

# 漫谈半导体材料及异质结器件

王海龙<sup>1,2</sup> 潘东<sup>1,2</sup> 赵建华<sup>1,2,†</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

(2 中国科学院大学材料科学与光电技术学院 北京 100049)

2018-08-23收到

† email: jhzhao@red.semi.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20181102

## A bird's eye view of semiconductor materials and heterostructural devices

WANG Hai-Long<sup>1,2</sup> PAN Dong<sup>1,2</sup> ZHAO Jian-Hua<sup>1,2,†</sup>

(1 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**摘要** 半导体材料与器件在当代信息社会中扮演着核心角色,相关产品几乎渗透了人类生活的各个角落。文章简要回顾了半导体的研究历史,介绍了半导体材料与相关应用,阐述了半导体异质结器件的工作原理,并展示了半导体自旋电子学及低维窄禁带半导体纳米结构的研究现状与发展前景。

**关键词** 半导体异质结, 二极管, 晶体管, 半导体自旋电子学, 低维纳米结构

**Abstract** Semiconductor materials and devices play critical roles in our modern information society, with products permeating almost every corner of our life. This article briefly reviews the history of semiconductor research, introduces semiconductor materials and related applications, describes the principles and applications of semiconductor heterostructural devices, and finally presents the current status and future development of semiconductor spintronics and low-dimensional narrow bandgap semiconductor nanostructures.

**Keywords** semiconductor heterostructure, diode, transistor, semiconductor spintronics, low-dimensional nanostructure

## 1 引言

让我们将时间回溯到20世纪30年代,虽然半导体相关现象早有零星发现,但不少科学家仍对半导体的概念持怀疑态度。天才物理学家泡利一贯以尖锐且富有远见的批评闻名,他曾说:“人们不应该去从事半导体研究,那里乱成一团,天知道半导体是否真实存在”<sup>[1]</sup>。令人难以想象的是,随着科学和技术爆炸式地进步发展,如今人类已经大步迈入信息社会,半导体相关的各种产品成为人们学习、工作和相互沟通中不可

或缺的工具。一些产品如智能手机等,由于几乎时刻不离身,甚至被戏称为人类的“外生器官”。

半导体不仅在实际应用中大放光彩,极大便利了人类生活,创造了巨大的经济价值,而且在基础科学研究领域也备受重视并斩获颇丰。从诺贝尔奖的颁发历史可以看出一些端倪——诺贝尔奖设立至今120余年,与半导体相关的获奖者就有20人以上<sup>[2, 3]</sup>!细数之下,相关获奖工作大多集中在近50年间,更是对半导体科技成就的莫大肯定。泡利的上述断言成为他著名的三大失误之一(另两个分别与电子自旋及弱相互作用中的宇称

不守恒相关), 为半导体科技的成功增加了一层传奇色彩。

即便如此, 似乎相当一部分人乐意就集成电路芯片发表高见, 却对半导体科技一知半解, 这要归因于半导体科学具有相对较高的认知门槛。是的, 没有量子力学和固体物理知识的辅助很难理解能带理论中“带隙”的概念, 也就无法从本质上区分半导体与金属和绝缘体的异同。不过没关系, 大家仅从半导体的字面意思去理解其概念也能够掌握它的主要特点——半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的材料, 其电导率横跨范围之广, 甚至高达13个数量级<sup>[3-6]</sup>! 神奇的是, 半导体电导率的数量级变化能够通过轻微改变杂质的掺杂含量进行有效控制, 而杂质浓度通常还不到宿主材料原子浓度的万分之一! 毫无疑问, 半导体对杂质的高敏特性是一柄双刃剑, 无怪乎泡利当年会给出略显抱怨的评价——毕竟在材料制备技术远未能精确控制杂质浓度的情况下, 各个实验室乃至同一实验室在不同时间段获得大相径庭的实验结果也就不足为奇了。

不难想象, 八十多年来半导体科技的迅猛发展以及相关产业的快速崛起, 离不开科学家们在无数实验中摸索并建立起来的半导体理论和技术, 进而强力推动了材料生长和各种微纳加工技术等的进步。相关制造加工技术反过来也极大地促进了半导体科技的发展, 形成正反馈, 使我们得以享受信息社会的各种便利。毋庸置疑, 物性可控的半导体材料是半导体科技发展的基础和保障, 本文也将从半导体材料开始, 逐步展开对半

导体异质结构器件的描述。

## 2 半导体材料

随着人们对各种功能性材料的要求越来越高, 对新型半导体材料的渴求与探索使得半导体材料家族迅速扩张。迄今为止, 已知的半导体材料不下千种<sup>[3-6]</sup>。起初, 人们主要着眼于无机半导体的研究, 并大致将主流半导体材料划分为三代: (1)第一代半导体以IV族材料Ge和Si为代表, 也称为“元素半导体”, 主要应用于大规模集成电路中, 实现逻辑和算术运算功能; (2)第二代半导体主要指以GaAs和InP等为代表的化合物半导体, 由于它们具有较高的发光效率和电子迁移率, 在光电子器件、微波器件及高迁移率晶体管领域有广泛的应用; (3)第三代半导体是以GaN和SiC等为代表的宽禁带半导体, 在高功率电子器件和短波长半导体照明领域扮演关键角色, 相较前两代半导体材料可在更高温度下稳定工作, 成为近年来半导体科技攻关领域的热点之一。

仔细想来, 上述分类方式实际上暗含了评价半导体材料的几个关键指标, 它们都与能带理论紧密相关。为方便理解, 图1给出了Si和GaAs的能带结构示意图, 即电子能量与波矢(准动量)的关系曲线。可以看到电子能量竟然无法在某一特定区域内取值! 这块电子禁入能量区被称为半导体的“禁带”, 其宽度即为半导体的“带隙”。以此为界, 其上部区域称为“导带”, 而下部区域称为“价带”<sup>[3-5]</sup>。首先需要关注材料是“间接”

还是“直接”带隙半导体, 前者是指导带最低点(CBM)和价带最高点(VBM)所对应的波矢值不同, 后者则反之。间接带隙半导体中的载流子跃迁往往需要借助于“声子”(声子反映了晶格振动的相关特性), 因此发光效率较低。第二个指标是载流子的迁移率(表征了载流子在电场驱动下的加速能力), 该数值与其有效质量密切关联, 由能带中某点处的曲率决定。第

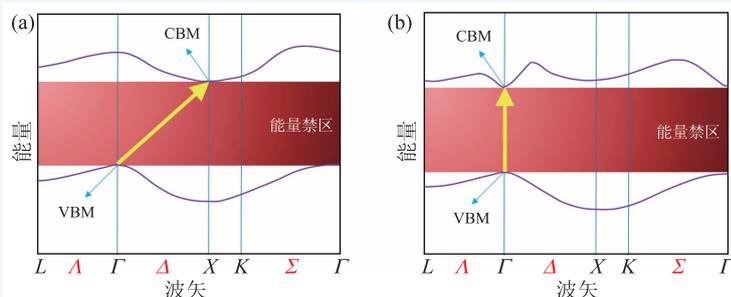


图1 (a)间接带隙半导体Si和(b)直接带隙半导体GaAs的能带结构示意图

三是带隙的大小，这是因为带隙数值不仅决定了光电探测与发光器件适用的波长范围，还部分标度了材料抵抗热扰动的能力(或器件的工作温度)。Si和Ge是间接带隙半导体，虽然可以为半导体逻辑和存储器件服务，在光电器件研发领域却只能让位于GaAs等材料，而人们对大功率电力电子器件和高频可见光器件的需求则推动了GaN等宽禁带半导体的研发。

需要指出的是，半导体材料不同代之间的划分仅仅描述了人们对半导体材料需求随时间的不断演进，并不意味着第一和第二代半导体已经退出历史舞台。实际上，第一代半导体Si材料仍然占据半导体市场的绝大部分，不同材料共存更多是因为它们在功能实现上能起到互补作用。

虽然无机半导体材料已经将很多梦想变为现实，但人类始终没有停下探索半导体新材料的步伐。特别是当有机半导体聚乙炔分子被发现之后，追求器件柔性、逼真色彩和环境亲和性的大众似乎看到了实现梦想的捷径，有机半导体的研究也如火如荼地开展起来了<sup>[7-9]</sup>。典型的有机半导体材料包括富勒烯(C<sub>60</sub>)、并五苯和三亚苯等<sup>[10-12]</sup>。如今，“人造皮肤”、“柔性显示屏”、“智能绷带”、“电子墙纸”和“可穿戴电子设备”等白热化的概念逐渐变为现实，更进一步拓展了半导体的应用范围<sup>[13-17]</sup>。近年来，基于钙钛矿结构半导体的有机太阳能电池展现出巨大的应用潜力，吹响了有机半导体进军光伏领域的号角<sup>[18-20]</sup>。

尽管半导体材料种类日渐丰富，但这种横向的扩张并未增强人们获得稳定单原子层半导体材料的信心。好在英国曼彻斯特大学的俄裔科学家Geim及Novoselov等不偏信传统认知，默默耕耘，终于在2004年一鸣惊人，通过大巧若拙的“手撕”方法获得了单层碳原子组成的石墨烯材料，开创了二维材料新领域<sup>[21-25]</sup>。虽然石墨烯由于其“零带隙”特征而难以作为半导体沟道材料应用在晶体管中(相关概念的介绍详见后文)，但它却拉开了二维半导体材料的研究序幕，各种由单层或少数层原子组成的半导体材料不断涌现，至今仍是材料领域研究的大热门<sup>[21-25]</sup>。这类材料

的优点显而易见，且不说薄、柔性与种类繁多等特点，单就其直观的原子级操控而言，就契合大众对科学发展的期望，同时成功变身为科研人员的“原子积木玩具”<sup>[21-25]</sup>。二维半导体材料大致包括以下几类：(1)各种“烯类”材料，如硼烯、硅烯和锡烯等，在高速电子器件和柔性器件等方面有潜在应用<sup>[26-28]</sup>；(2)过渡金属硫族化合物，包括带隙适中的MoS<sub>2</sub>和WS<sub>2</sub>等，可用于制备“轻量级”的柔性晶体管和激光器等<sup>[29-31]</sup>；(3)碳化物，典型代表有Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>和Ta<sub>4</sub>C<sub>3</sub>等，是较理想的储能材料<sup>[32-34]</sup>；(4)氮化物，包括宽带隙的BN等，是构造二维材料异质结中理想的势垒层，也常充当绝缘隔离层的角色<sup>[35, 36]</sup>。当然，还有许多其他二维层状材料也正快速进入科学家们的实验室，如黑磷<sup>[37]</sup>和有机二维材料等<sup>[38-40]</sup>，有望在光电器件和生物传感方面独辟一片天地。此外，一度占据研究前沿的碳基材料还包括碳纳米管等，相关研究结果引人入胜、层出不穷，具体可参见文末列出的综述文章<sup>[41]</sup>。

上面的讨论是在默认半导体材料为单晶材料的前提下进行的，实际上多晶和非晶半导体也在某些场合发挥着自身的优势。例如，多晶硅不仅可以作为场效应晶体管中的栅极，还能用于制作太阳能电池，而利用非晶材料制作光伏器件的研究也取得了长足进展<sup>[42-45]</sup>。

### 3 半导体异质结器件

半导体材料世界固然有趣，但难道仅凭其导电能力秉承中国人奉行的“中庸之道”，便可魔法般用于各种功能器件的制造吗？这么说自然形象易懂，却不免绝对和片面。实际上，要理解半导体器件的基本工作原理，读者们首先需要耐心地分析总结半导体材料及其异质结构的基本物理性质。

若说杂质敏感性是半导体的第一属性，估计大多数人能接受——前辈英才们未明其理而深受其害，当代豪杰们则掌控自如信手拈来。与此同时，另一个重要事实也不能忽略：半导体的载

流子浓度相对金属材料通常低三个数量级以上！正是这个半导体的第二属性直接盘活了半导体的世界，使其在光、电、磁和热等各种物理场施加的外部激励下，响应灵敏。进而，各种衍生的次级特性，如光敏性、电敏性和热敏性等就成为了半导体的标签。此外，半导体中的载流子也不再如金属仅有电子般单调，带正电的空穴开始露面，于是便有了p型(载流子为受主杂质提供的空穴)和n型(载流子为施主杂质提供的电子)半导体之分。人类很快就完成了一系列技术革新，掌握了精细调控载流子浓度和类型的掺杂手段。基于这两种具有不同导电类型的半导体材料，功能各异的半导体器件粉墨登场，所做的事情其实不难——让p型和n型半导体相互接触<sup>[4-6, 46]</sup>。若将一种材料分别掺杂成p型和n型两部分，得到的是同质结；若p型和n型半导体所用材料不同，则称为异质结。

不论是同质结还是异质结，它们的基本器件原理都是类似的，区别在于异质结中有更多的变化和更丰富的构造可能。图2是突变型pn结中载流子的分布示意图，可以看到，在p型和n型半导体界面附近有空间电荷区(由带电的施主或受主杂质构成)<sup>[4-6, 46]</sup>。这是由于载流子倾向于往低能量方向流动并聚集，直至空间电荷区中的内建电场大到将p型和n型半导体中的费米能级拉平为止。载流子承载着流动的电荷，它们的流失使得自由电荷难以进入空间电荷区。如此一来，空间电荷区虽有电荷之名却施行着阻碍自由电荷流动的行当，似乎称之为载流子耗尽区才不至于误导

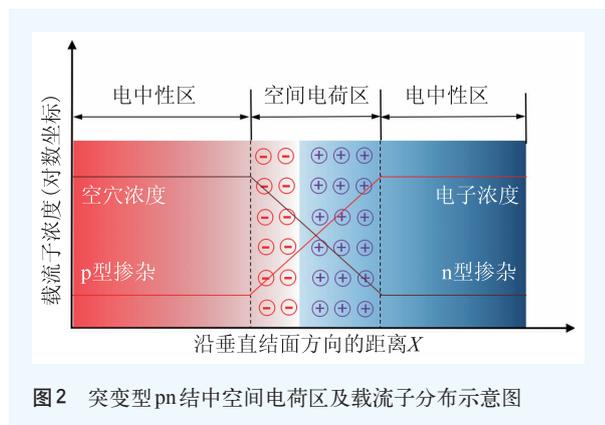


图2 突变型pn结中空间电荷区及载流子分布示意图

视听。需要指出的是，存在耗尽区是半导体的典型特征之一，是几乎所有半导体器件的基本要素，其重要性怎么强调都不为过。例如，pn结不仅是两端器件半导体二极管的核心，实现了整流、稳压、发光、探测和储能等功能，也是三端器件如结型晶体管、场效应晶体管及浮栅晶体管的重要组成部分，实现了逻辑运算、数据存储和数字成像等功能。

耗尽区的宽度可通过外加电压进行调控，p型半导体为电源正极时称为正向偏置，空间电荷区变窄，电流较大；反之则为反向偏置，空间电荷区变宽，电流较小乃至接近于零。正是由于pn结对外部电压响应的不对称性，使其具有单向导电特性，实现了二极管最基本的整流功能。

深入分析可知，正向偏置电压使耗尽区变窄的过程伴随着过剩载流子的注入，此时导带中非平衡的电子与价带中非平衡的空穴可能会发生复合。复合的种类与具体形式很多也相对复杂，此处不细致展开。较受关注的是辐射复合，即电子与空穴复合之后会发出能量与带隙相近的光，相应的器件称为发光二极管(LED)。利用具有不同带隙宽度的半导体材料，发光二极管的发光范围得到了有效扩展，得以大量应用在信号控制、显示和照明等领域。当然，由于半导体中电荷输运过程相当复杂，要考虑的因素(如载流子的限制、迁移率的提高和能量转化效率的提升等)很多，因此实际使用中各种两端型半导体异质结器件的核心结构通常是pn结的变种。例如，为了提高光电二极管的响应速度，往往在p型和n型半导体中加入一层本征半导体，形成所谓的p-i-n二极管<sup>[4-6, 46]</sup>。通过不同材料的组合构成二极管异质结构，还可以制备出诸多功能各异的半导体器件，如太阳能电池、激光二极管和微波器件等<sup>[4-6, 46]</sup>。

如果说二极管使人们意识到半导体器件的巨大应用潜力，那么场效应晶体管则不仅真正兑现了这一潜力，还奠定了半导体器件在信息技术中的统治地位<sup>[46]</sup>。作为半导体集成电路的核心部件，晶体管的主要功能便是实现电荷的可控操作，包括电信号的放大、电荷的存储和转移等。

晶体管与二极管最大的不同点在于引入了第三个电极——栅极，其目的是控制半导体的导电能力，亦即半导体导电沟道的通断。栅极通常也被称为“门电极”，形象地反映了它在晶体管中控制载流子通行的开关作用。

场效应晶体管包括结型和金属—氧化物—半导体型(MOS)，它们都包含两个背靠背的pn结<sup>[4-6, 46]</sup>。图3(a)示出了MOS场效应晶体管的结构图，其中，三个电极引出端分别是栅极、源极和漏极。栅极与半导体沟道通过绝缘电介质隔离，在栅极和源极(或漏极)两端施加电压能够积累或耗尽半导体中的载流子，从而实现源极和漏极间电流信号的控制。可近似认为栅压调控方法仅涉及电容的充放电过程，它有效降低了晶体管在开关状态间转换所需的能耗。晶体管的开关状态可用于二进制中0和1的表达，多个晶体管间通过三个电极相互连接能够形成多种功能器件，促使晶体管几乎出现在任何一个电子产品中：它能实现逻辑运算操作，耳熟能详的中央处理器芯片(CPU)即为最典型的例证；它能与简单的电容器件结合实现兼具容量和速度的数据存储功能，代表性产品包括动态随机存储器(DRAM)；它凭一己之力便能实现非易失(即断电数据不丢失)存储，只是需要增加一个被绝缘介质包围的悬空栅电极(称为浮栅，图3(b))，固态硬盘的风靡就是最佳证明；它还能基于电子对光的响应原理实现数字成像，相机以及摄像头中的电荷耦合器件(CCD)便是其完美代言<sup>[4-6, 46]</sup>。毫不夸张地说，晶体管是当今大多数半导体器件的核心要素，因此如何有效地减小晶体管的特征尺寸进而降低功耗并提高密度顺理成章地成为了半导体器件领域的研究主题。正是充分认识并把握住了这一点，在半导体工艺制程上始终独占鳌头的台积电和三星等公司才能长期受到大型芯片设计公司的青睐，而英特尔公司则成为了桌面/服务器端CPU芯片产业的独角兽。

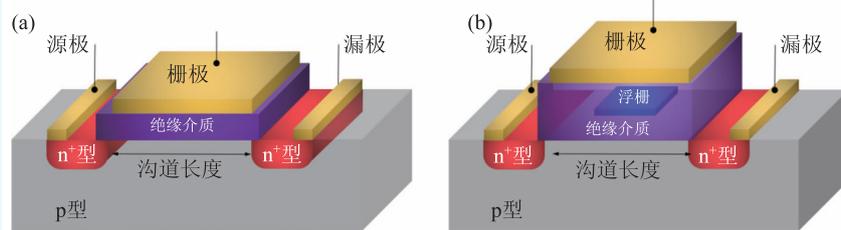


图3 (a)普通及(b)浮栅MOS场效应晶体管的结构示意图

篇幅所限，本节仅简要描述了二极管和场效应晶体管的基本原理和代表性应用，深入到细节必将展开一幅精美而震撼人心的画卷，例如江崎二极管的发明、蓝光二极管的实现、量子级联激光器的构想和量子霍尔效应的发现等<sup>[47-49]</sup>，不一而足。对半导体异质结器件、物理及相关应用感兴趣的读者，建议可参阅文末相关文献[3—6, 46]。

## 4 半导体自旋电子器件

纵观半导体的发展历史，几乎都是围绕控制电子电荷在材料中的分布做文章。半导体厂商专注于器件特征尺寸的缩小，以求减少电子所需跨越的距离，进而不断提高器件密度(或集成度)和响应速度，同时降低单个器件所需功耗，取得了巨大成功。以英特尔联合创始人命名的摩尔定律指出，集成电路中晶体管的密度大约每隔18个月便会增加一倍(该定律有过几次修正，此处仅阐述其核心思想)，这在过去半个多世纪里得到了印证。然而，当今晶体管器件的特征尺寸已进入纳米量级，量子效应开始显现，摩尔定律逐渐失效。早期，人们努力尝试在已有的框架内解决问题，例如针对电子隧穿效应等导致的漏电流问题，可以利用高 $k$ 介质和鳍式场效应晶体管(Fin-FET)结构在一定程度上进行解决。但是通过缩减器件尺寸提高性能的方法即将触碰其上限，探索新的器件原理似乎不可避免。

让我们重新审视信息技术的关键要素，虽然半导体在信息的处理(CPU和GPU等各种处理器芯片)、存储(内存DRAM和闪存flash等半导体存储器)、转换(各种光电器件如电荷耦合器件CCD

等)和传输(半导体激光器等)都起到至关重要的作用,但海量数据的存储一直都是以磁性材料为核心。这是因为磁性存储同时具有非易失、长寿命和大容量等综合优势,即使读写速度较慢且尚缺少随机存取功能,但在日益强调能源节约、数据长时间保存能力和读写寿命的当代,磁性存储相对于半导体存储仍然是数据需要长久断电保存时的首选。随着高速读写和随机存取功能在磁性存储原型器件得到成功演示并不断改进,磁性材料和器件展现出了更大的可能性。一般而言,宏观磁性的微观对应是电子的自旋(电子轨道运动对宏观磁性的贡献通常较小),是完全独立于电子电荷属性的另一个自由度。很长一段时间以来,电子的这两个自由度就似两条平行线般毫无交集,各行其是。那么,若在单一器件中综合利用电子的自旋与电荷属性,各取所长,是否有可能突破现有器件原理框架的限制呢?基于这个想法,科学家们开辟了半导体自旋电子学领域,期望利用自旋(辅以电荷)同时实现逻辑和存储等功能,颇有点大破大立的味道。

自旋的引入极大地丰富了半导体器件的类型,原则上可以依葫芦画瓢,根据半导体电荷器件设计出相应的半导体自旋器件。理想的画面固然很美,大多数半导体都不具有净自旋(或宏观磁性)的现实却异常冰冷。尽管少数半导体如岩盐结构的EuO和EuS等占尽4f电子壳层未了的便利而天然具有磁性,但这些材料不仅难以兼容主流半导体,还存在居里温度较低等问题<sup>[50, 51]</sup>。

显然,为了充分利用主流半导体的优越特性,人们需要解决的首要问题便是将净自旋引入这些半导体材料。要将磁性材料变为半导体似乎很难,但要让半导体拥有磁性却十分自然——就像旧时人们在半导体中增加电荷一般掺杂即可!稍有不同的是,此时掺杂的佐料需要是带有多余自旋(而非电荷)的磁性元素,如3d过渡族金属元素Cr和Mn等。20世纪70年代,人们首先在II—VI族半导体中取得了成功,获得了所谓的II—VI族磁性半导体,包括闪锌矿结构的(Zn, Mn)Se和(Cd, Mn)Te等<sup>[52-54]</sup>。其中,与II族元素等价替换的Mn元素有较高的溶解度,可以提供数量可观的局域磁矩。利用II—VI族磁性半导体较强的法拉第效应,它们已经被成功地应用在光隔离器中<sup>[54]</sup>。这类材料的缺点是很难通过掺杂改变导电类型和载流子浓度,同时磁性较为复杂,进而极大地限制了其应用范围<sup>[52-54]</sup>。等价磁性元素的掺杂之路行不通,自然要换个非等价的宿主材料研究一番,但少量掺杂通常很难获得长程铁磁序。这是由于宏观磁性的建立通常依赖于短程交换相互作用,而磁性元素在半导体中的平衡溶解度通常低于1%,从这个角度上看,自旋的掺杂比电荷掺杂要困难得多。好在乘着半导体科技发展的东风,半导体材料的制备技术已经得到了极大提升,利用非平衡的分子束外延技术可以大幅提高半导体中磁性元素含量到10%的量级,III—V族磁性半导体(In, Mn)As和(Ga, Mn)As成功面世<sup>[55-57]</sup>。与II—VI族材料不同,替代III族元素的

Mn原子不仅能提供局域磁矩,还能作为受主提供空穴载流子,其晶体结构及元素占位情况如图4(a)所示。进一步的实验和理论证明这类材料的长程铁磁序是由载流子为媒介诱导产生的,从而将二者直接关联起来<sup>[55-57]</sup>——这意味着只需简单照搬传统半导体中调控电荷的手段便可同时影响其自旋相关性质(器

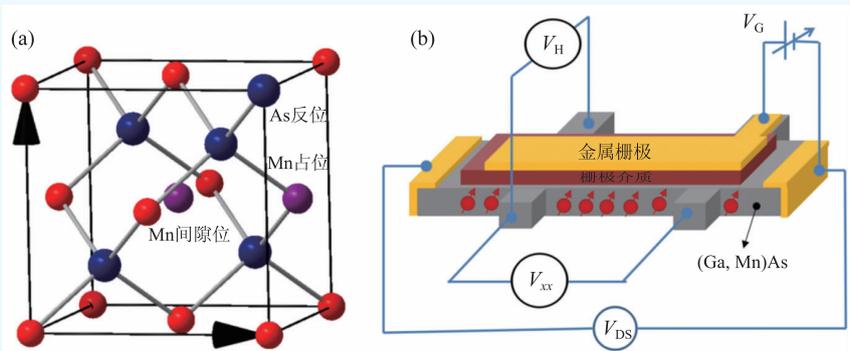


图4 (a)磁性半导体(Ga, Mn)As的晶体结构示意图;(b)基于(Ga, Mn)As薄膜的电控磁效应器件结构示意图

件结构见图4(b)!

部分解决了材料问题,相应的半导体自旋电子功能器件便如期而至,包括基于III—V族磁性半导体特别是(Ga, Mn)As薄膜的自旋发光二极管、自旋注入、全半导体磁性隧道结及磁性的电

场和电流调控器件等<sup>[56, 57]</sup>。之所以说部分解决材料问题,是因为目前III—V族磁性半导体的最高居里温度是(Ga, Mn)As中的200 K,仍然低于室温<sup>[56, 57]</sup>。尽管如此,III—V族磁性半导体还是很好地扮演了探索自旋相关物理效应的理想材料平台这一角色,许多在(Ga, Mn)As等磁性半导体中首次观测到的新奇物理效应如隧穿各向异性磁电阻效应、内禀反常霍尔效应和自旋轨道矩效应等都迅速地被应用到了金属自旋电子学中,完成了初期使命<sup>[56, 57]</sup>。此外,磁性半导体的研究触角还延伸到了IV族半导体和氧化物半导体等,其间故事亦是精彩纷呈<sup>[58—60]</sup>。更有甚者,常见于超导研究的BaZn<sub>2</sub>As<sub>2</sub>等材料也被创造性地用于研究电荷与自旋分离的磁性半导体,带来了新的研究视角<sup>[61]</sup>。可以预见,一旦居里温度较低等关键瓶颈取得突破,基于磁性半导体的异质结构功能器件必将有更广泛的用武之地!

半导体自旋电子学的研究内容还包括磁性金属/半导体复合结构以及非磁性半导体量子阱和纳米结构中的自旋相关现象等,物理内涵十分丰富,研究目标如自旋场效应晶体管的实现等亦十分宏大。但限于篇幅,本节内容便止步于此,期望能让读者窥一斑而知全豹,更为全面的介绍可详阅文末提供的综述文章[62, 63]。

## 5 半导体低维纳米结构

半导体异质结构器件不仅服务于国民经济和国防军工等诸多领域,同时也促进了许多新物理效应的发现。例如,整数和分数量子霍尔效应最早分别是在Si基MOS晶体管和(Al, Ga)As/GaAs

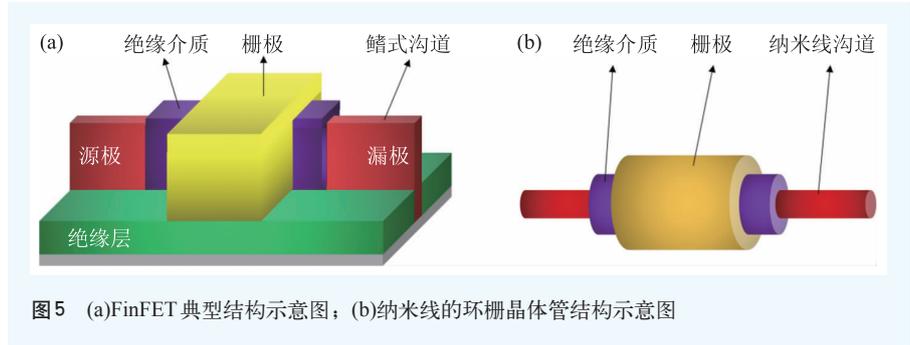


图5 (a)FinFET典型结构示意图; (b)纳米线的环栅晶体管结构示意图

二维电子气中发现的,而量子自旋霍尔效应则是在CdTe/HgTe异质结中得到了实验证实<sup>[64—66]</sup>。这些新奇的物理效应由于展现出自然之美而深深吸引人们,它们的发现同时也蕴含了人类对于高性能、低能耗甚至无能耗电子器件的不懈追求。

在沿用已有计算架构的前提下,进一步提升计算能力的关键是突破单个器件的性能瓶颈。前面提到,将半导体沟道制作成为超薄鱼鳍形状并将栅电极覆盖其上便可以有效提高栅控能力,相应的FinFET亦成为晶体管发展的里程碑事件之一,其典型结构如图5(a)所示。自然地,若将FinFET采用的栅电极“三面夹击”思想发挥到极致——制作出环栅晶体管,便能最大程度利用栅控能力从而降低漏电流,有望把晶体管的特征尺寸推向极限。不难想象,此时半导体沟道材料将变为二维纳米线的形式,绝缘电介质和栅极材料将纳米线依次包裹在内,如图5(b)所示。显然,理想的半导体纳米线沟道需要具备载流子迁移率高、直径较小和掺杂可控等特性,这些性质是最终获得具有低亚阈值摆幅、高开关比的高频晶体管的必要条件。窄禁带III—V族半导体InAs和InSb电子迁移率分别高达 $3.3 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 和 $7.7 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , InAs和InSb纳米线是较为理想的候选材料,我们近期的实验还表明,利用分子束外延技术能够可控地生长出直径约为10 nm的纯相超细InAs纳米线,开关比高达 $10^{8[67, 68]}$ 。

当然,对新型计算原理与框架的研究也早已提上日程,其代表性方案便是如今炙手可热的量子计算。量子计算的实现首先有赖于量子比特的构建,相应的物质载体包括冷原子、超导体、离子阱、金刚石氮空位中心及半导体量子点等体

系<sup>[69-71]</sup>。其中, 半导体基的量子比特由于其电学可调且易与当代成熟的电子技术兼容尤为引人注目。然而, 存储在量子比特中的信息极易受到周围环境的影响而出错甚至丢失<sup>[72]</sup>。因此, 物理学家们一直在寻找一种容错能力强的量子比特设计方案。基于Majorana费米子的容错拓扑量子计算是近年来被提出并得到普遍认可的一种解决方案<sup>[72, 73]</sup>。Majorana费米子的反粒子即是自己本身, 它是一种独特的无电荷且自旋为1/2的粒子。基于Majorana费米子构建量子比特有如下优势: (1)Majorana费米子满足 non-Abelian 统计规律, 即操作粒子的结果与操作的先后顺序有关, 这为设计新概念的拓扑量子计算机提供了重要途径; (2)Majorana束缚态总是成对出现, 而在空间上分离的两个粒子又保护了这种量子态不受每个粒子局部环境扰动的影响, 有利于解决量子比特的退相干问题; (3)基于Majorana费米子构建的量子比特能够进行编织操作, 进而有利于拓扑量子计算的具体实现<sup>[74]</sup>。

由于Majorana费米子在容错拓扑量子计算上的重要价值, 探测和证明Majorana费米子的存在成为目前凝聚态物理领域研究的重要问题。人们最早是在纳米线异质结构中观察到Majorana费米子的, 并迅速开展了相关的拓扑量子计算研究。其中, 基于超导体/半导体纳米线结构如Nb/InAs和Nb/InSb等形成p-波超导链, 人们可以通过超导近邻效应在纳米线两端构造出Majorana束缚态。实际上, 利用纳米线异质结构造量子比特有其独特优势: 在高品质材料制备方面, 纳米线的低维特性可以使应力在其表面充分释放, 外延过程中可以降低晶格失配对材料质量的影响, 从而实现纳米线形貌、组分和掺杂的精确控制<sup>[75-77]</sup>; 从量子比特扩展性的角度, 纳米线相关器件中可方便集成多个局域的金属或者超导接触以及顶栅、底栅和侧栅等控制电极, 从而极大增加了量

子比特的构造灵活性<sup>[78]</sup>。具体到III—V族半导体InAs和InSb纳米线, 由于二者具有较高的电子迁移率, 可以避免纳米线中由无序引起的电势涨落, 从而能够有效控制Majorana费米子的数目。此外, 作为窄禁带半导体, InAs和InSb纳米线易与超导金属电极形成势垒较低的透明接触<sup>[79]</sup>; 而在Majorana费米子的产生方面, 它们较大的朗德g因子意味着相对较小的磁场就足以满足要求<sup>[80]</sup>。总之, 基于半导体低维纳米结构的量子计算研究仍然方兴未艾, 必将大有可为。

综上所述, 在未来的电子器件研究与应用中, 半导体低维纳米异质结器件将占据一席之地。

## 6 展望与总结

毋庸讳言, 半导体产业过去追求的尺寸微缩红利已然将至尽头, 在触碰天花板之前发现行之有效的器件性能提升方法成为许多科学家追求的首要目标。但由于现今半导体产业的技术成熟度及业已形成的巨大市场, 在现有框架下继续缩减器件特征尺寸仍然是企业的首选。近些年来, 二维半导体材料成为研究热点, 正是由于它们通常仅含单层或少数层原子, 为人们研究原子层厚度极限下的相关物理效应提供了绝佳的材料平台。传统半导体纳米线则在两个维度上同时逼近原子厚度极限, 同样是科学家们在实现原子尺度半导体晶体管过程中的重要材料体系。然而, 在不可回避的“尺寸墙”到来之时, 寻求新的信息载体如电子自旋等已经或即将快速催生出新的科技研究领域。

可以想象, 对于利用超小尺寸半导体材料构建的异质结而言, 界面效应将成为决定器件性能的最关键因素。因此, 2000年诺贝尔物理学奖得主Kroemer的名言——“界面即是器件”——仍将是研究和设计异质结器件时所需遵循的金科玉律<sup>[81]</sup>。

## 参考文献

- [1] MacDonald A H *et al.* Nature Mater., 2005, 4: 195
- [2] <http://www.nobelprize.org>
- [3] 约翰·奥顿 著, 姬扬 译. 半导体的故事 (The Story of Semicon-

ductors). 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2015

- [4] 叶良修 编著. 半导体物理学. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [5] 黄昆原著, 韩汝琦 改编. 固体物理学. 北京: 高等教育出版社, 1996

- [6] Yu P Y, Cardona M. *Fundamentals of Semiconductors*. Berlin: Springer, 2001
- [7] Heeger A J. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, 73: 681
- [8] MacDiarmid A G. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, 73: 701
- [9] Shirakawa H. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, 73: 713
- [10] Curl R F. *Rev. Mod. Phys.*, 1997, 69: 691
- [11] Anthony J E, Brooks J S, Eaton D L *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2001, 123: 9482
- [12] Lee K J, Xiao Y M, Woo J H *et al.* *Nature Mater.*, 2017, 16: 722
- [13] Wang S H, Xu J, Wang W C *et al.* *Nature*, 2018, 555: 83
- [14] Chen S, Lou Z, Chen D *et al.* *Adv. Mater.*, 2018, 30: 1705400
- [15] Li C, Islam M M, Moore J *et al.* *Nature Commun.*, 2016, 7: 13319
- [16] Yokota T, Kajitani T, Shidachi R *et al.* *Nature Nanotech.*, 2018, 13: 139
- [17] Hua Q L, Sun J L, Liu H T *et al.* *Nature Commun.*, 2018, 9: 244
- [18] Snaith H J. *Nature Mater.*, 2018, 17: 372
- [19] Hodes G. *Science*, 2013, 342: 317
- [20] Lee M M, Teuscher J, Miyasaka T *et al.* *Science*, 2012, 338: 643
- [21] Geim A K. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, 83: 851
- [22] Novoselov K S. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, 83: 837
- [23] Neto A H, Guinea F *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81: 109
- [24] Peres N M. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82: 2673
- [25] Goerbig M O. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, 83: 1193
- [26] Feng B J, Zhang J, Zhong Q *et al.* *Nature Chem.*, 2016, 8: 563
- [27] Brumfiel G. *Nature*, 2013, 495: 152
- [28] Qin Z H, Pan J B, Lu S Z *et al.* *Adv. Mater.*, 2017, 29: 1606046
- [29] Zhou J D, Lin J H, Huang X W *et al.* *Nature*, 2018, 556: 355
- [30] Ye Y, Wong Z J, Lu X F *et al.* *Nature Photon.*, 2015, 9: 733
- [31] Mak K F, McGill K L, Park J *et al.* *Science*, 2014, 344: 1489
- [32] Anasori B, Lukatskaya M R, Gogotsi Y. *Nature Rev. Mater.*, 2017, 2: 16098
- [33] Ghidui M, Lukatskaya M R, Zhao M Q *et al.* *Nature*, 2014, 516: 78
- [34] Lukatskaya M R, Mashtalir O, Ren C E *et al.* *Science*, 2013, 341: 1502
- [35] Dean C R, Young A F, Meric I *et al.* *Nature Nanotech.*, 2010, 5: 722
- [36] Xue J M, Sanchez-Yamagishi J, Bulmash D *et al.* *Nature Mater.*, 2011, 10: 282
- [37] Li L K, Yu Y J, Ye G J *et al.* *Nature Nanotech.*, 2014, 9: 372
- [38] Wang C, He Q Y, Halim U *et al.* *Nature*, 2018, 555: 231
- [39] Sun Y R, Giebink N C, Kanno H *et al.* *Nature*, 2006, 440: 908
- [40] Hagleitner C, Hierlemann A, Lange D *et al.* *Nature*, 2001, 414: 293
- [41] Marconnet A M, Panzer M A, Goodson K E. *Rev. Mod. Phys.*, 2013, 85: 1295
- [42] Cai D L, Li P, Zhang S R *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90: 153513
- [43] Yang G T, Guo P Q, Procel P *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112: 193904
- [44] Park J, Park N, Varlamov S. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104: 033903
- [45] Sai H, Matsui T, Matsubara K. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109: 183506
- [46] 虞丽生. *半导体异质结物理*. 北京: 科学出版社, 2006
- [47] Esaki L. *Rev. Mod. Phys.*, 1974, 46: 237
- [48] Nakamura S. *Rev. Mod. Phys.*, 2015, 87: 1139
- [49] Faist J, Capasso F, Sivco D L *et al.* *Science*, 1994, 264: 553
- [50] von Molnár S, Read D. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91: 7
- [51] Ott H, Heise S J, Sutarto R *et al.* *Phys. Rev. B*, 2006, 73: 094407
- [52] Furdyna J K. *J. Appl. Phys.*, 1988, 64: R29
- [53] Saito H, Zayets V, Yamagata S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90: 207202
- [54] Onodera K, Matsumoto T, Kimura M. *Electron Lett.*, 1993, 30: 1954
- [55] 赵建华, 邓加军, 郑厚植. *物理学进展*, 2007, 27: 109
- [56] Dietl T, Ohno H. *Rev. Mod. Phys.*, 2014, 86: 187
- [57] 赵建华. *科学通报*, 2016, 61: 1401
- [58] Park Y D, Hanbicki A T, Erwin S C *et al.* *Science*, 2002, 295: 651
- [59] Dietl T. *Nature Mater.*, 2010, 9: 965
- [60] 许小红, 李小丽, 齐世飞. *物理学进展*, 2012, 32: 199
- [61] Deng Z, Jin C Q, Liu Q Q *et al.* *Nature Commun.*, 2011, 2: 422
- [62] Zutic I, Fabian J, Das Sarma S. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, 76: 323
- [63] Sato K, Bergqvist L, Kudrnovsky J *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82: 1633
- [64] von Klitzing K. *Rev. Mod. Phys.*, 1986, 58: 519
- [65] Tsui D C. *Rev. Mod. Phys.*, 1999, 71: 891
- [66] Konig M, Wiedmann S, Brune C *et al.* *Science*, 2007, 318: 766
- [67] Pan D, Fu M Q, Yu X Z *et al.* *Nano Lett.*, 2014, 14: 1214
- [68] Fu M Q, Pan D, Yang Y J *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 105: 143101
- [69] 周正威, 涂涛, 龚明 等. *物理学进展*, 2009, 29: 127
- [70] 郭光灿, 周正威, 郭国平等. *中国科学院院刊*, 2010, 25: 516
- [71] 王鹏飞, 石发展, 杜江峰. *中国科学技术大学学报*, 2014, 44: 362
- [72] Stern A, Lindner N H. *Science*, 2013, 339: 1179
- [73] Wilczek F. *Nature Phys.*, 2009, 5: 614
- [74] Beenakker C W. *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 2013, 4: 113
- [75] Wu Y Y, Fan R, Yang P D. *Nano Lett.*, 2002, 2: 83
- [76] Tribu A, Sallen G, Aichele T *et al.* *Nano Lett.*, 2008, 8: 4326
- [77] Björk M T, Ohlsson B J, Sass T *et al.* *Nano Lett.*, 2002, 2: 87
- [78] Fasth C, Fuhrer A, Björk M T *et al.* *Nano Lett.*, 2005, 5: 1487
- [79] Nilsson H A, Samuelsson P, Caroff P *et al.* *Nano Lett.*, 2012, 12: 228
- [80] Frolov S M, Plissard S R, Nadj-Perge S *et al.* *MRS Bull.*, 2013, 38: 809
- [81] Kroemer H. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, 73: 783