

21 世纪光电子学的发展方向

Development of Optoelectronics in the 21st Century

刘式墉

(吉林大学 长春 130023)

王玉堂

(国家自然科学基金委员会 北京 100083)

提到 21 世纪,人们常用“信息时代”这具有鲜明特点的词来形容。我们理解,进入 21 世纪后,人们的工作、生活等无不与信息的产生、重组、分析和传输紧密相关,人类社会将进入信息化社会。其突出的标志是发达的信息产业及先进的信息技术。在信息化社会里,信息产业对信息技术提出了需求,并极大地推动其发展;反之,先进的信息技术为信息产业的形成提供了保证并带来日新月异的变化,甚至产生“信息革命”。例如,当今先进国家酝酿并实施的“信息高速公路”计划,预计到 2000 年将现有劳动生产率提高 20~40%。这一切都是以当代材料科学、微电子及光电子科学和技术为基础和先导来实现的。有远见的科学家已预见到,材料、生物工程、光电子将是 21 世纪最重要的三大产业。本文从科学研究的角度出发,着眼于基础及应用基础研究的发展方向及“热点”来探讨光电子学的发展,而不过多讨论其产业的形成。

光电子技术是继微电子技术之后近十几年来迅速发展起来的一个新兴的技术领域,它集中了当代固体物理、导波光学、材料科学、微细加工和半导体科学与技术的科研成就,成为一门有极好应用前景的富有生命力的新兴交叉学科。

量子阱超晶格人工改性新结构、新材料的诞生及能带工程的成功应用大大地推进了光电子器件与技术的发展,极大地改善了光电子器件的性能,传统的光电子器件与技术将逐步被以量子尺寸结构为特征的新一代高性能光电子器件所代替。

随着科学技术的发展,人们对超高速率、超大容量(1 000 吉比特/秒)信息传输和实时高速交换与处理能力的要求愈来愈高,而实现这一点,根本的途径是发展光子集成回路(PIC),而量子阱超晶格的发展又给光子集成回路注入了新的生机,使它显示出更为光辉的前景。

近年来,随着聚合物材料的日趋成熟,聚合物

光电子学日益为人们所重视,特别是 1993 年出现了一些重要突破:聚合物波导调制器已在传输六路有线电视信号方面获得成功;聚合物光纤放大器增益达到 27 分贝,聚合物红光发光二极管(LED)已经在三维图像显示图中应用……。可以预料,价格便宜的聚合物光电子器件的性能(特别是可靠性)将会有更大的突破,并成为 21 世纪光电子学大家庭中的重要一员。

随着光学及微细加工、微机械的发展,研究微米和亚微米级光学元器件的基本理论、应用技术及其制造技术的微小光学也将愈来愈引人注目。微小光学的发展将使光学元器件微型化,更进一步,为适应光学并行性的要求,同类光学元件的阵列化、组合化也将迅猛发展。随着不同类光学元器件的集成化和多功能化,三维集成光学也将成为热门。预计 21 世纪微小光学将和微电子学一样,在科学技术和国民经济各个领域发挥重要的作用。

随着光计算、光集成的发展,人们对以价格相对便宜、易于与微电子技术共容的硅基光电子学的兴趣也愈来愈浓,促进了硅基光电子学的发展。

几个引人注目的发展方向和热点

1. 量子阱器件倍受青睐

随着分子束外延和金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术的发展,人们能够使不同的半导体材料在相当薄的尺寸(小于德布罗意波长)内实现有序的交替生长,从而获得量子阱或超晶格结构。由于在量子阱中的电子或空穴受到垒的限制,因而在垂直阱壁方向电子的运动被局域化,从而导致了阱内电子(空穴)能态的不连续,出现了一系列分立电子能态。量子阱内的电子(空穴)就成了二维电子(空穴),因而阱内电子(空穴)将组成以分立能级为基底的一系列子能带,原来抛物线状的能带分布函

数变成了阶梯状分布。这种改变导致许多新颖的物理特性。

正是由于量子阱结构的能态密度是阶梯状的,减少了一个维度的贡献,从而使量子阱激光器的阈值电流密度从 10^3 安/厘米² 量级下降到每平方厘米仅数亚毫安量级,从而极大地降低了功耗。此外,这种阶梯形的能态密度,也限制了注入载流子的热扩展效应,因此量子阱激光器的阈值增益受温度影响小。例如,GaAlAs/GaAs 量子阱激光器的特征温度可高达 437℃,比双异质结激光器高 3~4 倍。阶梯状能带分布也使量子阱材料有更为陡峭的增益谱和更大的微分增益。换句话说,量子阱激光器的增益随注入载流子浓度的变化更为灵敏,从而使激光器中电子与光子的耦合时间常数变得很短,因而量子阱激光器的弛张振荡频率上升 4~5 倍,达到 30 吉赫,甚至更高。

在超薄层势阱中,激发态的自由电子和自由空穴组成的自由激子在垂直生长方向上的运动受量子尺寸的限制,而成为二维激子。当阱宽窄到相当于体材料中的激子玻尔半径时,自由激子束缚能显著增加,甚至室温下也可以不离化,量子阱超晶格材料室温激子的存在,使得量子效应器件具有重要的非线性光学特性,并可据此制作光开关、光存储、光逻辑等多种功能的量子效应器件,对称式自电光效应器件(S-SEED)就是其一例。

更进一步,为了实现带结构的人工改善,人们发展了应变量子阱结构,应变存在于晶格失配的超薄层中,尽管外延层与衬底有晶格失配,但如果外延层足够薄,以至这种应变仍在弹性限度之内,则可避免产生位错,而这时由于晶格失配引起的在生长平面内的双轴压(或张)应力分解为一个静水压力和一个在生长方向上的单轴应力。根据外延层与基底材料晶格常数的不同,单轴应力可以分为张应力或压应力,静水压力只改变材料的带隙,从而改变吸收、发射波长,并根据组分变化进行人工调整。例如,0.98 微米的光纤放大器的泵源就是根据这一思想设计制造的。而单轴张(或压)应力可以改变价带轻、重空穴的子带相对位置,改变空穴有效质量。

对于生长平面经受双轴压缩力的压缩应变状态,尽管最高空穴子带是重空穴带,但重空穴有效质量减小,有利于进一步减小激光器阈值和功耗;对于伸张应变状态,轻空穴带可能成为最高空穴子带,尽管轻空穴有效质量有所增大,但非辐射复合亦减小,激光器阈值电流仍然可以作得较小,特别是由于此时 TM 模增益增大,尤其适于制造对偏振不灵敏的激光放大器。

关于量子阱激光器的可靠性问题,据最近报道,通过合理设计,1.48 微米多量子阱大功率激光

器的寿命已经超过 630 000 小时,这无疑是十分令人鼓舞的消息。

还需要特别指出,在量子阱、超晶格基础上发展起来的能带工程为光子集成回路的发展注入了新的活力,带来了新的生机。很显然,量子阱器件在低阈值、低功耗及快速方面的优越性质,对发展实用化的光子集成回路十分重要,很难设想用具有高功耗的激光器能获得实用化的光子集成回路;另外,利用量子斯塔克效应可使量子阱电吸收调制的吸收峰与量子阱分布反馈(DFB)激光器发射峰分开,从而获得良好的激光器与调制器的单片集成器件,目前日本研制的这种集成模块,峰—峰调制电压小于 2 伏,10 吉比特/秒下信号传输已获得成功。

正因为如此,预计到 21 世纪量子阱器件及其集成将会倍受青睐。

2. 聚合物光电子学前景诱人

近年来,价格便宜的聚合物在光电子领域中的应用愈来愈多。

IBM 公司的阿马登(Almaden)研究中心 1993 年报道,他们使用聚合物电光调制器和 832 纳米半导体激光器实现了 6 个模拟电缆电视信号的同时传输和接收,这也是第一个在模拟信号传输中使用聚合物调制器并获得较好信噪比的结果。

有机聚合物相当便宜,并且由于它们有相对低的介电常数,因而使它们有更高的调制频率和较低的驱动功率。IBM 公司在传输实验中用的聚合物调制器是用 35% 的 2,4,5-三芳基咪唑掺杂的聚醚酰亚胺制造的 2 微米厚平板波导,折射率为 1.64 (在 832 纳米下),包层是折射率为 1.54 的 6 微米厚的光交联丙烯酸酯,下电极是 500 纳米厚的铝,上电极是 0.5 纳米宽的铝条,输入输出是用棱镜耦合。

在传输实验中,6 个通道的电缆电视彩色图像和声音是被“忠实地”重现,但噪声稍有增加(其中部分是由于激光器输出的强度噪声引起的)。

关于聚合物光波导,据 1993 年报道,利用旋转涂敷以及模压办法,已经制成 6 条 45 厘米长的聚合物光学总线,对于 632 纳米的光,这个聚合物光波导总线的损耗为 0.5~2 分贝/厘米。我们知道,化合物半导体光波导损耗大体上也是每厘米零点几分贝的量级,这个损耗还是大了一些,要想达到实用化,还有许多工作要做。

关于聚合物发光管,近年来作了很多研究工作,它的主要优点是价格便宜,制造方便,发光颜色很容易通过分子结构或掺杂控制 $\pi-\pi^*$ 能隙来改变,并且可以制成各种特殊形状的光源,红光聚合物发光二极管相对已经比较成熟,发红光的聚合物发光二极管的亮度已达 1 500 坎/米²,寿命也很可观,有的报道可达 4 200 小时以上,1993 年日本东

芝公司已经用红光聚合物发光二极管发展了一种能在自由空间产生三维图像的体扫描红光发光二极管显示器,它可用于流体力学、医学成像和计算机辅助机械设计中的形象化显示。为了形成三维图像,系统具有产生线、面、球、立方体、柱等功能,它是由 50 个板(面间距为 2 毫米),每板 48×16 个红光发光二极管,共 38 400 个像素组成。为了提高分辨率,正在研制每板 100×100 个红光发光二极管,共 100 个板(板间距为 1 毫米),共 1 兆个像素的扫描器。

关于黄光,美国加州大学圣巴巴拉(Santa Barbara)分校的聚合物和有机固体研究所作了许多有益的工作。他们于 1993 年研究出一种新的双氧杂胆甾烷—聚苯撑乙烯(BCHA—PPA)用于黄光发光二极管,用钙作电极,导通电压约 8 伏,峰值发射波长为 570 纳米,量子效率为 0.35%。为了改善量子效率,他们进一步引入电子传输层,并把电极改为空气稳定电极如铝、铟等,量子效率分别达到 0.4%(铟电极)和 0.25%(铝电极)。目前黄光聚合物发光二极管亮度还不够。

至于蓝光聚合物发光二极管,目前国外只有几个实验室报道了他们的研究工作,并都只说是室光可见,没有报道具体亮度。最近我国吉林大学选用一种新的材料和空气稳定电极,亮度已经达到 44 坎/米²,是目前报道的最好结果,但还没有解决好寿命和稳定性问题。

聚合物激光器目前也正积极研制,人们预期聚合物发光二极管由于激光染料的高发光效率而有较低的阈值,1993 年人们已经制作了端面聚合物发光二极管,发散角已作到 10° 以内,但尚未激射。

聚合物光纤放大器(POFA),由于容易加工,价格低,直径大,具有高的光纤耦合效率和光束引入率,可望在局域网和光传感器件中有重要应用。1993 年,多模 GI(Graded—Index)型在可见区有增益的聚合物光纤放大器首次在日本 Kelo 大学研制成功,它具有 0.5 米长,0.25 毫米芯径和 0.5 毫米光纤直径,增益高达 27 分贝,它的 3 分贝带宽高达几百兆赫。

1993 年,第一个聚合物光子集成回路问世,它是由通过聚合物平板波导把波导模转化为衬底模式的 12 个全息光栅,以及 12 个把衬底模式耦合成为与衬底垂直的输出光的全反射全息组成,对所有全部内反射全息的衍射效率均大于 70%,从而可以实现 1 到 12 个表面法线三维光互联。

综上所述,1993 年是聚合物光电子学取得突破性进展的一年,前景诱人。但是,聚合物光电子学要走向实用化还有许多问题需要解决,特别是抗老化问题,减小光波损耗问题等,而解决这些问题的关键是材料体系的选择。从这几年的发展,特别是

1993 年的许多重要突破,我们认为只要给予充分的重视并认真作好某些基础研究,聚合物光电子学走向实用一定会实现,而且为期不会太远。

3. 硅基光电子学初露锋芒

硅和锗是微电子学中最重要基质材料,但都属于间接带隙材料,根据 $\vec{k}$ 守恒原理,带间辐射复合必须有声子参与协助。这是一种多体效应,跃迁几率很小,因此硅、锗都是低效率发光材料。这就是硅一直未能进入以 GaAs 为代表的 III—V 族材料光电子学领域的原因。但从技术价值或经济效益考虑,人们一直在探索实现硅(或锗)高效率发光的途径。利用短周期超晶格的布里渊区折叠效应,就是企图实现带结构改性的重要能带工程。

天然的体硅和锗材料有类似的带结构,价带顶处于布里渊区的中心处,导带底有两个谷点,最低谷点即 X 带谷点,处于 $\vec{k}$ 空间($\vec{k}=\pi/a_0$)0.8 位置,Γ 带的谷点能量都比 X 谷点高。布里渊区折叠的带结构工程就是利用原子层 Si_mGe_n 的交替生长在材料内部人工构成另一个比天然晶格大的周期,因为硅、锗中最低的 X 带谷点恰好在 $\vec{k}=0.8$ 处。因此,如果人工构造的周期选择为 10 个原子层尺寸,即 $m+n=10, L=5a_0$,那么人工引入的新周期将把天然的布里渊区分成 5 个等分。第 5 个子布里渊区与第 4 个子布里渊区的交点恰好就在最低的 X 带谷点处。根据布里渊区构成的原理,这些人工引入的子布里渊区将被折叠到第一子布里渊区中,因此在新的人工材料中,X 带谷将移到 $\vec{k}$ 空间中心的原点,而与价带中的子带组成准直接带隙结构。

人们期望这种准直接带隙结构的形成将使辐射复合跃迁的几率大大提高,因而有希望做出高效率的硅基发光和激光器件。在光荧光和电荧光谱的初步研究中,对此已从实验上得到了证实,但是为实现高效率的发光或激光器件,对其制备工艺和器件优化设计尚待进一步努力探索。

为了发展硅基光电子学,人们同时也试图在硅片上生长 GaAs(或 InP),并进一步在硅基上制造 GaAs(或 InP)激光器,均已获得成功。但由于硅与 GaAs(或 InP)晶格常数不同,失配位错在 10^6 /厘米² 以上。由于缺陷在 GaAs 中的影响比在 InP 中的影响要大得多,目前硅衬底上的 GaAs 激光器性能不高,稳定性极差,而采用特殊工艺在硅上制造的量子阱结构 InP 激光器发射波长为 1.5 微米、边模抑制比为 20 分贝,阈值电流 55 毫安,6 000 小时老化实验未发现性能有退化。这些结果为发展硅电子器件与激光器的单片集成器件的发展奠定了基础。

4. 光子集成回路是 21 世纪光电子(光子)器件发展的必然趋势

上述分析已经表明,无论是 III—V 族半导体光电子(光子)器件、聚合物光电子(光子)器件,还是