

热 壁 外 延¹⁾

杨玉琨 孟庆巨 吴连民

(吉林大学分析测试实验中心)

本文介绍了热壁外延的原理、实验装置和应用

热壁外延 (hot wall Epitaxy, 缩写为 HWE) 是一种气相外延技术。近十多年来,人们对它作了广泛的研究^[1]。同 MBE 和 MOCVD 相比,它的设备简单,能生长出和用 MBE 方法制备的同样完美的单晶外延层,而且节省原材料。

典型的 HWE 炉的构造如图 1 所示。把它放入高真空或超高真空室中,在真空环境中加热蒸发源、热壁和衬底,进行薄膜淀积。HWE 和一般的蒸发镀膜系统的主要区别是在蒸发源和衬底之间加了一个套筒,并把它加热,成为热壁,因而称该技术为热壁外延。热壁的作用,一是形成一个很接近于热力学平衡的淀积系统,因而能生长出完美的单晶外延层。有的 HWE 炉内,在蒸发源和衬底之间还加一个挡板,迫使从蒸发源出来的原子或分子先同热壁碰撞,交换热量,然后到达衬底,使得外延生长过程更接近热力学平衡。二是迫使从蒸发源出来的原子

和分子指向衬底,大大减少蒸发材料的损失。三是同 HWE 炉外面的真空环境相比,炉内保持着更清洁的环境,因而炉外的真空室可不抽到超高真空,从而使设备大大简化。

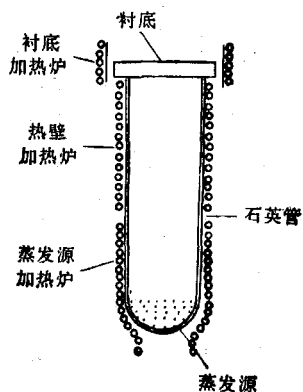


图 1 热壁外延炉的构造

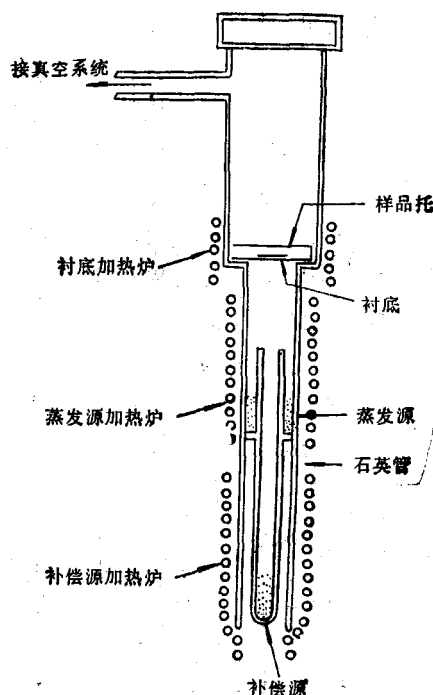
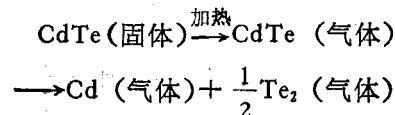


图 2 一种 HWE 炉的结构

有些化合物半导体加热时会分解,如



分解后的组分气体 (Cd 和 Te) 并不一定等组

1) 国家高技术计划新概念、新构思探索研究资助项目。

分蒸发。为使外延层的组分符合化学计量比,有时要加补偿源(如 Cd 补偿源)。调节补偿源的温度,改变其蒸气压,使得外延层的成分符合化学计量比。

为了使设备更简单,我们还试探把外延炉同真空室合二而一。图 2 即为这种 HWE 炉的结构示意图。当然这样作会失去 HWE 技术的一些优点,但还是可以生长出单晶外延层。

HWE 炉有闭管和开管两种。闭管 HWE 炉的结构如图 1 所示。其特点是衬底盖在热壁上,从而使炉内蒸发源的蒸气压比较高。有人用这种 HWE 炉在 GaAs(100) 面上生长 ZnS 单晶外延层^[2]。炉外真空度为 10^{-4} Pa,而炉内蒸发源的蒸气压估计可高达 10^{-1} Pa,从而在衬底附近形成蒸发源的过饱和蒸气压,使蒸发源易于在衬底上成核、长大,并使外延层具有一定的生长速率。

开管热壁外延是衬底不同热壁接触,热壁套筒不被盖住而留有缝隙,如图 3 所示。这种结构的炉子会失去 HWE 的某些优点。但是精心设计炉子,能得到准直的蒸发源的蒸气流,射向衬底,从而在衬底处形成蒸发源的较高的蒸气压。得到准直蒸气流的一种方法是热壁管口收缩;另一种方法是让管长为其直径的十倍以上。由于真空中气体分子的平均自由程很长,细长的管子便能对蒸气流起到准直作用。

开管 HWE 炉有其特殊的功能。Schoolar^[3]用 HWE 装置在 NaCl 衬底上生长 PbS 薄膜。衬底和热壁口之间的缝隙在 0 和 1mm 之间可调。PbS 蒸发源加热时会分解。当衬底和热壁管口之间有一定缝隙时,由于 S 蒸气压高,过量的 S 蒸气会跑出来,这就提供了一种控制载流子浓度的方法。使缝隙从小到大改变,可以生长出一系列薄膜。测试发现,第一个膜是强 P 型,第二个膜也是 P 型,但载流子浓度降低了,以后又变为 n 型。

我们用 HWE 技术在 GaAs(100) 面上生长出 CdTe^[4] 和 ZnSe 单晶外延层,在扫描电镜上观察它是镜面,无缺陷,X-射线衍射只观测到来自(200),(400)和(600)的衍射峰,而且

很尖锐。这说明外延层确实是单晶,而且是沿(100)方向生长的。

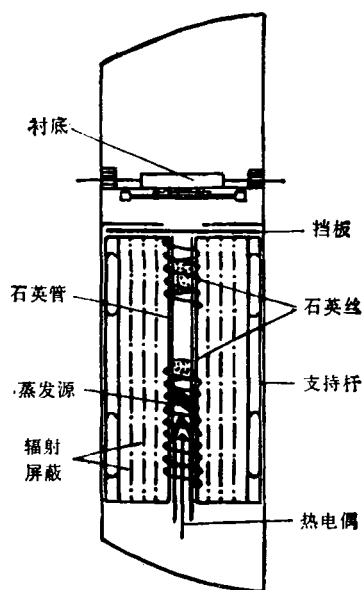


图 3 开管生长的 HWE 炉

为了进一步了解完美程度,还对外延层作了荧光光谱测量。图 4 是在 77K 温度下测得的 CdTe 外延层的荧光光谱。1.59eV 处的峰为激子峰,1.45eV 处很宽的发光带与缺陷有关。激子峰的半高宽(FWHM)为 9.6MeV,比较窄。激子峰能够出现,并且很窄,说明 CdTe 外延层是比较完美的单晶。

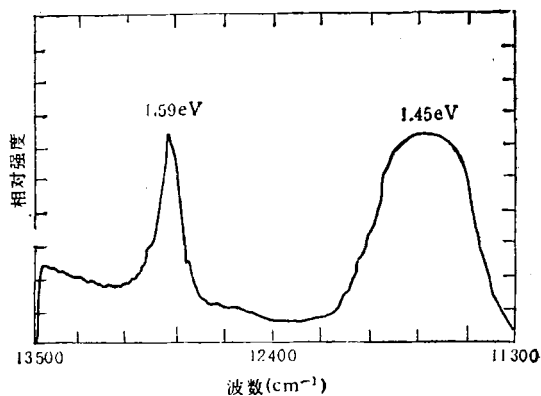


图 4 77K 温度下测得的 CdTe 外延层荧光光谱

HWE 不仅能生长单层薄膜,而且能生长多层薄膜,因而能制备异质结和超晶格。图 5 是 A. Ishida 等人^[5]用来制备 PbTe/EuTe 短

周期超晶格的 HWE 系统结构的示意图。该系统生长薄膜时真空度为 1×10^{-4} Pa, 温度条件在图 5 中给出。用解理的 KCl(100) 作为衬底, 由交替生长 PbTe ($\sim 100 \text{ \AA}$ 厚) 和 Eu (12 个原子层) 来制备 PbTe/EuTe 短周期超晶格。Eu 的蒸气压大于 Pb 和 PbTe, 但 EuTe 的蒸气压极小。Eu 原子淀积在 PbTe 外延层上, 变为 EuTe 化合物, 多余的 Pb 原子蒸发掉。PbTe 的生长速率为 10 \AA/s , 而 EuTe 为 0.5 \AA/s 。附加的 Bi_2Te_3 或 Tl_2Te_3 蒸发源是作掺

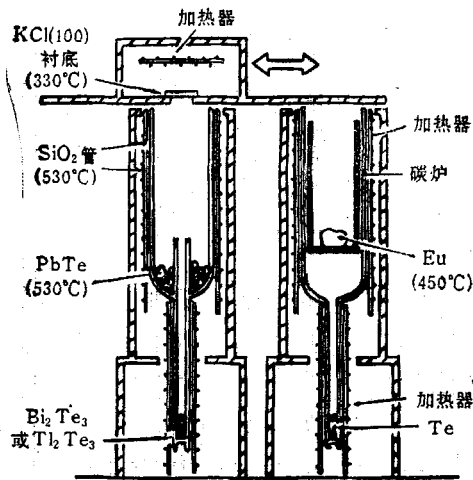


图 5 制备 PbTe/EuTe 短周期超晶格的 HWE 系统

杂用的施主或受主杂质。

还有人用 HWE 技术制备多晶薄膜。如 I. S. Athwal 等人^[6]用这种技术制备 Te 多晶薄膜。因为 HWE 技术能在接近热力学平衡的条件下淀积薄膜, 因而结晶度好, 晶粒较大, 使之具有良好的电学性质。

HWE 的缺点是生长过程中难于监测外延层的厚度、成分和结构。把生长条件控制好, 使生长速率恒定, 便可由生长时间来控制外延层的厚度。J. Humenberger 等^[7]进行了用小型四级质谱仪监测 HWE 炉内蒸气的成分的实验。

[1] A. Lopez-Otero, *Thin Solid Films*, 49(1978), 3.
 [2] M. E. Behrnt et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, 8(1971), 494.
 [3] R. B. Schoolar, Navy Ordnance Laboratories Tech. Rep., (1971), 71—233.
 [4] 孟庆巨等, 吉林大学自然科学学报, No. 4 (1988 年), 119.
 [5] A. Ishida et al., *Superlattices and Microstructures*, 2-6(1986), 575.
 [6] I. S. Athwal and R. K. Bedi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 26-9(1987), 1413.
 [7] J. Humenberger et al., *Thin Solid Films*, 163(1988), 241.

(上接第 506 页)

家来说, 物理学是那么珍贵和亲切。

* * *

这篇文章选自作者 1988 年 6 月 13—17 号在北欧哥本哈根的朗道诞辰专题讨论会上的报告。这个报告将收入“Landau: The Physicist and The Man”一书。该书是由 I. M. Khalatnikov 编辑 (Pergamon 公司, 牛津, 1989)。

[1] E. M. Lifshitz, Lev Davidovich Landau (1908—1968), in L. D. Landau, *Collected Papers*, Nauka, Moscow, Vol. 2, (1969).
 [2] L. D. Landau, *Collected Papers* (two volumes), Nauka, Moscow, (1969); L. D. Landau, *Collected Papers*, Pergamon, London, (1965).
 [3] *Memories of Landau*, Nauka, Moscow, (1988), English ed. to be published by Pergamon.
 [4] V. L. Ginzburg et al., *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 50(1950), 1064; Reprinted in L. D. Landau, *Collected Papers*, Nauka, Vol. 2, 126.

[5] V. L. Ginzburg, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 29(1956), 748.
 [6] L. D. Landau, *Phys. Zh. Soviet Union*, 4(1933), 43.
 [7] V. L. Ginzburg et al., *Solid State Commun.*, 50 (1984), 339.
 [8] V. L. Ginzburg, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.*, 8(1944), 76.
 [9] L. D. Landau, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 11(1941), 592; *J. Phys. USSR*, 5(1941), 71.
 [10] R. P. Feynman, *Phys. Rev.*, 91(1953), 1301.
 [11] V. L. Ginzburg, *Prog. Low Temp. Phys.*, 12, in Press.
 [12] L. D. Landau, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 30(1956), 1058.
 [13] D. Pines, *Elementary Excitations in Solids*, Benjamin, New York, (1963).
 [14] A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, 5th ed., Princeton, U. P., Princeton, N. J., (1956).
 [15] W. Pauli, *Theory of Relativity*, Pergamon, London, (1958).

(马红根据 Phys. Today 1989 年第 5 期第 54—61 页编译)