

南京航空航天大学
论文集

(二〇一〇年) 第28册

材料科学与技术学院

(第2分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇一一年五月



NUAA2011039785

Z427
1033 (2010) - (28)

材料科学与技术学院

061



2011039785

28

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物.会议名称	年、卷、期	类别
91	黄海宾 沈鸿烈 吴天如 张磊 岳之浩	博士 教授 博士 博士 博士	061 061 061 061 061	热丝 CVD 工艺参数对 SiGe 薄膜键结构影响的研究	功能材料	2010.10.4	
92	黄海宾 沈鸿烈 唐正霞 吴天如 张磊	博士 教授 博士 博士 博士	061 061 061 061 061	热丝 CVD 法在单晶硅衬底上低温外延生长 Si 和 Ge 薄膜的研究	人工晶体学报	2010.39.3	
93	郭艳 沈鸿烈 张娟 唐正霞 鲁林峰	硕士 教授 硕士 博士 博士	061 061 061 061 061	Fe/Si 多层膜经快速热退火合成 β -FeSi ₂ 薄膜的研究	真空科学与技术学报	2010.30.2	
94	江丰 沈鸿烈 鲁林峰 杨超 罗军	博士 教授 博士 硕士 学士	061 061 061 061 061	Al ₂ O ₃ 过渡层厚度对 AZO 薄膜性能影响的研究	电子元件与材料	2010.29.1 2	
95	朱云广 沈鸿烈 左连勇 鲁林峰	博士 教授 硕士 博士	061 061 061 061	Ni 掺杂 CoSb ₃ 化合物的热电性能及机理研究	电子元件与材料	2010.29.1 1	
96	冯晓梅 Henk	副教授 高级	061 外单位	Specific heat of the simple-cubic Ising model	Physical Review E	2010.81(0 31103)	
97	魏轶博 段立彬 刘广耀 王通 冯晓梅	硕士 博士 研究员 博士 副教授	061 外单位 外单位 外单位 061	Nd _{0.5} Sr _{0.5} Co _{1-x} MnxO ₃ 的晶体结构和电磁性能研究	电子元件与材料	2010.29.3	
98	宋海潮 冯晓梅 滕宏春 何延辉	硕士 副教授 教授 副教授	061 061 外单位 外单位	涂层硬质合金刀高速铣削 Cr12 模具钢的破损失效分析	机床与液压	2010. 38.20	
99	唐彬 魏艳红 倪家强 张满波	硕士 教授 高级 中级	061 061 外单位 外单位	可远程共享的钛合金焊接选材智能数据库设计	焊接	2010.7	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物.会议名称	年、卷、期	类别
100	魏艳红 占小红 董志波	教授 讲师 讲师	061 061 外单位	Development and Application of Software Packages in Welding Engineering	Sino-German Workshop on "Simulation of Welding"	2010 年 10 月 25-29 日, Berlin	
101	包祖国 陶 杰 王 玲 何雪婷	博士 教授 副教授 硕士	061 061 061 061	TiO ₂ 纳米管阵列对染料敏化太阳能电池性能的影响	电子元件与材料	2010.29.6	
102	郭训忠 陶 杰 李 鸣	博士 教授 工程师	061 061 外单位	模具型面及冲头对三通管件成形的影响研究	中国机械工程	2010. 21.15	
103	郭训忠 陶 杰 袁 正	博士 教授 工程师	061 061 外单位	Hydroforming Simulation and Experiment on Al 5083 T-shapes	Advanced materials research	2010.97-1 01	
104	郭训忠 陶 杰 刘红兵 李 鸣	博士 教授 博士 工程师	061 061 061 外单位	聚变堆用难变形 CLAM 钢三通成形模拟及试验研究	原子能科学技术	2010.44.1 0	
105	郭训忠 陶 杰 孙显俊 张立伍	博士 教授 博士 硕士	061 061 061 061	爆炸焊接 316L 不锈钢/Al 复合管的界面及性能研究	南京航空航天大学学报	2010.42.5	
106	郭训忠 陶 杰 刘红兵 李 鸣 胡立兵	博士 教授 博士 工程师 工程师	061 061 061 061 061	聚变堆用 CLAM 钢管件冷推弯成形数值模拟及试验研究	核科学与工程	2010.30.2	
107	何娉婷 陶 杰 张焱焱 汤育欣 王月勤	讲师 教授 硕士 硕士 博士	061 061 061 061 061	纳米二氧化钛吸入对小鼠肺部和血清生化指标的影响	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2010.27.4	
108	金 鑫 陶 杰 杨 艳	硕士 教授 博士	061 061 061	Synthesis and Characterization of Poly (1-vinyl-3-propylimidazolium) Iodide for Quasi-Solid Polymer Electrolyte in Dye-Sensitized Solar Cells.	Journal of Applied Polymer Science	2010. 118.3	
109	刘红兵 陶 杰 徐 江 陈照峰 骆心怡	博士 教授 教授 教授 副教授	061 061 061 061 061	Microstructure and mechanical properties of alumina coatings prepared by double glow plasma technique	Applied Surface Science	2010.56	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物.会议名称	年、卷、期	类别
110	秦琦 陶杰 杨艳	硕士 教授 学生	061 061 061	Preparation and Characterization of Polyaniline film on Stainless Steel by Electrochemical Polymerization as a Counter Electrode of DSSC. Synthetic Metals	Synthetic Metals	2010.160 .11-12	
111	秦琦 陶杰 杨艳 邓杰	博士 教授 博士 讲师	061 061 061 061	TiO ₂ 光阳极表面原位聚合聚苯胺的制备及表征	高分子材料科学与工程	2010.26.4	
112	秦琦 陶杰 杨艳 包祖国	博士 教授 博士 硕士	061 061 061 061	固态染料敏化太阳能电池用聚苯胺-乙炔黑空穴导体的制备(英文)	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2010. 27.4	
113	孙显俊 陶杰 郭训忠 张立伍	博士 教授 博士 硕士	061 061 061 061	Fe/Al 复合管液压胀形数值模拟及试验研究	锻压技术	2010. 35.3	
114	陶杰 黄镇东 刘红兵 汪涛 王月勤 郭训忠	教授 硕士 博士 教授 博士 博士	061 061 061 061 061 061	钛基合金抗高温氧化搪瓷涂层制备及性能表征	南京航空航天大学学报	2010.42.4	
115	田西林 陶杰 陶海军 包祖国 汤育欣 李转利 张焱焱	硕士 教授 讲师 博士 硕士 硕士 硕士	061 061 061 061 061 061 061	阳极氧化制备 TiO ₂ 纳米管阵列电极反应及阻抗研究	稀有金属材料与工程	2010.39.6	
116	吴涛 陶杰 邓杰 汤育欣 朱宏 高朋	硕士 教授 讲师 硕士 硕士 硕士	061 061 061 061 061 061	柔性不锈钢基底上一维 TiO ₂ 纳米线薄膜的制备及表征	物理化学学报	2010. 26.11	
117	杨艳 陶杰 金鑫 秦琦	博士 教授 硕士 博士	061 061 061 061	Preparation and characterization of a micro-porous polymer electrolyte based on polymeric ionic liquid for dye-sensitized solar cell	Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communication	2010.4.5	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物.会议名称	年、卷、期	类别
118	杨艳 陶杰 金鑫 秦琦	博士 教授 硕士 博士	061 061 061 061	Preparation and properties of gel polymer electrolyte based on PVDF/acrylate interpenetrating polymer network for dye-sensitized solar cell	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2010.27.4	
119	尹磊 陶杰 苏新清 刘红兵 徐江	硕士 教授 副教授 博士 教授	061 061 061 061 061	双层辉光离子渗金属技术制备 Al-Cr-Si 氧化物阻氟涂层	核技术	2010.33.10	
120	张金龙 陶杰 王月勤 郭训忠 汪涛	硕士 教授 博士 博士 教授	061 061 061 061 061	镁含量对粉末冶金 Ti-Mg 合金组织及性能的影响	中国组织工程研究与临床康复	2010.14.16	
121	张立伍 陶杰 郭训忠 李鸣 孙显俊	硕士 教授 博士 硕士 博士	061 061 061 061 061	Ti/Al 双金属三通管冷成形及热处理工艺	金属热处理	2010.35.8	
122	朱宏 陶杰 董祥	硕士 教授 博士	061 061 061	Preparation and Photoelectrochemical Activity of Cr-Doped TiO ₂ Nanorods with Nanocavities	Journal of Physical Chemistry C	2010.114	
123	王蕾 吴光英	高工 高工	061 外单位	2024、7075 铝合金热处理的工艺及设备	热处理技术与装备	2010.31.183	
124	徐江 蒋书运 王悦	教授 教授 硕士	061 外单位 061	Influence of Chromium Alloying on the Cyclic Oxidation Behavior of Nanocrystalline (Mo _x Cr _{1-x}) ₅ Si ₃ Films at 800 °C in Air	ACS applied materials & interfaces	2010, 2(1)	
125	徐江 王悦 蒋书运	教授 硕士 教授	061 061 外单位	The effects of substitution of Cr for Mo on the mechanical properties of nanocrystalline Mo ₅ Si ₃ films	Nanoscale	2010, 2	
126	徐江 周成侯 蒋书运	教授 硕士 教授	061 061 外单位	Investigation On Corrosion Behavior Of Sputter Deposited Nanocrystalline (Mo _x Cr _{1-x}) ₅ Si ₃ Films by Double Cathode Glow Plasma	Intermetallics	2010, 18(8)	
127	徐江 周成侯 陈照峰 王悦 蒋书运	教授 硕士 教授 硕士 教授	061 061 061 061 外单位	Corrosion behaviors of (Cr,Fe) ₃ Si/Cr ₁₃ Fe ₅ Si ₂ composite coating under condition of synergistic effects of electrochemical corrosion and mechanical erosion	Journal of Alloys and Compounds,	2010, 496(1-2)	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
128	卓城之 徐 江	硕士 教授	061 061	Erosion-corrosion behavior of nano-Al ₂ O ₃ reinforced Ni-based alloying layer in acidic slurry flow	Surface Engineering,	2010, 26(3)	
129	徐 江 卓城之	教授 硕士	061 061	Erosion-corrosion characteristic of nano-particulates reinforced Ni-Cr-Mo-Cu surface alloying layer in acidic flow and acidic slurry flow	Materials and Corrosion,	2010, 61(1)	
130	徐 江 卓城之 韩德忠 刘林林	教授 硕士 硕士 硕士	061 061 外单位 061	纳米颗粒增强 Ni 基复合镀渗合金层的腐蚀与冲蚀性能的研究	稀有金属材料科学与工程,	2010, 39(2)	
131	周成侯 徐 江 蒋书运	硕士 教授 教授	061 061 外单位	Reactive sputter deposition of alumina films on magnesium alloy by double cathode glow-discharge plasma technique	Materials Characterization	2010, 61(2)	
132	徐 江 孙 健	教授 硕士	061 061	纳米晶 NiSi ₂ /Ti ₅ Si ₃ 复合涂层耐磨耐蚀性能的研究	稀有金属材料科学与工程	2010, 39(12)	
133	刘子利 刘希琴 沈 平 朱秀荣 孟 亮	副教授 副教授 硕士 高级 高级	061 063 061 外单位 外单位	Effect of ball-milling parameter on mechanical and damping properties of sintered Mg-Zr alloy	Transactions of Nonferrous Metals Society of China	2010.20(11)	
134	刘子利 刘新波 刘希琴 吴正洲 阎新春 张校刚	副教授 硕士 副教授 学士 硕士 教授	061 061 063 061	非晶态 MgNi+x%B 储氢合金的制备及其电化学性能	南京航空航天大学学报	2010.42.1	
135	刘新宽 刘子利 刘 平 向阳辉 胡文斌 丁文江	副教授 副教授 教授 副教授 教授 教授	外单位 061 外单位 外单位 外单位 外单位	Properties of fluoride film and its effect on electroless nickel deposition on magnesium alloys	Transactions of Nonferrous Metals Society of China	2010.20(11)	
136	刘子利 沈 平 朱秀荣 孟 亮	副教授 硕士 研究员 教授	061 061 外单位 外单位	等通道角挤压对 Mg-0.6%Zr 合金力学性能和阻尼性能的影响	兵器材料科学与工程	2010.33.1	
137	沈 平 刘子利 孙颖迪	硕士 副教授 硕士	061 061	等通道转角挤压对镁锆阻尼合金组织和性能的影响	机械工程材料	2010.34.8	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
138	闫新春 刘子利	硕士 副教授	061 061	LaMg ₁₁ Zr+200%Ni+x%Zr 合金的电化学性能	电池	2010.40.1	
139	刘细良 刘子利 杨 明	硕士 副教授 硕士	061 061 061	Sb 含量对 Mg-4Zn-Y 合金组织和性能的影响	材料热处理技术	2010.39.04	
140	杨 明 刘子利 刘细良 费 飞	硕士 副教授 硕士 硕士	061 061 061 061	粉末冶金法制备镁-硅-锆合金的组织及性能	机械工程材料	2010.34.5	
141	郑 婷 骆心怡 孙晓宾 崔 宏 陶 杰	硕士 副教授 硕士 硕士 教授	061 061 061 061 061	钛合金表面抗氧化技术的研究进展	机械工程材料	2010, 34(4)	
142	孙晓宾 骆心怡 郑 婷 崔 宏 张云露	硕士 副教授 硕士 硕士 硕士	061 061 061 061 061	钛合金抗微动损伤的研究进展	金属热处理	2010, 35(3)	
143	孙晓宾 骆心怡 张平则 郑 婷 崔 宏	硕士 副教授 教授 硕士 硕士	外单位 061 外单位 外单位 外单位	Ti6Al4V 表面双层辉光等离子 W-Mo 共渗层及其高温摩擦磨损性能研究	机械工程材料	2010, 34(10)	
144	林 龙 李斌斌 卢林峰 江 丰 沈鸿烈	硕士 讲师 博士 博士 教授	061 061 061 061 061	氧气流量对射频磁控溅射制备 Cu ₂ O 薄膜性能的影响	人工晶体学报	2010.39.5	
145	余海洲 郑 勇 刘文俊 庞旭明 郑建智 熊惟皓	博士 教授 副教授 硕士 硕士 教授	061 061 外单位 061 061 外单位	Effect of Mn content on the microstructure and mechanical properties of Mo ₂ FeB ₂ based cermets	Journal of Refractory Metals & Hard Materials	2010.18.2	
146	吴 鹏 郑 勇 赵永乐 余海洲	博士 教授 硕士 硕士	061 061 061 061	Effect of Tac addition on the microstructures and mechanical properties of Ti (C, N)-based cermets	Meterials & Design	2010.31.7	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物.会议名称	年、卷、期	类别
147	余海洲 郑 勇 刘文俊 庞旭明 郑建智 熊惟皓	博士 教授 副教授 硕士 硕士 教授	061 061 外单位 061 061 外单位	Effect of V content on the microstructure and mechanical properties of Mo ₂ FeB ₂ based cermets	Materials & Design	2010.31.5	
148	余海洲 郑 勇 刘文俊 庞旭明 郑建智 熊惟皓	博士 教授 副教授 硕士 硕士 教授	061 061 外单位 061 061 外单位	Effect of Mo/B content on the microstructure and mechanical properties of Mo ₂ FeB ₂ based cermets	Journal of Refractory Metals & Hard Materials	2010.18.3	
149	吴 鹏 郑 勇 袁 泉 余海洲 王少刚	博士 教授 硕士 硕士 副教授	061 061 061 061 061	Preparation of Electroless Ni-Mo Coated Tic Powder	Key Engineering Materials	2010.434-435	
150	孙 帆 郑 勇 高小龙 王秋红	硕士 教授 硕士 硕士	061 061 061 061	固体氧化物燃料电池电解质和电极材料的研究进展	金属功能材料	2010.14.7	
151	高小龙 郑 勇 孙 帆	硕士 教授 硕士	061 061 061	磁性磨料制备技术的研究进展	硬质合金	2010.27.2	
152	王秋红 郑 勇 余海洲	硕士 教授 硕士	061 061 061	烧结气氛对 Mo ₂ FeB ₂ 基金属陶瓷显微组织和力学性能的影响	硬质合金	2010.27.5	
153	王秋红 郑 勇 孙 帆 高小龙	硕士 教授 硕士 高级	061 061 061 外单位	碳化硅晶须的制备及其再复合材料增韧中的应用	硬质合金	2010.27.1	
154	马 丹 肖 军 李 勇 孙 涛 范 琳 王 鹏 肖 军	硕士 教授 硕士 硕士 硕士 硕士 教授	061 061 061 061 061 061 061	Research on Fiber Placement Trajectory Design Algorithm for the Free-Form Surface with Given Ply Orientation Information	The 1 st International Conference on Advanced Polymer Matrix Composites	2010.1	
155	徐 涛 王显峰 肖 军 赵增林	硕士 讲师 教授 高级	061 061 061 外单位	Research on Fiber Placement Trajectory Design Algorithm for the Free-Form Surface with Given Ply Orientation Information	The 1 st International Conference on Advanced	2010.1	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物.会议名称	年、卷、期	类别
156	范琳 孙涛 马丹 王鹏 程培忠 李勇	硕士 硕士 硕士 硕士 高工 教授	061 061 061 061 外单位 061	Z-pin 层合板纵横剪切性能的研究	复合材料. 创新与可持续发展	2010. 1	
157	王培源 肖军 李勇 王显峰	硕士 教授 教授 讲师	061 061 061 061	复合材料在常规武器装备中的应用	复合材料. 创新与可持续发展	2010. 1	
158	陈雯娜 李淑琴 任华 肖军	硕士 副教授 副教授 教授	061 061 061 061	基于联苯结构耐热型环氧树脂合成研究	复合材料. 创新与可持续发展	2010. 1	
159	王鹏 范琳 马丹 孙涛 程培忠 李勇	硕士 硕士 硕士 硕士 高工 教授	061 061 061 061 外单位 061	Z-pin 增强层合板 II 型间断韧性试验研究	复合材料. 创新与可持续发展	2010. 1	
160	王培源 肖军 王显峰	硕士 教授 讲师	061 061 061	Research on Fiber Placement Trajectory Design Algorithm for the Free-Form Surface with Given Ply Orientation Information	The 1 st International Conference on Advanced Polymer Matrix Composites	2010. 1	
161	刘劲松 李子全 顾善群 赵传保 李永灿 陈健康 王寅岗	中级 教授 本科 本科 本科 高工 教授	061 061 061 061 061 061 061	不同形貌氧化锌微纳米材料的额熔盐控制合成	化工新型材料	2010. 38. 10	
162	曾光 李子全 周衡志	硕士 教授 博士	061 061 061	TiNi/ZnO 复合智能薄膜的制备及性能研究	稀有金属材料与功能	2010. 39. 8	
163	孙颖迪 李子全 刘劲松 杨继年 丛孟启	博士 教授 讲师 博士 硕士	061 061 061 061 061	Crystallization kinetics of Mg61Cu28Gd11 and (Mg61Cu28Gd11)99.5Sb0.5 bulk metallic glasses	Journal of Alloys and Compounds	2010. 506 .1	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
164	孙颖迪 李子全 刘劲松 梁诸明	博士 教授 讲师 本科	061 061 061 061	Mg-Cu-Gd 系非晶合金的腐蚀行为研究	南京航空航天大学学报	2010. 42. 5	
165	孙颖迪 李子全 刘劲松 梁诸明 杨兴瑞	博士 教授 讲师 本科 本科	061 061 061 061 061	退火温度对 Mg ₆₁ Cu ₂₈ Gd ₁₁ 块体非晶结构与性能的影响	材料热处理学报	2010. 31. 7	
166	陈 可 李子全 刘劲松 杨继年 孙颖迪 卞松岗	博士 教授 讲师 博士 博士 硕士	061 061 061 061 061 061	Ba 对原位自生 Mg ₂ Si/Mg-Zn-Si 复合材料组织与力学性能的影响	材料工程	2010. 4. 6 3	
167	卞松岗 李子全 陈 可 刘劲松 周衡志 杨继年	硕士 教授 博士 讲师 博士 博士	061 061 061 061 061 061	纳米增强体在镁基复合材料中的应用现状	机械工程材料	2010. 34. 4	
168	卞松岗 李子全 陈 可 刘劲松 孙颖迪 王玉雷	硕士 教授 博士 讲师 博士 硕士	061 061 061 061 061 061	Ba 对富 La 稀土复合变质对 Mg 合金组织与性能的影响	中国有色金属学报	2010. 20. 8	
169	王玉雷 李子全 刘劲松	硕士 教授 讲师	061 061 061	退火温度对 NiTi/Si 膜结晶特性及力学性能的影响	机械工程材料	2010. 34. 9	
170	周衡志 李子全 曾 光 胡孝昀 陈建康	博士 教授 硕士 中级 高工	061 061 061 061 061	纳米 CeO ₂ /Zn-4. 5-RE-Mg-Ti 的复合搅拌制备工艺研究	稀有金属材料与工程	2010. 39. 3	
171	杨继年 李子全 王凌岩 刘晓蓓 刘劲松	博士 教授 硕士 硕士 讲师	061 061 061 061 061	SGF/PP 泡沫复合材料的发泡效果和力学性能	南京航空航天大学学报	2010. 42. 1	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物.会议名称	年、卷、期	类别
172	刘晓蓓 杨继年 李子全 梁宇翔 王凌岩	本科 博士 教授 硕士 硕士	061 061 061 061 061	POE-g-MAH 对 SGF/POE/PP 泡沫复合材料结构和性能的影响	塑料	2010. 39. 2	
173	曹安然 李玉芳	硕士 副教授	061 061	弹簧钢用防氧化脱碳涂料的制备与性能	机械工程材料	2010. 34. 7	
174	曹安然 李玉芳 韩茂栋 王 剑	硕士 副教授 高工 高工	061 061 外单位 外单位	弹簧钢 55SiCr 氧化与脱碳性能的研究	金属热处理	2010. 35. 9	
175	孙斌斌 李玉芳 顾冬冬	硕士 副教授 副教授	061 061 061	机械球磨法制备 TiC/Al 复合涂层的显微组织及力学性能	兵器材料科学与工程	2010. 33. 1	
176	吴晓娟 沈以赴 陈绵炎	硕士 教授 硕士	061 061 061	机械球磨法制备 Ti-Cu 阻燃合金层及其性能研究	金属功能材料	2010. 17. 3	
177	王 燕 沈以赴	硕士 教授	061 061	Development of highly porous titanium scaffolds by selective laser melting	Materials Letters	2010. 64: 674-676	
178	王志阳 沈以赴	硕士 教授	061 061	Gasar 工艺及其衍生技术的研究进展	金属功能材料	2010 年 17 卷 3 期	

热丝 CVD 法在单晶硅衬底上低温外延生长 Si 和 Ge 薄膜的研究

黄海宾, 沈鸿烈, 唐正霞, 吴天如, 张磊

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211100)

摘要:采用热丝 CVD 法在单晶 Si 衬底上进行了 Si 和 Ge 薄膜的低温外延生长, 用 XRD 和 Raman 谱对其结构性能进行了分析。结果表明: 在衬底温度 200 °C 时, Si(111) 单晶衬底上外延生长出了 Raman 峰位置为 521.0 cm^{-1} ; X 射线半峰宽 (FWHM) 为 5.04 cm^{-1} 。结晶质量非常接近于体单晶的 (111) 取向的本征 Si 薄膜; 在衬底温度为 300 °C 时, 在 Si(100) 单晶衬底上异质外延, 得到了 Raman 峰位置为 300.3 cm^{-1} 的 Ge 薄膜, Ge 薄膜的晶体取向为 Ge (220)。研究表明热丝 CVD 是一种很好的低温外延薄膜的方法。

关键词: 热丝 CVD; 低温外延; 单晶 Si 衬底; Si 膜; Ge 膜

中图分类号: O484

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2010)03-0603-05

Low Temperature Epitaxial Growth of Si and Ge Films on c-Si Substrate by Hot-wire CVD

HUANG Hai-bin, SHEN Hong-lie, TANG Zheng-xia, WU Tian-nu, ZHANG Lei

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

(Received 7 December 2009, accepted 25 February 2010)

Abstract Epitaxial growth of Si and Ge films on c-Si substrate was carried out by hot-wire CVD (HWCVD) at low substrate temperature. XRD and Raman spectroscopy were used to analyze the structural properties of the films. It was found that a high quality homoepitaxial Si film is obtained on Si (111) substrate at 200 °C. The peak position of the Raman spectrum for the film is at 521.0 cm^{-1} and the full width at half maximum (FWHM) is 5.04 cm^{-1} , almost the same as those for the Si(111) substrate. Heteroepitaxial Ge film is performed on Si(100) at 300 °C. The Ge film is Ge(220) preferably oriented and the Raman peak position for this film is at 300.3 cm^{-1} . All results indicate that HWCVD is an excellent method for film epitaxy at low temperature.

Key words hot-wire CVD; low temperature epitaxial technique; c-Si substrate; Si film; Ge film

1 引言

大规模、超大规模集成电路及高速器件的发展, 需要衬底与外延生长薄膜的界面区杂质分布陡峭。常规的外延工艺温度太高 (通常大于 1000 °C), 使得杂质的固-固扩散以及自掺杂十分突出, 图形漂移和变形比较

收稿日期: 2009-12-07; 修订日期: 2010-02-25

基金项目: 国家“863”课题 (2006AA03Z219)

作者简介: 黄海宾 (1982-), 男, 山东省人, 博士研究生。E-mail: hbhuang@nuaa.edu.cn

通讯作者: 沈鸿烈, 教授。E-mail: hshen@nuaa.edu.cn

严重,也限制了外延层能达到的最小厚度^[1,2]。为此人们发展了分子束外延(MBE)、超高真空化学气相沉积(UHV-CVD)、等离子体增强化学气相沉积(PECVD)、热丝化学气相沉积(热丝CVD)^[3]等多种外延方法,以求在低温下获得优质外延层。MBE、UHV-CVD外延生长Si膜需要衬底温度500℃以上,生长锗膜也需要大于300℃^[4]。PECVD法外延生长Si膜温度较低,300~400℃就可进行外延生长^[1],但其等离子的轰击会对生长的薄膜造成损伤。热丝CVD由于没有等离子的轰击,对膜的损伤小,有利于得到高质量的薄膜。与其他沉积方法相比,热丝CVD是所需衬底温度最低的一种方法。Thiesen等^[3]指出使用该方法在衬底温度为195℃时就有硅外延生长的现象。该方法中热丝高温分解得到的 SH_x 、 H_2GdH_x 等基团具有很高的活性,与薄膜表面的SiH等键反应形核,有利于薄膜的外延生长^[3,5]。Richardson等^[6]研究了用热丝CVD制备的掺杂外延层的电学性能。Mukherjee等^[7]在衬底温度350℃时在Si(100)衬底上用热丝CVD的方法得到了外延质量很好的本征Ge(100)薄膜。

本文介绍了在热丝CVD设备上200℃低温下同质外延本征Si薄膜和300℃在Si衬底上异质外延p-Ge薄膜,并使用Raman谱、XRD对薄膜结构性能进行了分析表征。

2 实 验

本文实验所用热丝CVD系统结构示意图如图1所示。实验中的热丝采用高纯钨丝,用NaOH溶液除去钨丝表面残留的石墨,然后用纯水超声清洗,最后用丙酮清洗。生长时距离为1.0cm的两根钨丝平行放置在衬底上方4.0cm处。衬底采用卤钨灯加热,热电偶测温。

实验工艺如下:

(1)衬底清洗:衬底采用~600μm厚的p型单晶Si并用普通玻璃片作为对比。p-Si采用标准的RCA清洗工艺,并且在装入腔室前使用0.5%的HF酸漂洗,高纯氮气吹干;普通玻璃衬底用洗洁精超声清洗5min,然后超纯水超声清洗5min,换水两次,取出后高纯氮气吹干。其中玻璃衬底作为与单晶Si衬底生长薄膜的比较;

(2)衬底放入腔室后开始抽真空,同时加热衬底到指定温度。本底真空约 1.0×10^{-3} Pa时开始生长;

(3)为防止钨丝挥发物的污染,每次开始生长前都先将钨丝温度加热到约2000℃。用 H_2 处理10min;

(4)生长时热丝温度固定在约1800℃,气体流量用质量流量控制计精确控制;

(5)生长结束后抽空残余气体,待衬底温度降到100℃以下再取样。

Raman测试采用的是JY-T6400型Raman测试仪,采用室温下背散射的测试模式,激发波长 $\lambda = 514.5\text{ nm}$ 。XRD测试使用的D8-Advance(Bruker公司)型X射线衍射仪检测,采用 $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0.154\text{ nm}$)作为特征X射线。

3 结果与讨论

3.1 热丝CVD低温外延生长本征Si薄膜

实验中对热丝CVD生长Si薄膜进行了大量的研究。根据文献[6]报道,稀释比(H_2 流量/ $(\text{H}_2$ 流量+ SH_4 流量))对薄膜结晶性的影响很大。高稀释比有利于薄膜的结晶性的提高。实验结果也印证了这一结论。在生长外延Si薄膜时采用98.5%的高稀释比,热丝温度约1800℃,气压1Pa。结果在衬底温度为200℃的低温条件下得到了质量很好的外延Si薄膜。薄膜的厚度约为200nm。图2、表1和图3分别为该生长条件下Si(111)衬底和普通玻璃衬底上生长薄膜的Raman谱和XRD测试结果。

由图2和表1中Raman谱测试结果可以看出,外延生长得到的本征Si薄膜的Raman峰的位置为 521.0 cm^{-1} ,与测定的Si(111)单晶衬底的相同。Raman峰的半高宽为 5.05 cm^{-1} ,比Si(111)单晶衬底的半高宽

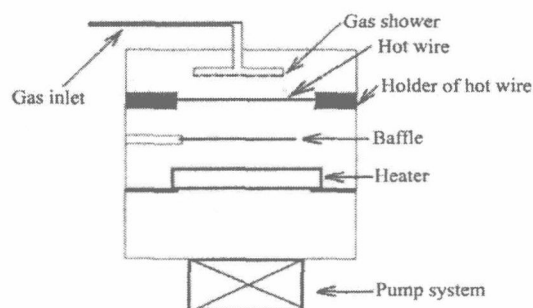


图1 热丝CVD设备结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the HW-CVD apparatus

4 85 cm^{-1} 略高了 0 20 cm^{-1} , 二者左右半高宽比 (左半高宽 / 右半高宽) 分别为 1. 16 和 1. 05。而相同生长条件下在玻璃衬底上生长的 Si 薄膜的 Raman 峰位置为 519. 1 cm^{-1} , 半高宽为 9. 45 cm^{-1} , 左右半高宽比为 1. 60。根据文献 [8], Raman 峰半高宽越小并且对称性越好时, 材料的结晶性越强。所以以上测试结果说明 Si 衬底对 Si 薄膜的生长有很强的诱导作用, 有利于薄膜的结晶。外延 Si 薄膜的 Raman 峰位与 Si 衬底的相同, 峰的对称性也只是细微差别, 说明外延得到的薄膜质量非常接近单晶 Si。

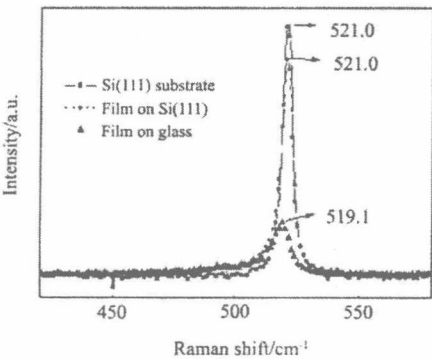


图 2 Si(111)衬底和普通玻璃衬底上生长的本征 Si 薄膜以及 Si 衬底的 Raman 谱

Fig. 2 Raman spectra of Si(111) substrate and intrinsic Si films on Si(111) and glass substrate

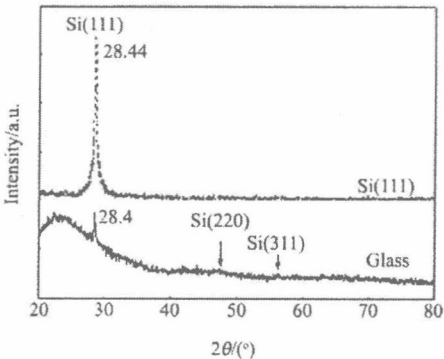


图 3 玻璃衬底和 Si(111)衬底上生长 Si 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of Si films grown on Si(111) and glass

表 1 图 2 中 Raman 峰的半高宽、左半高宽、右半高宽和左右半高宽比

Table 1 The Full width at half maximum (FWHM), Left FWHM, Right FWHM and ratio of Left FWHM / Right FWHM ($R_{L/R}$) of the Raman peaks in Fig 2

	c-Si	Film on Si(111)	Film on glass
FWHM	4 84513	5. 04693	9 4531
Left FWHM	2 48441	2. 71327	5 8198
Right FWHM	2 36072	2. 33366	3 6333
$R_{L/R}$	1. 05	1. 16	1. 60

图 3 中的 XRD 分析结果表明玻璃衬底上的 Si 膜是明显的 (111) 择优取向, (220)、(311) 峰都很弱, (111) 峰位置在 28. 40 °。Si(111) 衬底上的 Si 膜是只有 (111) 取向的衍射峰, 峰的位置在 28. 44 °, 与 Si(111) 的标准 XRD 峰的位置 (28. 448 °) 几乎重合。薄膜内应力计算公式: $\sigma = - (E / \nu) (d_n - d_0) / d_0$, E 为杨氏模量, ν 为泊松系数, d_n 为薄膜中的晶格常数, d_0 为体材料中的晶格常数。根据文献 [8], 取 $E = 130 \text{ GPa}$, $\nu = 0. 28$ 从而求得 Si(111) 衬底上的膜中内应力为 0. 13 GPa。膜中内应力很低。

外延生长很重要的一点是 Si 的基团到达衬底后具有较高的能量, 以便进行原子的重排, 得到很好的晶格质量。热丝 CVD 法与前面所述的 UHV CVD 等方法不同, SiH_4 基团和 H_2 经过热丝的高温催化和随后的迁移到衬底前的气相反应, 产生了 SH_3 、 SH_2 、Si 和 H 等活性基团, 这些基团与衬底表面的 SiH 键等反应, 使衬底上沉积的薄膜得以外延生长, 在衬底表面发生的是一个反应沉积的过程。热丝表面的温度非常高, 反应基团在其表面解吸附后具有很高的能量, 而且腔室中气压很低, 基团

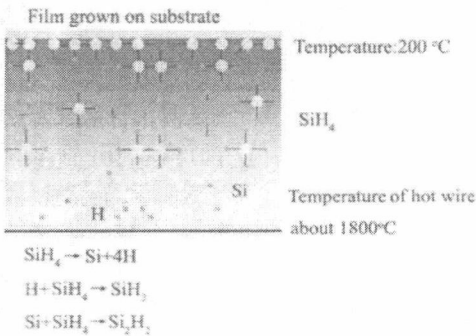


图 4 热丝 CVD 法外延 Si 反应机理
Fig 4 Scheme of chemical reaction of growth of epitaxial Si by HW CVD

在运动到衬底表面过程中碰撞损失的能量小,所以到达衬底表面的基团具有很高的能量,从而在衬底温度很低的情况下就可以发生反应沉积。整个反应过程如图 4 所示^[5]。其反应基团是 SH_x ,基团中 H 含量的提高有利于衬底表面的反应进行和原子重排,而源气体中 H_2 含量的增加会使得 SH_x 中 H 含量增大,所以要得到很好的结晶质量需要高的 H_2 稀释比。

3 2 热丝 CVD低温外延生长 B 掺杂 Ge 薄膜

为研究硼 (B) 元素掺杂对热丝 CVD 低温异质外延 Ge 薄膜的晶体结构的影响,对衬底温度 300 ℃条件下在 Si(100)衬底上异质外延 p-Ge 膜进行了研究。热丝温度仍保持在 1800 ℃,气压 2 Pa 气体流量的比例为: $\text{GeH}_4:\text{H}_2:\text{B}_2\text{H}_6=1\ 50:98\ 35:0\ 15$ 外延层的厚度为 80 nm。采用 Si(100)单晶衬底,同时使用普通玻璃衬底与 Si(100)衬底上生长的薄膜进行对比。外延 p-Ge 膜的 Raman 谱和 XRD 测试结果如图 5 表 2 和图 6 所示。

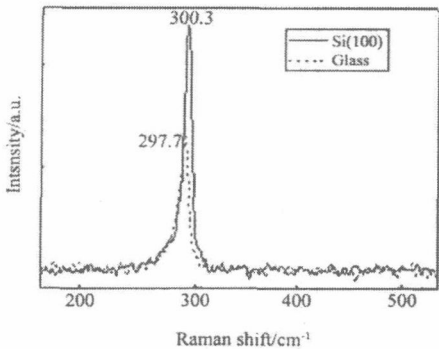


图 5 Si(100)衬底上和普通玻璃衬底上生长的 Ge 薄膜的 Raman 谱
Fig. 5 Raman spectra of Ge films on Si(100) and glass substrate

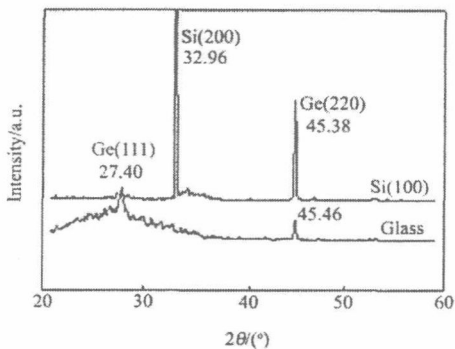


图 6 Si(100)衬底上和普通玻璃衬底上生长的 Ge 薄膜的 XRD 图谱
Fig. 6 XRD patterns of Ge films on Si(100) and glass substrate

图 5 中 Si(100)衬底上的 Ge 膜的 Raman 峰的位置为 $300\ 3\ \text{cm}^{-1}$,体材料 Ge 的 Raman 峰位置在 $300\ 5\ \text{cm}^{-1}$ ^[9];并且外延得到的 Ge 膜的 Raman 峰左右半高宽比为 1.08,峰的对称性非常好,说明外延薄膜的质量是较好的。

表 2 玻璃衬底和 Si(100)衬底上生长的 Ge 膜的 Raman 峰的半高宽和左右半高宽比
Table 2 The FWHM, Left-FWHM, Right-FWHM and $R_{L/R}$ of the Raman peaks in Fig 5

	Film on Si(100)	Film on glass
FWHM	8 71544	10 80456
Left-FWHM	4 52407	6 46485
Right-FWHM	4 19137	4 33972
$R_{L/R}$	1.08	1.49

由 XRD 测试结果看出,得到的薄膜是高度 Ge(220)择优取向的。相同条件下玻璃衬底上的样品同时存在 Ge(111)和 Ge(220)衍射峰,没有明显的择优取向。外延 Ge 膜中 Ge(200)峰位置为 $45\ 38^\circ$;标准体材料 Ge(220)峰位为 $45\ 59^\circ$ 。根据文献 [10],取 $E=100\ \text{GPa}$, $\nu=0\ 26$ 从而求得膜中内应力为 $2\ 5\ \text{GPa}$ 为张应力。Ge 膜的反应生长机理应该与 Si 类似的。文献 [7]在 Si(100)衬底上得到的是 Ge(100)取向的本征外延 Ge 薄膜。实验中得到的是 Ge(220)取向的 p-Ge 薄膜。薄膜的晶向要与衬底表面晶向最匹配才能得以外延,之所以在 Si(100)衬底上得到 Ge(220)取向的外延膜,可以认为是由于 Si 与 Ge 本身就存在一定的晶格失配(晶体 Si 和晶体 Ge 的晶格常数分别为 $0\ 357\ \text{nm}$ 和 $0\ 356\ 75\ \text{nm}$),而 B 掺杂又使得 Ge 膜的 Ge-Ge 键长发生变化所致。根据元素周期表中数据,Ge 和 B 原子大小分别为 $0\ 152\ \text{nm}$ 和 $0\ 117\ \text{nm}$,当 B 原子取代了 Ge 晶格中的 Ge 原子位置后,会使得周围的 Ge 原子向 B 原子取代位置靠拢,造成晶格一定的畸变,Ge-Ge 键发生变化,产生张应力。根据 XRD 测试结果,在薄膜平面方向上确实存在张应力。在薄膜生长过程中,Ge(220)晶面原子密度比 Ge(100)大,更有利于释放张应力,从而导致薄膜为 Ge(220)择优取向。

4 结 论

本文在热丝 CVD 设备上在热丝温度约 1800 °C, 钨丝到衬底距离为 4.0 cm 条件下进行了 Si 衬底上低温同质外延本征 Si 和异质外延 p-Ge 的研究。在衬底温度 200 °C 时, Si(111) 衬底上外延生长出了 Raman 峰位置为 521.0 cm^{-1} , 半高宽为 5.05 cm^{-1} 的 (111) 取向的结晶质量接近单晶的本征 Si 薄膜, 膜中内应力仅为 0.13 GPa。在衬底温度为 300 °C, Si(100) 单晶衬底上外延得到了 Raman 峰位置为 300.3 cm^{-1} , 半高宽为 8.72 cm^{-1} , 峰对称性很好的 Ge(220) 取向的 p-Ge 膜, 这是 B 掺杂使 Ge 膜的 Ge-Ge 键长发生变化所致, 膜中内应力为 2.5 GPa。

参 考 文 献

- [1] 张 侃, 叶志镇. 硅外延发展趋势 [J]. 材料科学与工程, 1995, 13(3): 8-13
Zhang K, Ye Z Z. The Development Tendencies of Silicon Epitaxy [J]. *Materials Science and Engineering*, 1995, 13(3): 8-13 (in Chinese).
- [2] 江若璩, 郑有焘, 马金中, 等. RRH/VLP-CVD 低温外延硅薄膜的电学性质 [J]. 半导体学报, 1991, 12(8): 482-487.
Jiang R L, Zheng Y L, Ma J Z, et al. Electrical Properties of Epitaxial Silicon Films Deposited at Low Temperatures by RRH/VLP-CVD [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1991, 12(8): 482-487 (in Chinese).
- [3] Thiesen J, Iwaniczko E, Jones K M, et al. Growth of Epitaxial Silicon at Low Temperature Using Hotwire Chemical Vapor Deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75(7): 992-994.
- [4] 周志文, 蔡志猛, 张 永, 等. UHV/CVD 法生长硅基低位错密度厚锗外延层 [J]. 半导体学报, 2008, 29(2): 315-318
Zhou Z W, Cai Z M, Zhang Y, et al. Growth of Thick Ge Epitaxial Layers with Low Dislocation Density on Silicon Substrate by UHV/CVD [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2008, 29(2): 315-318 (in Chinese).
- [5] Wang Q. Hotwire CVD Amorphous Si Materials for Solar Cell Application [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517: 3570-3574.
- [6] Richardson C E, Langekind K, Awater H A. Electronic Properties of Low Temperature Epitaxial Silicon Thin Film Photovoltaic Devices Grown by HWCVD [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516: 597-599.
- [7] Mukherjee C, Seitz H, Schröder B. Growth of Epitaxial Germanium Films on Silicon Using Hotwire Chemical Vapor Deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(22): 3457-3459.
- [8] 张松青, 张丽伟, 赵新策, 等. 脉冲退火法制备多晶硅薄膜的研究 [J]. 人工晶体学报, 2008, 37(2): 285-288.
Zhang S Q, Zhang L W, Zhao X Q, et al. Investigation on Poly-Si Thin Film Fabricated by RTP [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2008, 37(2): 285-288 (in Chinese).
- [9] Cao Z H, Liu P, Meng X K, et al. In Situ Transmission Electron Microscopy Observations of the Crystallization of Amorphous Ge Films [J]. *Applied Physics A*, 2009, 94: 393-398.
- [10] Wornan J J, Evans R A. Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio in Silicon and Germanium [J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36: 153-156.