

# Si/Ge 应变层异质结价带偏移的剪裁与设计

王仁智 黄美纯 柯三黄 李开航

(厦门大学物理系, 361005)

1994-11-17 收稿, 1995-04-06 收改稿

**摘要** 讨论应变层异质结价带偏移的剪裁、设计方法, 研究 Si/Ge 应变层异质结价带偏移设计参数与应变条件的关系, 基于异质结中平均键能“对齐”, 得到适用于 Si/Ge 异质结价带偏移剪裁与设计的计算公式和图表。

**关键词:** Si/Ge 异质结 价带偏移

**中图分类号:** TN304.054

## The Tailoring of Valence-Band Offsets at Strained Si/Ge Interfaces

Wang Renzhi Huang Meichun Ke Sanhuang Li Kaihang

(Department of Physics, Xiamen University, 361005)

**Abstract:** In this paper, the tailoring of valence-band offsets at strained Si/Ge interfaces is discussed. The relationship between the band tailoring parameters and strain condition for Si and Ge strained-layer in Si/Ge is researched. Based on the alignment of average-bond-energy  $E_m$  at Si/Ge interfaces, we get the formula and chart which are applicable to the artificial tailoring of valence-band offsets.

**Key Words:** Si/Ge Heterojunction Valence-Band Offsets

### 1 引言

量子阱和超晶格的出现, 标志着半导体材料的发展进入人工设计的新时代, 应变层异质结能带排列的剪裁和设计是“能带工程”的重要方面, Ge/Si 是应变层异质结中有代表性的系统之一, Ge 和 Si 的晶格失配虽然高达 4%, 但仍然可以得到很好的赝晶生长异质结。Schwartz 等<sup>[1]</sup> 用光电子能谱对应变层结构的能带作了比较成功的测量, 得到 Ge 生长在 Si(001) 衬底上的 Si/Ge 应变层异质结的价带偏移  $\Delta E_v$  值为  $0.74 \pm 0.13$  eV; 反过来, Si 生长在 Ge 衬底的 Si/Ge

\* 国家和福建省自然科学基金资助课题

应变层异质结的  $\Delta E_v$  值为  $0.17 \pm 0.13$  eV。可以看到,同样是 Si/Ge 异质结,由于应变情况的不同,其  $\Delta E_v$  值可以在 0.74 eV 与 0.17 eV 之间变动。因此,可以通过应变条件的选取,对 Si/Ge 应变层异质结能带排列进行剪裁和设计。

在异质能带排列的研究中,我们提出了以平均键能  $E_m$  为参考能级的新方案,研究中发现  $E_m$  与价带顶  $E_v$  的能距  $E_m^v (=E_m - E_v)$  是决定异质结能带偏移的关键参数<sup>[2]</sup>,研究了应变层异质结中  $E_m^v$  随平行晶格常数  $a_{//}$  的变化关系<sup>[3]</sup>。据此,本文基于  $E_m^v$  与  $a_{//}$  的变化关系,提出进一步剪裁和设计应变层异质结  $\Delta E_v$  的方法,并以 Si/Ge 典型的应变层异质结为例,讨论应变层异质结能带排列的剪裁和设计的有关问题。

## 2 应变条件的确定

A 和 B 两种晶格常数不同的材料共度生长赝晶异质结时,由于晶格失配引起的应力效应,使异质结两侧平行于界面的原子平面上的晶格常数  $a_{//}^A$  和  $a_{//}^B$  趋向一致(即  $a_{//}^A = a_{//}^B$ ),而垂直于界面的晶格常数  $a_{\perp}^A$  和  $a_{\perp}^B$  由弹性力学得到<sup>[4]</sup>:

$$a_{\perp}^i = a_i \{1 - D_i (a_{//} / a_i - 1)\} \quad (1)$$

其中  $i=1,2$  分别表示 A 和 B 材料,  $a_i$  是未形变时的晶格常数,常数  $D_i$  由晶体的弹性系数  $C_{11}^i$ 、 $C_{12}^i$  和  $C_{44}^i$  决定。在沿  $(0,0,1)$  方向单轴压力情况下,  $D_i$  为:

$$D_i = 2C_{12}^i / C_{11}^i \quad (2)$$

上式表明,应变层的应变条件由  $a_{//}$ 、 $a_{\perp}$  表征,当  $a_{//}$  取值决定后,可由材料的晶格常数和弹性系数确定  $a_{\perp}$  值[见式(1)和(2)],因此,确定应变程度的独立变量只需要用到  $a_{//}$  一个,所以在 Si/Ge 应变层异质结价带偏移的设计中,主要是揭示  $\Delta E_v$  随  $a_{//}$  的变化关系。考虑到  $a_{//}$  总是由外延层的晶格常数决定,采用  $A_{1-x}B_x$  合金作为衬底外延生长的 A/B 应变层异质结,其  $a_{//}$  值就是合金的晶格常数:

$$a_{//} = x \cdot a_B + (1-x) \cdot a_A \quad (3)$$

对于外延生长的 Si/Ge 应变层异质结,用  $Ge_xSi_{1-x}$  合金作为外延衬底,可以通过改变合金衬底的组分  $x$  来控制 Si/Ge 的  $a_{//}$  值(即改变应变情况)。

已知 Si 和 Ge 的晶格常数分别为 0.543 和 0.565 nm; Si 的弹性常数  $C_{11} = 16.75$ ,  $C_{12} = 6.50$ , Ge 的弹性常数  $C_{11} = 13.15$ ,  $C_{12} = 4.94$ , 单位都是  $10^{10}$  Pa, 以  $Si_{1-x}Ge_x$  合金作为衬底生长 Si/Ge 异质结,通过合金衬底的组分控制 Si/Ge 的  $a_{//}$  值(即应变程度)。在  $x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$  五种取值情况下, Si/Ge 应变层异质结中,由式(1)和(2)计算得到各应变层的  $a_{//}^{Si}$ 、 $a_{\perp}^{Si}$  和  $a_{//}^{Ge}$ 、 $a_{\perp}^{Ge}$  值分别列于表 1。

## 3 $E_m^v$ 随 $a_{//}$ 的变化关系

A、B 体材料  $\Gamma$  点简并价带顶在形变势作用下和自旋轨道(SO)耦合作用下都发生分裂,本文用  $E_{v,lv}$  表示只考虑形变势分裂后的价带顶,  $E_{v,av}$  表示各分裂价带的平均值,  $E_{v,so}$  表示同时计入形变和 SO 分裂后的价带顶。A/B 应变层异质结的价带偏移  $\Delta E_v$  值与 A、B 体材料(化学)性质、应变程度及 SO 分裂情况有关,为了确定各种影响因素的定量作用,分别引入  $E_m^v (=E_m - E_{v,lv})$ 、 $E_m^{av} (=E_m - E_{v,av})$  和  $E_m^{so} (=E_m - E_{v,so})$  三个参数,在应变层异质结的  $\Delta E_v$  设计过程中,先要

研究这些参数随应变程度(即  $a_{//}$ )的变化关系。

**表 1** 在 5 种(衬底合金组分)不同应变情况下, Si 和 Ge 应变层的晶格常数  $a_{//}$ 、 $a_{\perp}$ , 平均键能  $E_m$  只考虑形变势分裂时的价带顶  $E_{v,lv}$  和价带平均值  $E_{v,av}$ , 价带顶的形变势裂距  $\delta E_{001}$ , 同时计及形变势和自旋轨道作用后的价带顶  $E_{v,so}$ , 以及它们与平均键能的差值:  $E_m^{\Delta} (=E_m - E_{v,lv})$ 、 $E_m^{\Delta} (=E_m - E_{v,av})$  和  $E_m^{\Delta} (=E_m - E_{v,so})$  的计算结果

(单位: eV)

衬底合金组分	$x=0.00$		$x=0.25$		$x=0.50$		$x=0.75$		$x=1.00$	
	Si	Ge	Si	Ge	Si	Ge	Si	Ge	Si	Ge
$a_{//}$	5.430	5.430	5.485	5.485	5.540	5.540	5.595	5.595	5.650	5.650
$a_{\perp}$	5.430	5.820	5.387	5.774	5.345	5.733	5.302	5.691	5.260	5.650
$E_m$	9.12	9.81	9.03	9.69	8.94	9.57	8.85	9.46	8.77	9.35
$E_{v,lv}$	9.51	10.85	9.51	10.67	9.49	10.50	9.48	10.34	9.46	10.18
$E_{v,av}$	9.51	10.65	9.42	10.53	9.33	10.41	9.24	10.30	9.16	10.18
$\delta E_{001}$	0.00	-0.40	0.08	-0.29	0.16	-0.18	0.24	-0.09	0.30	0.00
$E_{v,so}$	9.52	10.95	9.51	10.77	9.49	10.60	9.48	10.44	9.46	10.28
$E_m^{\Delta}$	-0.39	-1.04	-0.48	-0.98	-0.55	-0.93	-0.63	-0.88	-0.69	-0.84
$E_m^{\Delta}$	-0.39	-0.84	-0.39	-0.84	-0.39	-0.84	-0.39	-0.84	-0.39	-0.84
$E_m^{\Delta}$	-0.40	-1.14	-0.48	-1.08	-0.55	-1.03	-0.63	-0.98	-0.69	-0.93

对于表 1 中五组不同应变情况下的 Si 和 Ge 应变层, 采用从头算赝势带计算方法 (norm-conserving pseudopotentials)<sup>[5]</sup> 计算它们的能带结构  $E_n(\mathbf{k})$ , 计算中, 都采用沿 (001) 方向的 4 个原子层 (Si)<sub>4</sub>(001) 和 (Ge)<sub>4</sub>(001) 的原胞结构, 原胞基矢  $a_1 = (1/2, 1/2, 0)a_{//}$ ,  $a_2 = (-1/2, 1/2, 0)a_{//}$ ,  $a_3 = (0, 0, 1)a_{\perp}$ , 原子位于 (0, 0, 0), (0.5, 0, 0.25), (0.5, 0.5, 0.5) 和 (0, 0.5, 0.75) 位置; 离子赝势由 Hamann<sup>[6]</sup> 方法得到, 对交换关联势作局域密度近似 (LDA), 能带本征函数用平面波展开, 动能截断为  $e_{\max} = 12.0$  Ry; 布里渊区积分采用两个特殊 k 点<sup>[7]</sup>, 自洽总能收敛到  $10^{-4}$  Ry。在上述能带本征值  $E_n(\mathbf{k})$  计算中 (包括价带顶  $E_{v,lv}$  和价带的平均值  $E_{v,av}$  以及下面  $E_m$  值), 能量原点由离子赝势确定, 该能量原点选取不影响能距参数  $E_m^{\Delta}$  和  $E_m^{\Delta}$  值的计算结果, 根据各种 Si 和 Ge 应变层的能带结构  $E_n(\mathbf{k})$  的计算结果, 由下式计算平均键能  $E_m$ <sup>[2]</sup>:

$$E_m = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{8N} \sum_{n=1}^8 \sum_{\mathbf{k}} E_n(\mathbf{k}) + \frac{1}{8N} \sum_{n=9}^{16} \sum_{\mathbf{k}} E_n(\mathbf{k}) \right\} \quad (4)$$

其中  $N$  为原胞数目,  $n=1 \sim 8$  为价带,  $n=9 \sim 16$  为重要导带。对于表 1 给出的 5 种不同 Si 和 Ge 应变层的价带: 由于形变势作用分裂的价带顶  $E_{v,lv}$ 、各分裂价带的平均值  $E_{v,av}$  和形变势裂距  $\delta E_{001}$  的计算结果, 以及平均键  $E_m$  的计算结果列于表 1。

在上述计算中, 只考虑形变势引起的价带分裂, 没有考虑自旋轨道分裂作用。实际上 Si 和 Ge 的应变层中, 由于形变势和自旋轨道的相互作用, 沿 (0, 0, 1) 方向的单轴压力将使价带分裂成 3 个价带能级, 这 3 个能级相对于平均价带  $E_{v,av}$  的移动量为<sup>[8]</sup>:

$$\Delta E_{v2} = \frac{1}{3} \Delta_0 - \frac{1}{2} \delta E_{001} \quad (5)$$

$$\Delta E_{v1} = -\frac{1}{6}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E_{001} + \frac{1}{2}\left\{\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E_{001} + \frac{9}{4}(\delta E_{001})^2\right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$\Delta E_{v3} = -\frac{1}{6}\Delta_0 + \frac{1}{4}\delta E_{001} - \frac{1}{2}\left\{\Delta_0^2 + \Delta_0\delta E_{001} + \frac{9}{4}(\delta E_{001})^2\right\}^{1/2} \quad (7)$$

其中  $\Delta_0$  是体材料没有考虑形变时的自旋轨道分裂,  $\delta E_{001}$  是形变引起的裂距; V2 是纯  $|3/2, \pm 3/2\rangle$  态, V1 和 V3 是  $|3/2, \pm 1/2\rangle$  态与  $|1/2, \pm 1/2\rangle$  的混合态。

对于 Si  $\Delta_0 = 0.04$  eV, 对于 Ge  $\Delta_0 = 0.30$  eV。由表 1  $\delta E_{001}$  值的计算结果与 Si 和 Ge 的  $\Delta_0$  值, 通过式(5)~(7)计算得到的价带移动  $\Delta E_{v2}$ ,  $\Delta E_{v1}$  和  $\Delta E_{v3}$  值, 取其中最大值与  $E_{v,av}$  值相加得到, 同时考虑形变势和自旋轨道分裂作用时的价带顶  $E_{v,so}$  值, 结果也列于表 1。表 1 还列出平均键能  $E_m$  与价带顶  $E_{v,hv}$ ,  $E_{v,av}$  和  $E_{v,so}$  的能隙, 即  $E_{vh}^m$ ,  $E_{va}^m$  和  $E_{vs}^m$  三个参数的计算结果。图 1(a)、(b) 分别给出 Ge 和 Si 应变层的  $E_{vh}^m$  (虚线)、 $E_{va}^m$  (点线) 和  $E_{vs}^m$  (实线) 等三个参数随平行晶格常数的变化关系。因为 Si 的 SO 分裂  $\Delta_0$  很小,  $E_{vh}^m$  与  $E_{vs}^m$  曲线几乎重合, 图 1(b) 中只给出  $E_{vs}^m$  曲线。

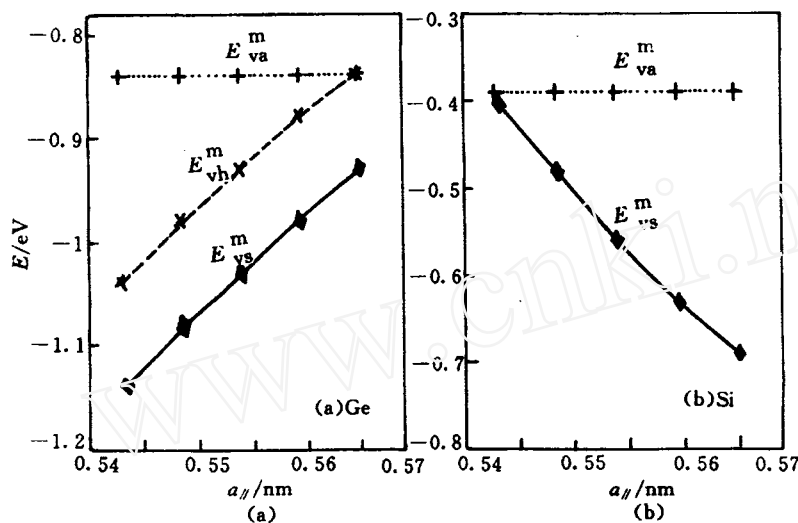


图 1 (a)、(b) 分别是 Ge 和 Si 应变层的  $E_{vh}^m$  (虚线)、 $E_{va}^m$  (点线) 和  $E_{vs}^m$  (实线) 三个参数随平行晶格常数  $a_{//}$  的变化关系。因为 Si 的 SO 分裂  $\Delta_0$  很小,  $E_{vh}^m$  与  $E_{vs}^m$  曲线几乎重合, 图 1(b) 中只给出  $E_{vs}^m$  曲线

从图 1(a) 和 (b) 可以看到, Si 和 Ge 应变层的  $E_{va}^m$  值与形变情况无关, 是由体材料 (化学) 性质决定的参数,  $E_{vs}^m$  值取决于应变程度 ( $a_{//}$ ),  $E_{vh}^m$  随  $a_{//}$  的变化趋势与  $E_{vs}^m$  相同,  $E_{vh}^m$  与  $E_{va}^m$  之间的差值主要由材料的 SO 裂距  $\Delta_0$  决定。

#### 4 异质结价带偏移 $\Delta E_v$ 值的确定

根据平均键能在 A/B 异质结中“对齐”<sup>[2]</sup>, 由 A、B 材料的价带到平均键能的能距  $E_m^m$  ( $E_m^m$  指  $E_{vh}^m$ ,  $E_{va}^m$  和  $E_{vs}^m$  三个参数), 用下式计算相应的价带偏移  $\Delta E_{vi}$  值:

$$\Delta E_{vi} = E_m^m(A) - E_m^m(B) \quad (8)$$

对于 Si/Ge 应变层异质结, 由表 1 五种不同应变情况下的 Si 和 Ge 的  $E_{vh}^m$ ,  $E_{va}^m$  和  $E_{vs}^m$  值, 根据式(8)分别得到只考虑形变势作用的价带偏移  $\Delta E_{vh}$  值, 形变势作用下各分裂价带的价带偏

移平均值  $\Delta E_{v0}$  以及同时考虑形变势和 SO 作用后的价带偏移  $\Delta E_{v1}$  值, 结果列于表 2。可以看出, 本文得到  $\Delta E_{v1}$  与引文[9]的计算结果符合较好, 本文的  $\Delta E_{v1}$  值不随应变条件变化, 这是上面提到的 Si 和 Ge 应变层的  $E_{v0}$  值与形变情况无关得出的结果。

图 2 绘出价带偏移  $\Delta E_{v0}$  (点线)、 $\Delta E_{v1}$  (虚线) 和  $\Delta E_{v2}$  (实线) 随应变层晶格常数  $a_{\parallel}$  (也就是随衬底合金组分  $x$  的变化关系)。其中  $\Delta E_{v2}$  是同时考虑形变势和 SO 作用后的价带偏移的最终计算结果, 该曲线的二次表达式为:

表 2 五种不同应变情况下的应变层异质结 Si/Ge 的只考虑形变势的价带偏移  $\Delta E_{v0}$ 、价带偏移平均值  $\Delta E_{v1}$  和同时考虑形变势和 SO 作用后的实际价带偏移  $\Delta E_{v2}$  值的本文计算结果; 以及引文[9]和[4]的从头算层势法的界面自洽计算结果和引文[1]的实验结果

衬底合金组分	$x$				
	$x=0.00$	$x=0.25$	$x=0.50$	$x=0.75$	$x=1.00$
异质结	Si/Ge	Si/Ge	Si/Ge	Si/Ge	Si/Ge
$\Delta E_{v0}$ 本文	0.65	0.50	0.38	0.25	0.15
$\Delta E_{v1}$ 本文	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
引文[9]	0.47				0.41
引文[4]	0.54				0.41
$\Delta E_{v2}$ 本文	0.74	0.60	0.47	0.35	0.24
引文[9]	0.74		0.48		0.21
引文[4]	0.84				0.31
Expt. [1]	0.74 ± 0.13			0.17 ± 0.13	

$$\Delta E_{v2}(x) = 0.74 - 0.58x + 0.08x^2 \quad (9)$$

图 2 或式(9)与(3)可用于 Si/Ge 应变层异质结价带偏移的剪裁和设计, 例如, 若得到价带偏移  $\Delta E_{v2}$  为 0.40 eV 的 Si/Ge 异质结, 可以由图 2 的  $\Delta E_{v2}$  曲线或式(9)与(3)得到其 Si 和 Ge 应变层的晶格常数  $a_{\parallel}$  值为 0.557 nm, 同时还可以了解到, 为实现这个设计, 可以将 Si/Ge 异质结外延生长于 Ge<sub>0.64</sub>Si<sub>0.36</sub> 合金组分  $x=0.64$  的衬底上。

### 参 考 文 献

- Schwartz G P, Hybertsen M S, Berk J, et al. *Phys Rev*, 1989; **B39**(2):1 235
- 王仁智, 黄美纯. *中国科学*, 1992; **A**(10):1 072
- Ke S H, Wang R Z, Huang M C. *Phys Rev*, 1994; **B49**(15):10 495
- Van de Walle C G, Martin R M. *Phys Rev*, 1986; **B34**(8):5 621
- Bachelet G B, Haman D R, Schluter M. *Phys Rev*, 1982; **B26**(8):4 199
- Haman D R, Schluter M, Chiang C. *Phys Rev Lett*, 1979; **43**(20):1 494

- Chadi D J, Cohen M L. *Phys Rev*, 1973; **B8**(12):5 747
- Pollak F H, Cardona M. *Phys Rev*, 1968; **172**(3):816
- Colombo L, Resta R, Baroni S. *Phys Rev*, 1991; **B44**(11):5 572



王仁智(Wang Renzhi) 1935 年生, 教授, 中国高等科学技术中心协联成员。1960 年厦门大学物理系毕业, 留校任教。主要从事半导体电子态理论计算研究, 已在国内外重要刊物上发表论文 50 余篇。

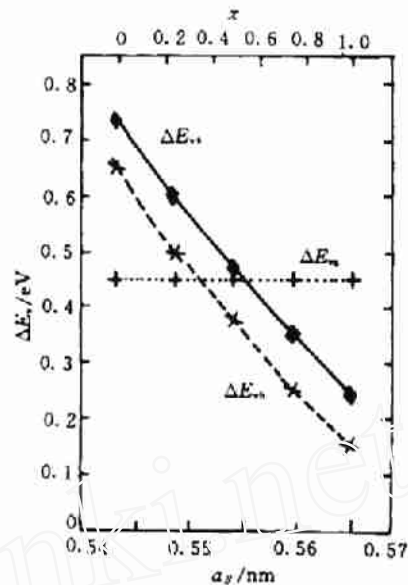


图 2 Ge/Si 应变层异质结价带偏移  $\Delta E_{v0}$ 、 $\Delta E_{v1}$  和  $\Delta E_{v2}$  随平行晶格常数  $a_{\parallel}$ 、合金组分  $x$  的关系



**黄美纯 (Huang Meichun)**  
1937年4月生。教授,博士生导师,高等科学技术中心协联成员,厦门大学物理系副主任,国家自然科学基金数理科学部评审组成员,《发光学报》编委,《厦门大学报》副主编,为1987年(北京)国际发光学术会议组织委员会成员和1993年(厦门)第19届国际统计物理会议组织委员会副主席。



**柯三黄 (Ke Sanhuang)** 29岁,厦门大学物理系博士,美国AAAS国际会员,CCAST协联成员,在固体电子成态研究领域,已在国内外重要刊物上发表论文三十余篇。



## 新结构高性能

### $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.71}\text{As}/\text{GaAs}$ HEMT

研究证明,  $\text{InGaAs}$  HEMT 的结构优于  $\text{GaAs}$  MESFET 和习用的  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  HEMT。在  $\text{GaAs}$  上制备的赝配结构 HEMT (PM-HEMT) 现已适合于商用,并在低噪声放大器 (LNA) 和功率放大器领域显示出极佳的性能。在毫米波 LNA 方面,以  $\text{InP}$  为衬底的晶格匹配 HEMT (LM-HEMT) 也显示出了世界纪录的性能。但这些器件尚存在下列缺点与局限性:

在 PM-HEMT 方面,为了获得优质层,铟的含量被限制在 25%—30%。这样,导带的不连续性  $\Delta E_c$  就局限于 0.35 eV 左右,单结的薄层载流子密度也限制在  $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。此外,当铟含量相同时,应变  $\text{InGaAs}$  中的电子迁移特性(迁移率、峰值速度等)比松弛的 (relaxed)  $\text{InGaAs}$  中的低。实验和蒙特卡洛计算均证明,PM-HEMT 沟道中的电子迁移特性与常规  $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$  HEMT 的相似。在 LM-HEMT 方面,功率性能受到低值  $\text{InGaAs}$  带隙 (0.75 eV) 的限制,因为当漏极电压高于 1.5 V 时,就会引起碰撞离化。另外,  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  的内建电势相当低 ( $V_b: 0.55 \text{ V}$ ),肖特基势垒的质量也相当差。

据《Jap. J. Appl. Phys.》第 33 卷第 6 期报道,为了克服器件的上述缺点, Passal Win 等研制成一种变性结构 (Metamorphic-MM) HEMT (MM-HEMT)。器件生长采用 MBE 工艺。与往常不同的是  $\text{GaAs}$  衬底上长有松弛的变性  $\text{In}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  缓冲层 (如图 1 所示),以便生长晶格匹配的  $\text{In}_{x}\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{In}_{y}\text{Al}_{1-y}\text{As}$  体系 ( $x$  和  $y$  接近 0.30)。有源层生长在 MM 缓冲层上 (如图 2 所示),衬底温度为 500 °C。这样生长的有源层具有下述优点:①由于导带的不连续性

强 ( $\Delta E_c: 0.65 \sim 0.7 \text{ eV}$ ) 而导致高的薄层载流子密度和良好的电子制约;②大带隙的  $\text{InAlAs}$  提高了肖特基势垒的质量;③无应变材料能产生更高的电子速度;④大的  $\text{InGaAs}$  带隙提高了漏极工作电压,减弱了碰撞离化。器件的铟含量接近 30%。在 77 K 下,当二维电子气的密度为  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时,电子迁移率高达  $25\,000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。当  $V_b = 0.68 \text{ V}$  时,  $\eta = 1.1$ ; 当栅长为 0.4  $\mu\text{m}$  时,器件的本征跨导高达  $700 \text{ mS/mm}$ ,  $f_t = 45 \text{ GHz}$ ,  $f_{\text{max}} = 115 \text{ GHz}$ 。当栅长为 0.2  $\mu\text{m}$  时, 18 GHz 下的  $NF_{\text{min}} = 1.1 \text{ dB}$ 。据作者称,就亚微米栅  $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  HEMT 而言,这是迄今报道的最好性能。

(曲兰欣)

450 nm	$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	undoped
100 nm	Graded $\text{InGaAs}$	undoped
	$x: 0.15 \rightarrow 0.3$	
450 nm	$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$	undoped
50 nm	$\text{GaAs}$	undoped
(001)S. I. GaAs substrate		
(a)		
450 nm	$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	undoped
100 nm	$\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.71}\text{As}$	electron-supply layer
3 nm	$\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.71}\text{As}$	undoped
100 nm	$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	undoped
200 nm	$\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.71}\text{As}$	undoped
Metamorphic buffer		
变性结构缓冲层		
(001)S. I. GaAs substrate		
(b)		

图 1 变性缓冲层的截面图

10 nm	$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	undoped
$\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.71}\text{As}$ electron-supply layer		
3 nm	$\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.71}\text{As}$	undoped
100 nm	$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	undoped
200 nm	$\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.71}\text{As}$	undoped
Metamorphic buffer		
变性结构缓冲层		
(001)S. I. GaAs substrate		

图 2 MM-HEMT 的有源层截面图