

(峰值约在 1.67 eV), 目前还不能肯定。另外 NMR 测量证明 C_{60} 分子在其格点进行地高速旋转[19], 这个特性对 C_{60} 的光致发光等特性有什么影响还没见到报道。

总之, 由于 C_{60} 具有独特的分子结构, 导致了其在物理、化学等方面有趣的特性, 有关它的光物理方面已经进行了较深入的研究, 但仍然存在文中所提到一些令人困惑的问题。

- [1] H. Kroto et al., *Nature*, **318**(1985), 162.
 [2] H. W. Kroto, A. W. Allaf and W. P. Balm, *Chem. Rev.*, **91**(1991), 1213.
 [3] W. Kratschmer et al., *Nature*, **347**(1990), 354.
 [4] Gu Zhennan et al., *J. Phys. Chem.*, **95**(1991), 9615.
 [5] 封继康, 化学研究与应用, No. 3 (1991), 32.
 [6] M. B. Jost et al., *Phys. Rev. B*, **44**(1991), 1966.
 [7] S. Saito and A. Oshiyama, *Phys. Rev. Letters*, **66**(1991), 2637.

- [8] J. Mort et al., *Chem. Phys. Letters*, **186**(1991), 281.
 [9] A. F. Hebard et al., *Nature*, **350**(1991), 600.
 [10] A. J. Heeger, S. Kivelson and J. R. Schrieffer, *Rev. Mod. Phys.*, **60**(1988), 781.
 [11] S. Larsson, A. Volosov and A. Rosen, *Chem. Phys. Letters*, **137**(1987), 501.
 [12] P. N. Saera et al., *Chem. Phys. Letters*, **190**(1992), 184.
 [13] H. Hoshi et al., *Japan. Appl. Phys.*, **30**(1991), 1397.
 [14] Z. H. Kafafi et al., *Chem. Phys. Letters*, **188**(1991), 492.
 [15] J. W. Arbogast et al., *J. Phys. Chem.*, **95**(1991), 11.
 [16] C. Reber et al., *J. Phys. Chem.*, **95**(1991), 2127.
 [17] M. Matus and H. Kuzmany, *Phys. Rev. Letters*, **68**(1991), 2822.
 [18] T. W. Ebbesen, K. Tanigaki and S. Kuroshima, *Chem. Phys. Letters*, **181**(1991), 501.
 [19] Y. C. S. Yannoui et al., *J. Phys. Chem.*, **95**(1991), 9.

未来最有希望的硅锗高速微电子器件 ——埋沟场效应晶体管

胡际璜 张翔九 王 迅

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

以前人们认为异质结双极型晶体管是硅锗新材料在微电子器件方面的最重要应用。根据最新的信息, 指出这一器件具有很大的局限性, 而正在崛起的硅锗 MOS 场效应晶体管有可能是未来最有希望的高速器件。叙述了这种器件的物理基础、典型结构及性能。

由于分子束外延 (MBE) 和化学气相淀积 (CVD) 等技术的发展, 人们成功地在硅衬底上生长出了特性良好的硅锗应变层、硅锗/硅异质结和超晶格。这些材料所具有的新奇特性使它们在微电子器件和光电子器件方面有着很诱人的应用潜力, 因而对硅锗/硅异质结、超晶格材料和器件的研究已成为近年来半导体能带工程中的热门课题。

硅锗器件发展中最成功的当数 SiGe/Si 异质结双极型晶体管 (HBT)¹⁾。美国 IBM 公司的 Patton 等人¹⁾ 最先研制出以 SiGe 合金作为基区的 HBT, 以后他们又将 SiGe/Si HBT

的截止频率 f_T 提高到 75 GHz²⁾, 已接近 GaAs HBT 的水平, 而它又比 GaAs 器件更容易实现同 Si 超大规模集成 (VLSI) 的结合。人们便开始认为 GaAs 在高速器件和电路中的优势将会丧失, 未来的高速器件将由 SiGe/Si HBT 取而代之。

从器件实用的角度来看, 比 f_T 更重要的频率参数是最高振荡频率 f_{max} 。前面所说的 SiGe/Si HBT 虽然其 f_T 高达 75 GHz, 但由于基极串联电阻比较大, 其 f_{max} 大约只有 20

1) 为方便起见, 本文中 SiGe 是指各种成分的 $Si_{1-x}Ge_x$, 以下两者互相通用。

GHz, 比 Si 的同质结双极晶体管提高并不多。近来有人采取了降低基极电阻的办法, 在提高 f_T 的同时, 使 f_{max} 也达到了 40 GHz^[5]。预计, 随着器件结构和工艺的改进, SiGe/Si HBT 的频率特性还将会有进一步的改进。

但是, 同所有的双极型晶体管一样, HBT 的驱动电流比较大, 使得其单元的功耗不能降低, 因而在 VLSI 中几乎无法使用。另一方面, 制造 SiGe/Si HBT 需要在原来的硅工艺中增加一道比较复杂的工序, 而器件的性能仅比不用 SiGe 合金的同质结器件提高有限, 因而从性能价格比上可能是得不偿失, 在批量生产上很难有竞争力。据了解, 美国的 IBM 公司和 Bell 实验室等几乎已经完全放弃了对 SiGe/Si HBT 的研究。

那么, SiGe 材料在微电子器件领域内究竟还有没有发展前途呢? 有没有比 SiGe HBT 更有实用价值的器件呢? 这就是本文所试图回答的问题。

一、SiGe/Si 埋沟 MOS 场效应管的发展和特点

目前 VLSI 所用的器件大多数是硅金属氧化物半导体场效应晶体管 (Si MOSFET), 特别是互补 MOS (CMOS) 电路, 它具有输入阻抗高、噪声系数小、功耗低、抗辐射性能强、温度稳定性好等优点。有人预言, 在不远的将来微电子器件将主要由 CMOS 电路组成。

CMOS 电路要求其中的一对 n 沟和 p 沟 MOS 管性能接近完全匹配。但由于 Si 中空穴的迁移率要比电子迁移率低得多, 为了使 p 沟 MOS 管同 n 沟 MOS 管具有相接近的特性, 只能增大 p 沟 MOS 场效应管的尺寸。但这是以牺牲电路的集成度为代价的。

寻找高空穴迁移率的材料自然是解决上述问题的关键。锗中空穴虽然有较大的迁移率, 但工艺上无法在 Si 衬底上直接形成 Ge 沟道。80 年代, 硅分子束外延技术日趋成熟, 在 Si 衬底上能生长出成分与厚度可以精确控制的

$Si_{1-x}Ge_x$ 合金层, 它的空穴迁移率比 Si 的高得多。于是, 人们开始探索用 SiGe 作沟道来制造 MOSFET^[4,5]。由于 $Si_{1-x}Ge_x$ 层氧化后具有的高界面态密度, 因而制作 MOS 场效应管遇到困难。直到 90 年代才开始出现用 SiO_2 作为栅氧化层的 $Si_{1-x}Ge_x$ 沟道 MOSFET^[6,7]。最近, 比较重要的进展是埋沟 $Si_{1-x}Ge_x$ MOSFET 的出现^[8-10]。它在 $Si_{1-x}Ge_x$ 沟道与栅氧化层之间加了一层薄的 Si 盖帽层, 因而也可称之为量子阱 $Si_{1-x}Ge_x$ MOSFET。由于栅氧化层是制作在 Si 盖帽层上, 性能良好的 Si/SiO₂ 界面克服了表面沟道 $Si_{1-x}Ge_x$ MOSFET 所遇到的栅氧化层制备的困难。图 1 是一个 $Si_{1-x}Ge_x$ /Si 增强型埋沟 p-MOSFET 的结构示意图。用硼离子注入形成源、漏区, 栅电极为多晶硅。

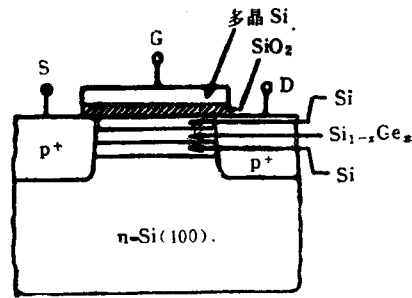


图 1 $Si_{1-x}Ge_x$ /Si 增强型埋沟 p-MOSFET 的结构

$Si_{1-x}Ge_x$ MOSFET 除了容易和 Si VLSI 工艺相容外, 至少还有以下三方面的优点: (1) 由于 $Si_{1-x}Ge_x$ 层的空穴迁移率增强 (相对于 Si), 因而可以制作性能良好的 p-MOS 管, 有利于提高 CMOS 电路的速度和集成度。(2) 埋沟 $Si_{1-x}Ge_x$ MOSFET 的沟道远离栅 SiO_2 , 因而可以大大减小表面沟道 SiMOSFET 中的热电子效应。这种效应常常是亚微米器件中比较严重的问题, 导致器件特性的严重退化。(3) $Si_{1-x}Ge_x$ MOSFET 有良好的低温特性。液氮温度工作是提高集成电路速度的有效途径, 也是未来发展趋势之一。人们一直在致力于发展低温工作的晶体管。而 $Si_{1-x}Ge_x$ 层的空穴迁移率随温度降低而增大, 因而它“先天”就具有低温工作能力。

下面,我们就这几个特点从物理上作些说明,并介绍和分析目前所研制的埋沟 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET 的结构和特性。

二、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET 的物理基础

1. 迁移率增强效应

半导体中载流子的迁移率是由其有效质量 m^* 和平均散射时间 τ 所决定的。有效质量是根据半导体的能带结构确定的,而 τ 则取决于散射机理。在一般比较完整的 Ge 或 Si 晶体中,散射的机理主要是声学声子散射、电离杂质散射以及能谷内或能谷间散射。在硅锗合金中,由于 Ge 和 Si 原子在其中的无规则排列而造成原子势场的起伏,还会引起称为合金散射的附加散射。

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 沟道中空穴迁移率的增强效应是由三个因素所引起的:(1) Ge 成分的加入改变了它的能带结构;(2)应力所起的作用;(3)调制掺杂的作用。下面分别予以介绍。

弛豫的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的能带结构随 Ge 的成分 x 而变。在 $x < 0.85$ 时,其能带是类 Si 的;而在 $x > 0.85$ 时是类 Ge 的。即使是类 Si 的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金能带,其载流子的有效质量和迁移率也和体 Si 材料不同。Ge 中空穴的有效质量比 Si 中为小,迁移率比 Si 的来得大。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金同体 Si 相比,其能带结构变化引起的效应也是使空穴迁移率增大,即使计入合金散射的影响,在相同掺杂程度下, SiGe 的空穴迁移率仍比体 Si 的来得大。在 SiGe/Si 异质结器件中, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层受到双轴应力的作用,其能带结构与无应变时有很大不同。双轴应力一般可以分解为一个单轴应力加上一个流体静应力,后者的作用是使所有的价带都发生相同的能量位移,因而不影响空穴的有效质量。而单轴应力对价带结构的影响比较大。一方面,它使得轻空穴带和重空穴带在布里渊区中心的简并取消,并且使自旋-轨道分裂带与轻、重空穴带的能量间隔增大(在压应力的情形是如此,即 SiGe 合金层共度生长在 Si 衬

物理

底上)。另一方面,应力使价带的态密度减小。前一个作用使得空穴的带间散射减弱,后一个作用相当于使空穴的有效质量减小,因而使得应变的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层的空穴迁移率比体合金的来得大。

Chun 和王康隆^[11] 计算了有应力情况下 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的空穴有效质量和迁移率。在散射时间中考虑了声学声子、光学声子、电离杂质、中性杂质和合金散射,计算了重空穴带、轻空穴带和自旋-轨道分裂带各自的迁移率,然后按照这几个带中载流子聚居数进行加权平均,得到的空穴迁移率沿横向(即在外延层平面内)和纵向(即生长方向)是不同的。图 2 是计算得到的应变 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ 外延层中室温下空穴的横向迁移率 μ_T 和纵向迁移率 μ_L 随掺杂浓度的变化。图 2 中也画出了无应变的 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ 以及体 Si 的迁移率。可以明显地看到应变 SiGe 层的迁移率增强效应。这种迁移率的增强还随 Ge 含量的增加而更为显著,如图 3 所示。此外,还可以看到,在同样合金成分和掺杂浓度情况下, μ_T 大于 μ_L ,这对于制作 MOS 沟道型器件极为有利。

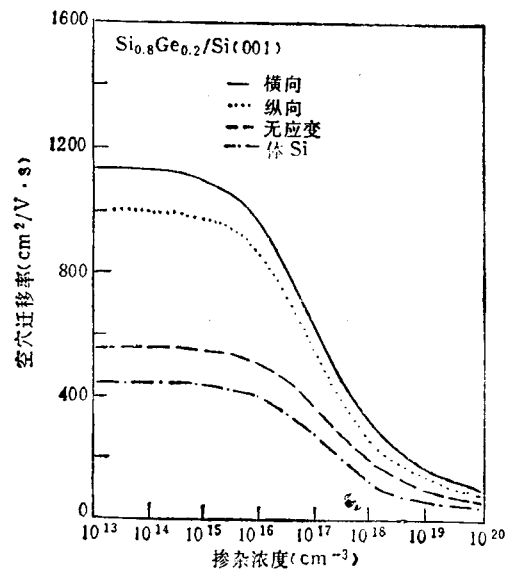


图 2 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}/\text{Si}(100)$ 空穴迁移率与掺杂浓度的关系

由调制掺杂所引起的迁移率增强同 III-V 族半导体异质结中的情形相类似。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$

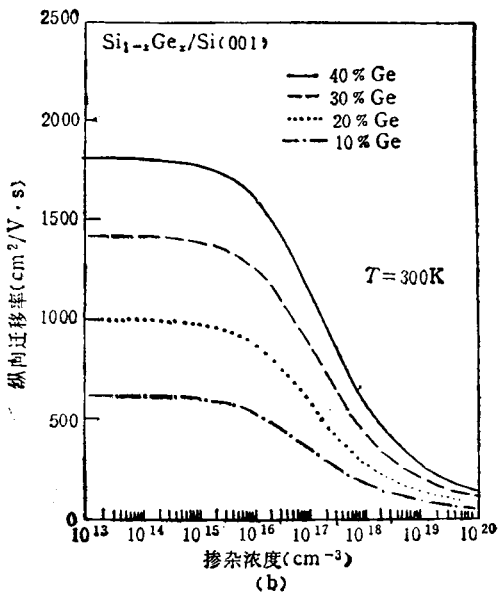
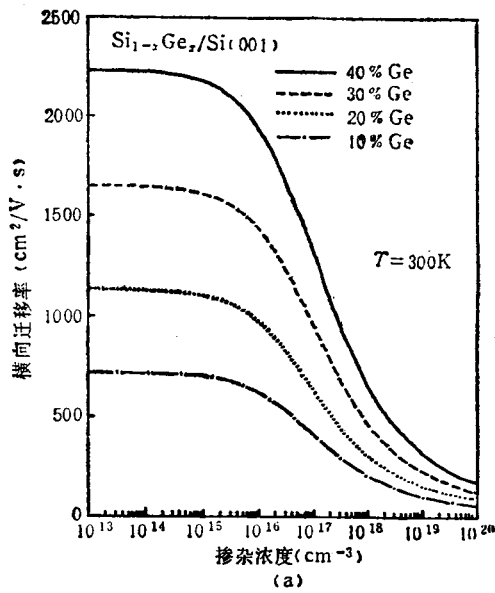


图3 不同 Ge 成分时, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 中的空穴迁移率随掺杂浓度的变化
(a) 横向迁移率; (b) 纵向迁移率

异质结的能带偏移主要发生在价带, Si 的价带顶在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的价带顶之下, 所以 Si 中的空穴将向 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 中注入。对 Si 层进行 P 型掺杂, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层不掺, 注入到 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 阱中去的空穴将与其母体杂质离子在空间上隔开一段距离, 因而大大降低了电离杂质的散射作用。这种调制掺杂的迁移率增强在低温下 (电离杂质散射起主要作用时) 尤为显著。

以上的讨论都是假定 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质界面体系是极其完整的。实际上界面的粗糙度、失配位错、应变弛豫等因素所造成的附加散射作用会降低空穴迁移率。因此, 实际采用的工艺技术对提高迁移率同样起着十分重要的作用。

2. 低温特性

MOS 场效应管在液氮温度工作具有许多优点。从器件本身来说, 有增强载流子迁移率、减小结的漏电流、减小连线电阻、提高跨导、降低噪声、改善其亚阈值的转移特性等, 从而有利于器件的高速低噪声工作。而对电路或系统来说, 由于热导率的增大和低温下扩散、电迁移、化学反应等速率指数下降, 因而可靠性和封装密度均可得到提高。所以, 液氮温度工作是 MOS 器件和电路的一个发展方向。

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 沟道具有良好的低温特性, 主要来源于其调制掺杂的结构。一方面利用调制掺杂可以大大减小在低温下对载流子迁移率起主要作用的电离杂质散射, 另一方面由于载流子与其母体杂质离子空间上分开, 因而避免了低温下载流子的“冻出”现象。

目前, 实验获得的最高空穴迁移率, 300K 时是 $250 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 77 K 时可达 $1500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}^{[10]}$ 。

3. 栅氧化层中的热载流子注入

栅氧化层中热载流子注入使器件性能退化, 对于小尺寸的 MOS 器件尤为突出。在栅极垂直电场作用下, 动能大于 Si/SiO_2 界面势垒的热载流子一方面向栅注入, 形成栅极电流, 使 MOS 器件的 I-V 特性变差, 另一方面在栅介质中积累形成氧化层中固定电荷和氧化层中陷阱电荷, 并产生新的界面态^[12], 使器件的阈值电压漂移, 跨导下降及稳定性变差。为此, 除了工艺上制备优质栅介质层, 减少栅介质中的载流子俘获中心外, 在器件结构上, 首先要尽量设法减小热载流子产生, 对于产生的热载流子应减小它们向栅极的注入。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 埋沟 MOS 结构具备了这两方面的优点。埋沟结构使主要电流通道受最大电场的影响减小, 因而可减小

热载流子的产生。其次,这种结构中传输载流子的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 沟道远离栅介质层,埋藏在 Si 盖帽层下面,当沟道中产生热载流子时,这些热载流子必须先越过 Si 盖帽层,经过较长的距离,才能到达 Si/SiO₂ 界面。在向 Si/SiO₂ 界面运动的过程中,它们会在 Si 盖帽层中遭受到多次碰撞而损失能量,使得具有越过 Si/SiO₂ 界面势垒能量的热载流子数大大减少。因而,减少了热载流子向栅的注入。所以 Si/Si_{1-x}Ge_x/Si 埋沟 MOSFET 可使热载流子向栅注入引起的器件性能退化得到克服。

三、Si_{1-x}Ge_x/Si MOSFET 的结构与特性

典型的 Si_{1-x}Ge_x 增强型埋沟 p-MOSFET 结构如图 1 所示。其工艺过程为:在 n-Si(100) 衬底上用 MBE 或 UHV/CVD 方法依次外延生长 Si 阻挡层、Si_{1-x}Ge_x 沟道层及 Si 盖帽层,在 Si 盖帽层上淀积栅氧化层与多晶硅栅,然后对源及漏区注入硼离子,最后形成栅、源、漏电极接触。器件的性能与 Si_{1-x}Ge_x 层厚度、层中 Ge 含量 x 、Si_{1-x}Ge_x 沟道长度、Si 盖帽层与 Si 阻挡层的厚度、掺杂浓度、栅氧化层厚度等有关。在器件的优化设计中,Si 盖帽层厚度与栅氧化层厚度是两个主要的因素。它们会影响沟道区的垂直电场强度,从而影响器件的阈值电压,它们带来的串联电阻还会影响器件的亚阈值电流摆幅^[13],因而在工艺允许的条件下,两者应尽可能地薄。器件的短沟道效应是另一个设计时必须着重考虑的因素。当沟道长度与源结和漏结的耗尽区宽度可以比拟时,沟道区的载流子不仅受栅压产生的纵向电场控制,而且受漏极电压产生的横向电场控制,从而导致器件的阈值电压下降,亚阈值特性变差,严重时甚至会使源漏穿通和增强热载流子效应。因此,器件设计时,应尽量避免短沟道效应的产生。

图 4 为一典型的埋沟 p-MOSFET 的 $I-V$ 特性。器件的沟道长度与宽度分别为 $0.7\mu\text{m}$ 与

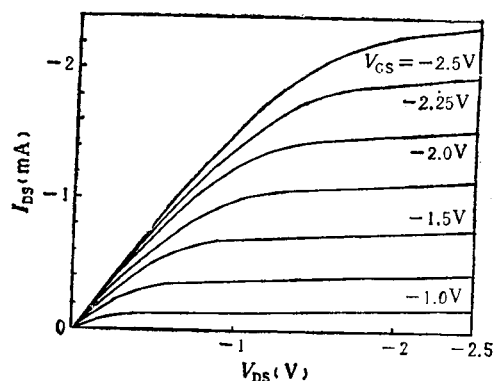


图 4 Si_{0.8}Ge_{0.2}p-MOSFET 的 $I-V$ 特性

$25\mu\text{m}$, SiGe 组分为 Si_{0.8}Ge_{0.2}, 源极与衬底的电压均为零伏。曲线呈现很好的饱和与截止行为^[13]。器件的源、漏间串联电阻较大(约为 300Ω),这是由于注入源、漏区的硼离子未被完全激活的缘故,而不是 SiGe 沟道的固有特性。

Si_{1-x}Ge_x MOS 器件还具有很好的亚阈值电流特性。沟道长与宽分别为 $100\mu\text{m}$ 与 $300\mu\text{m}$, Si 盖帽层与栅氧化层均为 100\AA 的 Si_{0.5}Ge_{0.5} 埋沟 p-MOSFET, 300K 与 77K 时,电流减小一个数量级的栅极电压摆幅分别为 80mV 与 30mV , 与同条件制备的对照 Si MOSFET 有相同值^[10]。温度降低,栅压摆幅减小与 Si_{1-x}Ge_x 沟道中载流子迁移率随温度降低而增大是一致的。

MOS 器件的跨导与亚阈值特性均反映了器件的沟道载流子迁移率的大小。图 5 是 Si_{0.7}Ge_{0.3} MOSFET 的低场迁移率与有效电场的关系^[9]。MOS 器件的栅氧化层厚度为 125\AA , 沟道长度为 $7-200\mu\text{m}$, Si 盖帽层厚度为 105\AA 。图 5 表明,300K 时[图 5(a)所示],有效电场在 $0-0.30\text{MV/cm}$ 的范围内,Si_{0.7}Ge_{0.3} MOS 管的沟道载流子迁移率都比 Si MOS 对照管高,其峰值约高出 50%。温度降低时,两者的差异更为明显。90K 时[如图 5(b)所示],Si_{0.7}Ge_{0.3} MOS 管的峰值迁移率较后者高出 100%。图 5 充分体现了 Si_{1-x}Ge_x MOS 器件的低温优越性。Ge 含量 x 增大, Si_{1-x}Ge_x 沟的空穴迁移率增大更多。图 6 给出了沟道长与宽均为 $25\mu\text{m}$, 栅氧化层厚为 36\AA 的 Si_{1-x}Ge_x

MOSFET 的沟道迁移率随 Ge 含量 x 与温度的变化^[10]。 $x = 0.5$ 时, 迁移率达最大值。 300 K 与 77 K 的最大迁移率分别为 250 与 1500 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $x = 0$ 的对照 Si MOS 器件, 其对应的迁移率分别为 150 与 550 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。 即在 300 K 与 77 K 时, $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ MOS 器件比对照 SiMOS 器件的空穴迁移率增大 70% 与 150%。 即使对于亚微米沟道的 p-Si MOSFET, 其低温迁移率也仅为 500 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 左右^[14]。 因此, 长 SiGe 沟道的 MOS 器件低温下的工作速度比亚微米沟道的 Si MOS 器件的还快。

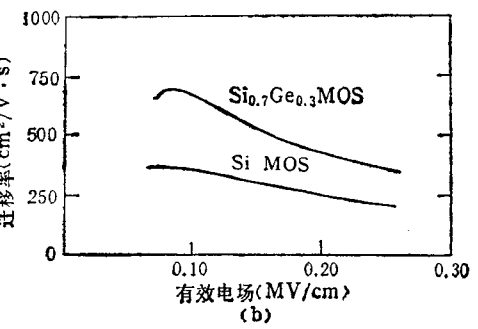
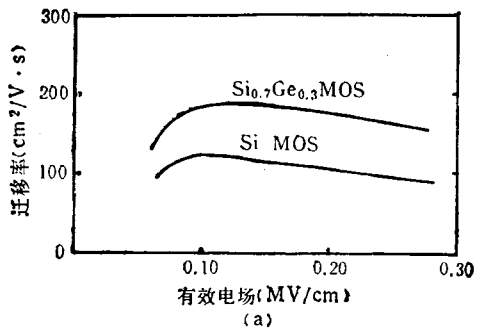


图 5 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ MOSFET 的低场迁移率与有效电场的关系
(a) 300K 时; (b) 90K 时

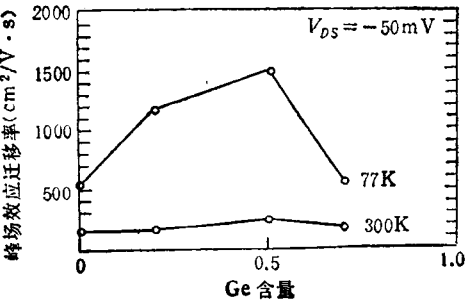


图 6 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET 的沟道迁移率与 Ge 含量的关系

目前研制的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET 与同条件下制造的对照 Si MOSFET 相比, 在常温与低温条件下已表现出明显的优势, 但还没有达到理论值给出的水平。 理论值给出 300K 时空穴迁移率为 1135 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ^[11], 按此值计算, MOS 器件的截止频率可达 60 MHz, 比目前最快的 Si MOSFET 的截止频率 (10—20 MHz) 高得多, 甚至比双极反型沟道场效应晶体管 (BICMOS) 还要快得多。 但上面介绍的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET 截止频率仅达 80 kHz, 相同条件制造的 Si MOSFET 的截止频率仅为 45kHz。 这表明, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ MOSFET 的器件结构与工艺参数都有待进一步探索改进。 Si MOSFET 是经过人们几十年的努力和改进才达到目前的水平, 而 SiGe MOSFET 的制造基本上沿用的是 MOSFET 的工艺。 人们意识到, 要制造好的 SiGe MOSFET, 必须像过去研究 Si MOSFET 那样, 对器件结构设计和一整套工艺技术等从物理基础到结构和工艺的优化进行系统的探索。 国外已有若干研究组正在努力进行这方面的工作, 由于硅分子束外延技术的长足进展, 人们追求实现性能完美的 SiGe 埋沟 MOSFET 的目标将不是遥远的事。

[1] G. L. Patton et al., *IEEE Electron Devices Letters*, **EDL-9** (1988), 165.
 [2] G. L. Patton et al., *IEEE Electron Devices Letters*, **EDL-11** (1990), 171.
 [3] A. Gruhle et al., *IEEE Electron Devices Letters*, **EDL-13**(1992), 206.
 [4] T. P. Pearsall et al., *Proc. 1st Intern. Symp. Silicon MBE (Toronto, Canada)*, Vol. 85-7, J. C. Bean Ed., Pennington, NJ: Electrochem. Soc., (1985), 400—405.
 [5] H. Daembkes et al., *IEEE Electron Devices*, **33** (1986), 633.
 [6] D. Nayak et al., Presented at the IEEE Device Research Conference, Santa Barbara, CA, June 25—27, (1990).
 [7] S. Verdonckt-Vandebroek et al., *IEEE Electron Device Letters*, **12-8**(1991), 447.
 [8] P. M. Garone et al., *IEEE Electron Devices Letters*, **EDL-12**(1991), 230.
 [9] P. M. Garone et al., *IEEE Electron Devices Letters*, **EDL-13**(1992), 56.
 [10] K. Goto et al., *Extended Abstracts of the 1992*

International Conference on Solid State Devices and Materials, Isukuba, (1992), 449—451.

[11] S. K. Chun et al., *IEEE Electron Devices*, **39-9** (1992), 2153.

[12] A. Hiroki et al., *IEEE Electron Devices*, **35**

(1988), 1487.

[13] D. K. Nayak et al., *IEEE Electron Device Letters*, **EDL-12**(1991) 154.

[14] J. Yuan-Chen Sun et al., *IEEE Electron Devices*, **34**(1987), 19.

瞬态激光作用下的弛豫过程¹⁾

周本谦

(中国科学院金属研究所, 中国科学院国际材料物理中心, 沈阳 110015)

概述了国内外在非平衡统计方面有关的理论和方法。着重介绍了中国科学院金属研究所在固体非平衡性质方面研究工作的一些新近进展,其中包括激光脉冲激发下的非平衡声子动态过程,一维链中非线性声子交互作用形成的孤子状激发,无序固体低温下声子输运的量子理论,瞬态激光作用下温度和长度变化的不同步效应。最后讨论了这方面今后应进行的理论和实验工作。

由于高新技术的发展,加热过程大大加快。在超短脉冲激光作用下,固体中将引发一系列瞬态过程,除了输运过程而外,一些平衡性质也因此显示出非平衡的特征。通过各类微观粒子的碰撞和散射,能量和动量分布将逐渐趋于平衡,这就是固体中发生的一类弛豫过程。在处理这类过程的理论问题时,因为牵涉到大量微观粒子的运动和交互作用,人们往往采用非平衡统计的理论和方法。而从实验上研究有关现象时,高速信号转换和采样系统就成为必不可少的技术。中国科学院金属研究所从80年代开始研究固体的非平衡热物理性质,从理论和实验两方面同时入手,彼此互相参照和验证,得到一些令人感兴趣的结果,本文将对此作一简要介绍。

一、非平衡统计的有关理论和方法

本世纪后半叶以来,关于大量粒子运动的非平衡统计理论逐渐受到人们的重视,已被逐步整理归纳在有关专著和教科书中^[1]。本节将简述其要点,作为处理有关理论问题时的参考。

1. 玻耳兹曼方程

在时间 t 时,粒子在坐标 q 和动量 p 空间

的分布函数 $f(q, p, t)$ 的变化遵从玻耳兹曼方程:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \left[\frac{\partial f}{\partial t} \right]_{\text{正移}} + \left[\frac{\partial f}{\partial t} \right]_{\text{碰撞}} \quad (1)$$

这是非平衡统计中的基本方程,很多理论工作都是围绕这一过程展开。

2. BBGKY 方程链

BBGKY 方程链是 Bogoljubov-Born-Green-Kirkwood-Yvon 方程链的简称,通过这一方程链可以找到粒子分布函数在外加势和相互作用势作用下的变化情况,这对描述激光作用下的粒子运动是有用的。

3. 马尔可夫过程

若一随机变量在 t_n 时取 X_n 值的条件几率仅与 t_{n-1} 时取 X_{n-1} 值有关,而与更早的取值无关,则称为马尔可夫过程。这可以使我们处理问题的方法简化,在大多数情况下,这一简化是合理的。

4. 朗之万方程

该方程描写布朗运动中的粒子在 x 方向运动时,其速度变化率 \dot{v} 和速度 v 及随机力 $f(t)$ 的关系

$$\dot{v} = -\gamma v + f(t), \quad (2)$$

1) 中国科学院院长基金特别支持项目和国家自然科学基金资助项目。