

文章编号: 1001-3806(2004)04-0346-06

中美激光加工领域专利技术发展动态评述

曹葆青¹, 曾晓雁²

(1. 华中科技大学 专利中心, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 综述了 1996 年至今中国与美国激光加工专利技术的发展动态, 比较了两国专利数量与质量存在巨大差异的原因。结果表明, 激光焊接、切割、打孔、标记、退火、微调等技术仍然是近几年内激光加工技术创新的主流, 而且随着激光器件水平的不断提高, 应用范围有不断扩大的趋势。加强专利保护意识、面向市场开发应用面广的新技术是我国激光加工产业做大做强最关键的两大点。

关键词: 激光加工; 专利; 发展动态; 评述

中图分类号: G306 文献标识码: A

Review of patents in laser processing in China and America

CAO Bao-qing¹, ZENG Xiao-yan²

(1. Patent Center, HUST, Wuhan 430074, China; 2. National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: The development status of patents in China and America from 1996 to 2002 is reviewed and compared. There is a big difference about the number and quality of patents between China and America. It is found that laser welding, cutting, drilling, marking and annealing were still the main stream for technology creation in the past 7 years, which may even expand bigger with the improvement of laser devices and development of new types of lasers. There are two important points to develop laser processing industry in China: the first is developing new technology geared to the needs of market, the second is strengthening the consciousness of patents and how to use intelligent right to develop new products.

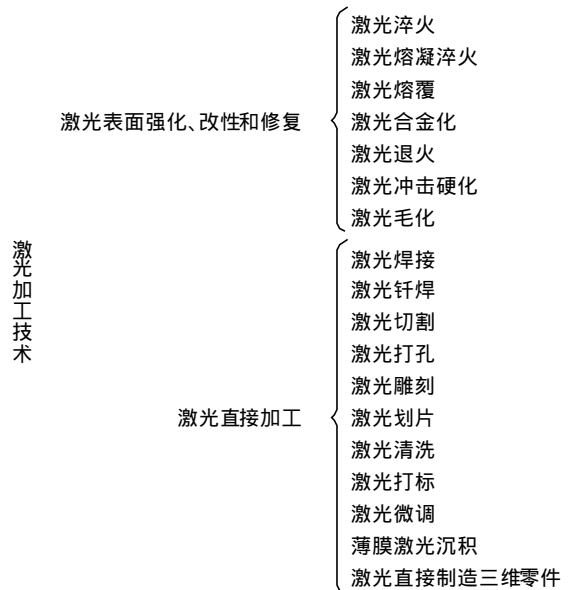
Key words: laser processing; patent; developing status; review

引 言

激光加工技术是研究激光对材料表面改性和部件制造过程中的物理、技术和工艺的问题。通常的激光技术包括切割、焊接、标记、雕刻、表面处理、微细加工等。激光加工的系统通常至少由 3 部分组成, 即激光器、导光系统(又称外光路系统)、加工工作台, 此外还包括一些激光加工所需要的辅助设备: 如激光切割与焊接用的喷嘴、激光熔覆与合金化用的自动送粉器、激光标记和雕刻用的光束扫描仪、以及进行加工时所需要的特种夹具等。必须指出, 激光加工工艺是激光加工系统发展的基础, 激光加工设备的建立都是围绕着如何实现加工工艺而展开的。本文将专门就激光加工工艺方面国内外的专利进展情况进行综合评述。

1 激光加工技术的分类

一般来说, 激光加工技术可以按照图 1 所示的方式分类。



作者简介: 曹葆青(1964), 女, 律师、专利代理人, 主要从事激光、计算机等技术领域的专利代理工作。

E-mail: zhuanli@hust.edu.cn

收稿日期: 2004-08-25; 收到修改稿日期: 2004-09-28

图 1 激光加工技术的分类

由于激光加工技术涉及的范围广,采用以上所述的分方法,利用 INTER 网,输入关键词进行检索。检索的数据库有两个:一个是美国专利数据库,另一个是中国专利数据库。在美国专利数据库检索中,检索策略为查询一组关键词,例如激光焊接(laser welding);对于中国专利的查询,也采用了类似的方法,即单独查询关键词的检索方案。主要查询结果见表 1。检索时间范围为 1996 年 1 月 1 日至 2002 年 10 月 1 日。

表 1 中国、美国专利数据库中激光加工工艺相关的专利查询结果

加工工艺 关键词	美国专利 数目	所占 比例/ %	中国专利 数目	所占 比例/ %
激光焊接	2390	25.3	81	27.5
激光切割	2185	23.2	43	14.6
激光退火	1117	11.9	10	3.4
激光熔覆	98	1.0	14	4.8
激光热处理	28	0.2	40	13.6
激光重熔	5	0.05	1	0.3
激光合金化	12	0.13	6	2.0
激光冲击硬化	33	0.35	1	0.3
激光打孔	1000	10.6	25	8.5
激光标记	462	4.9	51	17.3
激光刻蚀	668	7.1	4	1.4
激光微细加工	67	0.7	0	0
激光钎焊	73	0.8	2	0.7
激光清洗	54	0.6	0	0
激光微调	757	8.0	4	1.4
激光毛化	173	1.8	9	3.1
薄膜激光沉积	301	3.2	3	1.0
三维快速制造	分散于切割、 熔覆等专利中		分散于切割、 熔覆等专利中	
合计	9423	100	294	100

2 检索结果综合评论

由表 1 的检索结果,可归纳出如下几点推论。

2.1 关于美国专利

(1) 激光焊接、切割、打孔的专利数在大功率激光加工中名列前茅(分别在排列序位上位于第 1, 2, 4 位),说明虽然历时 20 年的发展,激光焊接、切割、打孔技术仍然在持续不断革新与发展;(2) 激光退火技术的专利数量惊人,在整个激光加工工艺的专利数量中排列第 3。其数目是同期激光表面强化技术的专利数目综合 7 倍以上;(3) 以激光微调、激光刻

蚀、激光标记、脉冲激光沉积、激光毛化技术为代表的中、小功率激光的精密加工技术、微细加工技术在过去的几年中得到突飞猛进的发展,专利数目增长幅度非常大,成为仅次于激光焊接、切割、退火、打孔以后的专利数量最多的激光加工技术,说明这些领域的发展速度非常快,是未来几年中最具应用前景的激光加工技术;(4) 美国专利的专利申请人大部分来自于企业,包括大型跨国公司,高校与研究机构所申请的专利数目不多。说明美国技术创新的主体是企业。在激光加工类美国专利的外国申请人中,以日本、德国的数量最多,这与这些国家激光技术的发展水平是密切相关的。

2.2 关于中国专利

(1) 中国专利中,最为活跃的依次为激光焊接、激光切割、激光标记、激光打孔、激光表面处理等,但整个专利的数目大大低于美国同类专利;(2) 中国专利中,与激光加工有关的各个领域中专利数目远远低于同领域中美国专利的数目,究其原因,一方面是由于我国激光加工技术起步晚,基础差;另一方面,则是由于我国设备条件的限制,无法与国外同行在一个层面上竞争,更重要的是我国的知识产权保护意识比较弱;(3) 中国专利激光领域中的专利申请人大部分来自大学和研究所,来自企业的专利数目很少。

2.3 中国人在美国申请的激光加工类专利数目与申请状况

从专利检索的情况来看,虽然不乏在国外的中国学者在美国申请专利的例子,但专利拥有权一般为所在国家的相关机构。中国企业界和研究院所在美国申请激光加工类专利的件数寥寥无几。从已经批准的美国专利来看,迄今为止,没有来自中国大陆的专利。究其原因,固然有我国激光加工技术的研究开发水平较低、美国专利的申请费用很贵等客观原因,但更加深层次的原因应该归根于我们的研究面向市场的太少,特别是面向国际市场,能够靠知识产权到国外赚洋人的钱的过硬技术太少。

2.4 外国人在中国申请的激光加工类专利数目与申请状况

外国人对知识产权的重视程度显然超过了我们。在屈指可数的 294 项中国专利中,国外机构委托申请的专利占 30% 以上,特别是在一些技术含量高的领域中,如激光微调,所申请的专利几乎全部为外国公司或者机构。

此外,还必须指出一点,在所统计的激光加工类

的中国专利中,约有 20%~30% 的中国专利已经放弃,而且其中的专利权人大部分属于中国大陆。

3 近几年具有代表性的激光加工技术评述

3.1 激光焊接技术

激光焊接技术是自 1996 年以来,激光加工技术中最为活跃的技术。就激光焊接技术而言,现有专利将会在如下几个方面对未来技术有较大影响。

3.1.1 激光+其它热源复合焊接工艺 激光与其它热源的复合焊接工艺是当前激光焊接的最大亮点之一。近几年申请的美国专利中,激光+电弧复合焊接、激光+电阻复合焊接、激光+等离子体复合焊接等专利技术申请的频率很高,德国、日本、美国等发达国家都将该技术作为未来激光焊接技术的研发重点。激光与其它热源复合焊接的最大特点在于,可以在不要增大激光功率的前提下,提高焊接速度或者扩大最大焊接熔深,同时又不明显降低焊接质量。因为激光加工的最大缺点在于设备的一次性投资比较大,而且对于大功率 YAG 激光或者 CO₂ 激光器而言,功率越高,所需要的费用越大。而电阻辅助加热、电弧辅助加热甚至等离子体辅助加热,所需要的费用都有限,却能够使激光焊接的最大熔深提高 1 倍以上,或者使等同厚度下激光焊接的最大速度提高 1 倍以上。因此,该技术有利于降低焊接成本。激光复合焊接工艺与设备可望在未来几年中进入我国市场,并在机械、冶金行业中板材焊接、管子焊接等生产技术中得到应用。以上详细内容参见参考文献[1]~[3]。

3.1.2 汽车不等厚板激光拼焊工艺与设备 汽车不等厚板的激光拼焊工艺与设备是美国专利激光焊接领域中的又一个亮点。汽车门内板采用不等厚板的激光拼焊工艺,不等厚板中的厚板作为受力件可以承受较大的载荷,而非受力件的薄板则一方面可以减轻轿车的重量,另一方面也容易冲压成型,提高产品的成品率,降低冲压机所需要的最大压力。激光拼焊的最大优点在于焊缝的焊接强度高、韧性好,可以确保在深冲变形过程中焊缝不变形。而高的焊接速度配合高自动化的焊接工作台,可以使焊接件的费用控制在一定范围内。详细内容参见文献[4]、[5]。

3.1.3 塑料激光焊接 塑料激光焊接技术是近几年才在国外兴起的技术。依据材料的不同,可以采用 CO₂ 激光器,但更多的是采用二极管激光器和二极管泵浦 YAG 激光器。采用激光焊接代替常规粘

接技术,在制造一些重要的塑料零部件中起着十分重要的作用,如大型塑料容器的制作。它的最大特点有两个:一个是利用某些塑料对激光透明的特点,进行激光的穿透焊接;另一个是塑料焊接过程的是焊缝区域高分子材料重新聚合的过程,不需要添加稀释剂或者其它物质,因此,结合强度很高。详细内容参见文献[6]。

3.2 激光切割技术

激光切割技术是激光加工技术中发展最早也最为成熟的技术,早在 1996 年之前,五轴联动激光切割、焊接机床就在工业中开始应用。随着激光器件质量和激光功率水平的不断提高,加工软件、切割头设计与制作水平的不断完善,激光切割机在工业中的应用正越来越广泛。

从近几年美国专利的获准情况来看,激光切割领域值得注意的动向有如下几点。

3.2.1 激光切割+冲压机床形成的组合机床 薄板冲压过程的高效率已经举世公认。但冲压件的一个最大的缺点是模具费用很高,因此,只有在所冲压的零件数量足够大的时候,才能够将制造成本降下来。采用激光切割+冲压的组合机床,其中大的框架结构由冲压完成,小的精细结构由激光切割完成。这样,大幅度降低模具制造的复杂程度,又充分利用了激光切割的精密与柔性的特点,特别是一些模具的框架结构相近的条件下,只要开一副冲模,余下的由激光切割来完成,从而使模具的制造周期和制造成本大幅度下降。因此可以认为,该专利技术的产业化前景十分看好。详细内容参见文献[7]。

3.2.2 激光切割+等离子切割的组合切割 组合切割的主要优势与组合焊接时类似,主要利用辅助热源的优势,提高材料对激光束的吸收率,减少切割过程中加热基体所消耗的能量,因此,可以提高激光切割的最大厚度或者等厚度下激光切割的最大速度。这在造船、机械等行业中有重要的市场。详细内容参见文献[8]。

3.2.3 激光切割+焊接的组合工艺 众所周知,对于激光焊接来说,板边的预处理工艺是十分重要的。如果板边粗糙度过高,则激光焊接质量就难以保证。例如,如果采用普通剪床加工待焊接的薄板两边,板边过高的表面粗糙度难以保证激光焊接的质量,因此,往往需要采用高精度剪床,或者采用铣床对板边先行预加工,工序很复杂。REAM 等^[9]将激光切割作为激光焊接的板边预处理工艺,方便、简单、工作效率高,在今后的汽车不等厚板材拼焊方面具有广

阔的应用前景。

3.3 激光退火技术

激光退火技术也是激光技术在工业中应用最早的几个领域之一,主要局限于电子行业。例如,半导体材料在离子注入、离子辐照、或者离子掺杂后,表面存在大量的晶体缺陷,其浓度远远超出了正常的半导体材料所要求的浓度值。采用激光退火,使其中的缺陷减少,是获得理想性能的必要手段。最近的研究结果表明,激光退火效果的好坏,不仅与激光退火的工艺参数有关,而且与掺杂元素种类及浓度有关。因此,YAMAZAKI及TANAKA等^[10,11]对激光退火过程进行了系统分析后,提出了一种新的退火方法与设备,主要是要控制退火激光束的波长、脉宽和脉冲数目。JUNG^[12]采用激光退火技术对液晶表面中的非晶硅进行处理,使其发生晶化,也属于激光退火技术的重要应用之一。

3.4 激光打孔技术

激光打孔技术尽管涉及的专利很多,但其中最闪亮的专利有3类。

3.4.1 飞机发动机叶片导流孔的激光打孔 这是激光打孔专利中涉及得最多的种类之一,足见其重要程度。虽然叶片导流孔的激光打孔问题已经解决多年,但是,围绕着如何进一步提高打孔效率与速度、打孔精度并确保打孔质量,众多的专利各有特点。KELLEY和MOORE等^[13,14]针对发动机叶片上复合冷却孔需要的形状是非圆形孔穴,采用YAG激光直接打孔,不需要狭缝控制光斑形状,即可以获得理想的导流孔。我国在该技术上也获得突破,但没有见到所申请的专利。

3.4.2 喷墨打印机墨盒头的打孔 打印机墨盒头的出水孔,要求直径很小(一般只有80 μm 以下),普通机械方法很难满足要求。采用准分子激光在塑料墨盒的表面打孔,可以满足这一要求,但单纯的激光直接辐射,只能获得直径为80 μm 以下的圆孔。NALBANDIAN等^[15]公布了一种采用准分子激光掩模打标的方法,可以直接加工出边长为40 μm 的方孔。类似的专利还包括文献[16],[17]等等。TEMPLE等^[18]则采用将激光束分解为多束光,通过控制每支光束的直径来控制所加工方孔的边长,不仅加工质量好,加工效率也高。但在国内,没有见到有关的专利。

3.4.3 香烟过滤纸(又称水松纸)激光打孔 在过滤嘴香烟的水松纸表面打一排直径很细的微孔,可以改善香烟的燃烧,减少吸入的焦油量,从而减轻对

吸烟者的危害。香烟过滤嘴水松纸激光打孔设备是近几年激光打孔技术中的一个亮点。日本香烟公司公布的美国专利^[19]中,详细介绍了打孔机所采用的激光器种类、光束输出方式与模式、送纸机的送纸速度、打孔的密度和直径等。该项技术的发展前景与各个国家的政策密切相关。我国也有企业申请了相应的中国专利,设备也已经在部分企业中开始运行。如果政府最终采取强制性的措施,要求各个香烟制造商采用水松纸打孔技术,则该技术或者产品的发展速度会非常快。

3.5 激光表面强化技术

激光表面强化技术包括激光淬火、熔凝淬火、表面合金化、熔覆、冲击硬化等。与其它技术相比,激光表面强化技术的专利数目显然不算多,其中的原因很多,最关键的一点在于激光表面强化技术所涉及的问题很多,研发所需要的周期长。

激光表面强化技术中的几个主要亮点体现在下面几个方面。

3.5.1 激光冲击硬化 采用高能脉冲激光束轰击材料表面,激光产生的等离子体爆破使材料表面承受巨大的冲击波而发生组织、结构变化,并产生巨大的压应力过程,称为激光冲击硬化。激光冲击硬化可以改善材料的表面硬度、强度和疲劳强度。DULANEY等^[20]公布了将激光冲击硬化技术应用到空心型的发动机叶片中,以便提高叶片的疲劳强度。其中的主要特点是将空心的叶片中填充一种物质,使其成为实心。这样,激光冲击硬化时就可以保证零件的精度。而文献[21]中则公布了远距离激光冲击硬化的装置和方法。

3.5.2 激光淬火技术 激光淬火技术的最大进展不是来自于工艺,而是由于设备的改进,即利用二极管激光器进行热处理。BEYER等^[22]公布的数据资料表明,采用二极管激光进行淬火处理,整体运行成本比CO₂激光淬火和YAG激光淬火低得多,而且激光器的体积很小,易于搬动,对于大型零件可以到施工现场进行热处理,因此,产业化前景非常好。目前,我国的大功率二极管激光器的研究与生产水平都很低,国内没有相应的专利申请。

3.5.3 激光熔覆与合金化技术 最具特色的有两点。一个是内孔零件的激光熔覆,另一个是发动机缸体的激光合金化。FINDLAN等^[23]采用YAG激光器,经过光导纤维输出和自动送丝装置,对圆筒零件的内壁进行激光熔覆与修复。该技术的最大特点在于,激光熔覆所修复的尺寸可以精确控制,因此减少

了后续的机械加工量。而常规的工艺方法在进行内壁堆焊时存在种种不便,无法与激光熔覆技术抗衡。BADY等^[24]公开了铝材发动机缸体或者缸套内壁激光表面合金化的工艺技术。该技术最大的特点是采用自动送粉装置,对铝合金的内壁进行合金化处理,使其表面硬度大幅度提高。由于铝合金的比强度高,强化手段有限,因此,该工艺对未来汽车发动机的生产技术产生很大影响。

3.6 激光毛化技术

激光毛化技术最早是应用于薄板冷轧辊的激光打毛,以便改善钢板的涂装性能,获得“镜面”钢板,我国技术人员也有相应的专利申请。近年来,激光毛化技术的应用范围在不断扩大,比较典型的例子就是磁记录介质的毛化。HACKEL等^[25]采用特殊设计的衍射光学镜,使单脉冲激光束一次性产生数千个脉冲点,这样,单个激光盘所需要的20万个毛化点可以在数秒钟内完成。磁光盘激光毛化的其它专利则是从不同角度对毛化质量进行改进,参见文献^[26]。在涉及到激光毛化的173件美国专利当中,涉及到光盘毛化的所占比例甚大。事实上,该技术已经在生产中得到广泛的应用。

3.7 激光微调技术

激光微调技术一直是激光微细加工的重要内容。近几年来,尽管涉及到激光微调的美国专利所占份额比较大,但激光微调技术开发内容没有明显变化,主要还是针对器件的电阻、电容等进行微调。SUN等^[27,28]采用波长为1.24 μm ~3.04 μm 的激光束对薄膜器件的导电膜、电阻膜以及集成电路基板进行微调,工艺参数范围宽,可以不用担心损伤基板,工业化效果好。

3.8 激光清洗技术

激光清洗技术在过去的几年中得到了快速发展,现在已经从最初的激光除锈起步,发展到激光清洗艺术品等。可以认为,在有关激光清洗的美国专利中,最有产业化前景的技术有两类:一类是各种模具激光清洗,另一类是电子产品中晶片的激光清洗。例如,FURUTA^[29]公开了一种采用激光清洗粘有有机物质和无机非金属材料的金属模具的技术。传统的手工清洗工艺不仅速度慢,而且容易损伤模具,影响产品精度。采用YAG激光对模具进行清洗,自动化程度高,不影响模具的表面精度。BENEA等^[30]公开的激光清洗制作橡胶轮胎的金属模具的方法,可以在不需要拆卸模具的条件下对模具进行清洗,不需要化学介质,对模具也没有机械损伤,因此,在橡

胶轮胎行业中可以得到广泛的应用。LU等^[31]公开的激光清洗电子封装片技术,同样利用了激光清洗不需要化学介质和“干洗”的特点,可以在不降低封装等级的前提下,将常规化学清洗法或者一定压力的水清洗方法无法清洗掉的微粒去掉,因此,在电子行业中有非常广阔的市场前景。

3.9 脉冲激光沉积技术

脉冲激光沉积技术的最大特点在于可以制备与靶材成分基本相同的薄膜,最大的缺点在于沉积物质的轴向分布比较严重,再加上蒸发过程中容易产生大的液滴,很大程度上限制了该技术的应用。正因为如此,大量研究人员投入到解决这一问题中来,产生了许多专利。MASHBURN^[32]公开了一种采用双束激光进行脉冲激光沉积的方法,通过将一束激光分解为两束激光后,照射到工件表面,因为光束质量的改善而减少液滴的数目,因此提高薄膜的质量。HARUTA等^[33]将脉冲激光沉积装置中加入一个磁场,可以起到改善薄膜质量的目的。TATAH^[34]利用脉冲激光沉积技术的原理,在大气环境下通过激光轰击预沉积在透明基板上的金属,将其离子转换到另外一块金属板,从而形成导线。该技术可望在电子工业中得到应用。

4 结论

(1)综合国内外激光加工技术的发展动态,可以认为,激光焊接、切割、打孔、标记、退火、微调等技术仍然是未来10年内激光加工技术的主流,而且随着激光器件水平的不断提高,应用范围有不断扩大的趋势。(2)我国企业与研究机构在激光加工领域所申请的专利无论在数量与质量上与美国专利相比都存在明显的差距。引起差距的原因是多方面的。加强专利保护意识,面向市场开发应用面广的激光加工技术是我国激光加工产业做大做强最关键的点。

参 考 文 献

- [1] WALDUCK R P. Enhanced laser beam welding [P]. U S Patent: 5866870, 1999-02-02
- [2] IGOR D, GEORGY I, EVGENY B. Combined laser and plasma arc processing torch and method [P]. U S Patent: 6388227, 2002-05-14.
- [3] FRANZ K, HELMER R, HEINZ S. Laminated pane with low energy transmission [P]. U S Patent: 5849402, 1998-12-15.
- [4] WALTER D, MELIH O, DAVID H. Tailored blank [P]. U S Patent: 642615, 2002-07-30.
- [5] JR F, FOLEY D R, MORRIS J *et al.* Laser welding system [P]. U S Patent: 6403918, 2002-06-11.
- [6] KORFE J. Method and apparatus for welding [P]. U S Patent:

- 6444946, 2002-09-03.
- [7] KATAYAMA I, KAWAI H. Composite laser and punch processing device [P]. U S Patent: 5880429, 1999-03-09.
- [8] WARREN J V Jr, STANLEY C E. Laser plasma arc metal cutting apparatus [P]. U S Patent: 5635086, 1997-06-03.
- [9] REAM S L, BEESON R J, ISAACS J P. Combination laser cutting and blank welding apparatus and method [P]. U S Patent: 6031199, 2000-02-29.
- [10] YAMAZAKI S, ZHANG H Y, ISHIHARA H. Laser processing apparatus [P]. U S Patent: 5897799, 1999-04-27.
- [11] TANAKA K. Laser processing method [P]. U S Patent: 5893990, 1999-04-13.
- [12] JUNG Y H. Laser annealing apparatus [P]. U S Patent: 6323457, 2001-11-27.
- [13] KELLEY J G, ROCKSTROH T J. Gas turbine engine component with compound cooling holes and method for making the same [P]. U S Patent: 5683600, 1997-11-04.
- [14] MOORE J R, WHEAT G E. Beam blocking material and method for beam drilling and inspecting cooling holes [P]. U S Patent: 5773790, 1998-06-30.
- [15] NALBANDIAN V, LEE C S. Double layer circularly polarized antenna with single feed [P]. U S Patent: 5703601, 1997-12-30.
- [16] GOTO A, INABA M, KOIZUMI Y. Laser process for making a filter for an ink jet [P]. U S Patent: 5940957, 1999-08-24.
- [17] WAKKER K R, GRANZOW D B. Process of making an orifice plate for a page wide ink jet printhead [P]. U S Patent: 5955022, 1999-09-21.
- [18] TEMPLE S, RUMSBY P T. Method of and apparatus for forming nozzles [P]. U S Patent: 6228311, 2001-05-08.
- [19] IMAI K, FUKUCHI J, TAKATSU M. Laser piercing apparatus for a web material [P]. U S Patent: 6025572, 2000-02-15.
- [20] DULANEY J L, CLAUER A H. Laser peening hollow core gas turbine engine blades [P]. U S Patent: 6078022, 2000-06-20.
- [21] DULANEY J L, TOLLER S M, CLAUER A H. Mobile laser peening system [P]. U S Patent: 6288358, 2001-09-11.
- [22] BEYER E, WISENBACH K, KRAUSE V. Process for treatment of materials with diode radiation [P]. U S Patent: 5705788, 1998-01-06.
- [23] FINDLAN S J, CHILDS W J. Method and apparatus for repairing damaged tubes by interior laser clad welding [P]. U S Patent: 5656185, 1997-08-12.
- [24] BADA T, BOHLING M, LENSCH G. Process and device for laser treatment of inside surfaces [P]. U S Patent: 6303897, 1999-04-19.
- [25] HACKEL L A, DANE C B, DIXIT S N *et al.* Laser illuminator and optical system for disk patterning [P]. U S Patent: 6037565, 2000-03-14.
- [26] MIYAKAWA T, YONEKAWA M. Laser texture processing apparatus and method [P]. U S Patent: 6091047, 2000-07-18.
- [27] SUN Y L, SWENSON E J. Laser system and method for selectively trimming films [P]. U S Patent: 5569398, 1996-10-29.
- [28] SUN Y L, SWENSON E J. Laser system for functional trimming of films and devices [P]. U S Patent: 580827, 1998-09-15.
- [29] FURUTA I. Cleaning device and method for cleaning resin sealing metal mold [P]. U S Patent: 6410883, 2002-06-25.
- [30] BENE A P, MANGOSI F. Method and apparatus for cleaning vulcanization molds for elastomer material articles [P]. U S Patent: 5928533, 1999-07-27.
- [31] LIU Y F, CHAN D, SIU H L *et al.* Pulse laser induced removal of mold flash on integrated circuit packages [P]. U S Patent: 5961860, 1999-10-05.
- [32] MASHBURN D N. Dual beam optical system for pulsed laser ablation film deposition [P]. U S Patent: 5558788, 1996-09-24.
- [33] HARUTA K, ONO K, TSUDA M *et al.* Thin film forming apparatus using laser and magnetic field [P]. U S Patent: 5760366, 1998-06-02.
- [34] TATAH A. Laser ablation forward metal deposition with electrostatic assisted bonding [P]. U S Patent: 5567336, 1996-10-22.

(上接第 345 页)

气柱孔时 H 极化波没有任何带隙, 验证了前面所说的高介电常数的介质孤立分布的结构只对 E 极化波容易产生带隙。空气柱孔一方面使光带下移, 如 E 极化的 4, 5, 6 条频带和 H 极化的 4, 5 条频带原处在频率范围 0.5~0.65, 后来降至 0.45~0.5。另一方面压缩了相邻频带的间距, 且使频带结构变得平坦, 从而 H 极化波在 0.65~0.68 频率范围出现带隙, 和 E 极化波在 0.66~0.68 频率范围的带隙相交叠, 产生了一条完全带隙。对于上述计算结果, 可作出定性的解释: 空气柱孔相当于正方介质柱上的线缺陷。对于 H 极化波, 它的 E 矢量处于 $x-y$ 平面上, 而介质面上 E 矢量的 $x-y$ 的切向分量要求连续, 线缺陷将改变波的传播方向, 成为散射体。因此, 某些频率的电磁波由于受到散射体的多重散射而局域在晶体内部, 从而产生了带隙。对 E 极化波, 它的

E 矢量沿介质柱长度方向即 z 轴, 和线缺陷长度方向一致, 因而不会改变波的传播方向, 从这一点上看, 它对 E 极化波影响较小。

参 考 文 献

- [1] 顾国昌, 李宏强, 陈洪涛 *et al.* 一维光子晶体材料中的光学传输特性 [J]. 光学学报, 2000, 20(6): 728~733.
- [2] 王 辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构 [J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2172~2178.
- [3] KRAUS T F, de LA RUE R M. Photonic crystals in the optical regime past, present and future [J]. Progress in Quantum Electronics, 1999, 23: 51~96.
- [4] 欧阳征标, 李景镇, 张道中 *et al.* 多层光子晶体滤波器研究 [J]. 光学学报, 2002, 22(1): 80~84.
- [5] 仇高新, 林芳蕾, 李永平. 利用复式晶胞实现二维正方形布拉菲格子光子晶体的完全带隙 [J]. 物理学报, 2003, 52(3): 600~603.
- [6] 金崇君, 秦 柏, 杨 森 *et al.* 三角形复式晶格的光子带结构研究 [J]. 光学学报, 1997, 17(4): 409~412.