽化. 由此可知, 球形岛和背景区域由于 C 组分的差异所造成的禁带宽化约为 0.45eV, 这和 PL 结果以及估算的禁带宽度都能够较好地吻合.

由上述的分析可知, 有着不同组分的球形岛和岛周围的背景区域的禁带宽度分别为 2.2 和 2.7eV, 而其 PL 峰分别来自于这两个区域的带间辐射复合.

4 结论

用热壁 CVD 法在 6H-SiC 衬底上生长了 SiCGe 三元合金, 样品生长呈现出显著的岛状特征. 利用 SEM, TEM, EDS 和 PL 等分析手段对薄膜进行了特性研究. 发现样品包含两种特征相, 由随机分布的规则球形岛和岛周围较平坦的背景区域组成. EDS 结果表明两相组分不同: 球形岛为高 Ge 区, 其 Ge 组分大于 40%; 背景区域 Ge 含量低于 1%. 两种相的生长速率也不相同, 在生长时间相同的情况下, 背景区较薄, 且满布三角形堆垛层错. 样品的 PL 峰位于 2.2 和 2.7eV 处. 分析认为, 这两个峰分别来自球形岛和背景区域的带间辐射复合.

参考文献

- [1] Roe K J, Katulka G, Kolodzey J, et al. Silicon carbide and silicon carbide-germanium heterostructure bipolar transistors. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(14): 2073
- [2] Chen Zhiming, Pu Hongbin, Wo Limin, et al. Hetero-epitaxial growth of SiCGe on SiC. *Microelectron Eng*, 2006, 83: 170
- [3] Soref Richard A. Optical band gap of the ternary semiconductor Si_{1-x-y}Ge_xC_y. *J Appl Phys*, 1991, 70(4): 2470
- [4] Boucaud P, Francis C, Julien F H, et al. Band-edge and deep level photoluminescence of pseudomorphic Si_{1-x-y}Ge_xC_y alloys. *Appl Phys Lett*, 1994, 64(7): 875

Structural Analysis of the SiCGe Epitaxial Layer Grown on SiC Substrate *

Li Lianbi, Chen Zhiming[†], Pu Hongbin, Lin Tao, Li Jia, Chen Chunlan, and Li Qingmin

(Department of Electronics Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Growth of SiCGe ternary alloy on 6H-SiC in a conventional hot-wall CVD system was studied, and the ternary alloy films were characterized by means of SEM, EDS and PL. It has been found that the samples grown at a narrow temperature region exhibit a two-phase co-growth aspect, which consists of a relatively smooth background region and some randomly distributed spherical islands. Materials in the two phases were found to have different compositions by EDS. The islands is a Ge-rich material with Ge content of more than 40%, while the Ge content of background is less than 1%. SEM images show that the two materials seem to have different growth rates and the background seems to be a defect-rich region, where a high density of stacking faults is evident. The PL peaks located at 2.2eV and 2.7eV come from the interband radiative recombination of the islands and background region, respectively.

Key words: SiC; SiCGe; island growth; LPCVD

PACC: 6855; 8115H

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0123-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60376011) and the Doctoral Program Foundation of Institute of Higher Education of China (No. 20040700001)

[†] Corresponding author. Email: chenzm@xaut.edu.cn

Received 29 November 2006