

中子辐照氢气氛生长硅的红外吸收*

张玉峰 杜永昌

(北京大学物理系)

翁诗甫

(北京大学化学系)

孟祥提 张秉忠

(清华大学核能技术研究所)

1984年4月6日收到

提 要

用傅里叶变换红外吸收光谱技术测量了中子辐照氢气氛生长区熔硅在 $1800-2300\text{ cm}^{-1}$ 和 $400-1200\text{ cm}^{-1}$ 频段的吸收光谱. 给出了较强谱带的退火曲线. 与质子注入硅的红外光谱及中子辐照氢气氛生长硅的深能级瞬态谱结果相比较, 讨论了相应于一些谱带的硅氢中心的可能结构.

一、引 言

尽管对硅中与氢有关缺陷的研究受到广泛的重视, 并且已使用多种实验技术进行观测, 但至今对它的了解还是不够的. 红外吸收光谱测量 (IR) 是研究硅-氢中心的重要而有力的手段之一. 在质子注入硅与氢气氛生长硅中, 相应于硅-氢中心的“伸缩”振动和“弯曲”, “摇摆”振动频段, 已观察到众多的红外吸收谱带^[1-9]. 但由于缺少电子顺磁共振等其它实验结果作比较, 尚难以确定这些谱带相应的结构. 谱带的多重性反映了硅氢中心的多样性^[1], 即说明氢与缺陷结合成了多种的氢-缺陷复合物. 另外, 许多具有电活性的杂质和缺陷可以被原子氢中性化^[10], 也表明存在着多种氢-缺陷复合物. 因此不仅搞清这些氢有关缺陷本身是有意义的, 而且还有可能通过硅中的氢来研究其它缺陷. 已有了一些理论工作计算氢在单晶硅中的位置, 状态和硅氢中心吸收带^[8, 11-14]. 在我们的结谱技术研究中, 观察到硅中的氢能使高能粒子辐照硅中 A 中心的生成率下降; 当热退火到 200°C 以上时, 氢的存在加快了辐照缺陷的退火消失; 在高能粒子辐照氢气氛生长硅中首次发现了与氢有关的深能级陷阱中心—— Z 中心和 H_3 中心^[15-18]. 本文通过对中子辐照氢气氛生长硅的红外吸收研究, 对比质子注入硅的红外吸收结果和中子辐照氢气氛生长硅的深能级瞬态谱测量结果, 讨论傅里叶变换红外吸收的测量结果及一些谱带的可能结构.

* 部分得到中国科学院科学基金资助.

二、样品与测试

原始材料为商品氩气氛和氢气气氛生长区熔硅,晶向 $\langle 111 \rangle$,电阻率约为 $1000 \Omega \cdot \text{cm}$. 样品切割成 $15 \times 15 \text{ mm}$ 的方块,厚度为 4 mm ,两面均抛光. 在清华大学核能研究所的轻水反应堆上作室温下的中子辐照,辐比为 10. 样品的一部份辐照剂量为 $1 \times 10^{16} \text{ neutron/cm}^2$,其余为 $4 \times 10^{17} \text{ neutron/cm}^2$. 将辐照后样品在纯氮气氛保护下分别作 30 min 等时热退火,退火温度从 100°C 到 600°C ,每隔 50°C 一个点. 退火后经清洗在 Nicolet 7199 B 型傅里叶变换红外光谱仪上测室温下的红外吸收光谱. 参比样品为未经辐照的氩气氛生长区熔硅. 谱仪的分辨率约为 1 cm^{-1} , 取样次数为 200 次,波数范围为 $400\text{--}1200 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1800\text{--}2300 \text{ cm}^{-1}$ 两个频段. 采用差示光谱法吸收度 A 的定义为 $A = \log P_0/P = \log T^{-1}$. P_0 为参考束的光流, P 为透过样品的光流, T 为透过率. 近边吸收是用 H-800 光谱仪测量.

三、实验结果

1. $1800\text{--}2300 \text{ cm}^{-1}$ 频段

这一频段范围相应于单晶硅中硅-氢中心的“伸缩”振动吸收^[1]. 我们在未经辐照的氢气气氛生长硅中观测到三条强的吸收谱带^[16],波数为 2210 , 1946 和 2123 cm^{-1} ,以及 2191 , 1995 cm^{-1} 几条弱带. 经 $4 \times 10^{17} \text{ neutron/cm}^2$ 辐照后,弱的谱带消失,三条强吸收带也都明显地减弱了^[16,18],与此同时产生了 1831 , 1895 , 1924 , 1980 和 2055 cm^{-1} 等一系列新谱带(见图 1). 其中 1831 和 2055 cm^{-1} 带经低于 200°C 退火就消失, 1895 和 1980 cm^{-1} 则在 $250\text{--}300^\circ\text{C}$ 退火后消失. 在热退火过程中出现许多二次缺陷吸收带,如 1970 , 1985 和 2065 cm^{-1} 等. 表 1 列出退火前(RT)和从 $100\text{--}600^\circ\text{C}$ 退火过程中相应于各退火段的红外吸收谱带. 为了便于比较,同时给出 Stein^[1], Gerasimenko^[3] 和 Mukashev^[4] 的质子注入硅的有关测量结果及张正南^[11]的中子辐照氢气气氛生长硅的测量结果. 表 1 中下面画横线者为和质子注入硅所共有且相对强度、退火行为一致的谱带. 带“*”号的是强的和较强的带,共 11 条. 它们的吸收度随退火温度的变化曲线示于图 2.

将中子辐照氢气气氛生长硅与质子注入硅的红外吸收谱带作比较是有趣的. 未经辐照的氢气气氛生长硅的红外吸收带与质子注入硅有显著区别. 1946 和 2123 cm^{-1} 两个强带在质子注入硅中不出现或很弱. 2210 cm^{-1} 带在质子注入硅中有与中子辐照氢气气氛生长硅类似的退火行为,但相对强度却较后者弱得多. 从图 2 还可看到 1946 cm^{-1} 带随退火温度升高而恢复升高,至 300°C 达到极大. 在辐照后出现的谱带中,有许多谱带是和质子注入硅中所共有的,且有相似的退火行为. 这说明它们属于同样的硅氢中心. 其中 1831 , 2055 及 1980 cm^{-1} 三条谱带的相对强度也与质子注入硅相近. 1895 cm^{-1} 带在中子辐照氢气气氛硅中是较强的带,它在质子注入硅中却很弱. 相反, 1924 和 2055 cm^{-1} 两个谱带在中子辐照氢气气氛硅中是弱带而在质子注入硅中却是强带. 在高温退火的吸收带中, 2105 cm^{-1} 是和质子注入硅相类似的. 而 1953 , 1970 和 1985 cm^{-1} 三个带却明显地不同于质子注入

表 1 1800—2300 cm^{-1} 频红外吸收带及其退火变化

温度 $T(^{\circ}\text{C})$	本 文											Stein ^[1]	Gerasi- menko ^[3]	Muka- shev ^[4]	张正南 等 ^[11]
	RT	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600			
	1831*	1831*	1831*										1830	1830	1827
		1849	1849												
	1895	1895	1895	1895	1895								1892		1889
	1924		1924	1924									1925	1925	1922
	1946*	1946*	1946*	1946*	1946*	1946*									1942
									1953*	1953*			1957	1957	1956
							1970*	1970*	1970*	1970*	1970*		1965	1960	1966
	1980*	1980*	1980*	1980*	1980*	1980*							1980	1980	1975
							1985*	1985*	1985*	1985*	1985*				
						2006									
			2025	2025	2025	2025									
	2055*	2055*	2055*										2030	2025	2020
	2065*	2065*	2065*	2065*	2065*	2065*	2065*	2065*	2065*	2065*	2065*	2065*	2056	2053	2045
							2070	2070					2066	2062	2062
											2105*	2105*	2105	2101	2100
	2123	2123	2123	2123	2123	2123							2125	2118	2117
							2162	2162	2162	2162	2162		2160	2162	2150
		2175	2175												
				2180	2180	2180	2180	2180					2185	2185	2175
		2185	2185												
	2210*	2210*	2210*	2210*	2210*	2210*	2210*	2210*	2210*	2210*					2205
												2210	2218		

“*”表示强的和较强的谱带; “——”表示与质子注入硅相似的带。

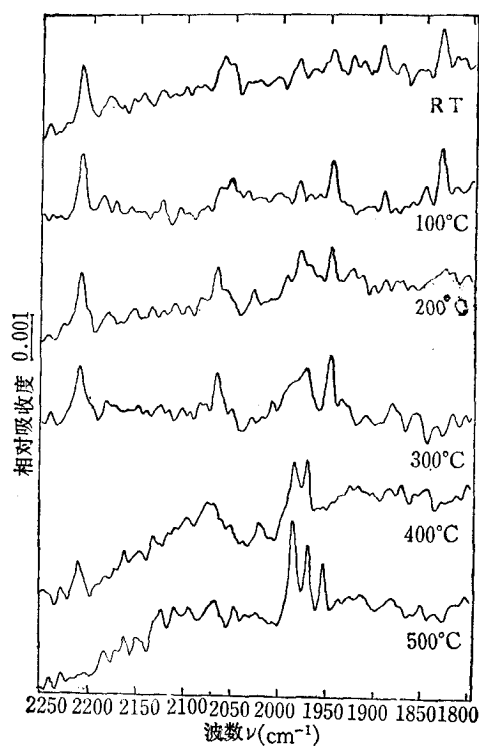


图1 4×10^{17} neutron/cm² 辐照氢气
氛硅退火后在“伸缩”振动频段的红外吸收谱带

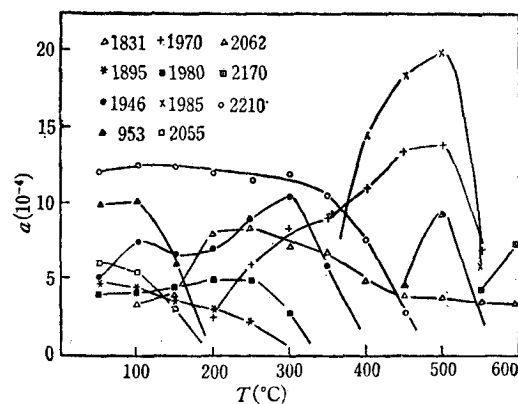


图2 11条强和较强的谱带的吸收度 a
随退火温度 T 的变化

硅:这三个带不仅都是强吸收带,而且都在 500°C 附近一较窄温度范围内吸收很强. 2162 cm^{-1} 带在质子注入硅中是最强的带,在中子辐照氢气氛硅中这个带很弱,但有类似的退火行为.

这两种不同方式引入的硅-氢中心的红外吸收谱带的相同与差异为我们分析它们的可能结构提供了一定的依据.

氢气氛中生长区熔硅经 1×10^{16} 和 4×10^{17} neutron/cm² 两种不同剂量中子辐照,其三条强带 2210, 2123 和 1946 cm^{-1} 吸收系数的下降及 250°C 30 min 热退火后的变化列于表 2.

表 2 三条强谱带的吸收度随中子剂量和退火温度的变化

谱带 (cm^{-1})	样品 吸收度 (10^{-4})	1×10^{16} neutron/cm ² 辐照		4×10^{17} neutron/cm ² 辐照	
		RT	250°C	RT	250°C
2210	22.4	16.2	15.6	13	13
2123	8.1	6.5	8.0	3.2	3.2
1946	16.2	9.7	15.9	8.1	12.2

这里要指出,因为原始材料来源不同,表 2 的数据与图 2 略有差别.从表 2 可以看出,经中子辐照后三条谱带均减弱,且中子剂量愈大,减弱愈显著.对 $4 \times 10^{17} \text{neutron/cm}^2$ 辐照, 250°C 退火后 1946cm^{-1} 带略有恢复,而 $1 \times 10^{16} \text{neutron/cm}^2$ 辐照, 250°C 退火后 1946 和 2123cm^{-1} 两谱带恢复到接近原来的强度.但 2210cm^{-1} 谱带,退火后不恢复.

2. $400-1200\text{cm}^{-1}$ 频段

在这一频段内,不仅有相应于硅-氢中心的“弯曲”和“摇摆”振动吸收带^[3,5],而且 TO 与 LO 单声子吸收带^[19],间隙氧与 A 中心的吸收带^[20],以及中子辐照硅的高次吸收带 (HOB)^[21] 均在这一频段内.

Rolle 等人^[19]测量到 LO 单声子带在 410cm^{-1} , TO 单声子带在 488cm^{-1} . 我们观测到 LO 单声子吸收带在中子辐照氢气氛硅样品中为 414cm^{-1} ,而在中子辐照氩气氛硅样品中为 406cm^{-1} ; TO 单声子带在中子辐照氢气氛硅样品中为 484cm^{-1} ,而在中子辐照氩气氛硅样品中为 489cm^{-1} . LO 和 TO 单声子吸收带的退火曲线示于图 3.

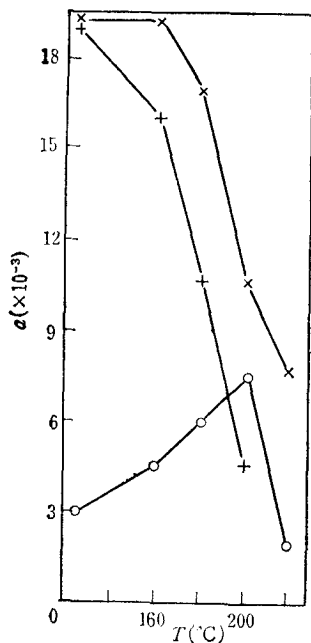


图3 $4 \times 10^{17} \text{neutron/cm}^2$ 辐照氢气氛生长硅的 LO 和 TO 单声子带及 A 中心的 827cm^{-1} 吸收带的吸收度 a 与退火温度 T 的关系
× 为 TO(484); + 为 LO(414); ○ 为 A 中心(827)

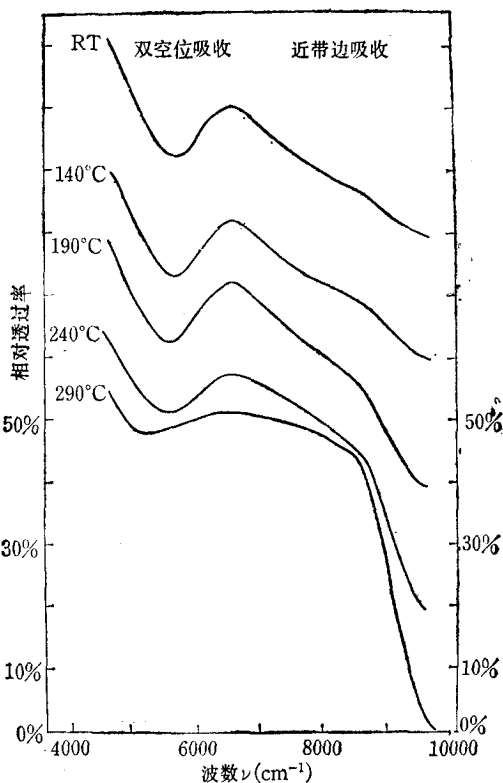


图4 $4 \times 10^{17} \text{neutron/cm}^2$ 辐照氢气氛硅的双空位 ($1.8\mu\text{m}$) 和近带边吸收的退火变化

因为区熔硅中氧含量低,中子辐照后生成的 A 中心浓度低,故 A 中心的 827cm^{-1} 吸收

带较弱.从图 3 可以看出 A 中心的退火趋势: 在 200°C 以下随退火温度升高, A 中心浓度升高, 这是中子辐照产生的空位团释放空位的结果^[15]. 经 250°C 退火, A 中心浓度已显著下降, 经 300°C 退火后, 827cm^{-1} 吸收带消失, 这个结果与 DLTS 测量结果一致^[15], 表明硅中的氢加速了 A 中心的退火.

在氢气氛生长硅中, 已报道^[8]在这一频段观测到几条相应于硅-氢中心“弯曲”与“摇摆”振动的吸收带, 我们的结果在表 3 中给出. 与文献[8]的结果相近, 观测到 $632, 791$ 和 809cm^{-1} 三条谱带. 中子辐照后, 791 与 809cm^{-1} 带消失, 632cm^{-1} 带减弱, 同时产生 812 和 962cm^{-1} 两谱带. 在这些谱带中, $632, 791$ 和 809cm^{-1} 与 $2210, 2123$ 和 1946cm^{-1} 谱带有着类似的退火行为. 812cm^{-1} 谱带与 1831 和 2055cm^{-1} 两谱带有很相近的退火行为. 而 962cm^{-1} 带在中子辐照氩气氛硅中也存在, 它可能是中子损伤中心. 为了比较, 表 3 同时给出了质子注入硅在这一频段的红外吸收带^[3,5].

表 3 硅-氢中心在“弯曲”与“摇摆”振动频段的吸收带

质子注入硅		氢气氛生长硅		中子辐照氢气氛生长硅
Gerasimenko ^[3]	Mukashev ^[5]	崔树范等 ^[3]	本 文	本 文
		548		
	580(100 600)			
	636 (RT 600)	634	632	632(RT 400)
	642(550)			
702(300 600)				
715(RT 600)	718(100 600)			
745(100 500)	748(100 600)			
765(100 250)				
		791	791	791(250 400)
		812	809	809(350 500)
810 (RT 200)	816(RT 200)			812(RT 150)
1070 (RT 200)				
1113(300 600)				

表中括号前面的数字是谱带出现的温度, 后面是消失的温度($^{\circ}\text{C}$).

3. 双空位 ($1.8\mu\text{m}$) 与近带边吸收

在 $5000-10000\text{cm}^{-1}$ 频段内的双空位 ($1.8\mu\text{m}$) 和近带边吸收及其退火变化示于图 4. 从图 4 可以看出, 双空位 ($1.8\mu\text{m}$) 吸收带的退火行为与近带边吸收相似. 退火到 290°C 时, 双空位吸收带基本消失, 这时吸收边也由下塌逐渐趋于陡直. 由于实验灵敏度的限制, 未能观测到氢气氛与氩气氛两种样品的差别.

四、讨 论

1. 从中子辐照氢气氛生长硅和质子注入硅的红外吸收光谱对比中可以看到, 同是氢与辐照缺陷形成的硅-氢振动中心, 两类样品有着一些其相对强度和退火行为都很相近的谱带. 又由于两种情况下引入氢和缺陷的方式不同, 氢与缺陷浓度也不同, 使得二者有一

些谱带有显著的差别。氢气氛生长区熔硅中的氢是从高温快速冷却下来时以过饱和状态冻结在硅单晶中的,它的浓度约在 10^{16} — 10^{17} H/cm³。质子注入硅则是室温下将高能量的质子注入硅中的,且在注入层内氢的浓度高达 10^{20} H/cm³。两种情况下产生的辐照缺陷浓度和类型也有差别。

我们可以把中子辐照氢气氛生长硅的硅-氢中心红外吸收谱带分为三类:

第一类是未经辐照就存在的谱带,如“伸缩”振动频段的 2210, 2123, 1946cm⁻¹ 和“弯曲”,“摇摆”振动频段的 632, 791, 809cm⁻¹。这一类吸收带同质子注入硅有显著区别。它们在质子注入硅中不出现或者较弱,这些谱带有可能是氢与高温热平衡缺陷的复合物。理论计算曾指出^[4],在有缺陷存在的情况下,氢首先倾向于饱和缺陷处的悬键而形成硅氢键。在高温状态下,硅中占优势的本征缺陷可能是间隙型的^[22],不管是自间隙还是晶格空位都会形成硅悬键,氢结合这些悬键就形成了氢-缺陷复合物。两种剂量中子辐照,退火后 1946cm⁻¹ 谱带都先增强,而后在更高温度退火减弱以至消失。而 2210cm⁻¹ 带则不出现退火增强恢复现象。

第二类谱带是中子辐照后立即出现或在 100℃, 150℃ 退火出现,而在低于 300℃ 消失的谱带。它们包括 1831, 1895, 1924, 1980, 2025, 2055, 2175, 2185 以及 812cm⁻¹ 等。显然它们是由氢与辐照缺陷形成的硅氢中心。简单的辐照缺陷,如双空位 (V₂), 平面四空位 (V₄), 氧空位等均在这个温度范围内退火。质子注入硅中所共有的且退火行为相近的谱带,表明它们有相同的结构。它们很可能是氢与简单的辐照缺陷如单空位 (V), 双空位 (V₂), 平面四空位 (V₄) 及自间隙 (I) 等的复合物。1831, 2055 和 812cm⁻¹ 三谱带在两类样品中均为强带,可以预计它们相应于室温下中子损伤和质子注入硅所产生的主要缺陷。

在第二类谱带中有些带在质子注入硅中也存在,退火行为相近,但相对强度不同。如 1895cm⁻¹ 在中子辐照中是强带,而在质子注入硅中是弱带^[3],这可能因为此带是在氢的浓度不高时,辐照缺陷上仅部分悬键被氢所饱和而成。在质子注入硅中氢的浓度很高,倾向于饱和和更多的或全部的悬键,因而在质子注入硅中 1895cm⁻¹ 带就弱。与 1895cm⁻¹ 带相反,1924 和 2025cm⁻¹ 两带在质子注入硅中是强带,而在中子辐照硅中是弱带。它们可能是辐照缺陷处的悬键更多地或全部地与氢结合而成,还可能是氢-双空位的复合物。后者理由如下:在质子注入硅的 DLTS 研究中发现^[23],双空位及其缺陷的生成率随注入质子的剂量而变化,当高于 5×10^{13} H⁺/cm² 时双空位等缺陷生成率急剧下降,这表明注入的氢被双空位 (V₂) 俘获生成氢-双空位复合物。红外光吸收实验中注入质子剂量高于 10^{16} H⁺/cm²,可以预计,在质子注入硅中氢-双空位复合物有较高的浓度。但是在高能粒子辐照氢气氛硅中却不一样。由两个相邻晶格原子位移直接生成的双空位不因硅中氢的存在而降低生成率。说明室温下因单空位迁移可以生成氢-单空位中心,而双空位是稳定的,不能与氢结合成氢-双空位中心。

第三类谱带是 350—400℃ 以上退火消失的带。它们包括 1953, 1970, 1985, 2065, 2105, 2162 和 2180cm⁻¹ 等。它们可能是氢与复杂缺陷结合的复合物。其中 1953, 1970 和 1985cm⁻¹ 三条谱带有着鲜明的特点,它们在 500℃ 附近一个较窄的退火温度范围内有很强的吸收。在质子注入硅中没有和它们相似的带。在重损伤的中子辐照硅中,经 400℃

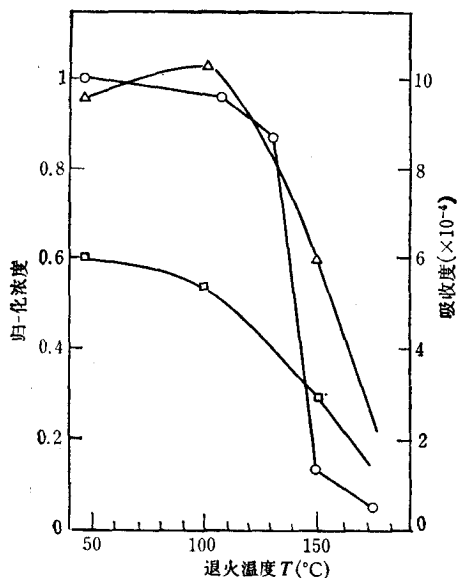
以上退火, DLTS 测量到一系列深中心^[24,25], Rolle 等人观测到 400—550°C 退火范围出现红外吸收带——高次带 (HOB)^[19]. 它们相应的组态尚未确定, 但确信它们是较为复杂的缺陷. 以上三条谱带有同高次带相似的退火行为, 很可能就是氢与这些复杂缺陷结合而成的复合物引起的. 对比未经辐照和中子辐照的氢气氛生长硅, 前者吸收带均在 600°C 附近退火消失^[8], 而经辐照的样品 1946, 2123, 2210, 632 和 791 cm^{-1} , 均在 300—450°C 之间退火消失. 这表明辐照后在这个温度范围内产生了与氢结合能力更强的缺陷. 低剂量中子 ($1 \times 10^{16} \text{neutron/cm}^2$) 辐照似尚不能产生这些缺陷, 使 1946 和 2123 cm^{-1} 谱带得以恢复.

在中子辐照氢气氛硅中 2210 cm^{-1} 带很强, 而 2162 cm^{-1} 带很弱, 在质子注入硅中 2162 cm^{-1} 带最强而 2210 cm^{-1} 带较弱. 这可能是氢的浓度不同所致. 2210 cm^{-1} 带可能相应于 Si-H_n , 2162 cm^{-1} 带相应, Si-H_n ($n \geq 2$).

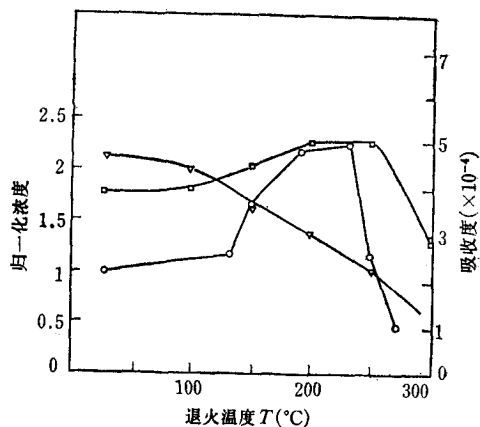
2. 在低剂量中子辐照^[16,18], 和电子辐照^[17]氢气氛区熔硅中, 用结谱法首次观测到能级为 $E_c - 0.20\text{eV}$ 的 Z 中心和能级为 $E_v + 0.12\text{eV}$ 的 H_c 中心两个与氢有关的深中心. 同样作为中子辐照氢气氛硅所产生的与氢有关的缺陷, 我们将一些红外吸收谱带与上述两个深中心作对比.

在中子辐照氢气氛生长 P 型硅中, 观测到与氢有关的深中心—— H_c 中心^[18], 华宗璐等人在 1 和 5MeV 电子辐照 P 型氢气氛硅中也观测到同一深中心. 1831, 2055 和 812 cm^{-1} 吸收带有与 H_c 中心类似的退火行为, 它们又都是中子辐照后出现的浓度较高的缺陷, 很可能同属于一种氢有关中心, 见图 5(a).

我们已指出, 在中子辐照氢气氛硅中, 不可能在退火前产生高浓度的氢-双空位中心.



(a) 1831, 2055 cm^{-1} 带和 H_c 中心的退火曲线
 Δ 为 1831 cm^{-1} ; $\square$ 为 2055 cm^{-1} ; $\circ$ 为 H_c 中心



(b) 1895, 1980 cm^{-1} 带和 Z 中心的退火曲线
 ∇ 为 1895 cm^{-1} ; $\square$ 为 1980 cm^{-1} ; $\circ$ 为 Z 中心

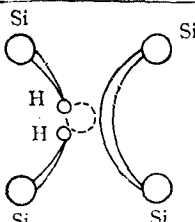
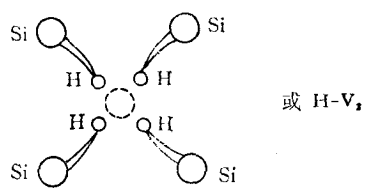
图 5

华宗璐等人也指出^[17], H_0 中心不可能是氢-单空位中心. 电子顺磁共振证明室温下中子损伤硅中浓度最高的缺陷是 $Si-P_3$ 中心, 即 $\{110\}$ 平面四空位^[26], 该缺陷在近 180°C 退火消失. γ 射线辐照不产生四空位, 我们用相同剂量的 γ 射线同时辐照电阻率相近的 n 型和 p 型氢气氛区熔硅样品, 在 n 型样品中测到高浓度的 A 中心, E 中心和 Z 中心, 而在 p 型样品中检测不到 H_0 中心^[27]. 因此我们认为 H_0 中心可能是氢-平面四空位复合物. 1831 和 2055cm^{-1} 可能有一条带属于这一缺陷中心, 或者两带相应于同一硅氢中心, 而彼此相差一个声子频率^[1].

另一个用结谱法得到的与氢有关的中心—— Z 中心和 $1895, 1980\text{cm}^{-1}$ 两谱带有相近的退火行为, 见图 5(b). Z 中心的可能结构在文献[16]中已有详细讨论. 它是两个氢原子结合单空位的两个硅悬键而成(见表 4). 1895 和 1980cm^{-1} 两谱带中可能有一条相应于这一硅氢中心. 上面曾谈到 1895cm^{-1} 带可能为氢饱和了缺陷的部分悬键, Z 中心的模型就属于这样的结构.

对一些硅氢中心红外吸收谱带的可能结构归结如表 4. 要证明这些中心尚需要进一步的工作.

表 4 一些硅氢中心的可能结构

谱带 (cm^{-1})	相应的 DLTS 中心	可能结构
1831 2055 812	H_0 中心	$H-V_4$
1895 1980	Z 中心	
1924 2025		 或 $H-V_4$
1946 2123 2210		11 -高温热平衡缺陷
1953 1970 1985		H -复杂缺陷(中子损伤硅退火生成)

北京大学化学系吴瑾光, 物理系焦鹏飞在红外吸收测量中给予了热情协助, 和秦国刚同志作过有益的讨论, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] H. J. Stein, *J. Electro. Mater.*, **4** (1975), 159.
- [2] H. J. Stein, *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 1030.
- [3] N. N. Gerasimenko *et al.*, *Phys. Stat. Sol.*, (b) **90**(1978), 689.
- [4] B. N. Mukashev *et al.*, *Phys. Lett.*, **72A** (1979), 381.
- [5] B. N. Mukashev *et al.*, *Phys. Lett.*, **87A** (1982), 376.
- [6] J. Tatarkiewicz and K. Wieteska, *Phys. Stat. Sol.*, (a) **66** (1981), K101.
- [7] 崔树范等, 物理学报, **28**(1979), 791.
- [8] 崔树范等, 中国科学(A辑), (11)(1983), 1033.
- [9] 张正南、许振嘉, 物理学报, **31**(1983), 994.
- [10] A. J. Tavendale and S. J. Pearton, *J. Phys.*, **C16** (1983), 1665.
- [11] V. A. Singh *et al.*, *Phys. Stat. Sol.*, (b) **81** (1977), 637.
- [12] V. A. Singh *et al.*, *Phys. Lett.*, **65A** (1978), 251.
- [13] T. S. Shi *et al.*, *Phys. Stat. Sol.*, (a) **74** (1982), 329.
- [14] 施天生等, 中国科学(A辑), (12)(1984), 1121.
- [15] 杜永昌、张玉峰、秦国刚、孟祥提、张秉忠, 半导体学报, **5**(1984), 7.
- [16] 杜永昌、张玉峰、秦国刚, 物理学报, **33**(1984), 443.
- [17] Hua Zhong-Lu (华宗璐), Qin Guo-Gang (秦国刚), Zhou Jie (周洁), *Chinese Phys. Lett.*, **2** (1985), 43.
- [18] Du Yong-Chang (杜永昌), Zhang Yu-Feng (张玉峰), Meng Xiang-Ti (孟祥提), *Semiconductor Processing*, ASTM STP 805, D. C. Gupta, ed., (1984).
- [19] M. E. Rolfe and J. C. Corelli, *J. Appl. Phys.*, **47** (1976), 37.
- [20] J. W. Corbett *et al.*, *Phys. Rev.*, **135A** (1964), 1381.
- [21] J. C. Corelli *et al.*, *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **31** (1977), 251.
- [22] W. Frank *et al.*, *Defects in Semiconductors*, ed. by J. Narayan and T. Y. Tan, (1981), 31.
- [23] 杜永昌、张玉峰, 物理, 待发表.
- [24] Guldborg, *J. Phys.*, **D11** (1978), 2043.
- [25] 孟祥提等, 核科学工程, **2**(1982), 172.
- [26] B. N. Mukashev *et al.*, *Radiation Effects*, **61**(1982), 159.
- [27] 张玉峰、杜永昌、沈宏扬、王晓辉, 电力电子技术, 待发表.

INFRARED ABSORPTION OF NEUTRON-IRRADIATED FZ-Si GROWN IN HYDROGEN ATMOSPHERE

ZHANG YU-FENG DU YONG-CHANG

(Department of Physics, Peking University)

WENG SHI-FU

(Department of Chemistry, Peking University)

MENG XIANG-TI ZHANG BING-ZHONG

(Institute of Nuclear Energy Technique, Tsinghua University)

ABSTRACT

Infrared absorption spectra of neutron irradiated FZ-Si grown in hydrogen atmosphere have been measured in wavenumber ranges $1800\text{--}2300\text{ cm}^{-1}$ and $400\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ by FTIR. The annealing behaviour of stronger absorption bands has been shown. By comparing with spectral results of proton implanted silicon measured by IR and neutron irradiated FZ-Si grown in hydrogen atmosphere measured by DLTS, the possible constructions of H-related centers are discussed.