

光子晶体在半导体激光器中的应用*

郑婉华[†] 任刚 邢名欣 杜晓宇 王科 张冶金 陈良惠

(中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室 北京 100083)

摘要 激光的发明,将人类带入光通信、光存储、光显示的高科技文明中,随着高科技的不断发展、进步和应用范围的不断扩大,对激光的要求更高,例如低阈值、高效率、高亮度、高速、小体积、好的模式特性等,这些要求在现有的传统激光器理论及技术中是难以达到的。但是当人们将光子晶体的理论与现有激光物理和技术相结合时,则有望突破传统激光器的性能瓶颈。例如,提高自发辐射速率,同时获得更高的自发辐射向受激辐射的耦合效率,实现激光器的无阈值工作,利用光子晶体对光子态的调制作用,可以获得比传统激光器大几个数量级的光学腔品质因子,大幅度提高激光的亮度、单色性,结合光子晶体微腔及其显著增加的光学腔品质因子,可以提高激光器的调制速率等,因此,人们预期光子晶体科学与技术将成为未来光电子领域发展的核心之一。文章介绍了光子晶体在半导体激光器中的应用,指出光子晶体科学技术引入发展了几十年的半导体激光器中,使半导体激光器展现出更加优异的性能。最后文章作者展望了光子晶体激光器的未来发展和应用的方向。

关键词 光子晶体,激光器,点缺陷腔

Applications of photonic crystals in semiconductor lasers

ZHENG Wan-Hua[†] REN Gang XING Ming-Xin DU Xiao-Yu
WANG Ke ZHANG Ye-Jin CHEN Liang-Hui

(Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The invention of the laser brought us into the era of light communication, light storage, light displays, and so on. High quality lasers, with low threshold, high efficiency, high brightness, high speed and small volume, have become essential for future applications. However, all the above-mentioned properties have limitations in traditional laser physics and technology. Photonic crystals combined with modern laser physics and technology have opened a way to overcome the bottleneck of such limitations. Based on the manipulation of photon states in photonic crystals it is now possible to increase the spontaneous emission rates so that a thresholdless laser will finally become realizable, and the simultaneous achievement of an ultra-high cavity quality factor and ultra-low cavity volume will result in lasers with much greater brightness and higher speed. It can thus be expected that photonic crystal science and technology will become the basis of future opto-electronics. We describe the use of photonic crystals in semiconductor lasers, whereby the laser characteristics are greatly enhanced, and discuss the potential applications and future developments of photonic crystal lasers.

Keywords photonic crystal, laser, point defect micro-cavity

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2006CB921700),国家自然科学基金(批准号:10634080,60677046),国家高技术研究发展计划(批准号 2006AA03Z403)资助项目

2006-10-20 收到初稿,2007-06-27 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: whzheng@red.semi.ac.cn

1 光子晶体的研究进展

1864年,Maxwell J C^[1]发表了一篇题为《电磁场动力学原理》的文章,从此著名的电磁场理论诞生了,Maxwell以一组电磁场结构方程组表述了电磁场的结构和性质,预言了电磁波的存在以及光不过是一种电磁波。结合Maxwell方程及固体物理的理论,光波在周期分布的散射元结构中表现出令人惊奇的现象,如光子带隙的存在、光波的负折射效应、光速减慢效应等,所有这些性能都归结为光子晶体对光子态密度的调制。在光子晶体中,光子态密度完全不同于光子在自由空间或介质中的分布。美国Bell实验室的Yablonovitch E在研究如何抑制自发辐射时,理论上首先模拟出在三维的周期散射元结构中,在特定的电磁波频率范围内,所有方向的光子的模式完全消失,在此能量范围内,光子态密度分布不再与光子能量及材料的介电特性有关,因此相应于该能量范围的自发辐射被强烈禁止^[2],同时,Princeton大学的John在研究无序的散射元结构时,发现特定能量的光子可以被强烈地局域在结构中。此后,他们于1987年各自独立地提出了“光子晶体”(photonic crystal)这一新概念。光子晶体是不同介电性能的材料在空间中周期排列的结构,当这种周期与光波长相当时,将对光子在该材料中的传播行为起到强烈的调制作用。

光子晶体的一个典型特征,就是光子带隙(photonic band gap, PBG)的存在,处于带隙内的光子态不存在,因此光子带隙也被称为光子禁带。继光子晶体概念提出之后,1991年,Yablonovitch制作出第一个具有全方位光子带隙的结构,光子带隙为10—13GHz^[4],理论计算和实验结果吻合得非常好,进而在微波波段率先用实验证实了光子禁带的存在。类似于电子晶体,当电子在具有周期势场的晶格结构中运动时,电子的态分布将形成能带结构,带与带之间可能有能隙^[5],当光子在光波长量级的周期排列的介电材料中传播时,由于周期性所引起的布拉格散射,将在特定的频率范围内产生光子禁带。如果光子能量落入光子禁带频率范围内,则不能在光子晶体中传播,利用此特性可以制作真正的高反射器件。

如果光子晶体材料的介电性能在周期结构中出现了扰动或缺陷,就会像电子晶体出现缺陷态一样,在光子晶体能带中出现缺陷态。点缺陷中产生的光

子将被局域在这个缺陷周围,形成谐振腔。正是采用这种谐振模式,1999年,美国加州理工大学和美国南加州大学的研究人员,首次展示了第一只半导体二维薄板光子晶体点缺陷激光器^[6],实验上首次证实了这种周期排列的光子晶体材料具有控制光子的能力。

同样,光子晶体中也可以形成线缺陷,其行为类似于光波导。众所周知,传统介质波导在直角转弯处,存在辐射损耗,一般传输率只有30%,因而利用传统波导,不可能在小尺度上实现光学器件的集成,1996年,Mekis^[7]等人提出了光子晶体线缺陷直角波导,理论模拟表明,光场被局域在直角波导中传播。1998年,美国麻省理工学院的研究人员Fan等,提出了利用光子晶体点缺陷谐振腔(也被称为微腔)的选频特性和光子晶体线缺陷波导的导波特性的方案^[8]。构建一个微米尺度的上/下载滤波器的方案^[8]。总之,在光子带隙中引入缺陷能级,则可以制备光子晶体微腔,微腔的品质因子最高可以达到几十万,是传统技术制备微腔的品质因子的百倍以上,利用这种微腔制作的滤波器、激光器等,都具有更高的频率选择性和好的模式特性。

目前,随着科技的飞速发展,对光电子器件性能的要求越来越高,传统的光电子器件面临着众多新的考验,例如,传统的激光器存在功耗大、阈值高、模式特性差、尺寸大、不易集成等缺点,成为限制激光器被更广泛应用的瓶颈;光波导和反射镜已广泛应用于集成光路和光通信中,由于目前的光电子技术无法制备直角波导和高反射率的反射镜,同样限制了该器件的实际应用,而光子晶体的研究为突破现有光电子器件水平提供了可行的方案。经过近二十年的研究,人们逐渐确信,光子晶体具有特殊的控制光子的能力,在传统光电子器件中引入光子晶体结构,将突破传统器件中的物理瓶颈,提升器件的性能;在光子晶体芯片上集成激光器、波导、滤波器、耦合器等,将能实现微纳结构下的全光集成。

2 二维半导体光子晶体激光器的研究发展

众所周知,激光与普通光不同,它不是天然发射和存在的,激光是受激辐射在谐振腔中被放大的结果。1917年爱因斯坦预言,当足够的电子受到激发跃迁至特定能级时,入射光子的能量如果恰好等于

原子二能级的能量差,就会触发级联反应,使高能级的所有受激的粒子降到低能级,放出同频率、同相位的大量光子。美国贝尔实验室的研究人员在1954年终于在微波波段首先实现了微波激射,接着,他们在1957年至1958年间,利用钾蒸气等作为工作物质,实现了红外和可见光波段的激光的激射,1960年,梅曼首次采用固体材料——红宝石,实现了固体激光器的激射。激光的发明和发展,改变了人类的生产、生活和科技活动的面貌,在它发明的40余年中,激光器从气体激光器到固体、液体激光器,直至半导体激光器,科学家们不断地从工作物质、激光腔、抽运方式等方面推动着激光器研究的快速发展,而不同种类的激光器也在不同领域的应用中发挥着重要的作用。特别是半导体激光器以其微型、成本低、性价比好等优点在光通信、光计算、光存储等领域被广泛使用。在光通信和光信息系统进一步发展的要求下,集成光路的研究在国际上开始被重视起来。由于把光子作为信息的载体比用电子有更明显的优越性,具有各种功能的集成光路,无论是在理论上还是在实验上,在国外还是在国内,都在积极探索,并随着微加工技术的进步,近十年来集成光路研究取得了很大的进展。但是,光子是中性粒子,因此不像电子一样易于被操纵,因此,尽管早在上世纪50年代就有人提出用光子携带信息,但是迄今为止,光信息技术的应用还仅仅局限于信息的传输即光通信。而在信息处理方面则无法取代电子技术。而光子晶体这种新材料,可能为解决这一问题提供机会。人们可能根据光子晶体的能带工程,来达到控制光子运动的目的。更重要的是,人们可以在一块光子晶体上将具有不同功能的光子器件集成起来,实现光子集成芯片,在这个芯片中,光子晶体激光器作为核心器件提供光子。

众所周知,激光器由三部分组成:激光工作物质、谐振腔、激励源。光子晶体对光子态的调控作用,使得引入光子晶体结构后,能够形成激光的振荡,因此,某些结构的光子晶体发挥着谐振腔的功能,同时,由于特殊结构的光子晶体微纳谐振腔具有极高品质因子和极小模式体积的性能,这同时提高了激光工作物质的自发辐射速率——Purcell效应,因此,对于光子晶体微腔,这是一个特殊的谐振腔,它不仅保持腔内光场的振荡,同时也从物质本身本征地增强了这种振荡。

1999年,加州理工大学的Painter^[6]等人设计制作出第一个光子晶体点缺陷腔型激光器。图1所示

为其激光器的结构,其特点是激光器结合了光子晶体的光子量子调控与半导体量子阱材料受限电荷态的量子调控,利用微电子加工技术,在InGaAsP/InP量子阱材料上,实现了波长为1.55 μm 的激射。这种结构采用的是三角晶格光子晶体,三角晶格光子晶体的带隙比四方晶格的宽,因此相对而言,制作缺陷腔激光器较容易。2001年,Reese^[9]等人研究了四方晶格光子晶体的缺陷腔激光器。

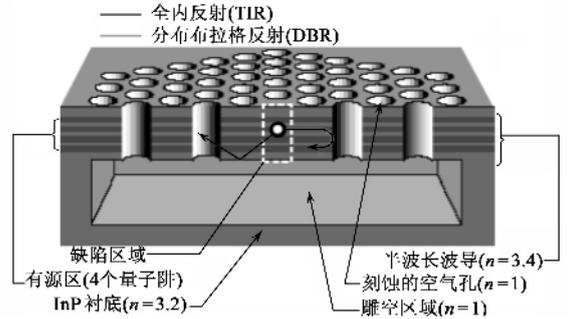


图1 二维光子晶体缺陷腔激光器结构^[6]

为了使得光子晶体激光器更加实用化,必须采用电注入的方式。2001年,密西根大学的Bhattacharya^[10]等人发表了第一篇关于电注入光子晶体缺陷腔激光器的设计理论探讨。如图2(a)所示,它利用DBR作为底层,加强垂直方向上的光限制。2004年底,韩国先进工业技术研究院的Lee Y等人^[11]等人发表了更为合理的电注入光子晶体缺陷腔激光器的结构,如图2(b)所示,它利用单缺陷腔下方的介质柱提供了一个导电通道,并充当一个导热的介质,从而解决了光子晶体激光器导热不佳的问题。文献[11]中报道的器件的总Q值高达2600,阈值电流仅为260 μA 。

为了得到更高的Q值,人们还对微腔的结构做了很多优化设计。2003年,京都大学的Noda^[12]小组对光子晶体微腔的结构进行了微调,首次在Nature上报道了微腔电磁场边界调控效应对微腔品质因子的影响的物理机制,同时他们在无源器件上获得了高达4万5千的品质因子。如图3所示,通过微调缺陷腔内孔的位置,使得腔内电磁场在光子晶体边界处的散射减小,最小化泄漏能量,从而提高了微腔的Q值,优化了微腔的设计。

在Noda的启发下,人们对缺陷的概念有了新的认识,光子晶体内的缺陷不仅仅是去掉某些晶格点上的空气孔,还可以采用晶格错位的概念,在完整三角晶格中引入晶格位移,同样可以在禁带中获得缺陷态,文献[13]报道了位移型缺陷腔激光器。

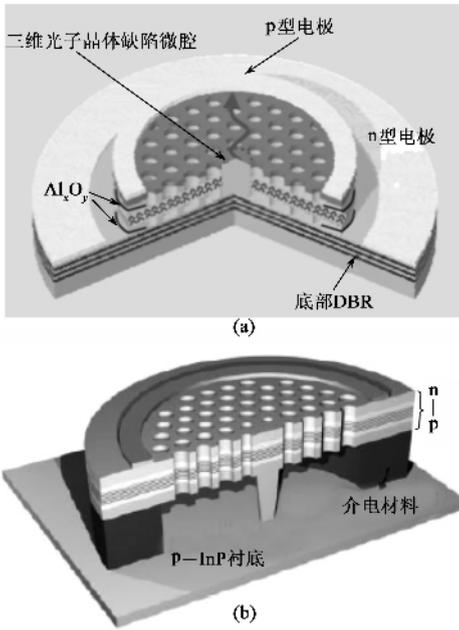


图2 两种电注入方式的光子晶体缺陷腔激光器

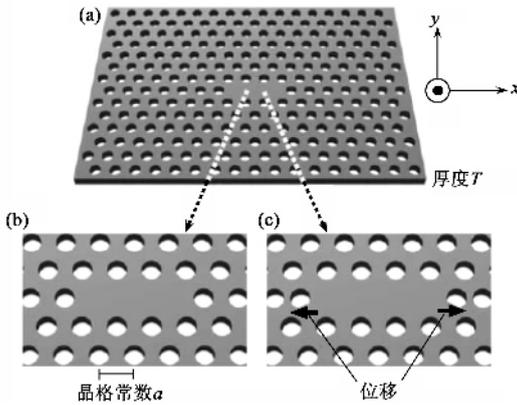


图3 优化微腔结构实现高Q值腔

与缺陷腔型面发射激光器同步发展的还有带边发射激光器,在1999年,Noda小组发表了第一篇二维带边光子晶体激光器的结果^[14],他们将多量子阱有源层的结构和带有一个光子晶体结构的晶片键合在一起(如图4所示),该种激光器是根据光子晶体对态密度的调制,通过能带带边及晶格的对称性,形成激光的振荡,激光的出射方向仍然垂直于光子晶体平面,这种激光器对半导体的技术要求极高。几年之后的2006年,在美国加州 Long Beach 的 CLEO 会议上,报道了输出功率在 mW 量级的研究成果^[15],他们认为,虽然其输出功率与传统激光器相比较有很大差距,但是随着高技术的发展,这种光子晶体激光器必将在激光效率、激光阈值等方面表现出优越的性能。

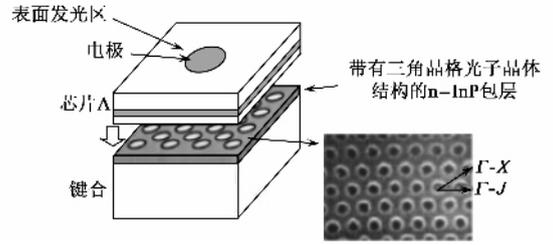


图4 二维带边光子晶体激光器的结构

同样在2006年的CLEO会议上,美国南加州大学 O'Brien^[16]教授领导的研究小组,我们与日本横滨大学的合作研究小组^[17],同时报道了利用光子晶体波导带边的边发射激光器的研究成果,其结构更趋简单,其原理在于利用缺陷波导的带边慢光效应,实现光与增益物质的强烈相互作用,匹配的光波导将激光腔中的激光耦合输出。这种激光器被认为是面向未来平面内全光集成的核心,如何将其发展成为未来实用化器件,从激光原理到技术的各方面的工作引起了人们的兴趣。

随着光子晶体微腔激光器的研究的深入,由单一缺陷微腔发展到多个光子晶体微腔的耦合。2006年,美国 Stanford 大学的 Vuckovic^[18]研究小组在 Nature 上首次报道了通过多个微腔耦合获得超快激光的研究成果,其激光器的调制速率超过 100GHz,目前传统激光器的调制速率在 40GHz 左右。

总之,光子晶体在半导体激光器中的应用主要有三类:第一类是根据光子禁带中的缺陷态对光子的局域效应,形成微腔,对受激辐射进行放大,产生激光输出,人们尝试了多种缺陷型激光器^[19-20],主要目的是提高微腔的品质因子 Q,降低激光器的阈值;第二类是根据光子晶体的能带工程对光子态密度的裁剪作用,利用能带中高对称点处的布拉格散射或低群速度的特性,形成无几何边界的驻波腔,最终实现该点处的受激辐射放大;第三类激光器是在光波导中引入光子晶体结构^[21],人们在研究单模垂直腔面发射激光器时,为了提高单模激光功率,根据光子晶体对光子态密度的调制,在大孔径垂直腔激光器的输出 DBR 中,引入光子晶体结构,抑制高阶横向模式,从而获得大孔径下的单模激光输出。

3 我们的工作

如前所述,当周期性排列的介电材料的晶格常数在光波长量级时,光子晶体就具有调制光子的能力,而在光通信、光存储、光计算中应用的光波长都

在微米或亚微米量级,因此,调控波长在微米量级的光子晶体的介电材料的周期必须在亚微米量级,当采用空气孔或介质柱构成的光子晶体时,空气孔和介质柱的尺寸则必须在微纳尺度,这给光子晶体材料与器件的研制带来了极大的困难。随着半导体微加工技术的发展和成熟,将微电子工艺与光电子工艺有机结合,成为亚微米结构光子晶体材料与器件研究的必经之途,因此半导体材料的微纳制备技术成为光子晶体激光器研制的核心技术。

我们的工作主要集中在光子晶体微腔激光器的研制方面,光子晶体微腔激光器帮助人们深入研究微纳腔中光电子的动力学过程,光与物质的相互作用过程等,同时微纳腔激光器由于其极小的体积,便于集成,在光信息处理和光子集成方面有广泛的应用前景。

半导体纳米制造技术的进步使得制作波长尺度的微腔成为可能。当包含有源材料的微腔的腔损耗很低时,这种微腔就可以成为有效的低阈值激光器。因为光子晶体微腔具有正比于 $(\lambda/2n)^3$ 的小的模式体积以及很高的品质因子,所以光子晶体缺陷激光器为零阈值激光器的最终实现提供了可能性^[22]。目前大部分光子晶体缺陷激光器都是在二维光子晶体板结构上实现的^[6,11,13,20]。在二维光子晶体板中,光子在两种机制下受到三维的限制:在水平方向上,二维光子晶体结构的存在限制了光子在某些波段的传输,即光子带隙的存在;在竖直方向上,板波导的内部全反射限制了光子在竖直方向上的传输。各种类型的光子晶体激光器已经陆续报道^[6,10-20]。

光子晶体的光子带隙的存在有利于自发辐射的抑制及受激辐射的产生,在目前研究的典型的光子晶体结构中,空气孔型的三角晶格光子晶体具有最大横电场分量的光子带隙,而压应变结构下的半导体量子阱材料的自发辐射具有横电场特性,因此,我们的光子晶体激光器是基于空气孔型三角晶格的光子晶体。

研究中采用的 InGaAsP/InP 量子阱半导体材料是用金属有机化学气相沉积(MOCVD)方法生长在(100)方向的 n 型 InP 衬底上的。有源层的厚度约为 290nm,增益峰的位置为 1540nm。实验中采用电子束曝光的方法,将纳米尺度的光子晶体图形首先在电子束曝光胶上形成,然后通过感应等离子耦合(ICP)干法刻蚀将光子晶体结构转移到半导体材料上,最后,采用湿法的腐蚀制备出光子晶体薄板结构。光子晶体制备技术中的关键核心技术之一是

ICP 干法刻蚀技术,这是一项上世纪 90 年代开始迅猛发展的低损伤的干法刻蚀技术,迄今为止对于硅材料的刻蚀,在刻蚀选择比、刻蚀速率、刻蚀形貌等方面已经发展很成熟,随着纳米科技的发展,纳米尺度的硅图形的制备也很成功。特别是,人们采用 ICP 干法刻蚀技术实现了光波波段硅基光子晶体的研制,成功地演示了光子晶体对光子的调控作用。相比较而言,由于材料本身的特殊性,III-V 族半导体材料的 ICP 刻蚀技术仍在研究和发展中,人们尝试不同的方法,目的是实现刻蚀速率快且稳定可控,具有高的各向异性及高的刻蚀选择性。我们的刻蚀实验^[23]采用 Oxford Plasma System 100 系统,通过对刻蚀气体的离化和刻蚀中物理与化学反应的研究,在衬底温度略高于室温的条件下,实现了高各向异性的 InP 基材料的光子晶体微纳结构空气孔阵列的刻蚀,制备出周期为 400—500nm,空气孔直径为 100—300nm 的二维三角晶格光子晶体结构。

形成光子晶体缺陷腔的方法就是改变三角晶格中晶格单元的折射率,而其中最简单的方法就是将一个空气孔去除。当选取空气孔的半径为 $r/a = 0.24$ 时,超元胞方法的理论分析表明,带隙中只存在偶极模。同时我们分析了当调整缺陷腔周围的最近邻空气孔的半径时带隙中缺陷模式的频率分布和电磁场分布的演化,优化了的光学微腔,获得更高的微腔品质因子和低抽运功率下的激光器的激射^[24]。

图 5 为典型的点缺陷腔型光子晶体激光器的 SEM 结构图和激光器的输入输出特性曲线。

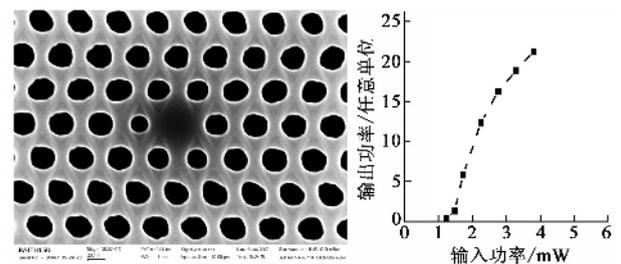


图 5 单一缺陷微腔激光器的扫描电镜图和激光器工作的输入输出特性曲线

实现单一模式激光器的激射一直是人们努力的方向,光子晶体微腔中包含有多种模式。如在图 5 所示的光子晶体微腔中,可能存在施主型的双重简并偶极模、四极模和非简并的单极模及六极膜,这些模式都是由于腔体的等效折射率发生变化后,由空气带的平板模式演化而来。对于简并的偶极模,可以通过调整微腔结构的对称性实现简并模式的简并

解除,如在 Painter 工作中^[6],采用非对称微腔结构单元,特别调整沿某一方向的空气孔的大小,打破微腔的对称性,这种结构的偶极模式的分裂达 40nm,他们预示,当有源材料的增益范围与光学腔的模式匹配时,就有望实现单偶极模的激光器的激射。在我们的研究工作中^[24],从理论上提出,可以通过拉伸整体光子晶体结构,使得简并的偶极模式分裂超过 60nm,获得单偶极模激光器的激射。这种方案,避免了光子晶体技术中对电子束曝光及 ICP 刻蚀的极高要求,易于实现。图 6 为理论模拟的单偶极模的近场光分布与实验结果的比较,实验与理论模拟结果吻合很好。

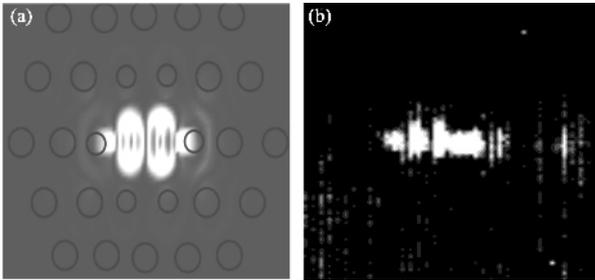


图 6 (a)理论模拟激射光场的分布 (b)实验观测结果

光子晶体对光子的强调控能力,在不同的光子晶体器件中都得到证实,这为人们实现控制光子的梦想打开了大门。研究具有与电子集成芯片相类似的控制光子的光子晶体集成芯片成为人们所有努力的最终目标之一。如果将光子晶体集成芯片比喻成可以完成各种功能的人体,则芯片中的激光器就是人体的心脏,也是集成芯片中的核心器件。如何研制出在平面内传播的光子晶体激光器,成为是否可以实现光子晶体集成芯片的关键。为了这个目标,如前所述,Noda 小组、O'Brien 小组、我们研究小组和 Baba 小组,分别实现了不同结构的边发射光子晶体波导激光器。在我们的研究工作中,通过在耦合输出波导中引入啁啾波导结构,一方面满足激光腔中的振荡光场矢量与输出波导的匹配,另一方面解决了波导带边处的慢光效应对光的强吸收,获得了输出效率提高 214 倍的好结果^[17]。

4 展望

迄今为止,光子晶体有 20 年的发展历史,取得异常迅速的发展,可以说是一门正在蓬勃发展的新学科。光子晶体不仅给固体物理和光电子学带来新的理论问题,其应用前景十分广阔,目前已经吸引了

国际学术界的视野,成为研究领域的焦点。人们预测,以光子晶体为基础的新的科学技术将成为支撑 21 世纪的基础技术。将光子晶体结合半导体纳米结构是光子技术移植入量子限制效应区域的典型方案,它使得光子技术进入了量子效应控制区域,光子晶体在光波长尺度范围内控制光子,而半导体纳米结构限制电子和空穴在电荷的热德布罗意波长的尺度内,这两者的结合是彻底的、完全的对光子和电荷的量子约束,这是光电子材料和器件发展至今的又一次质的飞跃,人们有可能使制作出的器件具有传统光学不可比拟的惊异性能。光子晶体在激光产生方面的应用刚刚起步,人们一直关注着具高效率、高功率、高亮度、高速、以及模式特性好的激光器的诞生。目前,本项目组在光子晶体激光产生原理方面进行如下三方面的研究,首先,目前垂直腔激光器的自发辐射向受激辐射的模式耦合效率仅为 10^{-3} 量级,而光子晶体激光器研究迄今最好水平约为 10^{-1} 量级,提高了两个量级,因此,从理论上深入研究光子晶体的光量子调控机理对光电子动力学的影响,将能够为我们探索高效率、低阈值乃至无阈值激光器打下基础;其次,面向全光集成的边发射激光器的研究,成为未来平面内全光集成的核心,研究光子态、光子模式之间的转换也是研究微纳结构光子晶体的光量子调控的一个重要研究内容。另外,光子晶体的光量子调控,如何锁定光子模式之间的相位,这是获得更窄脉冲以及高脉冲功率的必经之途。

总之,光子晶体在激光器中的应用研究是集高技术、光量子与受限电荷的量子动力学新原理于一身的一门新学科,必然需要面对和解决诸多新问题,再加上未来信息领域对高性能激光的需求,使得这方面的研究方兴未艾,科学意义重大。

致谢 对本组研究生马小涛、蔡向华、日本横滨大学马场教授、中国科学院物理研究所张道中教授等的帮助表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Maxwell J.C. Proceedings of the Royal Society of London 1864, 13 531
- [2] Yablonovitch E. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20) 2059
- [3] John S. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20) 2486
- [4] Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Phys. Rev. Lett., 1991, 67 2295
- [5] 黄昆著(韩汝琦改编)。固体物理学。北京:高等教育出版社,1988[Huang K(Han e R Q Ed.). Solid State Physics. Beijing: Higher Education press, 1988(in Chinese)]

[6] Painter O , Lee R K , Scherer A *et al.* Science , 1999 , 284 : 1819

[7] Mekis A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1966 , 77 3787

[8] Fan S *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1998 , 80 960

[9] Reese C , Gayral B , Gerardot B D *et al.* J. Vac. Sci. Technol. B , 2001 , 19 : 2749

[10] Bhattacharya P J , Sabarinathan W D , Zhou P *et al.* IEEE Circuit and Devices Magazine , 2003 2 : 25

[11] Park H G , Kim S H , Kwon S H *et al.* Science , 2004 , 305 : 1444

[12] Akahane Y , Asano T , Song B S. Nature , 2003 , 425 944

[13] Nozaki K , Ide T , Hashimoto J *et al.* IEEE Electron. Lett. , 2005 #1 843

[14] Noda S , Yokoyama M , Imada M *et al.* Science , 2001 , 293 : 1123

[15] Kunishi W , Ohnishi D , Miyai E *et al.* CLEO 2006 , USA , California Long Beach , May 21 - 25.

[16] Yang T , Lipson S , O'Brien J D *et al.* CLEO 2006 , USA , California Long Beach , May 21—25

[17] Zheng W H , Ma X T , Ren G *et al.* CLEO 2006 , USA , California Long Beach , May 21—25

[18] Altug H , Englund D , Vuckovic J. Nature , 2006 , 2 484

[19] Loncar M , Yoshie T , Scherer A *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2002 , 81 2680

[20] Zheng W H , Ren G , Cai X H *et al.* Journal of Crystal Growth , 2006 292 341

[21] Song D S , Kim S H , Park H G *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2002 80 3901

[22] Baba T. IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. , 1997 3 : 808

[23] Ma X T , Zheng W H , Ren G *et al.* Chinese Physics , 2007 , 56 977

[24] Zheng W H , Xing M X , Ren G *et al.* CLEO 2007. USA , Maryland , Baltimore , May 6 - 11



· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书名	作(译)者	定价	出版日期
半导体的检测与分析(第二版)	许振嘉	估价100	2007年8月
薄膜结构X射线表征	麦振洪等	40.00	2007年7月
电磁波述论	盛新庆	38.00	2007年7月
大气声学	杨训仁 陈宇	52.00	2007年6月
d波超导体	向涛	48.00	2007年5月
场论中的路径积分导引(影印)	U. Mosel	45.00	2007年4月
表面物理原理(影印)	F. Bechstedt	58.00	2007年4月
半导体光学(第三版)(影印)	C. F. Klingshirn	118.00	2007年4月
自组织纳米材料(影印)	Motonari Adachi, D. J. Lockwood	56.00	2007年4月
远程通信中的非线性光学(影印)	T. Schneider	68.00	2007年4月
物理学中的拓扑和几何(影印)	E. Bick, F. D. Steffen	65.00	2007年4月
量子光学——降噪、囚禁离子、量子路径和退相干(影印)	M. Orszag	58.00	2007年4月
光学与激光——光纤与光波导(第五版)(影印)	M. Young	79.00	2007年4月
飞秒激光脉冲——原理及实验(第二版)(影印)	C. Rulliere	68.00	2007年4月
薄膜材料——应力、缺陷的形成和表面演化	卢磊	86.00	2007年1月
亚稳金属材料	胡壮麒	160.00	2006年12月
高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊	54.00	2006年9月
半导体异质结物理(第二版)	虞丽生	52.00	2006年5月
实验物理中的概率和统计(第二版)	朱永生	72.00	2006年3月
物理学中的群论(第二版)	马中骥	68.00	2006年2月
相互作用的规范理论(第二版)	戴元本	68.00	2005年6月

凡购书者免邮费,请按以下方式联系我们:

电 话 010 - 64017957 64033515

电子信箱 : mlhukai@ yahoo. com. cn yandeping@ cspg. net

通讯地址 北京东黄城根北街16号 科学出版社 100717 联系人 : 胡凯 鄢德平

主页 <http://www.sciencep.com>