



·学部委员黄昆教授主持·

# 化合物半导体— 绝缘体界面的界面态

·何力·

编者按：为了表彰我国年青的物理学家所作出的突出贡献，本刊新辟《青年物理学家论坛》栏目。本期由国际著名物理学家黄昆教授主持，他亲自审阅何力这篇文章，认为“这篇文章内容比较丰富，阐述也是扼要清晰可读的，可以发表”。何力于1982年赴日本留学，1985年在东京电气通讯大学获硕士学位，1988年在北海道大学获博士学位。他在半导体化合物的界面态研究方面取得了出色的成果，在已发表的近30篇论文有5篇发表在国际一级杂志上。他的导师长谷川机教授称赞他是一位富有想象力的优秀科学家。他在1989年度的863高技术任务完成情况评比中获得专家组的最高评分，并于1990年获德国洪堡奖学金，现已赴德继续从事 HgCdTe 分子束外延与超晶格的研究工作。

由于化合物半导体材料具有许多比硅材料更加优越的电学和光学性质，近二十年来用化合物半导体材料研制新一代超高速器件和光电器件的发展十分迅猛。特别是超晶格量子阱技术的建立与发展为化合物半导体材料开拓了更加广阔的应用前景。我们知道，任何平面工艺器件都离不开绝缘体-半导体 ( $I-S$ ) 界面作为半导体器件表面的钝化保护。如果在  $I-S$  界面上存在高密度的界面态，则将导致载流子在半导体表面的复合速度加大，严重影响半导体器件的工作。在利用  $I-S$  界面作为器件工作区的金属-绝缘体-半导体 (MIS) 场效应器件中， $I-S$  界面问题则更为至关重要。高密度的界面态将影响器件表面沟道的形成，并大大降低器件的工作速度。随着器件尺寸不断向精微化、高集成化方向发展，器件  $I-S$  界面对器件体积比将不断提高，界面对器件的影响将越来越大。因此，对化合物半导体界面性质的理解，对界面态的控制问题已经成为当前化合物半导体技术中迫切需要解决的重要课题。

在过去 15—20 年内，人们主要以砷化镓，磷化铟等材料为中心，用表面分析，电学光学等测试手段对  $I-S$  界面进行了大量的研究。在这些工作中，人们认识到低温淀积绝缘介质工艺的重要性，建立了阳极氧化，等离子阳极氧化，化学气相淀积 (CVD)，等离子 CVD，光激励 CVD 等绝缘介质的形成新工艺，为现代化合物半导体界面技术奠定了基础。本文将从化合

物半导体界面的一般电学特征及这些特征与界面态的关系入手，介绍目前对界面态起源及其分布性质的理解和抑制界面态，改善界面性质的一些新尝试。

## 一、化合物半导体 $I-S$ 界面的基本电学特征

化合物半导体  $I-S$  界面一般存在较高密度的界面态。界面态对  $I-S$  界面的电学性质的作用将最直接地反映在化合物半导体 MIS 结构的电容特性上。在对界面态的研究中，人们发现化合物半导体 MIS 结构的电容-电压 ( $C-V$ ) 特性曲线通常伴随着滞后效应，如图 1 所示。当栅极电压改变其扫描方向时，电容曲线在电压轴上发生移动。图 1(a) 型的滞后称为“注入型”滞后，是由于界面上的电荷与直流偏压  $V_c$  达到平衡状态所需的滞后时间较大引起的。一般认为这种滞后效应是在栅压  $V_c$  扫描过程中，半导体载流子“注入”到界面附近某些性质不同的电荷陷阱，即所谓“慢

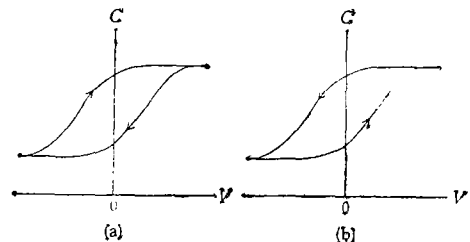


图 1 MIS  $C-V$  曲线的滞后效应。(a) 注入型滞后，(b) 离子迁移型滞后

界面态”所致。图 1(b)型滞后称为“离子迁移型”滞后,是由于栅压  $V_G$  的作用使绝缘介质中的电荷发生迁移所致。这类滞后通常在介质漏电较大,致密性不好的情况下发生。在制备工艺较为成功的化合物半导体 MIS 结构中,图 1(a)所示的注入型滞后(以后简称滞后)是通常观测到的普遍现象,也是  $I-S$  界面的基本电学特征之一。近年来的大量系统的实验表明: $C-V$  曲线滞后的大小以及曲线的形状与测试条件有十分复杂的依赖关系,随器件的初始状态,栅极电压的扫描范围、速度、方向等不同而发生变化。我们知道, $C-V$  曲线是研究、评价界面态的重要手段。滞后效应的存在为研究界面态的密度、分布带来了巨大的障碍。即使是同一个样品, $C-V$  曲线因测试条件的不同而产生差异。由于测试条件的不同,即使在同样的界面上所得出的评价结果会相去甚远。甚至有时界面态密度相差 2 个数量级也不足为奇。长期以来, $C-V$  曲线的滞后效应为界面态的评价、改善界面工艺带来了巨大的困难。正确地认识滞后效应的起因以及和界面态的相互关系是一个必须解决的重要问题。

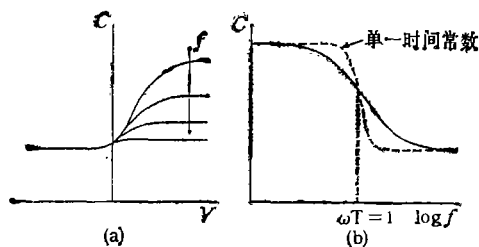


图 2 化合物半导体 MIS 电容的频率色散。(a)  $C-V$  曲线上的频率色散, (b) 电容-频率特性。

化合物半导体  $I-S$  界面的另一个重要特征是 MIS 电容的异常频率色散,这点可从图 2(a)所示的  $n$  型半导体的  $C-V$  曲线中看出。在多数堆积一侧的 MIS 电容值随测试信号频率的升高从低频极限值  $C_{max}$  向高频极限值  $C_{min}$  减小。如图 2(b)所示, MIS 电容的频率色散范围比用单一界面态时间常数所描述的范围更宽,这个现象称为“时间常数的频率色散”,是在化合物半导体  $I-S$  界面中观测到的普遍现象。频率色散效应在 SiMOS 界面上用电导测试方法也可观测到。Nicollian 和 Goetzberger 从界面态是局域在  $I-S$  界面处的能量上的连续分布体的观点出发,考虑到界面上的电荷,半导体中掺杂的起伏涨落的影响,提出了解释色散效应的“统计学模型”,很好地说明了 SiMOS 电容的色散效应,得到人们的普遍接受。但当该模型推广到化合物半导体界面时却遇到了很大的困难。在化合物半导体  $I-S$  界面上的大量研究表明“统计学模型”所得出的理论结果与实验结果不能吻合。

与这些效应相关,化合物半导体  $I-S$  界面的另一

特征是 MIS 场效应晶体管(FET)的漏极电流随时间的漂移现象。在栅压一定时,漏极电流随时间逐渐减小,严重地影响了化合物半导体在 MISFET 上的应用。

在化合物半导体  $I-S$  界面上观测到的这些电学特征,十分显然是与化合物半导体界面态的性质密切相关的。但以前这二者之间的相互关系,作用机制一直没有在实验上、理论上得到澄清,对这些界面现象的解释也是相互孤立,互不关联。一般认为, $C-V$  曲线的滞后效应起因于介质层中由于化学键缺陷等因素引起的某些局域的“慢界面态”;而时间常数色散则起因于界面处半导体悬挂键引起的在能量上连续分布的“快界面态”。因而, $I-S$  界面态由两类起因不同,性质不同的“快态”和“慢态”组成。在实验上, $C-V$  曲线的滞后电压反映出“慢态”的密度大小,而  $C-V$  曲线的形状则给出“快态”密度的多少。这种对实验现象的孤立解释和对界面态的理解很难与从实验中得到的结果相吻合。这些现象与界面态的关系无法得到一个完整的、统一的理解,这为正确评价界面和进一步控制界面性质带来了很大的困难。为了克服上述困难,必须对界面态的起源及其性质做更加深入的研究探索。

## 二、界面态的起源

在总结了在不同化合物半导体  $I-S$  界面上获得的大量实验结果的基础上,人们发现化合物半导体界面态有以下几个特征:界面态在禁带能量上呈  $U$  字形分布,界面态密度的大小与界面形成工艺相关;界面态电中性点的能量值与半导体材料相关;界面态具有分布范围非常广的时间常数; $I-S$  界面和半导体-半导体( $S-S$ )界面的电中性能量,以及金属-半导体( $M-S$ )界面的费米能级钉扎位置有强烈的一致性。

正确的界面态起因模型必须能对上列特征作出圆满的说明。目前,在化合物半导体界面态的起因机制上,占主流地位的主要是以下三个模型。

A. “等效功函数模型”: 1981 年 Woodall 和 Freecout 提出在  $I-S$  界面处形成的界面过渡层中的结合键缺陷(如悬挂键)和原子析出物是界面态的起源。如在 GaAs-氧化物界面上, GaAs 和  $As_2O_3$  反应所生成的 As 析出物。推广到  $M-S$  界面,该模型认为费米能级的钉扎能量是在金属膜形成工艺中引起的原子析出层的等效功函数所决定的。

B. “统一缺陷模型”: 1979 年 Spicer 等人提出界面态起因于界面形成工艺在半导体表面附近引起的点缺陷能级。他们在真空中解理得到的半导体清洁表面上,研究了在各种金属和氧化的表面吸附过程中表面费米能级的变化。结果发现费米能级变化的最终位置(钉扎能量)与吸附物质无关,从而提出吸附过程将导致半导体元素空位(如 GaAs 材料为 Ga 或 As 空位),这些空位缺陷在禁带中的特定能量上导入了高密度界



# 穆斯堡尔谱学三十年

K. J. Anderson

穆斯堡尔在阅读自己关于  $^{191}\text{Ir}$  共振的第一篇文章时突然意识到,他可以直接由多谱勒位移实验来确定自然宽度的谱线——他预见到会有一场竞争。他把文章送到在他看来“没有多少人阅读的德文《自然科学》杂志上”发表。当立即有二百多人来索取复印本时,他“迅速意识到这竟是犯了一个多么大的错误”。他因发现这种“无反冲  $\gamma$  射线共振吸收效应”,获得 1961 年诺贝尔物理学奖。

鲁道夫·路德维希·穆斯堡尔生于 1929 年 1 月 31 日。他在一些工业实验室花费了一年时间,后来进入慕尼黑工业大学,1952 年完成学位课程,1954 年完成了他的论文。1955—1957 年,他到马克斯-普朗克医学研究所从事研究工作,1958 年在慕尼黑工业大学获得博士学位。

穆斯堡尔的博士论文叙述了  $\gamma$  射线无反冲发射的实验。五年以前他就开始研究对  $\gamma$  射线在物质中的吸收,尤其是核共振吸收。

瑞利曾在 19 世纪预言过光共振,伍德 1904 年在钠的火焰中发现了光共振,1929 年(穆斯堡尔出生的那年)其他研究人员试图实现  $\gamma$  射线荧光而未获成功。

1946 年, Ya. I. 巴里特和 M. I. 波德戈雷斯基指出,发射  $\gamma$  射线时由于原子核的反冲造成能量损失,破坏了预期的  $\gamma$  共振。其他研究人员试图用加热或运动的办法来补偿反冲的能量损失——一种办法是把

$^{198}\text{Hg}$  加热到  $1100^\circ\text{C}$ ,另一种办法是让  $\gamma$  源沿靶的方向快速转动(试图使发射的  $\gamma$  射线发生蓝移\*,以回到共振能量),不过这些实验都没有成功。他们遇到的问题在于多谱勒谱线的热增宽的程度破坏了他们希望实现的高分辨率。这些实验在当时太困难了,除了少数核谱实验室外,感兴趣的人并不多。

1957 年,鲁道夫·穆斯堡尔在研究  $^{191}\text{Ir}$  的  $129\text{keV}$   $\gamma$  射线时发现,当他把发射源的温度从  $300\text{K}$  降低到  $88\text{K}$  时,共振吸收大大增加了,他猜想,只要温度降到足够低时,晶体中的原子便有效地“冻结”在晶格中,这样,核的反冲便通过整个晶格得到衰减。

“发射” $\gamma$  射线的原子核反冲力与用手枪射击的情况很相似:如果你不握紧手枪就扣动扳机,手枪的反冲力就很大。但是如果你把手枪固定在一个混凝土墩上——或者把原子冻结在晶格里——这支手枪或原子核就不能反冲了。在这种情况下,反冲对发射的  $\gamma$  射线能量的影响便可以忽略不计;而其他原子核所吸收的这种无反冲  $\gamma$ -射线,其波长正是共振吸收的精确值。

因为共振吸收截面峰宽集中在很窄的能量区间,所以  $\gamma$  能量的细微变动也会造成很大的不同。穆斯堡尔发现,使  $\gamma$ -源相对靶核运动,即使运动的速度低到

\* (蓝移为向短波谱位移,红移为向长波谱位移——译注)

面态。I-S 界面的界面态是由在能量上 U 字形分布的界面态和缺陷引起的高密度能态的叠加而成的。

C. “统一 DIGS 模型”: 1986 年日本北海道大学的长谷川教授领导的研究小组提出界面态起因于界面附近的结合键无序层。在界面形成时,向不同化学键的过渡,应力、化学配比的破坏,杂质的侵入,悬挂键及各种点缺陷的存在,晶格失配等一系列因素导致在 I-S 界面附近形成一个结合键短距无序层。作为安德森局域化的结果,无序层的形成在禁带内引入 U 字形分布的界面态。从束缚近似的观点来看,界面态的产生是在无序层中成键态与反键态无法完全分离的结果。在禁带中的导带一侧为反键态(受主型),价带一侧为成

键态(施主型),其电中性点由混成轨道能量决定。晶格无序层在界面两侧各有一定厚度,因此界面态是在界面附近的,在空间上和能量上的连续分布体。

目前,关于界面态的起源尚无普遍接受的定论。从模型上看,上述模型的前两个在统一解释界面态特征上遇到的困难较大,很难系统地理解一节中叙述的界面基本电学特征。“统一 DIGS 模型”揭示了界面态在空间上连续分布的可能性,打开了统一地理解基本电学性质的大门。国际上一些不同研究小组从不同角度的工作证实了“统一 DIGS 模型”的可能性,使该模型成为说明界面态起源的较有希望的模型之一。

(待续)