

微腔激光器及其列阵的发展

Development of Microcavity Lasers and Their Arrays

于荣金

(中国科学院长春物理研究所, 研究员 长春 130021)

王玉堂

(国家自然科学基金委员会, 研究员 北京 100083)

当今世界, 材料、能源和信息是组成社会物质生产活动和精神生产活动的三大重要资源, 并且能源、交通、材料和信息是一个国家的四大基础产业。我国也把信息科学作为优先发展的四个学科(生命科学、信息科学、能源科学和环境科学)之一。

随着科学技术的进步, 人类已经步入“信息时代”。信息时代的基础是计算机和通信以及两者的结合——信息网络, 也就是首先由美国提出而现在世界各国都在着手建设的信息基础结构(Information Infrastructure)。信息基础结构建成之日, 就是人类真正进入信息社会的自由王国之时。

信息科学是由电子学和光子学这两门学科构成的, 相应地, 信息技术则是由电子技术和光子技术构成的。电子学、电子器件和设备、电子技术在信息领域占有主导地位, 起重要作用。人们已认识到: 通信和计算机研究及发展的未来世界属于光子学领域, 例如, 信息高速公路的主要干线就是光纤通信系统。因此, 一些专家预言: “光子时代已经到来”, “光子技术将引起一场超过电子技术的产业革命”, 并“将给工业和社会带来比电子技术更为巨大的冲击”。世界各国对发展光子学的重视程度和优先地位也说明了这个问题。例如, 美国国防部、能源部提出的 20 项关键技术, 其中光子学排在第五位; 德国联邦研究与技术部组织德国最大的八个研究所参加研讨并提出 21 世纪九项关键技术, 其中光子学排在第四位。

微腔激光器的尺寸只有微米甚至亚微米量级, 一个平方厘米的片子上, 可以集成几百万甚至上亿个激光器, 使光子元件的集成度达到完全可以与当今超大规模集成电路相比的程度。因此, 微腔激光器的诞生, 使光子学跨越固态光子学阶段, 直接进入微光子时代的超大规模集成光子回路阶段。微腔激光器不仅使集成度产生飞跃, 而且使其它性能也得到改善。每个微腔激光器的阈值电流只有亚毫安

甚至可进一步降低至微安量级, 即使 100 万个激光器同时工作, 其总的功耗也只有几瓦。同时, 这些激光器还有超高速(THz)的调制速率。

微腔激光器及其集成的二维面阵, 是一种适合大批量生产、低成本、高效和高密度的光源, 对实现和发挥光学巨平行的计算、传输和处理, 有不可替代的作用, 适用于低功率的光互连、巨平行的数字光计算、多头存储器、二维扫描、多信道光纤通信、激光打印和信息显示等广泛的领域。它与大规模、超大规模集成电路一样, 是一个国家信息产业(也是光子学)发展的必由之路, 是今后信息产业的重要基础, 因此需要不失时机地对它进行深入研究和开发。它进入实用化之后, 可带动一大批信息高技术产业, 对光计算机、光纤通信、信息显示以及整个光信息处理技术的发展, 都具有极为深远的意义。

微腔激光器及其列阵的研究, 涉及多个学科, 因此对它的研究不仅对光子学, 而且对凝聚态物理、材料科学、信息科学以及纳米尺寸的微加工技术等都具有带动性。它所涉及的内容都是这些学科和技术领域当今最前沿或关键的部分。

一、微腔激光器及其列阵的发展概况

所谓微腔激光器, 就是一类谐振腔尺寸很小的激光器。一个理想的立方形微腔, 其尺寸应为 $\lambda/2n$, 其中 n 为腔内材料的折射率, λ 为谐振波长。例如对于一个由折射率为 3.5、谐振波长为 0.84 微米的半导体所构成的微腔, 其边长尺寸仅为 0.12 微米。当然在实际上, 尺寸可以放宽, 仍能在发射的光谱区内得到一个模式, 同时也可与目前的微加工技术相适配。一般, 微腔要求至少有一维的尺寸在光波长的量级, 某些微腔激光器的有效腔长也可以大于一个光波长。

微腔的引入, 可以使凝聚态物质中腔量子电动

力学效应得以实现,并提供丰富的例证。同时,不仅使激光器的尺寸得到大幅度的减小,而且可控制自发发射,使激光器的性能得到重大的改进。自发发射速率并非一个原子不可改变的特性,而是原子和真空场耦合的结果,而且如果没有真空场的起伏,自发发射将会消失。真空场使原子受到扰动和极化,反过来,感生的原子偶极又去扰动和极化真空场。因此,可以利用谐振腔结构调制真空场的起伏,对自发发射速率加以控制。一个适当设计的具有极短腔长的微腔内光子寿命极短,因而可以实现超快速的响应(超过 100 吉伯/秒),这是通常的二极管激光器所不能达到的。

微腔激光器已形成一类内容和品种十分丰富的器件,它涉及不同的结构、不同的材料、不同的波长、不同的性能和不同的用途。微腔激光器从结构来看,现在主要有三种基本类型:垂直腔表面发射型、圆盘型和微球型。微腔激光器所用的材料,有Ⅲ-V族化合物半导体、有机聚合物,以及掺稀土的晶体或玻璃。微腔激光器的输出波长覆盖了红外(1.58 微米)到可见光。各种微腔结构用电泵浦或光泵浦实现了具有不同性能的激光输出,可满足各种不同领域的需求。

1. 垂直腔表面发射激光器(VCSEL)

早期的半导体激光器,其激光输出都是在平行于衬底的方向。对这种激光器进行集成,只能得到一维线阵,要实现二维面阵,还要将一维线阵堆垛起来。因此人们在 1977 年提出了另一种激光输出方向与衬底相垂直的“表面发射激光器”,并于 1979 年实现了低温(77K)下的脉冲运转。在表面发射激光器的研究中,曾提出过两种结构方案:一种是水平腔结构,另一种是垂直腔结构。由于垂直腔结构在器件集成度以及输出光束的质量上要比水平腔结构具有明显的优势,因而后来人们大都致力于垂直腔结构器件的研究和发展。1988 年,日本科学家伊贺(Iga)及其同事们在这个研究中取得了突破性进展,并于 1988 年 10 月在东京召开的光电子学会议上宣布了他们采用 MOCVD 生长技术在世界上首次实现了电泵浦的 GaAs VCSEL 室温连续工作。接着,在 1989 年 AT&T 贝尔实验室的科学家报导了他们采用 MBE 生长技术,制作的低阈值室温连续电泵浦垂直腔表面发射 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子阱微型激光器获得成功。室温连续最低阈值电流为 1.5 毫安,器件尺寸为微米量级,在不到 1 平方厘米的 GaAs 衬底上集成了 100 多万个这种激光器,器件密度约为 2×10^6 个/平方厘米,从而宣告了垂直腔表面发射微腔激光器及其列阵的正式诞生。

垂直腔表面发射半导体微腔激光器的性能,经过这几年的努力,已获得很大进展。发射波长为 0.8 微米(GaAs)和 0.98 微米(InGaAs)的 VCSEL,室温

条件下的阈值电流在 1 毫安量级,有的低达 0.7 毫安,最新报导在 2×2 平方微米 VCSEL 中室温阈值电流已低达 133 微安。输出波长已从红外 0.98 微米向可见光扩展。VCSEL 发射的是圆对称高斯光束,可以与光纤进行有效的耦合。采用一种新的无源反波导区 VCSEL,在实现很低阈值电流和阈值电流密度的同时,在四倍阈值电流下还发射具有固定偏振方向的单一基模。

2. 圆盘状微腔激光器

1992 年,美国科学家麦考尔(S. L. McCall)等人用 InGaAs/InGaAsP/InP 半导体材料系统制作出另一种结构的微腔激光器——圆盘状半导体微腔激光器。这种激光器是在 InP 衬底上先外延生长蚀刻停止层,接着生长台柱层,最后生长量子阱结构。在量子阱结构的上面和下面还生长有管端盖帽层。用光刻技术把外延好的片子蚀刻成直径 3~10 微米、深度直至蚀刻停止层的圆柱,再用选择蚀刻剂(HCl 溶液)对量子阱结构下面的 InP 进行侧向蚀刻,形成支撑圆盘状量子阱结构的小柱。制作好的器件采用光泵浦激发。这种圆盘的厚度仅为 100 纳米,圆盘悬挂在衬底之上有小柱支撑的空气中,形状如图钉。它不需要 VCSEL 的那种腔镜,而是靠高折射率半导体和它周围低折射率空气界面处的全内反射而以“耳语回廊”模(Whispering-gallery modes)形式传导,光学模在垂直方向也受到强烈的限制。由于这种传导作用和光学限制,只要能使所有的损耗比较小,就可产生维持激射作用所需足够大的光增益。“耳语回廊”模是一个世纪以前雷利(Rayleigh)用来作为声音(即使是耳语)沿伦敦圣保罗教堂墙壁有效传播的一种解释,当今又作为圆盘状微腔激光器中光波传播模式的形象比喻。而且实际上,声波波长与教堂直径之比和光波波长与现在所研究的光学微腔直径之比非常相似。

由于圆盘的厚度小于半导体中的半波长,因此只允许一个光学横模在圆盘平面内传播。这种微腔结构使光学增益区和模体积有极好的重叠,而大的重叠因子是达到微腔激光器低阈值的重要条件之一。这种结构避免了制作高反射多层介质镜的复杂工艺,并且可以在诸如 InGaAs-InGaAsP 长波长系统上制作高 Q 值的微腔。对于半径为 1 微米的圆盘,光波长为 1.5 微米时,“耳语回廊”模沿着盘边大约有 8 个波节,不同波节数的模式之间有足够大的光谱间隔,使得在 InGaAs 量子阱发射谱(中心波长 1.5 微米)中占优势的仅一个模式。对这些 1 微米半径的微盘所测得的 Q 值为 200 到 1 000,而 β 值接近 0.1(理论预期值为 0.3)。

至今,圆盘状微腔半导体激光器大都采用光泵浦,器件直径为 3~10 微米、高度约 100 纳米量级,光泵浦的阈值功率已降至 25 微瓦。1992 年也曾报

导过发射波长 1.58 微米、直径 9 微米的微盘激光二极管,实现了电脉冲泵浦下室温单模运转,阈值电流达 950 微安。电泵浦的微盘激光器形状如两个叠起来的图钉。采用不同方法,解决输出光的有效耦合问题也正在进行之中。圆盘状微腔激光器与 VCSEL 相比,制作工艺比较简单,并在增益区与谐振模式之间的重叠因子、电泵浦效率等方面更具优越性;而 VCSEL 比圆盘状激光器更具成熟性。

3. 微球状微腔激光器

凝聚态物质微结构中的“耳语回廊”模,最早是在直径为 60 微米含染料若丹明 6G 的乙醇液滴上,用光泵浦得到的。由于液滴边界有接近理想的光滑程度,在许多情况下它仅受表面处热起伏的限制,所以光损耗很小,可以得到 Q 值高达 10^8 的谐振腔。因而对液滴微腔效应作了许多基础性研究。在实验上,也证明在 14 微米直径的若丹明 6G—乙醇液滴上用光泵浦观察到了腔量子电动力学增强的受激发射,Q 值为 $10^3 \sim 10^4$,腔量子电动力学增强超过 120 倍。而从实际应用角度出发,需要采用固体材料。这方面早期的受激发射工作是在几个毫米直径的球状固体中进行的。最近几年,已制作出具有高 Q 值“耳语回廊”模微腔所需光滑度的聚合物球。利用直径为 10~90 微米、掺染料的聚苯乙烯微球,在光泵浦下得到了受激发射;在钹玻璃微球中也进行了腔内量子电动力学效应的研究。已利用光泵浦掺染料的聚苯乙烯球状微腔得到了可见光波段的激光。在球形液体染料激光器中,通过注入散射粒子控制腔的 Q 值,实现了波长调谐。

二、微腔激光器及其列阵的发展趋势

在过去工作基础上,进行深入的物理基础和技术基础研究,可使器件达到最高的极限水平,即把尺寸再缩小一个数量级,集成度从几百万个/平方厘米进入上亿个/平方厘米;阈值再降低两个数量级(达到几个微安);扩展输出光的波长范围;解决热沉、可靠性以及光的耦合等实用化问题;进而研究和实现微腔激光器与其它光子元件、电子元件的集成问题。与此同时,结合各种应用的需求,开发各类实用化产品。

在材料方面,要研究各种适合微腔激光器的新材料,以及对现有材料的改进。例如发展有机聚合物材料、各种掺稀土离子的材料、纳米和复合材料,原有的半导体材料则要从量子阱向更低维的量子线和量子点材料发展,甚至要发展光子晶体。光子晶体是具有光子能带及能隙的一类材料,如果光子晶体中原子的自发发射频率正好在光子能隙处,则这种辐射就完全被禁戒,不能传播。其典型结构为一个折射率周期变化的三维物体,周期为光波长量

级,光子在这类材料中的作用类似于电子在凝聚态物质中的作用。制造三维光子带隙系统,可以实现一个真正分立的光学模,隔绝在某一有限光谱范围内的所有光学模。一个介电缺陷,就可以形成这个隔离光谱区内具有某一频率的“受主”或“施主”光学模,这些缺陷模原则上能够形成 β 值很接近 1 的高 Q 值谐振模。现在,不仅用矢量平面波方法证明三维光子的禁带在某些类型(如面心立方、金刚石、简立方、体心立方和六角密堆等)介电结构中是确实存在的,而且这种介电结构已可用微加工技术制作出来。谢勒(A. Scherer)等人采用电子束及一定顺序的干法蚀刻工艺,做出了 GaAsP/GaP 外延层内中心间距为 250 纳米、孔为 200 纳米的可在可见光谱范围工作的光子晶体。

在工艺技术方面,现有的 MBE、MOCVD、CBE 和 ALE 等薄层生长技术,可精确控制超薄层半导体材料的生长,实现“能带工程”,使人们从原子尺度设计和改变材料的结构参数和组分,改变材料的能带结构和物理性能,因而它们已为半导体材料的外延生长奠定了坚实基础。现在的关键是需要发展更理想的微加工技术,包括各种凝聚态物质的选择蚀刻和选择淀积技术。目前,用来制造半导体微腔激光器的微加工技术包括:常规的制版光刻工艺、电子束技术、干法蚀刻(离子铣、反应离子蚀刻、准分子激光蚀刻)、湿法蚀刻(采用选择蚀刻液)、离子注入或质子注入等。这些微加工技术都是现成的,它们在制作尺寸在微米级以上的微腔激光器中可以满足当前的基本需要。但是从发展看,尤其是从进一步缩小器件尺寸、提高器件边界光洁度考虑,应进一步应用和发展新的微加工技术,包括采用同步辐射、X 射线激光为光源的曝光技术、离子束和聚焦离子束技术、准分子激光直接蚀刻和诱导蚀刻技术,以及计算机控制扫描的大视场电子束曝光技术等。

应结合实际应用,开发具有不同功能的产品。实际上在对微腔激光器及其列阵进行基础研究的同时,也在不断地开发新产品。从有关国际会议来看,微腔激光器、微腔效应、微结构的制作与性能等已成为一大热点。美国对这个领域十分重视,竞争激烈,各单位之间还互相保密。例如,为了满足较大输出光功率的要求,研制了高功率的相干耦合 8×8 VCSEL 列阵,其总的输出功率已超过 1 瓦。为了实现空间复用的大容量光纤通信系统,AT&T 贝尔实验室演示了一个 8×18 微腔激光器列阵,每个微腔激光器的阈值电流接近 4 微安,阈值电压接近 2.65 伏,每一个微腔激光器在 450 兆伯/秒下工作,合在一起的通过量可达 65 吉伯/秒。又如,每个微腔激光器与其它光电元件实现单元集成,就可构成灵巧

(下转第 5 页)

分辨率。利用CT方法研究古生物化石国外已开展了一些工作。利用X-CT方法在恐龙蛋中寻找胚胎的工作国外也曾有新闻报导。

在河南省科委和文物局的支持下,在河南省文物研究所、中科院高能物理研究所和郑州铁路中心医院协助下,郑州大学利用X-CT和 γ -CT对西峡恐龙蛋化石作了断层扫描观测。发现编号为XZ-1及XZ-2的恐龙蛋化石CT图像存在明显的胚胎结构特征。其中XZ-1号蛋的CT图像(见封面图)显示出一个较完整的动物轮廓结构,而由XZ-2号蛋CT图上(见封二图)可看到一些类似骨骼特征的图像。为了辨认胚胎结构,对恐龙蛋的蛋壳、蛋内填充物和显示胚胎结构各个部分的密度值进行了测量,胚胎结构部分的密度值明显小于蛋壳,而大于蛋内填充物,其密度值的大小与恐龙化石十分接近。对这两枚恐龙蛋在三个不同方向进行了连续的多层扫描,XZ-1号蛋均显示出一个连续的胚胎结构;在XZ-2号蛋中有几根圆柱形,不仅有一定长度,而且圆柱中间部位密度值明显小于圆柱边缘部分。然而,由于恐龙蛋在长期石化过程中的复杂变化,沉积岩也会显示出结构造型。目前还没有建立恐龙蛋化石结构的CT图像识别技术标准,要完全确认两枚恐龙蛋中的胚胎,需要在这两枚恐龙蛋作解剖研究。如果解剖少数恐龙蛋化石的要求能够实现,我们将研究恐龙蛋化石CT图像与实物结构的对应关系,以便建立识别恐龙蛋化石内部结构的技术标准。在此基础上利用恐龙蛋中的胚胎,联系恐龙种属研究恐龙蛋的类别和恐龙个体发育等。

利用CT方法研究古生物化石有着广阔的发展前景,不仅能对骨骼结构作细致的观测,而且可以研究某些生理结构特征。CT方法的广泛应用,将把古生物学的研究推向新的高度。

五、问题与建议

恐龙蛋化石中蕴藏着丰富的科学信息,我国的恐龙蛋化石资源是大自然赐予人类的宝贵遗产,按照“世界文化与自然遗产保护公约”及“生物多样性

公约”,深入研究地质时期的生物生态环境、自然历史变迁、恐龙灭绝原因及地球灾变问题,对于深刻认识中生代生物多样性、组合特征及演化发展;对于当代社会经济、科技、资源和环境的协调发展与确立保护生物多样性对策;对于更好地保护地质(包括化石)自然遗产以及促进地区的经济建设和社会进步都有重要作用。目前恐龙蛋化石研究工作面临样品提供渠道不畅和经费来源不足的困扰。为加强恐龙蛋的研究,建议解决以下两方面的问题:

1. 正确处理研究与保护的关系

恐龙蛋化石作为自然遗产,在我国埋藏异常丰富,但其绝对数量有限。如何保护好人类的这份遗产,留给子孙后代是至关重要的。研究恐龙蛋化石蕴藏的科学信息,揭示自然之谜意义重大。研究与保护并不矛盾;而保护恐龙蛋化石本身也需做大量的研究工作。恐龙蛋化石的研究一定要结合埋藏环境条件。为此需要提供有一定层位关系和已知埋藏环境条件的恐龙蛋化石样品。目前在研究中面临能否动用、剖析研究样品的困扰,特别是为了研究恐龙蛋的内涵,对少数样品需要做解剖研究和测试分析。例如寻找恐龙胚胎的研究,需要通过对少数恐龙蛋的解剖研究,才能确定扫描图象与实物结构的对应关系,建立识别胚胎的技术参照标准。1994年11月我们扫描出XZ-1号蛋内的胚胎结构,12月初向有关管理部门提出了解剖这枚恐龙蛋的报告。1995年又多次请示解剖问题,至今没有得到解决,致使扫描恐龙胚胎的结果无法得到确认。目前在寻找恐龙胚胎方面各国的竞争十分激烈,不少国家正在从事此项研究,特别是从中国流失出去的恐龙蛋化石中寻找恐龙胚胎。如果科学研究中所必须的化石样品得不到解决,我们扫描恐龙胚胎的研究进展将有可能功亏一篑!

2. 恐龙蛋化石的研究需要统一规划和协调

恐龙蛋化石群的研究应当在国家科委领导下作出统一规划,有计划、有重点地开展研究工作。在科研经费方面除国家、地方投入外,应当多渠道争取研究经费,也可以有计划有重点地开展国际合作。(责任编辑 王宏章)

(上接第18页)

像素(Smart Pixel);每个微腔激光器与几个晶体管集成在一起,就可实现逻辑操作;每个微腔激光器与光探测器集成在一起,其列阵就可实现神经网络芯片之间的光互连。如果在电子计算机中用这类光互连替代电互连,有可能使电子计算机的运算速度

提高三个数量级。为了在全息存储、激光投影显示、塑料光纤通信,以及替代目前He-Ne激光器的各种应用,正在积极开发各种可见光微腔激光器。

(责任编辑 肖庆山)