

半导体物理效应与光电子高技术产业*

王 启 明

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室 北京 100083)

摘 要 阐述了能带理论和晶格动力学的创建对半导体科学技术发展的历史意义,重点介绍了若干关键性半导体物理效应的内涵及其对光电子器件与技术发展所作出的源头性贡献,描绘了以半导体激光器为代表的现代光电子高科技产业的发展现状与趋势,指出了光电子高科技持续发展的主要方向。

关键词 半导体物理效应,能带论,晶格动力学,量子阱,激光器与光电子技术

THE PHYSICAL EFFECTS OF SEMICONDUCTORS AND HIGH-TECH OPTOELECTRONICS INDUSTRY

WANG Qi-Ming

(State Key Joint Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract A review is presented of the historic impact of energy band theory and crystal lattice dynamics on the development of semiconductor science and technology. Attention is focused on the implications of certain vital physical effects in semiconductors, and their contributions to the development of optoelectronic devices and technology. The state-of-the-art and future development of modern optoelectronic high-tech industry as represented by semiconductor lasers are described, as well as the main strategies for its sustainable development.

Key words physical effects of semiconductors, energy band theory, crystal lattice dynamics, quantum well, laser and optoelectronic technology

1 引言

20 世纪是人类社会发展史中取得辉煌成就的一个黄金时代,电磁学理论、量子力学和相对论的创建不仅加深了人们对物质世界内涵的深刻认识,同时也促成了一系列高科技产业(如计算机、通信、自动控制、能源、半导体产业等)的诞生与发展。它导致了社会生产力史无前例地飞速发展,人类在 20 世纪中所创造的财富几乎超过了有史以来的总和。科学技术的成就与运用已成为社会生产力中最关键、最活跃的重要组成部分,并为新世纪中的持续大发展奠定了坚实雄厚的基础。

电子作为信息和能量的荷载体,在 20 世纪的发展中作出了巨大的历史性贡献,物理学家常把这个“黄金时代”喻之为“电子时代”。

21 世纪的人类社会将是一个高度信息化的社会。随着社会物质文明和精神文明生活的高度发展,信息已不再仅仅是社会中人们通信联络的纽带,更将成为创造社会财富与丰富文明生活和提高社会素

质的源泉与通道。社会对信息量的要求将以太比特/秒($1\text{Tbit/s} = 10^{12}\text{bit/s}$)为起点呈现超越摩尔定律的爆炸性增长,物理学家又称它为三“T”高度信息化社会,即 Tb/s 的信息传输容量,TB 位元的信息存储密度和 $1/T$ 秒的信息处理速度。

基于已有的概念和技术,“电子”载体的功能受到“瓶颈”效应的限制,已经到了它的局限。“光子”由于不具荷电性,并能以最快的光速传播,又最容易体现波和粒子二象性,因此,利用光子作为信息和能量的载体将超越电子载体的功能,它将把信息高科技推向超高速、超大容量的宽带范畴,成为三“T”信息化社会中不可替代的佼佼者。

20 世纪后期,人们就已深刻地认识到“光子”的巨大潜力。美、日、西欧经济发达国家纷纷部署各种战略发展计划,把光子技术视为 21 世纪中高科技国力竞争的焦点。

光子技术既是电子技术的突破,又是它的延拓与发展。它们彼此关联,互为依托,构成信息化社会

* 2002-02-05 收到

的两大关键支柱。半导体光子芯片的运作离不开电子回路的支撑和操控。因此未来的信息系统芯片将是一类光子功能与电子功能融合一体的光电子集成芯片。这就是传统概念的半导体光电子学。

现代的半导体光电子学则更深刻地考虑到光子载体的光物理本质在半导体芯片中的功能体现与运作。为此,在芯片中就包含有多种必需的有源和无源光子器件,例如光频振荡器、放大器、接收器、光开关和调制器、光逻辑器件、偏振控制器以及分路与合路器等。通过光波导从物理上把它们连接在一起,构成光子信息集成回路。它将信息载波从微波频段扩展到光波频段,形成了实质上的光频域电子学,它就是现代概念的半导体光电子学。

光频振荡器是构成现代光电子学的核心与基础。半导体激光器是一种理想的谱线很纯的高功率密度相干光频振荡器。半导体光电子学与技术的发展取决于半导体激光器的不断更新换代,性能的不断改善提高。因此,半导体光电子技术与产业的发展也就体现在半导体激光器在各个高科技领域的有效的应用与推广,可以说,半导体激光器是光电子产业的龙头。

2 半导体光电子产业的发展现状与趋势

半导体激光器诞生于 1962 年,那时还只能在液氢温度下脉冲运作,然而作为现代光电子学的光频振荡器却要求必须能在室温下连续波工作,同时具有很高的可靠性和稳定性。1970 年秋,美国 Bell 实验室和前苏联的约飞技术研究所第一次在双异质结构半导体激光器中对此获得了重大突破,并经过了 3—4 年的努力,1974 年终于使器件工作寿命超过 10 万小时。如果说半导体激光器的诞生拉开了光电子学发展的序幕,那么长寿命双异质结构激光器的突破则是半导体光电子学获得工程应用与规模化产业发展的起点。

经历了不到 30 年的开拓发展,半导体激光器已经进入了全盛的成熟期。它的应用几乎渗透到国民经济、国防安全以及家庭民用的各个领域,并已形成和迅速发展成为强大的高技术产业。

以下重点介绍三个主要方面。

2.1 光通信与光网络

光通信与光网络是半导体激光器与光电子技术最深远重大的应用发展。它已经取代传统的高频载波(包括毫米波)电通信,通信光缆的铺设如同人体

中的神经一样遍及全球各个重要角落,不仅有连接各个国家和大城市间的主干道,同时还有各个地区内部的分干道,以及伸向广大小城镇和农村的地区线。信息化社会中每个用户乃至个人都需要及时占有和传送所需的大量信息。由于密集波分复用(DWDM)技术的运用,现在单根光纤已能传送 10Tb/s 以上的信息码流。当前的发展趋向是实现光通信网络化,把本地网的终端伸向办公室和家庭用户。由于数字化技术的发展,光网络的服务范围已大大超出邮电通信发展范畴。它将与计算机网、广播网以及诸如电子商务、金融体系等诸多服务体系统一在同一个光网络中构成一个宽带综合服务数字化光网络(B-ISDN)。多媒体 Internet 光网络的普及与发展为光电子产业提供了一个巨大市场、需求和机遇。

据估计,全球的光通信设备市场规模将从 2000 年的 235 亿美元上升到 2005 年的 573 亿美元以上。

我国地域广阔复杂,人口众多,加上政府重视,光通信市场的发展潜力尤为引人重视。预计 2001 年可能达到 200 亿元,2005 年将上升到 500 亿元以上,而且这是偏于保守的估计,无疑,光电子器件产业将在国民经济产业中占有重要的优势。

2.2 DVD 为代表的光盘存储技术

DVD 为代表的光盘存储技术是半导体光电子技术的又一重大的应用发展。它已逐渐取代磁头存储器,在音像家电市场上占据强有力的地位,并呈迅速增长的态势。随着半导体激光波长往短波方向(780nm→630nm)的拓展,激光束斑尺寸也在不断缩小。因此,光盘的存储密度正在成倍地提高,促使原来的模拟式的记录存储制式转向数码化。DVD 光盘存储器已发展为数字化的制式,现在一张光盘就能够存储或播放 2 小时以上的数码化电影。而 GaN 基蓝绿激光器的成功发展,又将把光盘存储器的水平推进到更高存储密度(如 20GB/片以上)的第四代。音像娱乐和家庭教育已成为现代家庭的普遍需求,无疑光盘存储器的供需和不断更新换代就是又一项涉及千家万户的巨大产业。

我国 DVD 市场基本上与国际同步成长,并有后来者居上的发展态势。如果按每年 1000 万台销售估计,则产值将达 150 亿元。我国加入 WTO 后产品打入国际市场,经济效益将更为可观。

DVD 光盘存储器的出现不仅使得音像播放能直接拼入 B-ISDN 光网,同时也为计算机的发展提供了一种更高存储量的外存储设备。DVD-RAM 大功率短波长激光器产业的发展,还将使光盘存储器

具有可记录和擦除的功能.因而也可成为计算机的存储器(DVD-ROM)使用.下一代万亿次/秒的超大容量计算机的发展正在考虑采用三维全息DVD-ROM.可见光盘存储器产业的发展天地远不只局限于音像器材,它也将成为计算机产业中的重要成员.这类高档产品无疑具有很高的附加值.

2.3 半导体大功率激光器与应用系统

原子级可控精度半导体超薄层外延生长技术(MBE,MO-CVD等)的成功发展促进了量子尺寸结构在半导体激光器中的应用.量子阱结构就是典型的成功之例.今天的半导体激光器几乎都采用了量子阱结构.它使激光器阈值电流密度数量级降低,如可达 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 以下.谱线特性进一步改善,如量子阱分布反馈激光器谱线宽度可压窄至 100kHz ,温度不敏感性明显提高,甚至可以在 200°C 以下环境温度下工作.尤为引人注目的是单面光功率输出可高达 1W 以上(甚至 10W).而通过阵列式组合,功率达万瓦级的半导体激光器也已能获得.半导体激光器出光面积很小,亮度高达兆瓦以上,发射波长则有很大的可调性.

980nm 波长的量子阱大功率半导体激光器的问世为掺 Er 光纤放大器提供了一种高效率的泵浦光源.这种半导体激光泵浦的掺 Er 光纤放大器(EDFA)立即取代了光通信干线的中继器,并很快地形成了EDFA产业.由于EDFA具有宽带响应的光放大特性,尤其适用于波分复用系统,因而被喻为引发了光通信技术的革命性进展.目前的EDFA装置价格还居高不下,甚至售价1万美元以上,有很高的附加值.

808nm 波长的量子阱大功率半导体激光器可以用来替代泵浦Nd:YAG的氙灯或氪灯.由于泵浦光谱域的理想匹配,泵浦效率的提高达一个多量级以上,不需要附加水冷系统,使Nd:YAG激光器的体积和重量数量级缩小,人们称此为激光二极管泵浦的固体激光器(DPSSL).DPSSL兼有半导体激光器高效率、高亮度、高重复频、高可靠的优点,而又同时保持高光束质量的固体激光器特点,是一种理想的强-强结合,被认为是现代固体激光器发展中的一次革命性突破.

DPSSL激光器尤其适宜于在机载和航天武器系统中的测距制导、引爆雷达等技术中应用,成为现代化高技术战争中的重要手段,是灵巧武器和手术打击的关键技术基础.例如美国在海湾战争中使用这类精密武器占有 8% — 10% 的比重.后来的“沙漠之

狐”行动中则高达 70% ,而在科索沃战争中惊人地上升到 98% .

808nm 波长DPSSL激光器万瓦级大规模组合件又被选用作钕玻璃激光器的泵浦源,作为实现激光可控核反应的核心装置.它属于聚变核反应,不会有放射性污染,这种聚变核反应所释放的巨大能量将是一种取之不尽的绿色能源.一台这样的核电站所需要配置的大功率半导体激光器将难以计数.它的成功发展无疑将引发能源技术的又一次革命,具有深远的重要的历史意义.

大功率半导体激光器在精密加工、激光医疗乃至生物工程技术的发展中也大有用武之地.

虽然大功率半导体激光器不会直接与家庭用户和个人发生关系,产业规模不如前两者,但它的技术含量很高,单价很高,产值依然相当可观,社会经济效益则难以估量.此外,以半导体激光为核心的光电子技术在信息显示、信息获取以及信息处理和自动控制等领域还有许多重要的不可替代的应用发展,并也都形成了不同规模的产业.限于篇幅,不再一一介绍.

纵观全局,不难看到,今天的光电子高技术已经形成并正在发展成为一支浩浩荡荡的产业大军,它将成为21世纪高度信息化社会发展的关键支柱.

3 固体能带论和晶格动力学是半导体科学与技术发展的基础

半导体科学的发展建立在20世纪30年代创建的能带论和50年代发展的晶格动力学的基础上.

固体能带论的建立和发展使人们能以更接近物质微观世界运动本质的量子论观念,深刻揭示半导体内部电子的运动规律,从而能够深刻理解、牢固掌握和灵活运用半导体的物性本质,发展出各种具备新颖功能的半导体器件.

能带论的建立虽起源于对金属物性的微观本质研究,但它在半导体中的发展则使之达到更加丰富、完善的高度,可以说半导体能带理论已成为固体能带理论最完备的范例.

能带论的研究表明,半导体中的电子几乎为晶格原子中未饱和的外壳层价电子所支配.低温常态下价电子几乎填满了低能量的电子态,这些电子态组成一个饱和的满带,也称价带.而相对于价带存在着一个最近邻的导带,常态下导带的电子态全部空置着,只有由外场激发的价带中的电子才有少数能

进入导带.然而这些少量的电子却决定了半导体的重要的宏观的物性.导带与价带之间的电子态是不允许存在的,这一能域称为禁带.禁带的能量间隔大小与半导体特有的电学和光学特性密切相关.

能带论又指出,有两种类型能带结构,即直接带结构和间接带结构的半导体存在.前者,如 GaAs, InP, 在导带和价带能谷中的电子态处于同一电子波矢空间(或称动量空间)的同一位置,电子的激发跃迁只需满足能量守恒的原则;而后者却处于不同位置,电子的激发跃迁还需同时满足动量守恒原则,因此间接带中电子的激发跃迁要困难许多,需要从半导体中寻求第三者提供动量的资助.这个第三者就是下面将要提到的晶格振动的声子.

能带结构的类型不同,尤其强烈地影响着半导体中电子与光子耦合跃迁的强度,因而也就成为半导体光电子器件发展中一个备受关注的问题.

半导体中“空穴”导电的概念也是源于能带论的研究.当价带中的电子受激发到导带中的同时,在价带中却留下了空置的电子态,亦即空位.在外场的驱动下,空位附近的价电子将会以它为目标接力式地移动,从而构成一种与导带电子运动方向相反的电流.它等价于带正电的载流子的运动,称它为“空穴”.电子-空穴对的概念贯穿于半导体器件物理的方方面面.

晶格动力学是半导体科学技术发展的另一重要基础.它从晶格原子微观振动的概念出发,深刻地揭示和描述了半导体晶体在温度场中的运动行为和规律.理论研究揭示晶体中存在两种类型的振动模,即低频率的声学振动模和高频率的光学振动模.前者以晶格长程运动贡献为主,而后者则来自于它的短程运动.这些运动又分为与振动波传播方向一致的水平模和相垂直的横向模,分别表示为 LA, TA, LO, TO 振动模.由于晶格振动的频率落在声波领域,而其能量也呈量子化的分布,因此又称它们为 LA, TA, LO, TO 声子.TO 声子即为横光学波声子,是声子中频率最高(也即能量最大)的一类,其能量与半导体所处环境温度有关,一般也只有 10meV 的量级.但由于晶格原子的质量远大于电子的质量,所以它具有可观的动量,足以在电子-光子耦合中充当第三者,协助完成间接跃迁的过程.

半导体晶格中充满着无数的声子,随时随地都能起着第三者的角色.然而这类的电子-光子-声子耦合跃迁为三体效应,跃迁几率强度仍然远不如直接带半导体二体效应的效果,至少低 2—3 个量

级,但毕竟提供了一条弥补的途径.

声子的贡献不仅在于协助实现间接带半导体中的电子-光子耦合跃迁,还蕴含有更多的丰富的内涵.例如,热电子的带内弛豫,实空间中电子对势垒的隧道穿越,带内能谷间电子的转移等诸多物理过程,这里声子都充当了慷慨提供动量的无私角色.这便是半导体中的电子-声子耦合过程.

基于声子能量的量子化特性,现在有人也对研究声子振荡器感兴趣,如能实现,将使半导体技术应用迈入声波频段.无疑,随着半导体科学技术的进一步发展,声子技术有可能成为一个新的研究热点.

4 半导体物理效应是光电子高科技产业发展的源头

光电子学器件分为有源和无源器件两大类.有源器件包括光频振荡器、光功率放大器、波长变换器、光信号接收器和光电能源转换器等.无源器件的种类则更多,主要有光开关、电光转换调制器、偏振控制器、光束耦合器、分路合路器等,它们是具有各种功能的波导器件.

光电子学器件比微电子器件种类更多,功能更复杂,涉及的物理效应也更深遂.下面作简单介绍.

4.1 光吸收与光电转换效应

当外部光子流入射到半导体中时,由于光子与电子的耦合跃迁,处于低能态的电子(通常是处于价带中的电子)吸收光子能量后,将激发跃迁到导带中的高能态,形成光电子.这一过程包含了半导体材料对光的吸收本领和光电转换的过程.当价带中的电子吸收光子能量后,跃迁到导带的同时在价带中留下了空穴,通常称为光生载流子,它能够参与外场驱动下的导电过程,而表现为光电导或光生伏特效应.它是各类光电探测器、光开关和光电池的物理基础.

GaN 带隙为 3.39eV,可以制作紫外光探测器, $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 的带隙随 x 值的不同可在 0.16—0.8eV 调节,尤其可用于发展 1—14 μ m 波段红外光探测器. InGaAsP 合金的带隙可调节到 0.8eV,为目前光通信 1.3—1.6 μ m 波段探测器的理想选择. Si 的带隙为 1.1eV,对太阳光谱有高的吸收效应,因而是现代太阳能电池的首选对象.

4.2 受激复合光跃迁

处于热平衡状态的半导体中的电子、空穴浓度直接与所处环境温度相关,并有一个确定的函数关系,这种载流子称为平衡载流子.

如若采取外界的手段,包括光激发、电子束激励、电场激发和 P-N 结正向注入等,都能在半导体中产生偏离平衡值的附加载流子,即非平衡载流子。一旦撤消外场,这些非平衡载流子(电子和空穴)将通过内场的耦合而复合消失。若复合过程中的附加能量以光子的形态释放,就是一类光跃迁辐射复合。直接带半导体,如 InP, GaAs 等化合物材料辐射复合跃迁几率很大,内量子效应可接近 100%,因而成为现在一切发光二极管(LED)的物理基础。

上述的辐射复合光跃迁,是一种随机的自发过程,发光谱带很宽,达 100Å 量级,又没有统一的位相关联,没有相干性,因此 LED 只能作为一种自然光源使用。

为提高激发强度,使价带中半数以上的电子被激发到导带中去,则将出现高能态的电子数大于低能态的电子数的反常状态,它偏离了正常的玻尔兹曼分布,称为粒子数反转分布,形同于虚构的负温度状态下的分布。处于反转分布的半导体,当有能量与带隙 E_g 接近的光子入射时,通过外部光场的扰动,上能级的电子有可能迅速通过辐射光跃迁,恢复到初始的正常状态,这个物理过程即称为受激光跃迁。受激光跃迁所发射出的光子具有与入射光子同一的频率和位相,是一种很强的单色相干光。

各种半导体激光器都是基于受激光跃迁的物理基础实现的。受激光跃迁具有可观的光增益,以此可研制出半导体光放大器,以及基于半导体光放大器的全光波长转换器。

4.3 室温激子效应

通过外场激发产生在半导体中的非平衡电子与空穴由于受到自身库仑场的吸引,在空间中的运动受到了牵制,类同 H 原子,形成一个整体。但由于它是存在于半导体介质中,这种整体相对比较松散,如果把价带中的空穴视为核心,则电子的运动轨迹半径可以覆盖几十个晶格原子,电子-空穴的这种聚合的整体称之为激子。激子作为一个整体可以在半导体中自由运动,又称为自由激子。激子的整体运动不表现出电流的特性,只有当通过外场或热场的激发使电子脱离激子的整体时才表现出导电的特性。外场激发所需的能量即为激子激活能,一般仅为若干 meV,因此一般半导体中如 Si, Ge 的激子在室温下几乎都已离化,而有些宽带隙材料如 GaN 等则可能超过 10meV,有很强的室温激子效应。

激子对于入射光有很陡的吸收边,当外来光能量(或频率)与激子的结合能相近时,将产生共振效

应,有很陡强的吸收系数,因而激子效应成为发展高灵敏光开关和光子接收器的物理基础。

激子光吸收有很快的响应速度,可达 ps 的响应时间,它已成为高速电光吸收调制器发展的首选对象。

由于激子的内场容易受到激发的载流子的屏蔽,即使在低强度光照射下,激子的强吸收效应也很容易导致出现饱和吸收的非线性特性,因此激子效应的充分运用也将成为发展半导体非线性光学器件的重要基础。

后面还将谈到处于量子阱中的激子有很强的 Stark 效应,这种效应还可用于发展高速光逻辑开关器件。

4.4 量子阱效应与能带工程

量子阱结构是由两种不同带隙、不同介电常数(或折射率)的半导体依次交替生长在一起,各层厚度大约只有若干原子层(10nm 量级),与半导体中电子波长相近。带隙小的半导体(如 GaAs)夹在带隙大的半导体(如 AlGaAs)之间,形成了电子和空穴的势阱,陷落在势阱中的电子、空穴只能在阱平面内自由运动,而在垂直方向则受到阱壁势垒的限制。电子和空穴波将由于阱壁的反射产生的干涉效应形成一系列的驻波态(即阱中电子或空穴的能态)。具有这种效应的势阱即称为量子阱。它使半导体中许多固有的物理特性产生了重要的人工改性。例如原来导带和价带内的准连续能态分布被代之以若干分立的子能带,能态分布变陡,密度减小。量子阱结构的采用使激光器温度特性有很大的改善,甚至可在 300°C 以下工作,阈值电流密度降低一个量级以上,低达 100A/cm,发射谱线变窄,可达 0.1Å 以下。尤其重要的是由于量子阱激光器具有很高的增益和低的损耗,因而能够获得几个量级提高的光功率输出,从 10mW 的量级提高到 W 的量级。时至今日几乎所有的半导体激光器都已采用量子阱结构。又由于两侧势垒对阱中电子、空穴有强的空间定域限制效应,因而量子阱中激子的激活能大为提高,使室温甚至高温下大量激子未被离化,增强了激子的共振吸收效果,量子阱中的激子能够承受更强的电场,因而呈现出更强的场致吸收效应,吸收峰往长波方向的移动(红移)有更大的频域,即称为量子限制 Stark 效应(QCSE)。QCSE 效应已成为发展高速光开关、光逻辑器件和低损耗高速电光调制器的物理基础。

随着原子层外延生长技术的成熟和对能带改性的深刻认识,后来人们又采用两种晶格失配度大的

半导体材料(如 InGaAs 和 InP 等)来组成量子阱.现代的外延生长技术已能使量子阱层控制在弹性形变的临界厚度之内,因此在阱区材料内就存在很强的应力场.它可以是压应力场或张应力场.应力场的出现将对半导体能带的价带产生强烈的影响,使简并化的价带出现分裂,并产生交叉移动.这种物理效应将对量子阱的介观物理特性进一步施加人工改性,其结果是使半导体激光器的特性几乎全部进一步得到优化,尤其重要的是它能够使半导体激光器产生纯偏振态(TE 或 TM 态)的激光输出.它又为偏振技术的利用提供了新的机遇,从而使半导体激光器的发展登上了又一个新高度.

4.5 场致折变效应

不同的半导体材料晶格结构各异,因而具有不同的介电常数或折射率,而同一半导体材料如果掺杂浓度不同,由于自由载流子对等离子色散的贡献也会呈现折射率的差异.当然前者比后者差异更显著.如果做成三明治夹层结构,中间折射率大,两侧折射率小,即类似于相反形态的势阱结构.然而对夹层中的光场却起到了与量子阱一样的效果,光在这种三明治中的传播将受到折变场的限制,此结构即为半导体光波导.光波导的作用如同电子系统中的金属引线,它有很低的损耗和很强的定域导引性.折变效应是一切光波导的物理基础.

施加外场(如电场或光场)可以改变半导体的折射率,这就是普克尔(Pockels)效应(或电光效应)和光折变效应,统称场致折变效应.将它引入到波导结构中,通过外电场改变波导传输层的折射率,将会使传输光的传播系数产生变化,使传输光引入附加相移 $\Delta\phi$,因此在波导结构中通过电场可以调制传输光的位相.若将光波导做成干涉仪结构,则通过两臂的相干效应可以实现输出光强的强度调制,这就是现在电-光波导调制器和波导光开关的物理基础.

光折变效应有直接效应和间接效应,前者是半导体在强光照下,通过光场中的电场分量所引起的场致折变效应;后者则是在某种特殊样品中,通过入射光激发的光生载流子被邻近的陷阱陷落后形成强的局域化的空间电荷场,导致折射率变化.

不论哪一类光折变效应都呈现出非线性光学特性,可以用来研制光开关器件和阵列,并具有可擦除功能和存储功能.它对光信息的随机存储和 A/D 变

换以及光信息处理有重要的应用.

以上所介绍的半导体物理效应是推进光电子器件与应用技术发展的最重要物理基础,也是今天光电子产业发展的源头.当然还有一些其他物理效应的贡献,因篇幅所限,不再赘述.

5 结语

一项奠基性的基础理论和模型的创建改变了人们对物质世界传统观念的认识,可持续地影响人类文明社会的发展.就凝聚态物理领域而言,能带论和晶格动力学就是明显的例证.

源头性物理效应的发展和新一代工艺技术的开拓则对社会生产力的发展起着巨大的催产和促进的作用.半导体物理效应与光电子高技术产业的紧密关系就是无可置疑的例证.

高技术产业的可持续发展取决于对物理效应的透彻掌握和灵活运用,同时又依赖于新效应的不断发现、研究和利用.

新的源头将会开拓出新的技术与产业,满足社会新的更高的需求.纳米结构、量子点、非线性光学效应、单电子、单光子器件、量子载体的研究将为新一代光电子器件与高技术产业的发展作出新的贡献,成为量子信息科学与技术发展的关键基础.

参 考 文 献

- [1] 王启明. 光纤通信, 2001(3):8; 2001(4):8 [Wang Q M. Optical Fiber Communication, 2001(3):8; 2001(4):8 (in Chinese)]
- [2] 王启明. 世界科技研究与发展, 2000(2):160 [Wang Q M. World Sci-Tech R&D, 2000(2):160 (in Chinese)]
- [3] 褚君浩. 物理, 1999(8):471 [Chu J H. Wuli(Physics), 1999(8):471 (in Chinese)]
- [4] 王启明. 半导体学报, 1998(10):141 [Wang Q M. Chinese J. Semiconductors, 1998(10):141 (in Chinese)]
- [5] 王启明. 物理, 1998(9):124 [Wang Q M. Wuli(Physics), 1998(9):124 (in Chinese)]
- [6] 王启明. 物理, 1996(2):82; 1996(3):91 [Wang Q M. Wuli(Physics), 1996(2):82; 1996(3):91 (in Chinese)]
- [7] 朱龙德. 物理, 1997(7):411 [Zhu L D. Wuli(Physics), 1997(7):411 (in Chinese)]
- [8] 王启明. 物理, 1991(1):22 [Wang Q M. Wuli(Physics), 1991(1):22 (in Chinese)]
- [9] 陈正豪. 物理, 1991(4):223 [Chen Z H. Wuli(Physics), 1991(4):223 (in Chinese)]