

作者感谢李林、洪朝生、梁敬魁、管惟炎诸教授对此工作的兴趣、支持与有益的讨论。

参 考 文 献

[1] W. Buckel et al., *Phys. Lett.*, 17(1965), 187.
 [2] B. Strizker et al., *Z. Physik B*, 24(1976), 367.
 [3] C. C. Tsuei et al., *Phys. Rev B*, 9(1974), 4742.

[4] H. L. Luo, *Science*, 145(1964), 581.
 [5] W. Klement, *J. Inst. of Metals*, 90(1961—1962), 27.
 [6] C. J. Lobb, Technical Report, No. 16, (1980), Division of Applied Sciences, Harvard University, U.S.A.
 [7] A. C. Mota et al., *Solid State Commun.*, 20(1976), 1025.

区熔¹⁾[115]硅单晶的外形特征

徐文耀 (天津 1446 研究所)

1980 年 5 月 8 日收到

在半导体硅材料的研究和应用中,广泛地使用沿[111]和[100]晶向生长的硅单晶,而对其他晶向生长的硅单晶,则研究和应用较少.对沿[115]生长的硅单晶国外虽有报道^[1,2],但应用还不普遍,国内还未研究报告.本文总结了我们对区熔[115]硅单晶的研究工作.在文献[1]中仅就[115]硅单晶的生长机理同[111]硅单晶进行了比较,同时研究了固-液界面的不同特点,指出[115]硅单晶生长无(111)小平面(facet)效应,因此均匀性较好.我们着重研究了有位错和无位错[115]硅单晶的外形特征,沿[115]生长单晶时对漩涡(swirl)缺陷的抑制作用以及P型高阻硅电阻率($>1000\Omega \cdot \text{cm}$)在断面的不均匀性等问题.

一、[115]硅单晶的外形特征

1. 沿正[115]晶向生长的硅单晶

经X光定向的[115]籽晶被装在校正的籽晶夹里,我们用通常的区熔工艺生长了有位错和无位错[115]硅单晶,并观察到有位错的[115]硅单晶,该单晶的外形特征类似于[001]硅单晶,例如平行于生长轴也出现四条生长稜线(growth line),不过这些生长线的位置不同于[001]的硅单晶,如图1和图2所示.在图1中A, B, C, D 四点为[001]单晶四条生长稜线同(001)的交点,其连线互相垂直,且分别沿

[110]及 $[\bar{1}10]$ 方向.图2中A, B', C, D' 四点是[115]单晶四条生长稜线同(115)的交点,其中A, C 两点连线通过轴心,其方向为 $[\bar{5}52]$. B', D' 两点则移近A点,其连线不通过轴心,而

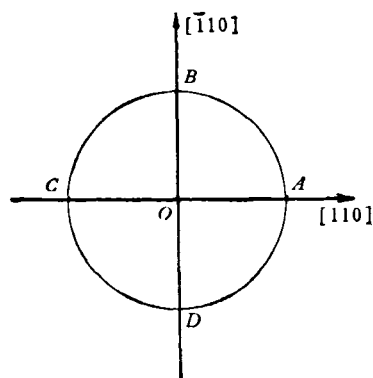


图1 [001]生长的硅单晶横截面上生长稜线分布示意图

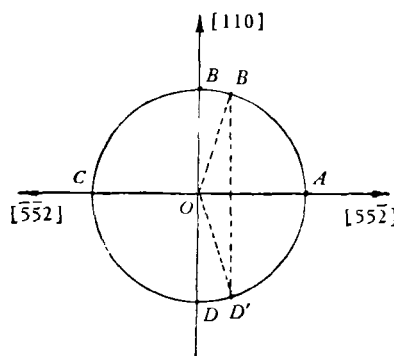


图2 [115]生长的硅单晶横截面上生长稜线分布示意图

1) 区熔即 Floating-zone.

平行于 $[\bar{1}10]$ 。测得角 $\angle BOB' = \angle DOD'$ ，且小于 $15^\circ 48'$ 。

无位错 $[115]$ 硅单晶的外形特征是有一条不同于其它三条生长稜线的鼓稜 (ridge-like bulge)。这条鼓稜平行于生长轴，具有连续性的特点，它同 (115) 的交点位于图 2 中的 C 点，较其余三条稜线鼓凸明显，类似于 $[111]$ 无位错硅单晶的鼓稜。由此可见，无位错 $[115]$ 硅单晶的外形特征，除鼓稜之外，其它和有位错时一样。在晶体生长初期如何判别有位错呢？若在放肩阶段（即锥体区），在图 2 中的 C 处出现一宽镜面，并在收肩转入等径生长时出现鼓稜，而且鼓稜连续生长，则可判定此单晶为无位错的。

2. 生长轴与 $[115]$ 构成偏角 α 和方位角 φ 生长的单晶

如图 3 所示，当生长轴与 $[115]$ 有一偏角 α ($4-6^\circ$) 时，其晶体外形特征将随之变化；当 α 值一定时，主要随方位角 φ 而变化。

当 $\alpha = 4-6^\circ$ ， $\varphi = 0$ 时，生长轴 Z 接近

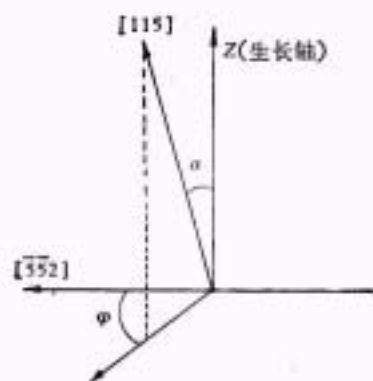


图 3 生长轴与 $[115]$ 偏离时偏角 α 和方位角 φ 与 $[115]$ 的几何关系

$[114]$ 晶向，此时鼓稜体积较正 $[115]$ 时增大，图 2 中的 $B'D'$ 向 A 移近， A, C 两点连线仍通过轴心。

当 $\alpha = 4-6^\circ$ ， $\varphi = \pi$ 时，生长轴 Z 接近 $[11\bar{7}]$ 晶向，此时鼓稜的体积较正 $[115]$ 时减少，图 2 中的 $B'D'$ 远离 A 而向 BD 移近， A 和 C 仍在通过轴心的直线上。

当 $\alpha = 4-6^\circ$ ， $\varphi \approx \pi/10$ 时，鼓稜不在 C 处，而在 C 处旁边出现，它所在的方位不是 $[115]$ 所指方位，而是 $[001]$ 所指方位。在 C 处有一条类似有位错单晶的生长稜线。可见，这种情况的硅单晶外形，除了在 A, B', C, D' 处有四条生长稜线以外，还有一条鼓稜，并以此来表征晶体是无位错的。

二、 (115) 上腐蚀显示的漩涡缺陷

采用 Sirtl²² 腐蚀剂腐蚀 (115) 时，一般都不出现如同 (111) 上的漩涡状图案（见图 4），而常出现如图 5(a), (b), (c) 所示的漩涡缺陷分布图案。



图 4 $[111]$ 生长的硅单晶横断面腐蚀的漩涡图案



图 5 $[115]$ 生长的硅单晶横断面微缺陷腐蚀图案
(a) 云雾状图样；(b) 均匀分布的图样；(c) 均匀分布的环形图样

这些宏观图案虽不同,但其组成的小个体都有如下共同点:(1)在金相显微镜下(放大150倍)小个体的几何形状相似,呈孤立态存在,大小不等,有疏密集群的特性;(2)这些小个体在同一面上与位错坑比较,前者为浅底坑,后者为深底坑且形状大小全同。在大致相同的生长条件下,我们比较了[115]和[111]晶向生长的单晶,发现前者对于漩涡缺陷的产生有明显的抑制作用。

三、(115)上电阻率的均匀度

我们对[115]硅单晶电阻率(从 $160\Omega \cdot \text{cm}$ — $5500\Omega \cdot \text{cm}$)均匀性作了研究,从表1可见(115)上电阻率均匀性比较好,其横截面不均匀度可控制在10%以下,甚至可达1%。对同样条件下生长的[111]硅单晶,则明显地看出电阻率不均匀度要大得多,见表1。同文献[1]比

表1 P型高(中)阻硅单晶断面电阻率不均匀度统计

编号	断面电阻率分布 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	不均匀度(%)	直径 (mm)	晶向
f_s-5	170 167 165 162 165 167	<5	35	[115]
f_s-10	520 500 490 500 520	5.9	30	[115]
f_s-8	800 805 810 815 820	2.4	28	[115]
QRL-8-1	1400, 1400, 1400, 1400	<1	29	[115]
QRL-9-7	1900, 1900, 1900, 1950	<3	27	[115]
QRL-8-4	2100, 2100, 2150, 2200	4.7	28	[115]
QRL-9-5	1660, 1660, 1665, 1650	<3	29	[115]
QRL-10-18	5000, 5400, 5500, 5300(A)	<8	29	[115]
QRL-10-18	4500, 4500, 4300, 4300(B)	4.5	29	[115]
77-12-9	1100, 1200, 1100, 1200	8.7	27	[111]
77-12-8	3000, 2400, 2700, 3000	21.6	28	[111]
77-12-6	4300, 4200, 4000, 4800	24.1	29	[111]
77-12-2	5500, 5700, 7000, 6000	28.8	28	[111]

较,可看出我们在高阻硅单晶断面电阻率均匀性方面的实验是有显著效果的。

断面电阻测量点的位置:四个测量点的是中心一点和周边三点;五个测量点的是中心一点和周边四点;六个测量点的是中心一点和周边五点。

四、对[115]硅单晶外形特征讨论

1. 有位错[115]硅单晶

[115]硅单晶的外形特征实质上是[001]晶向偏向 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 方向 $15^\circ 48'$ 之后的生长外形特征。[001]生长的单晶有四条对称的生长稜线,如图1中A,B,C,D,其分别为(111),($\bar{1}\bar{1}1$),($\bar{1}\bar{1}1$)和($1\bar{1}1$)的露头处,晶体生长时,因生长条件不同,可以导致图1中A,B,C和D处的{111}倾斜显露并呈现叠加状;也可以导致与{111}相应的 $\langle 111 \rangle$ 因生长速度不同而呈尖状生

长线。沿[115]生长的单晶也有类似情况,所不同的是生长轴同各{111}的夹角不是 $35^\circ 16'$ 而为 $19^\circ 28'$, $51^\circ 04'$ 和 $33^\circ 46'$ 。因此,单晶外形在图2中A,B',C和D'处所露头的{111}小晶面叠加,其倾斜度和显露程度同[001]比较有明显区别,尤以A处为突出。因在A处(111)和[115]之间夹角为 $15^\circ 28'$,故易显露,且呈宽晶面叠加,而B'和D'两处多呈尖状生长线,类似于[001]单晶外形。总之,有位错[115]硅单晶外形也是受{111}和 $\langle 111 \rangle$ 的生长特征控制的。

2. 无位错[115]硅单晶

无位错时出现鼓稜且位于 $[\bar{5}\bar{5}2]$ 。用我们在另文中分析鼓稜的方法^[5]对[115]硅单晶鼓稜进行分析表明,鼓稜是[001]生长动力的表现,用(111)小平面生长过冷模型^[4]是无法解释的。图6所示为沿 $[\bar{5}\bar{5}2]$ 的生长动力:

$$F_{[\bar{5}\bar{5}2]} = f_{[\bar{5}\bar{5}2]} + f_{(001)} \cos 74^\circ 12' + f_{(\bar{1}\bar{1}1)} \cos 19^\circ 28',$$

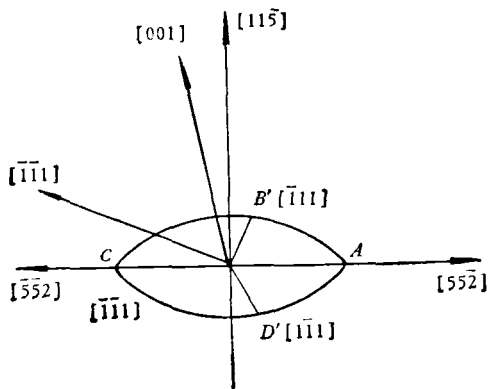


图6 [115]硅单晶生长动力示意图

式中 $f_{[552]}$ 是沿 $[552]$ 的自然结晶动力, 即我们在文献[5]中所称的本征结晶动力; $f_{[001]} \cos 74^\circ 12'$ 为 $[001]$ 生长动力在 $[552]$ 的分量, 而在 (115) 上的其他方向不包含这个分量, 由于 $[001]$ 生长动力强于 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$, 所以这一分量是十分显

著的; $f_{[111]} \cos 19^\circ 28'$ 是 $[\bar{1}\bar{1}1]$ 生长动力的分量。除此分析之外, 如前所说, 当方位角 $\varphi \approx \frac{\pi}{10}$ 时, 鼓棱所在方位并非 $[115]$ 指向, 而是 $[001]$ 所指方位。这也表明 $[115]$ 硅单晶鼓棱的产生同 $[001]$ 生长动力有关。一旦 $F_{[352]}$ 的生长动力与熔体表面张力 f_s 平衡时, 则形成鼓凸状的鼓棱。其形成过程, 我们已在文献[5]中分析过。

感谢区熔组和测试组以及支持过本工作的同志们。

参 考 文 献

- [1] T. F. Ciszek, *J. Electrochem. Soc.*, **120**-6(1973), 799.
- [2] A. Mayer, *Solid State Technol.*, **15**-4(1972), 38.
- [3] E. Sirtl and A. Z. Adler, *Metallk.*, **52**(1961), 529.
- [4] T. F. Ciszek *J. Crystal Growth*, **10**-3(1971), 263.
- [5] 徐文耀, 半导体技术, 6(1978), 27.

用椭圆偏振光谱法研究溅射无定形硅的光学性质

陈树光 叶贤京 莫 党 (中山大学物理系)

1980年12月2日收到

一、引 言

近年来, 由于太阳能利用等方面的需要, 无定形硅的研究在国际上得到重视和发展。无定形硅的光学性质是基础研究的重要内容之一, 与它的电子结构有密切关系。其中, 吸收系数和吸收边的研究工作较多, 折射率的研究也有一些。

Pierce 和 Spicer^[1] 测量了无定形硅的复数折射率, 求出介电常数的虚部 $\epsilon_2(E)$, 并与 Philipp 和 Ehrenreich^[2] 对单晶硅的测量结果作比较, 得到图1的结果。由图可见, 单晶硅存在三峰结构, 而在无定形硅中, 这三峰结构消失

物理

了, 只剩一个峰值较低的峰, 并且峰的位置向低能方向移动。Pierce 和 Spicer 是在很广的波长范围(相应能量 0.4 到 11.8 电子伏)内测量反射率, 然后按 Kramers-Kronig 关系, 通过积分运算求得 $\epsilon_2(E)$ 的。Philipp^[3] 也用类似方法测量无定形硅的光学性质, 结果很相似。

关于无定形硅折射率的特点, 有人认为主要是远程无序起作用, 而 Joannopoulos 和 Cohen^[4] 则尝试用近程无序作出理论解释。现在很清楚, 无定形硅由于制备方法不同或工艺条件变化而有各种不同的结构和性质, 并且也有不同的缺陷。因此, 深入研究其光学性质将有重要的意义。

椭圆偏振光谱法可用来测量非吸收薄膜的