

金属-绝缘体-半导体 微电子学系统的物理基础

〔苏〕B. Г. 里托夫钦科 A. П. 戈尔班 著

1.2

科学出版社

内 容 简 介

本书深入地探讨了制备绝缘体-半导体、金属-绝缘体-半导体型阻快结构的各种方法,以及对其参数和电学性质的研究,并在第五、六、七章中系统地总结了对 MIS 系统非平衡过程的各种测试和分析方法,在第八、九章中介绍了电耦合器件及 MIS 和绝缘体-半导体结构的器件和组件。

本书可供从事 MOS 器件物理和集成电路工作的科研、生产人员参考,也可作为大专院校半导体物理和半导体器件专业师生的参考书。

В. Г. Лароченко А. П. Горбань

ОСНОВЫ ФИЗИКИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК- ПОЛУПРОВОДНИК

Наукова Думка, 1978

金属-绝缘体-半导体 微电子学系统的物理基础

В. Г. 里托夫茨科

〔苏〕 А. П. 戈 尔 班 著

黄振岗 叶汝求 译

陈 鸣 校

责任编辑 王昌泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1980 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1980 年 10 月第一次印刷 印张: 11 5/8

印数: 0001—1,520 字数: 260,000

ISBN 7-03-000083-8/O·22

定价: 0.10 元

前 言

平面工艺的发展导致了金属-绝缘体-半导体(MIS)型半导体结构的建立,并在这种结构的基础上制造出了一类便于进行物理研究的系统,以及具有很高参数的分立型和集成型器件。目前,不仅在微电子学集成电路内,而且在分立器件内,在绝大多数情况下都采用了绝缘体-半导体(IS)平面结构、金属-绝缘体-半导体(MIS)平面结构,甚或更复杂的多层系统。

从 MIS 结构器件特性的观点来看,特别有意义的是利用这种结构的非平衡特性和光电特性。确实,上述系统的特点是,高频性能好,并对各种类型辐射的灵敏度高(由于是借助于外电场用特殊的方法在近表面区形成 pn 结),其中就存储和处理电信息和光信息的观点来看,它还具有实现多种功能的可能性。所有这一切为在 IS 和 MIS 系统基础上制作各种全新的器件开辟了前景。这些器件是对位置敏感的平面光电元件、高速动态电容器、光电反应转换器、高分辨率的平面摄像管、各种类型的逻辑结构,等等。因此,可以说,微电子学领域中已出现了一个崭新的方向——MIS 结构的光电子学。我们注意到,按照预测,近十年内在光电子学领域内将要占据中心地位的正是绝缘体-半导体和 MIS 多层结构。

另一方面,有一系列特殊的物理现象,这些现象本身的存在和出现与研究系统的多相性质有关。首先是微区内发生的电子现象,最近在半导体物理学中所取得的最显著成就都与这些局部区域内的电子现象有关。例如,这里只须指出

下列情况：表面沟道二维电子气的量子效应、电光现象、在半导体薄层内激发激子时的丛集效应、表面全息相和电荷全息相、平面结构内的电荷耦合效应、表面激光器的发明。从这里可以得出一系列基本的物理结论，而这些结论则是今后制备各种新型实用系统（电荷耦合器件、全息相存储系统等）的基础。应该指出，尽管目前在绝缘体-半导体和 MIS 结构电子学的物理以及器件方面已有极丰富的资料，但到目前为止，尚未对这些资料加以系统的总结。与此同时，各方面专家对本问题的巨大兴趣，表明有必要出版一本有关 MIS 系统的物理基础的专著。

本书在很大程度上是依据乌克兰科学院半导体研究所集成微电子学物理基础室从 1961 年开始对 MIS 结构的研究所取得的成果编写成的。此外，本书还根据作者的学术兴趣有选择地总结了其它作者的工作成果。

本书第一至四章和八、九两章由 B. Г. 里托夫钦科，第五至七章由 A. И. 戈尔班执笔写成。我们感谢本研究所的同事帮助准备手稿，也感谢 B. И. 斯特里赫和 K. Л. 格林丘克的有益指教。

主要符号和缩写字说明

- χ ——电子的功函数
 χ_0 ——半导体的电子亲和势
 ψ ——静电势
 ψ_0 ——半导体体内的静电势, 相当于本征半导体费米能级的位置
 φ_0 ——相当于热平衡状态下半导体费米能级位置的电势
 φ_n, φ_p ——相当于电子和空穴准费米能级位置的电势
 μ ——迁移率
 e ——电子电荷的绝对值
 k ——玻耳兹曼常数, 辐射的吸收系数
 T ——绝对温度
 $\beta = \frac{e}{kT}$
 $Y = \beta(\psi - \psi_0)$ ——空间电荷区内的能带弯曲量, 无量纲
 $U_B = \beta(\psi_0 - \varphi_0)$ ——体内费米能级相对于禁带中央的能量位置(以 kT 为单位进行量度)
 $U_s = Y_s + U_B$ ——无量纲的表面势
 U_M ——接触电势差
 U_r ——体内过剩电子-空穴对的复合率(厘米⁻²·秒⁻¹)
 V ——电压
 V_m ——交流测试电压的幅度
 v_n, v_p ——电子和空穴的热运动速度
 E ——所研究子系统的能量位置
 E_c ——禁带中央的能量位置
 E_f ——费米能级的能量位置
 $E_g = E_c - E_v$ ——禁带宽度
 E_λ ——波长为 λ 的光量子能量
 $\mathcal{E}, E, F$ ——电场强度
 $\varepsilon = \frac{E}{kT}$ ——所研究的子系统以无量纲单位表示的能量位置

ϵ', ϵ ——半导体的相对介电常数
 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}$ 法/厘米——真空介电常数
 N_i ——体内局域中心浓度 (加下标 v) 或表面局域中心浓度 (加下标 s)
 N_d, N_a ——施主和受主浓度
 N_c, N_v ——导带和价带内的有效态密度
 n, p ——电子和空穴的体浓度
 n_0, p_0 ——热平衡状态下电子和空穴的体浓度
 n_i ——本征半导体内载流子的平衡浓度

$$n_i = n_i e^{\frac{E_i - E_v}{kT}} = n_i e^{H_i}, \quad \left. \begin{aligned} n_i &= n_i e^{\frac{E_i - E_v}{kT}} = n_i e^{-E_{is}} \\ p_i &= p_i e^{\frac{E_v - E_i}{kT}} = p_i e^{-E_{is}} \end{aligned} \right\} \text{对局域能级归一化后导带和价带内的载流子浓} \\ \text{度}$$
 n_i, p_i ——局域能级上的电子和空穴浓度
 $A_n = \frac{\Delta n}{n_0}, A_p = \frac{\Delta p}{p_0}$ ——电子和空穴的注入电平
 Q ——所研究的子系统的单位面积电荷 (折合到单位表面面积的数值)
 Γ_n, Γ_p ——电子和空穴的表面过剩量
 σ ——电导
 σ_{KZ} ——光子被局域中心俘获时的俘获截面
 σ ——高斯分布参数
 σ ——载流子被局域中心俘获时的俘获截面
 σ_{00} ——体电导率
 $\Delta\sigma$ ——在外激发因素作用下电导的改变量
 σ_L, σ_g ——因场效应而引起的电导变化的弛豫分量和稳态分量
 $\rho_T = \sigma_0^{-1}$ ——体电阻率
 $\rho(x)$ ——距表面 x 处的体电荷值
 τ ——弛豫过程的本征时间
 τ_n, τ_p ——非平衡电子和空穴的寿命
 τ_{st} ——电子-空穴对的寿命
 t ——时间
 S ——表面复合速度
 S_g ——表面产生速度

C' ——MIS结构的单位面积微分电容(法/厘米²)
 $C_{\text{空间区}}$ ——半导体表面空间电荷区的单位面积微分电容
 $C_{\text{电}}, C_{\text{氧化}}$ ——绝缘体和氧化层的单位面积电容
 C_s ——局域中心的单位面积微分电容
 ΔC ——单位面积电容的改变量
 D_n, D_p ——电子和空穴的扩散系数
 $l_p = \sqrt{D\tau}$ ——可动少数载流子的扩散长度
 $l_{Dn} = \sqrt{D_n \tau_{n0}}$
 $l_{Dp} = \sqrt{D_p \tau_{p0}}$ } 电子和空穴作扩散运动时的扩散长度
 l_i ——自由程
 l ——样品长度
 b ——样品宽度
 $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ ——电子和空穴迁移率的比值
 d ——样品厚度
 $d_{\text{电}}, d_{\text{氧化}}$ ——绝缘体氧化层的厚度
 $L_i = \sqrt{\frac{q\phi_0 kT}{2e^2 n_i}}$ ——在本征半导体内的德拜长度
 L_D ——在非本征半导体内的德拜长度
 L^- ——空间电荷区内非平衡电子-空穴对的局域因子
 L^+ ——在空间电荷区内局域中心上的复合因子
 I_0 ——照射到样品上的光强
 I ——通过样品的电流值
 j ——载流子通量密度(厘米⁻²·秒⁻¹)
 G ——MIS结构内可动载流子的产生率(厘米⁻²·秒⁻¹)
 g_n, g_p ——在能级上电子(空穴)寿命的倒数
 R ——可动过剩载流子的复合率(厘米⁻²·秒⁻¹), 光的反射系数
 r_n, r_p ——能级对电子(空穴)的俘获速度
 $F = \frac{C_{\text{空间区}}}{2e^2 n_i L_i}$ ——表征表面空间电荷的函数(泊松方程经一次积分后的形式)
 f_n, f_p ——局域中心被电子和空穴占据的函数
 f ——激发因素的调制频率

$\omega = 2\pi f$ ——角频率
 ν ——光量子的频率
 m ——质量
 m_e^*, m_h^* ——电子和空穴的有效质量
 g_s ——表面陷获因子
 IS ——绝缘体-半导体系统
 MIS ——金属-绝缘体-半导体系统
 CCD ——电荷耦合器件
 MOS ——金属-氧化物-半导体
 BBD ——斗链器件
 BC ——埋沟
 SCT ——表面电荷晶体管
 M ——金属
 I ——绝缘体
 II ——半导体
 c ——导带
 v ——价带
 V ——半导体体内
 s ——表面
 i ——距禁带中央某值的读数
 0 ——热平衡条件
 L ——光照条件
 t ——局域中心
 j ——能级序号
 δ ——空间电荷区和准中性体的边界
 n ——电子
 p ——空穴
 a ——受主
 d ——施主
 TPT ——技术物理杂志
 JETP ——实验和理论物理杂志
 IT ——实验仪器和技术

ПТМ——半导体技术和微电子学

УФЖ——乌克兰物理杂志

УФН——物理科学进展

ФТП——半导体物理和工艺

ФТТ——固体物理

目 录

前言	1
主要符号和缩写字说明	iii
第一章 在半导体衬底上生长绝缘膜	1
§ 1 半导体经氧化而形成绝缘膜的方法	2
§ 2 杂质对氧化层性质的影响	19
§ 3 制备绝缘膜的其它方法	25
第二章 MIS 结构参数的测量方法	31
§ 1 MIS 系统的等效电路	31
§ 2 根据电容测量计算表面势和表面陷阱参数的方法	33
§ 3 基于测量横向电导 G (MIS 阻抗的有功分量) 的 方法	40
§ 4 研究表面和 MIS 系统的光电法	43
§ 5 热激现象法	51
第三章 绝缘体-半导体系统表面绝缘层结构和电学性质 研究	57
§ 1 应用电子衍射法研究表面氧化层	58
§ 2 表面氧化层的光学特性	59
§ 3 氧化物的结构——层状模型	69
§ 4 质谱法研究绝缘层结构	72
§ 5 氧化物结构和化学键的特性	74
§ 6 绝缘层结构和其电学性能的关系	77
§ 7 与氧化物内局域电荷有关的绝缘体-半导体结构的 电学性质	87

第四章 绝缘体-半导体双层系统界面的晶体结构和电学性质	92
§ 1 半导体-绝缘体结构的三层模型	92
§ 2 绝缘体-半导体系统界面的电学参数	101
§ 3 MIS 结构表面沟道散射过程的特点	113
第五章 MIS 结构中的产生现象和输运过程	134
§ 1 MIS 结构参数和非平衡空间电荷区特性的相互关系	134
§ 2 MIS 结构中的双极产生过程	153
§ 3 硅 MIS 结构中双极产生过程的实验研究结果	146
§ 4 MIS 结构产生和复合参数的相互关系	159
§ 5 绝缘体内的电荷输运和场产生	162
§ 6 半导体衬底内的场产生	170
§ 7 隧道谱	177
§ 8 厚绝缘层 MIS 结构中的隧道产生现象[动态隧道效应]	182
第六章 光照对 MIS 系统特性的影响——光电容效应	189
§ 1 MIS 系统中的光电容效应理论	189
§ 2 在硅 MIS 结构内光电容效应的主要规律性	205
§ 3 光电容效应法研究 MIS 结构中的复合和陷获过程	212
§ 4 具有非稳态耗尽层的 MIS 结构内的光电现象	220
第七章 MIS 系统电物理性质的不均匀性及确定不均匀性的方法	239

§ 1	表面电荷不均匀性的统计模型	239
§ 2	具有非均匀分布表面电荷的 MIS 电容器模型	241
§ 3	确定表面电荷微区不均匀性特征参数的方法	242
§ 4	表面电荷不均匀性影响 MIS 系统特性的实验数据	260
第八章	电荷耦合器件	267
§ 1	电荷耦合器件工作的物理原理	267
§ 2	CCD 的工作状态	272
§ 3	电荷损失机理	278
§ 4	CCD 器件的工作特点	283
§ 5	不同类型的 CCD 集成电路	285
第九章	MIS 和绝缘体-半导体结构的器件和组件	294
§ 1	表面变容器	294
§ 2	MIS 和绝缘体-半导体光敏器件	309
§ 3	绝缘栅 MIS 场效应晶体管	316
参考文献		329

第一章 在半导体衬底上生长绝缘膜

金属-绝缘体-半导体(MIS)结构含有由金属、绝缘体和半导体三相组成的元件(相互间分子接触),因此对这种结构可采取适用三种固体基本状态的工艺手段。对金属,通常采用各种真空镀膜法(铝、金、钼、铬等类型金属的热蒸发、电子溅射和离子溅射),而对淀积导电性能良好的半导体膜(如无定形硅、半透明 SiO_2 等),则用化学反应法。在一系列文章中对这些问题都有详细的分析(如文献[18, 140, 672]等)。

首先,对半导体(衬底)的状态要提出一定的要求,其中包括对杂质成分的要求。一方面,半导体应是掺杂的,通过掺入不同类型杂质,以各种方式构成不同的空间电荷层(pn, n^+n 等);另一方面,制作 MIS 结构时经常采用高温工艺,而这既可能在半导体中引起不希望的杂质再分布,也可能导致杂质渗入邻近界面的绝缘体区。在这种情况下,杂质和半导体以及界面的晶格结构缺陷之间可能发生化学结构上的相互作用。为此,必须确定半导体的原始体状态(规定不可控杂质,如氧、碳、钠、缺陷,特别是层错、位错等的容许量)。同时,确定半导体的表面态也是同样重要的。对于相当多的器件来说,表面正是妨碍 MIS 结构获得理论预期参数和提高集成电路成品率等的关键部位。另外,研究改进原始表面和半导体-绝缘体界面的制备方法,是获得优质氧化层,并最终得到 MIS 结构优良参数的必要出发点之一。半导体基片氧化前要经几个处理步骤,这些步骤随具体器件制作工艺不同可能有显著差别。对每一种集成电路都要给出详细的工艺卡片。许多著作(例如文献[105])都有器件制造及科学实验中所用的表面化学处

理方法的介绍。

§ 1 半导体经氧化而形成绝缘膜的方法

自从 Atalla 和 Kahng^[419] 利用热生长氧化物作栅绝缘体而做出第一个硅 MOS 晶体管以来, 硅的热氧化方法得到了广泛应用, 并且一直是制作现代半导体器件(平面工艺和集成电路生产等)的基本方法。我们将详细论述硅的热氧化机理, 并简要介绍在半导体表面上制备绝缘膜的其它方法。

半导体(硅、锗、砷、III-V 族化合物等)的氧化分几个阶段进行, 每一阶段受一定的机理制约。

1.1 氧化的起始阶段

对硅和锗氧化的研究表明, 在氧的亚单层覆盖阶段($\theta < 0.75$), 吸附热为常量(锗的 Q_a 约为 130 千卡*/摩尔, 硅的 Q_a 约为 220 千卡/摩尔), 然后明显下降^[242]。这一现象的发生或者是由于接近表面的氧分子的斥力作用(在表面能量均匀情况下), 或者是由于存在不同深度的势阱(非均匀表面模型)。在后一种情况下, 较深的势阱(这里吸附热较高)填满后再填浅的势阱。在浅势阱里分子和表面的结合力较小, 即 Q_a 值较小。但是, 在某些实际情况下, 也不排除两种机理都起作用, 如在强损伤表面的情况下, 表面上活性中心的数目可能显著减少。例如, 在足够高的温度下(高于室温)氩离子 Ar^+ 轰击后, 表面对氧的捕获能力明显的钝化, 据推测这是由于形成了将未填满的表面价键连接起来的价桥。这时, 还在完成单层覆盖以前, 粘附因子和吸附热就急剧下降(20 倍以上), 从 1 下降至 $\sim 5 \times 10^{-2}$ ^[227, 225], 因而活性吸附中心的作用减弱。

* 1 卡 = 4.1868 焦耳。

半导体表面化学吸附第一个单层氧以后, 半导体和氧之间相互作用的性质就发生了变化, 半导体衬底原子对氧的捕获速度大为减慢, 有时几乎完全停止. 在这一阶段, 半导体表面形成稳定和较有序的单层氧化物. 单层氧化物的存在已在许多实验中得到确认(电子自发射^[322]和电子衍射实验), 并针对半导体实际表面的三层模型情况作了详细讨论^[109].

在形成氧化物的下一个阶段, 每一个半导体(硅或锗)原子上有 0.7 到 2—3 个氧原子, 这相应于形成第二个氧单层前的氧化物. 在这一阶段需要考虑表面区的半导体晶格应力. 这方面的实验主要是 Ligenza 的实验^[469, 470]. 这些实验根据较低温度下“脱氧作用”所造成的重量损失来确定氧化的初始阶段. 已经断定, 表面覆盖(一个半导体原子上有一个氧原子)前, 在 100°C 以下的温度范围内, 氧的初期吸附实际上是瞬间发生的. 从一定温度起(对于锗为 150°C)吸附速度减慢. 但是, 在较高温度下, 第一个单层重新排列, 形成每个硅(锗)原子上有两个氧原子的单层, 也就是说由一氧化物层向二氧化物层过渡. 根据许多著作中的数据^[469, 370, 460, 237, 296], 这个阶段相应于对数吸附律(图 1.1),

$$N = a \ln t + N_0, \quad (1.1)$$

并且常数 a 和 N_0 随温度变化很小, 但在改变晶面时, 这些常数有显著的变化. 这个方程中常数 N_0 决定一氧化物单层中氧原子的数目, 并实际上等于相应晶面的衬底原子数目. 常数 a 为形成单层的速度. 例如, 室温下, 对于锗(111)面, $a = 1.09 \times 10^{14}$ 厘米⁻²·分⁻¹, $N_0 = 7.7 \times 10^{14}$ 厘米⁻², 后一数值实际上与(111)面的原子数目一致. 已发现, 锗的氧化速度 v 的大小与表面晶向有关. $v(100) > v(111) > v(110)$ ^[470, 370, 372]. 在 40—150 大气压的范围内和足以使上述氧化物单层重新排列的温度下(约 500—800°C), 曾对硅进行过测量^[469, 371]. 这

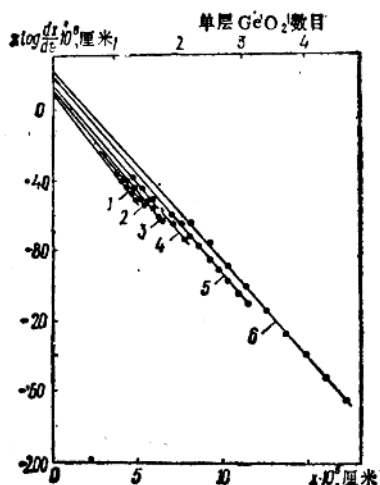


图 1.1 锗的初始氧化阶段。

1—423K; 2—473K; 3—523K; 4—573K; 5—623K; 6—673K.

种情况下, 氧化速度也随晶面不同而变, 并和关于表面键合力的预计定性相符, 即 $v(110) > v(311) > v(111)$. 氧化激活能也有变化: $Q_{\text{氧化}}(111) = Q_{\text{氧化}}(311) > Q_{\text{氧化}}(110)$.

这样, 在形成一氧化物层以后, 继续氧化显著减慢, 一氧化物层的形成阻碍了氧化的继续进行. 在这个阶段, 当实验温度足够高时, 化学吸附的分子层重新排列, 附加吸附的氧原子形成更稳定的二氧化物层. 如果考虑到氧化能虽然接近吸附能, 但却比它稍高^[242], 则重新排列的过程还需要某种激活能. 随着温度升高, 形成稳定层的延迟时间将越来越短(例如, 对于锗, 120°C 时为 40 分钟, 250°C 时为 1 分钟).

上述规律的物理原因可根据下述概念来理解^[372, 469]. 清洁表面上吸附氧以后(或通过腐蚀剂作用形成第一层一氧化

物后), 在表面区观察到半导体的晶格应力. $(\text{Si-Si})v$ 的应力键化学上比较活泼, 原因是部分价键未填满, 更确切一点说是被较弱的, 而且不对称的表面键所抵销[文献 110, 第九章]. 应力键和氧相互作用导致物体的原子脱离晶格, 并形成单一的氧化物; 各种削弱表面键的因素的存在(杂质原子、结构缺陷、原子台阶等), 使 $(\text{Si-Si})v$ 键减弱, 从而使氧化速度加快. 以下事实证明了这一作用机理: (1) 这个机理预计氧化膜随时间按对数规律生长; (2) 对数律生长阶段的速度常数与表面复合体的键应力定性相关^[372, 469, 538, 540]; (3) 在氧原子直接与半导体表面作用时, 即氧化的“单层”阶段, 基本上可以预计键应力的影响. 如果减弱应力(例如在室温或较高温度下用 Ar^+ 轰击^[226]), 则氧化相的形成速度也会变慢. 根据椭圆偏振仪的测量^[209, 210, 105], 在一定条件下, 对于在氧化-还原腐蚀剂中形成的膜, 观察到对数生长律, 对室内气氛下的样品的观察也有同样结果. 虽然这种膜比单层膜厚得多, 但这样形成的氧化物系统在许多方面都与上面讨论的情况相近, 即带有大量微应力, 并且在老化过程中确实发生从一氧化物到形成二氧化物的相变^[319, 105].

这样, 在形成氧化层的第二阶段, 氧化过程由氧的快速化学吸附(这是控制生成一氧化物层的因素)和衬底原子从晶格位置向氧化层的运动所保证.

形成二氧化硅的阶段结束以后, 氧化的第三阶段开始. 这时对数律失效, 在这种条件下, 氧化速度比前一阶段要低得多. 例如, 即使在 400°C 下三个小时, 硅上也仅生成 $18\text{\AA}$ 的氧化膜. 在这一阶段, 氧化过程受 Mott-Cabura 机理控制^[499, 394, 895, 130]. 这个机理的实质如下: 当氧被薄氧化层表面吸附时, 逐渐发生吸附分子和半导体表面之间的电子电荷隧道交换, 这时吸附分子带负电, 半导体则因失去电子而带正