

简化过程,这正是利用微重力环境的主要动机.分析微重力条件下产生的火焰,可了解燃烧及其扩展的细节.为防火灾,轨道飞行中对燃烧的研究得到航天器舱内气压和材料的选择标准.灭火概念,表明了这种实验的可行性,消除自然对流对得到燃烧的明确概念和研究模式有助.对认识和利用燃烧都是有益的.

事实上,微重力下的液滴燃烧实验是近代微重力实验的先驱.日本人 Kumagai S.和 Isoda H.利用自由落体技术,进行了多次燃料液滴微重力实验,其结果在1957年召开的第6次国际燃烧会议上发表了.后继者在飞机、火箭、航天器上多次实验,不但提出了实验兼容的问题,并纳入空间站初期轨道能力(IOC)任务及其后的计划中.

参 考 文 献

[1] 王景涛.物理,1998,27:392 [WANG Jing-Tao. Wuli (Physics),1998,27:392(in Chinese)]

- [2] 王景涛著.微重力应用导引.北京:中国科学技术出版社,1988 [WANG Jing-Tao. An Introduction to Microgravity Application. Beijing: China Science and Technology Press, 1988 (in Chinese)]
- [3] 林兰英,柯俊,马俊如主编.中国微重力科学与空间实验——首届学术讨论会论文集.北京:中国科学技术出版社,1988 [LIN Lan-Ying, KE Jun, MA Jun-Ru (editors in chief). Proceedings of the First Chinese Symposium on Microgravity Science and Space Experiments. Beijing: China Science and Technology Press, 1988 (in Chinese)]
- [4] 胡文瑞.物理,1996,25:453 [HU Wen-Rui. Wuli (Physics), 1996,25:453 (in Chinese)]
- [5] H. U. Walter (法) 主编.葛培文,王景涛等译.空间流体科学与空间材料科学.北京:中国科学技术出版社,1991 [H. U. Walter (editor). Ge Pei-Wen, Wang Jing-Tao translate into Chinese. Fluid Science and Materials Science in Space. Beijing: China Science and Technology Press, 1991 (in Chinese)]
- [6] Herring R. A. QUELD Program on Mir, Microgravity Sciences. Canadian Space Agency, Sept. 1997
- [7] Feuerbacher B, Hamacher H, Naumann R. J. Materials Sciences in Space. Springer Verlag, 1986

GaAs 表面硫钝化研究新进展*

谢长坤 徐法强 徐彭寿

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘 要 GaAs 及其他 III-V 族半导体表面钝化一直是人们感兴趣的研究课题,在半导体器件制造工艺的发展中起着重要的作用,文章着重从钝化方法和钝化机理两方面简单地回顾了近年来 GaAs 表面硫钝化的最新研究进展.

关键词 GaAs,钝化,表面复合,光致发光

RECENT DEVELOPMENTS IN GaAs SURFACE PASSIVATION BY SULFUR

XIE Chang-Kun XU Fa-Qiang XU Peng-Shou

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science & Technology of China, Hefei, 230029)

Abstract Surface passivation of GaAs and other III-V semiconductors plays an important role in the development of semiconductor devices. Recent developments of the sulfur passivation of GaAs surfaces are briefly reviewed from the aspects of both methodology and mechanism.

Key words GaAs, passivation, surface recombination, photoluminescence

1 引言

化合物半导体 GaAs 是直接带隙半导体,具有高的电子和空穴迁移率,是制造高速半导体器件和光电子器件的优良材料.由于 GaAs 和其他 III-V

族半导体表面空气氧化以及金属与 III-V 族半导体接触,将导致很高的表面和界面态密度,钉扎了费米能级,限制了 GaAs 基器件和其他 III-V 族半导体器件的发展^[1,2],因而 GaAs 的优良特性在半导体器

* 2000-04-26 收到初稿,2000-06-05 修回

件中未能充分发挥作用.其重要原因之一是 GaAs 和其他 III-V 族半导体表面钝化技术没有完全解决.

对硅器件来说, SiO_2 是一种非常理想的钝化膜, Si/SiO_2 界面有非常低的态密度和好的化学稳定性.而 GaAs 自体氧化物不能满足半导体钝化膜的两个基本要求:一是电子钝化(降低表面态密度),二是化学钝化(提高稳定性).因此采用自体氧化物是行不通的,必须采用其他材料作钝化层. GaAs 表面的硫处理被认为是迄今为止进行表面钝化的最为有效的方法.1987 年, Sandroff 等^[2]首先提出了 GaAs 表面的硫钝化方法.他们用 $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液来钝化 GaAs 异质结双极型晶体管(HBT)器件,使 HBT 的小电流放大系数提高达 60 倍,钝化后的样品的光致发光(PL)强度增加了 250 倍.为提高钝化层的性质,以后又发展了许多硫化物处理 GaAs 表面的方法.其中 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ ^[3]、 S_2Cl_2 ^[4]、硫醇^[5]等化学处理不仅能改善 GaAs 表面特性,并且在器件运用方面得到了证实^[6].例如 HBT 小电流增益有显著提高,高电子迁移率晶体管(HEMT)的实现成为可能,激光器可靠性有很大的改善,并使某些类型激光器光电响应特性有明显的改善.更为激动人心的是,成功制作了 GaAs 金属绝缘体半导体场效应晶体管(MISFET).有关 GaAs 和其他 III-V 族化合物半导体表面的钝化技术一直在不断发展和改进,人们通过对钝化后表面原子结构和电子结构的研究,探讨钝化膜的形成机制,并想方设法提高硫钝化层的稳定性.本文的主要内容就是介绍 GaAs 硫钝化研究方面最近几年的发展与现状.

2 GaAs 表面硫钝化方法

在对 GaAs 表面钝化技术的研究中,人们主要关注其钝化效果的稳定性、寿命及器件技术应用的可行性.自 1987 年以来,已经有几十种钝化方法被发展起来了.这些方法主要分为两类,即化学钝化和加保护层钝化.

2.1 化学钝化

所谓化学钝化即利用硫化物在水或其他溶剂中形成的溶液对 GaAs 表面进行钝化.最初 Sandroff 等^[2]将 $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 滴在高速旋转的 GaAs 异质结双极二极管 HBT 器件上,器件上形成一层无色晶状膜,使得 HBT 小电流增益提高 60 倍,降低表面复合速度至 500cm/s .虽然 $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 对 GaAs 表面具

有钝化作用,但钝化层是 Ga 和 As 的氧化物和硫化物的混合层,在空气中不稳定;另外 $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 钝化后表面含有 Na 等金属离子,对工艺不利,如用水洗,则 PL 强度会大大降低,造成钝化失效.

因此,现在采用较多的钝化方法一般是把预处理后的样品浸泡在 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液中^[3]进行水浴加热, Ga 和 As 的氧化物以及硫化物都能溶解在 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液中.溶液中的 S^{2-} 离子与 GaAs 表面相互作用并反应生成 Ga 和 As 的硫化物钝化层. Yuan 等^[7]发现中性 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液与碱性 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液相比,较低的 pH 值可抑制生成的硫化物在溶液中的溶解能力,并可以产生较厚的 Ga 硫化物层和较强的 Ga-S 键, Ga 的硫化物有较好的稳定性,且该方法有更低的腐蚀速率,所产生的腐蚀坑数目少,直径小,有较好的平整度,这对实际工艺是非常有用的. Bessolv 等^[8]研究发现溶剂对离子化学反应的路径和动力学有很大影响.实验表明, $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 的 $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ 溶液比水溶液有更好的钝化效果,可更有效地去除表面氧化物和形成硫化物.由于醇溶液的介电系数较低,有利于 S 与 GaAs 表面原子形成共价键,其钝化的 GaAs 表面具有较低的态密度.

本研究小组^[9]发明了一种新的硫钝化方法,即有机小分子硫代乙酰胺(CH_3CSNH_2)与 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 或盐酸配置成酸性和碱性钝化液钝化 GaAs 表面, CH_3CSNH_2 在酸性或碱性溶液中水解形成的 HS^- 和 S^{2-} 离子与 GaAs 表面作用,有效地去除表面氧化物层,形成稳定的硫化物钝化层.如图 1 所示,经钝化后, GaAs 表面自体氧化物 Ga_2O_3 和 As_2O_3 消失,并形成 Ga 和 As 硫化物覆盖层,且在碱性溶液比在酸性溶液中更易生成 Ga 和 As 的硫化物.在此基础上, S 钝化对 GaAs(100)表面上生长的铁磁性金属薄膜磁性的影响研究表明^[10], S 钝化后在 GaAs(100)表面形成的 GaS 钝化层与 Fe 薄膜产生界面反应,削弱了 As 与 Fe 的相互作用,并阻止 As 向 Fe 外延层扩散,从而增强了 GaAs 表面铁薄膜的磁性.钝化表面退火处理的研究表明, As 硫化物很不稳定,与衬底 GaAs 反应,转化为稳定的 Ga 硫化物,该硫化物表面层在 $460\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温下仍有较高的热稳定性^[11].此种方法与其他钝化方法相比,操作简单,不存在其他金属杂质离子的干扰,也无毒害性气体产生,可以说是实际半导体器件工艺过程的比较理想的钝化方法.

最近 Sun 等^[12]采用 $\text{SeS}_2:\text{CS}_2$ 溶液钝化 GaAs(100)表面也取得较好的结果.研究表明,钝化

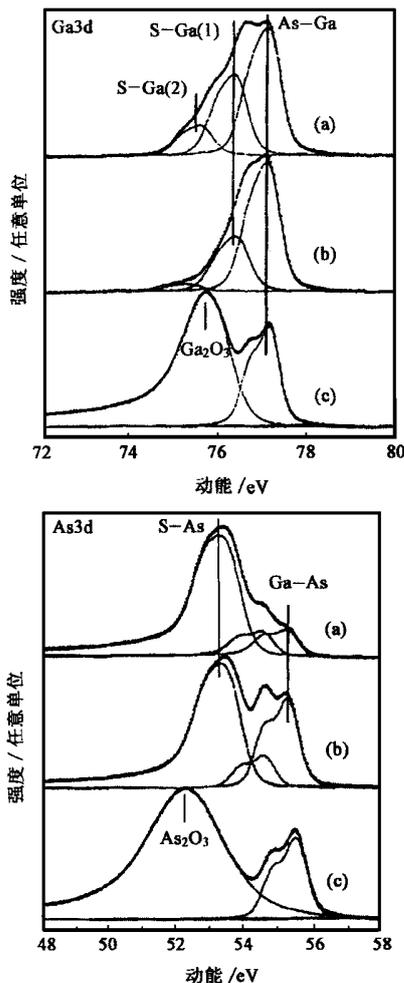


图1 不同化学处理的 GaAs(100)表面经曲线拟合的 Ga3d 和 As3d 谱
 (a) $\text{CH}_3\text{CSNH}_2/\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 溶液里钝化 10 min, $h\nu=100\text{eV}$;
 (b) $\text{CH}_3\text{CSNH}_2/\text{H}^+$ 溶液里钝化 10 min; (c) 酸腐蚀的表面

后可去除能隙中央 (midgap) 表面态密度,降低表面复合速率或减少表面电荷密度,因而增强 PL 强度.根据 XPS 实验结果,提出一种化学层状结构模型 $\text{S}-\text{S}/\text{As}-\text{S}$ 、 $\text{Se}-\text{S}/\text{Ga}-\text{Se}/\text{GaAs}(\text{Substrate})$. Ga_2Se_3 与 GaAs 晶格匹配很好,可以消除因表面应力和结构无序而引起的能隙态密度.作者认为,利用多个叠加层是钝化 GaAs 表面的一个方法.第一层是以 $\text{S}-\text{S}$ 键为结尾的表面,第二层抑制了表面与环境的反应而提供了一个保护层.表面 S 吸附层和富 As 区都可保护下面的钝化层,免受空气和其他化学环境的影响.此方法处理的表面可在空气中几个月内保持稳定,表面费米能级仅有可忽略的移动.赝势计算^[13]表明, S/GaAs 系统电子特性的钝化归功于 $\text{Ga}-\text{S}$ 键的形成, $\text{As}-\text{S}$ 键不降低带隙态密度.表面化学环境决定表面复合速度和表面态密度,因此,其 PL 强度的增强和能带弯曲的降低应归功

于 $\text{Ga}-\text{Se}$ 键的形成.此种方法不仅产生了表面电子钝化效果,而且钝化层能防止表面与环境发生反应.

以上所介绍的钝化过程是在溶液中进行的,通常又称为“湿法”钝化.此外,有人采用非溶液的钝化方法,通常称为“干法”钝化.例如 Conrad 等^[14]用 SXPS 研究了通过 H_2S 气体热分解实现 S 在 GaAs 表面的热与光化学淀积.当衬底温度大于 550 K 时, H_2S 发生不可逆分解,在 GaAs 表面实现 S 淀积.大于 700 K 时,表面具有 (2×1) 有序重构,形成 GaS 双分子层结构. Shen 等^[15]利用电子回旋共振化学气相淀积 (ECRCVD) 系统对 n 型 GaAs 表面进行 H_2S 等离子体钝化,光反射谱 (PR) 的研究发现,钝化后表面费米能级向导带移动,并且表面态密度从 10^{13} 降至 $6\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$,这说明表面态密度的减少使费米能级解除钉扎.由此可见, $\text{Ga}-\text{S}$ 的形成在等离子体钝化的表面具有重要作用.用此方法进行钝化,几个月后重复进行 PR 测试,没有观察到钝化效果发生变化.

2.2 加保护层钝化方法

通过化学处理使得半导体表面产生钝化层的方法已取得了一定的成功,大量的研究工作都证实了化学处理可显著地改善 GaAs 表面性质以及 GaAs 器件的性能.但化学钝化存在的主要问题是其硫钝化效果往往不稳定,特别在有 O 的大气环境和有光照的条件下,会导致钝化效果失效.要解决硫钝化不稳定问题的关键是如何在 GaAs 表面得到厚的硫化层以抵御氧对 GaAs 表面的再氧化,于是人们采用在半导体表面生长一层绝缘层,使 GaAs 表面与大气环境隔离,阻止表面与环境的化学反应,以达到钝化的目的.哈佛大学 MacInnes 等^[16]利用 $[(\text{t-Bu})\text{GaS}]_4[(\text{t-Bu})-\text{C}(\text{CH}_3)_3]$ 有机分子在 GaAs 表面上淀积了 GaS 薄膜,获得很稳定的钝化效果,解决了常规硫钝化存在的不稳定性问题,并实现了 n 型沟道耗尽型的 GaAs MISFET^[17].该器件电子迁移率为 $4665.6\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,接近于 GaAs MISFET 的电子迁移率;该 GaS 钝化膜带隙为 3.5 eV,电阻率为 $10^9\Omega\cdot\text{cm}$,基本上达到了理想栅绝缘层的条件(高带隙、低电导、高击穿电场、良好的界面特性等),可以实现 GaAs MISFET.可见在 GaAs 表面上自体生长 GaS 薄膜是 GaAs 表面钝化的一条有效途径. Islam 等^[18]采用 GaS 晶体作为升华材料,利用 Bridgman 方法在 GaAs 表面生长 GaS 薄膜,低能电子损失谱 LEELS 显示了 GaS 淀积,并且在 350 °C 退

火后,与表面悬键相关的峰位立即消失,说明蒸发物质中 S 原子对 GaAs 表面悬键产生有效钝化, GaS 薄膜生长在以 S 层为结尾的 GaAs 表面.能带不连续性是半导体界面的最基本性质之一,利用 XPS 实验结果进行估算发现, GaS 与 GaAs 的价带顶之差仅 0.3eV,其能带对准性较好;PL 强度在 20h 内几乎不变(如图 2),这与常规 $(\text{NH}_4)_2\text{S}^{[19]}$ 钝化效果的迅速衰减形成强烈对比(见图 3).陈溪滢等^[20]用 S

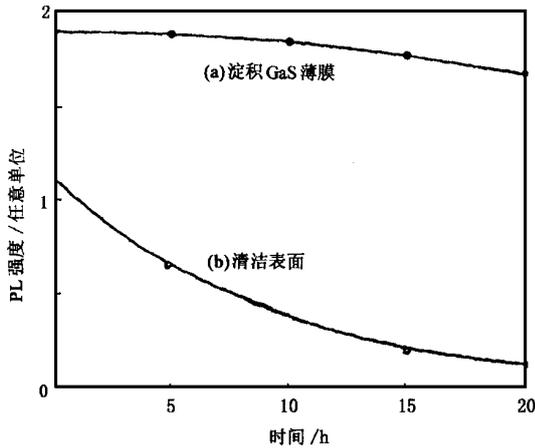


图 2 GaAs 表面 PL 强度随时间衰减图

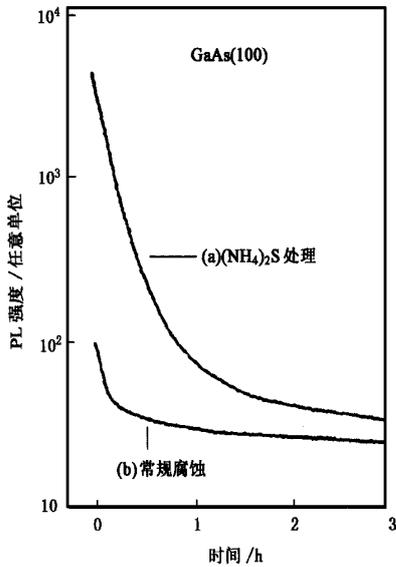


图 3 GaAs 表面 PL 强度随时间衰减图

气微波等离子体辉光放电法在 GaAs 衬底上生长出了具有较好电学性质的 GaS 薄膜.实验将衬底温度控制在 400 °C,利用 As—S 键的不稳定性使其自体生长出 GaS 薄膜,这与 Si 表面自体氧化生长 SiO_2 钝化薄膜相类似. Al/GaS/GaAs MIS 结构的 C-V 特性测试研究^[21]发现,在扣除 GaS 介电系数随频率的变化后, MIS 结构的电容值随频率变化不大,证实了 GaS/GaAs 界面有较低的表面复合速率和好的

钝化效果.但生长 GaS 的方法应用于实际尚存在一定困难,例如一个迫切需要解决的问题是目前还没有找到合适的栅金属电极与 GaS 有良好的粘附性,这直接关系到实际器件的成品率.最近 Hong^[22]等在 GaAs 表面外延生长非硫化物保护层也取得了成功.他们采用电子束蒸发方法在 GaAs(100) 表面外延生长具有(110)取向的单晶氧化钆薄膜(文章发表在《Science》上),研究发现氧化钆薄膜是性能良好的高绝缘材料,绝缘系数大约为 10,零电压下低漏电流为 $10^{-9} - 10^{-10} \text{ A/cm}^2$,4.5nm 厚薄膜击穿电场为 10 MV/cm, C-V 测试在能隙中央的界面态密度 $D_{it} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$,略高于 SiO_2/Si 界面态.另外他们还利用 $\text{Gd}_2\text{O}_3-\text{GaAs}$ 制造出性能良好的 GaAs MOSFET.以上说明,在 GaAs 表面生长保护层是一种有效的钝化方法,如果保护层/GaAs 界面具有较低的态密度,即可对 GaAs 表面实行有效的电子钝化和化学钝化.

3 表面钝化机理

半导体表面态与界面态及表面电子传输对半导体材料与器件的性质,尤其是对表面电导、热导和光学性质有重大影响.位于禁带中的表面能级能起到复合中心的作用,促进电子和空穴的复合,缩短非平衡载流子的寿命.一般认为,表面复合属于间接复合,是通过表面态对电子和空穴的俘获来实现.因此如果半导体表面态密度很大,就会存在很大的表面复合,这时,通过禁带之间跃迁而产生的直接复合过程的发光强度会大大降低.表面态密度的减小可导致表面复合速度的大大减小.根据半导体表面复合理论,表面复合速度^[23]

$$S \sim \left| \cosh \left[\frac{E_{is} - E_F}{k_B T} \right] + \cosh \left[\frac{E_{rs} - E_{is}}{k_B T} \right] \right|^{-1}$$

式中 E_{is} 为表面本征态能级, E_{rs} 为表面复合中心能级, E_F 为费米能级, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度.当 $E_{is} = E_F$, $n_s = p_s = n_i$,即表面处于本征态时,双曲余弦函数 $\cosh[(E_{is} - E_F)/k_B T]$ 具有极小值,相应地表面复合速度 S 具有极大值.同时当 $E_{is} = E_{rs}$,即表面复合中心能级位于禁带中央时,双曲余弦函数 $\cosh[(E_{rs} - E_{is})/k_B T]$ 也具有极小值.也就是说,位于禁带中央附近的复合中心其复合速度最大.所以硫钝化导致表面态密度减小或使表面态偏离禁带中央,解除表面态对费米能级的钉扎,可使表面复合速度减小,从而使直接的电子-空穴复合会大大增

加.这是钝化表面 PL 强度增强的微观机理.从化学观点看,表面态代表所谓软酸 Lewis 中心,容易捕获半导体导带电子,为钝化这些表面态,应该削弱其捕获半导体导带电子的能力.根据硬软酸碱原则,软酸能与软碱形成共价键.当共价键形成时,硫化物与表面态共享的电子云的非可变性(hardness of electron cloud)比分离个体高,即表面原子/离子抵御其电子云的电荷总量和电荷分布发生变化的能力增加,从而引起表面态活性降低,形成非活性的复合中心,导致表面复合速度的降低.硫离子正好属于软碱,因此适宜于 III-V 族半导体表面钝化.

当 GaAs 表面具有很高的表面态密度时,表面费米能级处于钉扎的状态.硫钝化的目的就是要减小表面态密度,减小表面势垒高度.在重掺杂极性半导体中,载流子将与晶格发生强烈的相互作用,LO 声子与自由电子等离子激元耦合,产生 LO 等离子激元耦合模 L^- .图4是钝化前后的拉曼谱^[8],LO 是来自表面耗尽层的纵光学声子模, L^- 是来自 GaAs 体材料的声子等离子激元耦合模.由于在 GaAs 表面存在表面态,引起电子输送,在表面和靠近表面的区域形成了偶电层,即在近表面附近形成了空间电荷层,这样半导体表面和体内的电势差构成了表面势,形成了能带弯曲.当 GaAs 表面存在很强的表面态时,在 GaAs 表面存在表面耗尽层,拉曼散射测得表面耗尽层的 LO 模,当拉曼散射激发光

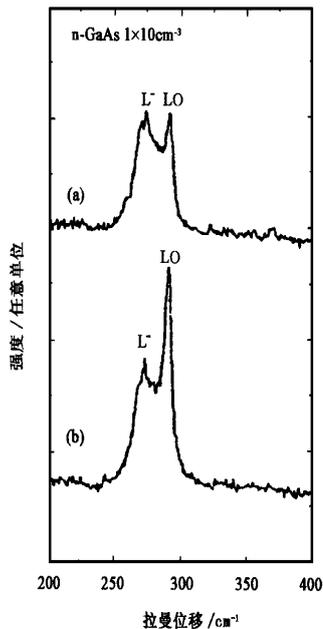


图4 GaAs 表面拉曼谱
(a) $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 醇溶液处理; (b) 未处理

穿透深度超过表面耗尽层厚度时,拉曼散射就可测得 L^- 模.由图4可见,钝化后 LO 模强度减小, L^- 模强度增大,说明硫钝化使 GaAs 表面态大大降低,表面电荷减少,表面耗尽层厚度减小,从而减小能带弯曲.

自 Sandroff 等^[21]利用硫化物溶液对 GaAs 表面进行化学处理导致表面电子特性提高以来,硫钝化技术引起人们广泛的关注.但钝化后表面结构和钝化机制尚不十分清楚.几个理论研究证实, Ga-S 键在钝化机制中具有主要作用. Ren 和 Chang^[24]讨论了 GaAs(001) 表面以 As 结尾的不同结构模型,发现所有含 As-S 键的模型都不能满足电子计数规则^[25](因每个键由两个电子所饱和,故每个原胞含奇数个电子的表面是金属性的,而含偶数个电子的表面是绝缘性的); Ohno^[13]利用局域变分的理论方法和 Slab 模型计算了 S/GaAs 界面的电子结构,发现 As-S 键在 GaAs 禁带中引入大量的表面态,而 Ga-S 键则有利于降低禁带内的表面态密度; Hirsch 等^[26]利用局域态密度近似(LDA)和自能的 GW 近似下的准离子能带结构计算发现,图5(a)是

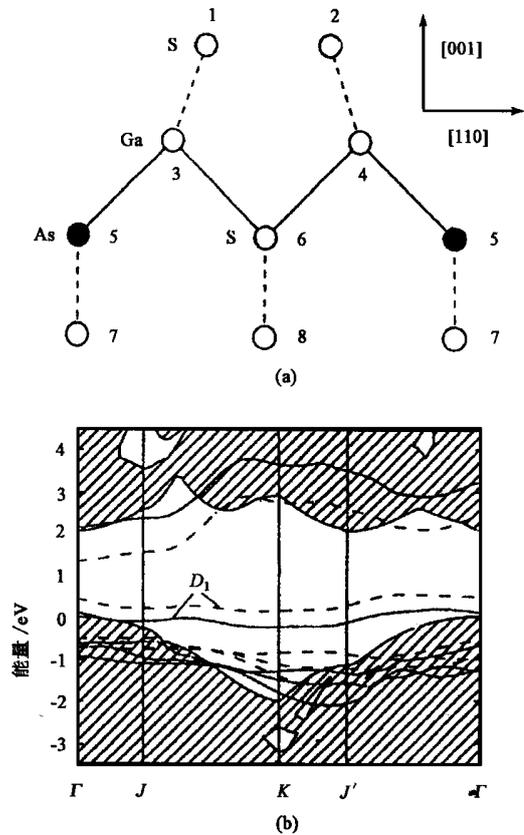


图5
(a) S/GaAs(001) - 2×1 表面最稳定结构模型; (b) 图5(a)能带结构[GW(LDA)计算出硫致表面态(实线、虚线所示)]

S/GaAs 系统最稳定的结构模型:单层硫原子吸附在以 Ga 结尾的衬底表面,衬底的第二层原子每第二个 As 原子由 S 代替,其表面是非金属性的,符合电子计数规则.其能带结构如图 5(b) 所示,其中斜线部分是体能带,实线和虚线是单位晶胞两个 S 原子的桥键和悬键态相互作用形成的两个对称态和反对称态;在严格的准粒子修正下,体能带和低的未占有能带相对价带顶 VBM 上移,占有态相对 VBM 下移,形成没有表面态的带隙,与实验结果一致.

4 结语

GaAs 及其他 III-V 族半导体表面钝化的研究一直是各国物理学界非常重视的问题,关于这方面的文章发表了数百篇,产生专利几十个.由于化学钝化所生成的钝化层太薄,无法抵御氧对它的破坏,于是人们采用在化学处理之后的表面沉积 SiN_x , SiO_2 等薄膜^[15],使得钝化层与大气隔离,这样处理的器件在数月后重复测试,没有观察到退化,这与加保护层钝化方法相似,但两者的长期稳定性仍然是一个需要解决的问题,因此一直未能将 GaAs 表面钝化技术运用于实际当中.人们一方面要通过各种表面分析手段结合理论计算研究硫与砷化镓表面的相互作用,以弄清硫钝化的机理;另一方面则应致力于寻找能改善硫钝化稳定性的方法,以期使这种技术推向实用化.化学和加保护层等多种钝化方法相结合是解决当前问题的有效办法,化学钝化可改善表面界面特性,降低表面态密度,加保护层钝化可提高表面稳定性,防止钝化效果退失,如何将这些钝化方法结合起来以得到最好的钝化结果是今后研究工作中所要集中解决的问题.不难设想,如果硫钝化能够发展成为一种实用技术,则对于砷化镓及其他 III-V 族半导体工业的发展会起到重要的推动作用.

参 考 文 献

- [1] 李哲深,王迅.物理学进展,1995,15:218 [LI Zhe-Shen, WANG Xun. Progress in Physics, 1995, 15: 218 (in Chinese)]
- [2] Sandroff C J, Nottenburg R N, Bischoff J C *et al.* Appl. Phys. Lett., 1987, 51: 2022
- [3] Spindt C J, Liu D, Miyano K *et al.* Appl. Phys. Lett., 1989, 55: 861
- [4] Li Z S. Appl. Phys. Lett., 1994, 64: 3425
- [5] Lunt S R, Santangelo P G, Lewis N S. J. Vac. Sci. Technol. B, 1991, 9: 2333
- [6] 袁泽亮,侯晓远,王迅.物理,1998,27:349 [YUAN Ze-Liang, HOU Xiao-Yuan, WANG Xun. Wuli (Physics), 1998, 27: 349 (in Chinese)]
- [7] Yuan Z L, Ding X M, Hu H T *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 71: 3081
- [8] Bessolov V N, Lebedev M V, Ivankov A F *et al.* Appl. Sur. Sci., 1998, 133: 17
- [9] Lu E D, Zhang F P, Xu S H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 2282
- [10] Xu P S, Zhu C G, Zhang F P *et al.* J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom., 1999, 101-103: 507
- [11] Lu E D, Xu F Q, Sun Y M *et al.* J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom., 1999, 101-103: 4290
- [12] Sun J, Seo D J, O'Brien W L *et al.* J. Appl. Phys., 1999, 85: 969
- [13] Ohno T. Surf. Sci., 1991, 155: 229
- [14] Conrad S, Wullons D R, Xin Q S *et al.* Appl. Sur. Sci., 1996, 107: 145
- [15] Shen H, Zhou W, Pamulapati J. Appl. Phys. Lett., 1999, 74: 1430
- [16] MacInnes A N, Power M B, Barron A. Appl. Phys. Lett., 1993, 62: 711
- [17] MacInnes A N *et al.* Science, 1994, 263: 1751
- [18] Islam A, Lim K K, Tambo T *et al.* Surf. Sci., 1998, 416: 295
- [19] Oigawa H, Fan J, Nannichi Y *et al.* Extended Abstracts of the 1988 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, 1988. 263
- [20] 陈溪滢,丁训民,张胜坤等.物理学报,1997,46:612 [CHEN Xi-Ying, DING Xun-Min, ZHANG Shen-Kun *et al.* Acta Physica Sinica, 1997, 46: 612 (in Chinese)]
- [21] 陈溪滢,曹先安,丁训民等.物理学报,1997,46:826 [CHEN Xi-Ying, CAO Xian-An, DING Xun-Ming *et al.* Acta Physica Sinica, 1997, 46: 826 (in Chinese)]
- [22] Hong M, Kwo J, Kortan A R *et al.* Science, 1999, 283: 1897
- [23] 顾祖毅,田立林,富力文.半导体物理学.北京:电子工业出版社,1995. 213-215 [GU Zu-Yi, TIAN Li-Lin, FU Li-Wen, Physics of Semiconductor, Beijing: Electronic Industry Press, 1995. 213-215 (in Chinese)]
- [24] Ren S F, Chang Y C. Phys. Rev. B, 1990, 41: 7705
- [25] Pashley M D. Phys. Rev. B, 1989, 40: 10481
- [26] Hirsch G, Kruger P, Pollmann J. Surf. Sci., 1998, 402-404: 778