

衬底错向对 LPE-GaAs 表面形貌的影响

周伯骏 蒋四南 高维滨 方兆强

向贤碧 朱素珍 王玉田 吴让元

(中国科学院半导体研究所)

1983年2月9日收到

提 要

本文研究了与(100)晶面错向的衬底上砷化镓液相外延层的表面形貌。随着外延层厚度的增加，先后观察到了鳞片状结构、水波纹结构和平行阶梯结构。本文对这形貌变化的机构作了讨论。我们还看到当外延层厚度是 $2.1\text{--}2.2\mu\text{m}$ 时，只有错向 $<4'$ 表面才光亮平整。当外延层厚到 $2.5\text{--}3\mu\text{m}$ 时，错向 $<5'$ 即可获得光亮的表面。

一、引言

外延层的表面形貌会对外延层，尤其是对薄外延层的性质产生重要影响，因而很多学者曾对表面形貌作过研究。关于在和(100)晶面有错向的砷化镓衬底上液相生长的外延层表面如何形成阶梯的问题，Nobuyuki Toyoda 等人^[1]作了由核到岛和再由岛到阶梯的假设和分析，但是他们对由岛到平行阶梯之间形貌的变化过程未作叙述。T. Nishinaga 等人^[2]虽然假设和讨论分析了表面形貌（简单正弦波形，具有正弦波前沿的水波纹形和多突起形），但是他们对外延初期的形貌未加叙述，对表面形貌的变化也没有叙述。为此，研究了错向衬底上液相外延层表面形貌随厚度增加从开始出现小岛直到成平行阶梯的整个演变过程，并对此作了解释。

此外，对于错向角小于多少才可得到平整光亮的外延层表面的问题国外学者存在小的差异。如 E. Bauser 等人^[3]的结果表明衬底表面与(100)面错向小于 $5'$ 可得光亮表面。而 Nobuyuki Toyoda^[1]的结果表明错向必须小于 0.06° 才能得到光亮的表面。对此，我们用不同错向的衬底在两种不同生长厚度的情况下作了研究，我们两种不同厚度外延层的实验结果与他们两者的结果分别对应一致。

二、实验条件

- 所有衬底皆取自水平掺 Cr 高阻单晶，衬底取向都与 $\langle 0\bar{1}\bar{1} \rangle$ 轴平行（偏离小于 $1'$ ），衬底接触生长液时表面状况良好。
- 为了使阶梯结构明显，选用较低的液相外延生长温度^[3]（ $\sim 600^\circ\text{C}$ ）。过冷度为 5—

6°C，降温速率 25—30°C/小时。

3. 为了消除偶然因素的影响，在生长 2.1—2.2 μm 厚的外延层时，将错向分别为 3'、4' 和 5' 的衬底在同一次实验中外延生长。再在类似条件下，将错向 6' 和 7'—8' 的衬底也在同一次实验中外延生长。当生长厚度为 2.5—3 μm 的外延层时，将错向 4' 和 5' 的衬底以及 5'、6' 和 7'—8' 的衬底分两批在条件类似的两次实验中一起外延生长。在对生长厚度不同的外延层作比较时，同样错向的衬底都是从同一个大衬底上解理得到的，保证了作比较的可靠性。

4. 用激光对衬底进行定向，精度约 1'。对错向 3' 和 6' 的两个衬底再用精度为 1' 的 X 光定向仪作抽样比较，结果一致。9'、23' 和 30' 的衬底是用 X 光定向的。

三、结果和讨论

1. 在液相外延生长初期，外延层由鳞片状小岛组成，如图 1 所示（见图版 I）。岛的长度方向沿着〈011〉方向。

2. 与(100)晶面分别错向 9'、23' 和 30' 的衬底在同一次实验中外延生长厚度约 0.8 μm 的外延层，它们的形貌如图 2 所示（见图版 I）为鳞片状结构。

我们发现鳞片的长度方向基本上都沿〈011〉方向，而且随着错向的增加在〈011〉方向上鳞片的密度也增加。

3. 与(100)晶面错向 3'、4'、5'、6' 和 7'—8' 的衬底生长厚度为 2.1—2.2 μm 的外延层的表面形貌，如图 3 所示（见图版 II）。

由图可见，只有错向小于 4' 表面才光亮平整，与 Nobuyuki Toyoda^[1] 的结论一致。大于 4' 则出现水波纹形阶梯。从图 3 还可看到阶梯密度随错向增大而增大。

4. 衬底与(100)晶面分别错向 4'、5'、6' 和 7'—8' 生长厚度为 2.5—3 μm 的外延层的表面形貌，如图 4 所示（见图版 III）。

由图 4 可看到，当外延层厚达 2.5—3 μm 时，只要错向小于 5'，外延层表面就平整光亮，与 E. Bauser^[3] 的结论一致。错向大于 5' 会出现条纹和阶梯。此种阶梯比图 3 中的水波纹平直。

5. 为了验证阶梯密度随着错向的增大而增加，以及验证阶梯形状随着外延层厚度的增加从水波纹形逐渐变得比较平直的现象，我们用挖有圆柱面槽的衬底进行外延生长，槽内外延层的表面形貌如图 5 所示。槽的轴与〈011〉方向平行。槽外原衬底表面与(100)晶面的错向都在 1' 以内。

由图 5 可见（见图版 I），在槽的底部有平整光亮的长条区域，它相应于错向小而不出现阶梯的部分。但是，随着圆柱面往两旁伸展，错向增大便出现了台阶，而且随着错向的增大台阶密度就增大。从图 5(b) 可明显地看到台阶的方向是沿着〈011〉方向的，这与 E. Bauser^[3] 的观点一致，因为她认为台阶的方向即是衬底面与(100)面的交线延伸的方向。从本实验结果可知：(a) 错向很小时可得到平整光亮的表面；(b) 外延层很薄时其厚度对台阶形状有影响；(c) 台阶密度和错向大小有关。因此，本实验结果可以和上述实验结果“3”和“4”作定性比较。

6. 对于厚外延层的情况, 我们观察到了由错向引起的平行阶梯状结构, 如图 6 所示(见图版 III)。

7. 由上述实验结果可以得到这样一种外延层表面形貌随厚度变化的规律: 由成核到鳞片(开始孤立, 后来联上), 再到水波纹状台阶, 最后随着外延层的长厚变成了平行阶梯状结构。我们对这种变化的原理作如下的描述:

由于本文所用的衬底表面都与 $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ 轴平行, 故而可将衬底表面看作由很多 (100) 面和 (011) 面组成的阶梯所构成, 如图 7(a) 所示。我们再从图 7(b)、(c)、(d) 来分析成核并长大的情况。由图 7(b) 可见在台阶的边缘成核几率比其它地方大, 故而假设先长上去一个核。当形成这个核后便在此核的 $[0\bar{1}1]$ 方向及相反的 $[01\bar{1}]$ 方向都形成了台阶拐角生长条件。在这些地方生长所需能量更小, 因而在这两个方向更快长大, 如图 7(c) 所示。紧靠此处的 $[011]$ 方向也因具备了台阶生长条件, 如图 7(d) 所示, 故而沿 $[011]$ 方向也是长大的。但是从图 7(d) 可知, 只要在 $[011]$ 方向形成一个核, 马上就会在此核的 $[0\bar{1}1]$ 和 $[01\bar{1}]$ 方向两个侧面同时形成台阶拐角生长条件, 使得在这两个方向更快地长大。这种晶核发展速度的各向异性决定了以后形成鳞片结构的长度方向总是沿 $[0\bar{1}1]$ 方向的。

由于在外延层上形成二维核及其长大要比在衬底上成核和长大有效得多。因而在最初一层有相当大小后, 在它长大的同时便可在此上面形成二维核并很快长上新的一层外

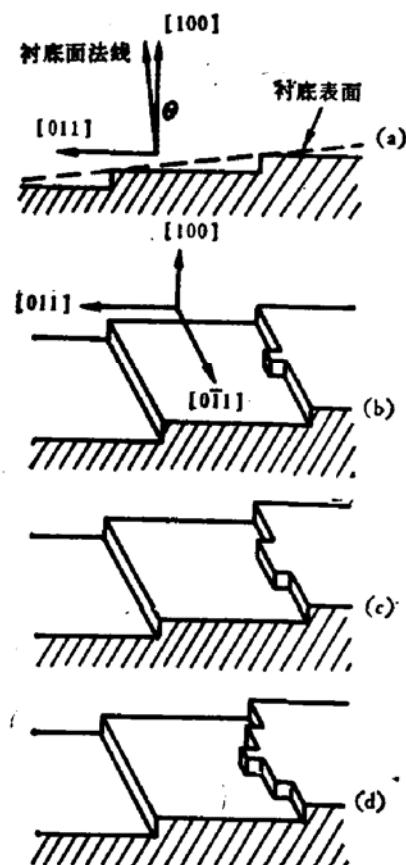


图 7 错向衬底表面成核及长大的示意图
(a) 把错向衬底表面看作由很多 (100) 面和 (011) 面组成的台阶所构成, (b), (c), (d)
为成核及其长大的示意图

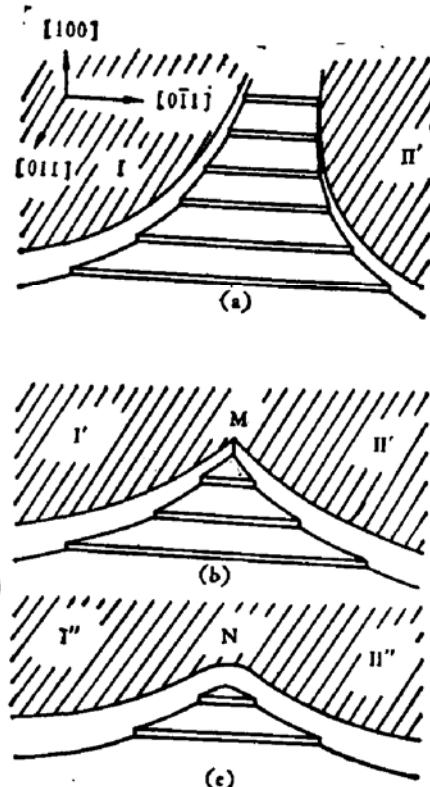


图 8 从鳞片状结构发展成水波纹状结构的示意图
(a) 两个邻近的鳞片, (b) 两鳞片相对快速生长而
连接上, (c) 连接处快速向前推进

延层。类似的情况会继续发生，这就造成鳞片（包括与 $[011]$ 相反方向的后沿）要比衬底面高出相当厚度的现象。

另外，在上层台阶成核并长大时，其 $[011]$ 方向正对的下层台阶不一定同时成核和长大，这就使长上的一层外延层前沿一直伸展到下层台阶的边缘。如果前沿继续推进跨过若干台阶，最后造成鳞片 $[011]$ 方向的前沿厚度比反方向的后沿来得厚，如图 8(a) 示意图所示。还有一种情况，即上层台阶成核并长大到相当规模时下层台阶才开始成核并长大，那末各自长大的结果上层台阶生成的外延层前沿会压上下层台阶生成的外延层。又由于在外延层上生长比在衬底上生长有效的缘故，上层外延层前沿终将赶上层外延层的前沿。这种情况也是造成鳞片前沿比后沿厚的原因之一。鳞片前沿后沿厚度的差别可用干涉显微镜观察出来，从图 1 和图 2 的照片也能粗略可见。

从图 7(a) 还可以明显地看到，当衬底表面法线与 $\langle 100 \rangle$ 晶向偏离越大时，台阶的密度便越大，这和实验结果是一致的。

下面我们再来解释随着外延生长的继续进行，表面形貌怎样从鳞片状结构向水波纹状结构直至平行阶梯结构演变的原理。我们假设有两个邻近的鳞片 I 和 II，如图 8(a) 所示。由图可见，在鳞片 I 的靠 $[0\bar{1}1]$ 方向的侧面和各台阶相交处都具备台阶拐角生长条件。当在这些地方生长时，又会在其邻近形成新的台阶拐角生长条件，致使鳞片 I 迅速往 $[0\bar{1}1]$ 方向扩展。而在鳞片 I 的 $[011]$ 方向侧面，主要只是有台阶生长条件，因此扩展速度比前者慢。同理，鳞片 II 也迅速往 $[01\bar{1}]$ 方向扩展，而往 $[011]$ 方向扩展慢。正由于 I 和 II 相对的侧面快速扩展，结果就连接上，成为图 8(b) 所示状态，即为 I' 和 II'，它们相交于 M。在 M 处有台阶拐角生长条件，使得 M 处往 $[011]$ 方向迅速扩展成为图 8(c) 所示 N 的位置。此时鳞片 I' 和 II' 已成了 I'' 和 II''。与鳞片 I 和 II 的发展变化类似，其它鳞片也同时发生类似的变化，结果使外延层表面出现如图 3 中所示的水波纹状形貌。

根据同样的道理，在继续生长时，在水波纹状结构的凹的部分由于波纹台阶在 $[0\bar{1}1]$ 方向和 $[01\bar{1}]$ 方向生长快，使得凹处最终长平，得到了在较厚的外延层表面出现的平行阶梯状结构，如图 6 所示。

8. 关于 E. Bauser 等人^[3]和 Nobuyuki Toyoda 等人^[1]对多少错向范围才能得到平整光亮的表面有不同估计的问题，我们用两种不同厚度的外延层作了比较。当外延层厚度在 $2.5-3\mu\text{m}$ 以上时，与 E. Bauser 的结论一致，即错向 $5'$ 以内就可得到平整光亮的表面。在外延层薄于 $2.2\mu\text{m}$ 时，错向小于 $4'$ 的才得到光亮平整的表面，这和 Nobuyuki Toyoda 等人^[1]认为的错向小于 0.06° 才能得到平整光亮的表面的看法一致。

四、结 论

1. 在与 $\langle 100 \rangle$ 晶面错向的衬底上生长厚度小于 $1\mu\text{m}$ 的外延层时可得到鳞片状的结构，鳞片的长度方向沿 $[0\bar{1}1]$ 方向。随着错向增大，鳞片状结构的密度在 $[011]$ 方向上就增加。随着外延层的继续生长，鳞片状结构便向水波纹状结构变化，最后变成平行阶梯结构。本文用把错向衬底的表面看作由很多 (011) 面和 (100) 面组成的台阶，并通过沿台阶成核，再在核的 $[0\bar{1}1]$ 和 $[01\bar{1}]$ 方向出现台阶拐角生长条件的现象使核的发展及鳞片的扩

展沿 $[0\bar{1}1]$ 晶向比沿 $[011]$ 晶向快的理论解释了外延层形貌随外延层厚度而变化的原因。

2. 在厚度小于 $2.1-2.2\mu\text{m}$ 的外延层上衬底表面与(100)晶面错向小于 $4'$ 时才得到光亮平整的表面, 否则会出现水波纹状结构。当外延层厚度大于 $2.5-3\mu\text{m}$ 时, 错向小于 $5'$ 即可获得光亮平整的表面, 否则会出现条纹状台阶。

本文曾得到许振嘉、梁骏吾和叶式中同志的指导, 在具体工作中曾得到余金中、石志文、马国荣、钱家骏、何宏家、王凤莲、单树森和虞嘉峰同志的帮助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Nobuyuki Toyoda, Minoru Mihara and Tohru Hara, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18**, 2207 (1979).
- [2] T. Nishinaga, K. Pak and S. Uchiyama, *J. Crystal Growth*, **43**, 85 (1978).
- [3] E. Bauser, M. Frik, K. S. Loehner, L. Schmidt and R. Ulrich, *J. Crystal Growth*, **27**, 143 (1974).

Effect of Substrate Misorientation on Surface Morphology of LPE-GaAs

Zhou Bojun, Jiang Sinan, Gao Weibin, Fang Zhaoqiang, Xiang Xianbi, Zhu Suzhen,
Wang Yutian and Wu Rangyuan
(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

The surface morphology of GaAs LPE layers grown on substrates misoriented from the (100) plane has been studied. With the increasing of the thickness of epitaxial layers, scales, ripples and terraces are observed successively. The mechanism of the change of the morphology has been discussed. It is found that, when the thickness of LPE layers is $2.1-2.2\mu\text{m}$, smooth planar surfaces can be obtained only if the misorientation $\theta < 4'$, and when the thickness is $2.5-3\mu\text{m}$, smooth surfaces can also be obtained on substrates if the misorientation $\theta < 5'$.