

超快激光微加工技术在集成光学领域的应用

李抒瑾

(山东师范大学物理学院 250358)

1. 引言

1969年,集成光学的概念被米勒(S. Miller)博士提出。集成光路是一种能够在极小的区域内完成对光信号低功耗和高稳定性的高速传输和处理的集成光子学系统,在以后的光信息处理和光通讯领域应用前景广阔、研究意义重大。光波导器件不仅可以限制和引导光的传输,还能实现非线性和主动增益;同时与集成光路中的其他元件相互结合,共同组成拥有多样功能的“高密度集成光子芯片”,实现复杂化、微型化、多样化的应用,是连接集成光路中各种不同功能器件的基础元件和关键部分。

随着技术的发展,越来越多的加工技术用于制备光波导器件,而国内外目前比较普遍使用的光波导加工技术主要可以归纳为以下几种:化学气相沉积法、离子注入技术、飞秒激光写入等。飞秒激光写入技术是一项依赖于超高峰值功率的超短脉冲激光的三维微纳精细加工技术,它将飞秒激光束聚焦于衬底表面以下,利用光学材料能对光子非线性吸收的特性,使得介质材料折射率发生变化,在激光的写入处或者邻近区域就形成光波导结构。当飞秒脉冲激光聚焦于光学材料内部达到了一定阈值时,在激光焦点附近的极小区域内会产生雪崩电离、多光子吸收和自聚焦现象等非线性效应,并且不产生明显热效应,从而可以在透明材料的内部产生永久的折射率变化。这一制备方法有很广的应用范围,常用的一些基底材料有玻璃(如熔石英、硼

硅酸盐和磷酸盐玻璃等)和晶体(如 LiNbO_3 、KGW以及钛蓝宝石晶体等)。总之,飞秒激光微加工技术在实现复杂多样的集成光学系统方面展现出了巨大的应用潜力。

2. 基本理论

2.1 光波导的基本种类

如图1所示,光波导由折射率略高的中间层(b)和折射率较低的另外两层(a、c)构成,当光以一定角度入射时,会在界面处发生全反射,从而将光限制在特定区域内进行有效传输,并在较大程度上加强波导腔内的光密度。

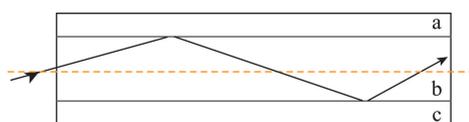


图1 光波导结构

如图2所示,光波导主要分为平面光波导(一维光波导)、条形光波导(含脊型、条型和埋层通道型光波导)和柱形光波导(光纤)。

根据形成机理不同,飞秒激光加工光波导主要存在四种类型(如图3所示):

I 单线型光波导,如图3(a)所示,飞秒激光写入时激光焦点处折射率增高,改变量为正,而焦点附近的其他区域折射率减小,波导区域位于激光痕迹上。所以写入处形成光波导,这种类型的制备方式主要用于衬底材料是熔融石英和玻璃等材料。

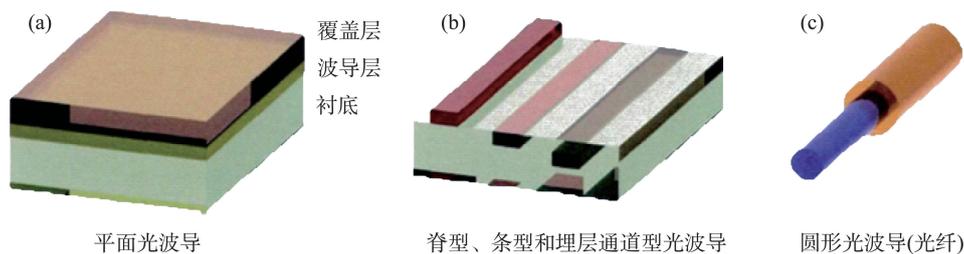


图2 波导结构图

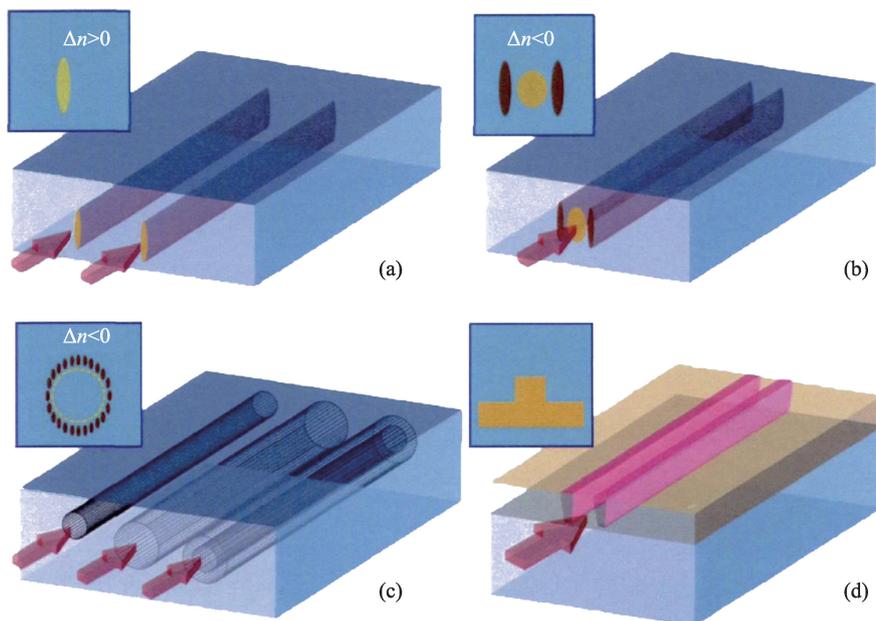


图3 (a)单线型光波导结构图;(b)双线型光波导结构图;(c)包层型光波导结构图;(d)脊型光波导结构图

II 双线型光波导,如图3(b)所示,飞秒激光写入时焦点处的折射率降低,而写入处周围区域折射率增高,两条写入痕迹构成了光波导,导光区就位于两条折射率降低的痕迹中间。这种制备方式主要应用于激光晶体(如Nd:YAG)和非线性晶体(如KTP)等材料中。

III 包层光波导,如图3(c)所示,激光写入处折射率降低,而周围区域折射率升高,封闭的几何结构由小尺寸的飞秒激光写入痕迹包围形成,而包围区域的折射率相对激光辐照区较高,形成了包层光波导。这种制备方式主要应用于陶瓷、介电晶体等材料。

IV 脊型光波导,如图3(d)所示,高能量飞秒激光脉冲通过烧蚀(红色区域)加工制备光波导,而脊型光波导就由两条烧蚀的痕迹直接构成。

2.2 飞秒激光微加工技术制备光波导的方法原理

飞秒激光写入技术集显微技术、超快激光微加工技术、计算机控制技术、高精度三维移动技术于一体。飞秒激光写入技术在写入过程中具有高度灵活性,加工的方式可分为纵向写入、横向写入和螺旋状扫描等方式。如图4所示,样品移动的方向平行于入射激光的方向,称为纵向写入,优点在于得到的波导端面中心对称性极好,但加工长度受限;样品材料的移动方向垂直于入射激光传播方向时,称为横向写入,这种写入方式加工距离不受限制,但加工后的波导端口狭长,增加了传输损耗。

制备光波导器件时所需设备含光源系统(飞秒激光器)和显微与实时监测系统、三维精密移动系

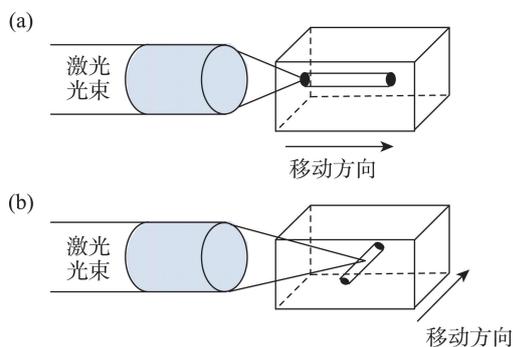


图4 (a)纵向写入结构图;(b)横向写入结构图

统和电脑控制系统组成的三维电动平移台。如图5所示飞秒激光依次经过半波片、偏振器和分束镜等元件后聚焦于样品,可以调节光路中的光学元件,调整飞秒激光的扫描速度、脉冲能量和偏振等参数。CCD拍摄出实时直观的样品加工图像。

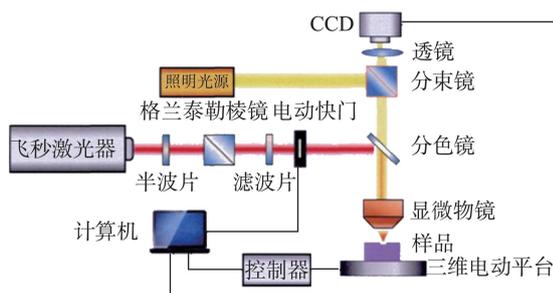


图5 飞秒激光写入光波导光路图写入

2.3 飞秒激光微加工技术的优势和发展

飞秒激光微加工技术是利用超高峰值功率的超短激光脉冲进行微纳米级处理的过程。与其他传统的光波导制备方法相比,飞秒激光微纳技术有着绝对的优势:

(1) 飞秒激光微加工技术适用范围广泛,对材料的要求较低。我们仅仅需要调节飞秒脉冲激光的写入参数(如重复频率、脉冲宽度、扫描速度、脉冲能量、工作波长等)便可在不同材料中制备光波导。

(2) 操作简单,不需要光刻掩膜技术的支持,可调控性强,只需要移动样品的加工位置就可以制备光波导和各种复杂光子学器件,大大缩短了加工时间,节省了加工成本。

(3) 加工设备和环境要求较低,不需要超净的

环境,且制备过程清洁无污染。

(4) 冷加工,飞秒激光脉冲宽度极短,峰值强度大,能量的吸收被限制在了极小的范围内,热效应不明显,不易损坏样品,可用来加工金属膜等热敏感性材料。

(5) 可以进行三维(3D)内部加工,将激光聚焦在衬底内部,材料会产生多光子吸收,于焦点处引起折射率升高,制备任意结构的波导器件。

(6) 飞秒激光微加工技术空间分辨率极高,有确定阈值,可以突破衍射的极限,精确控制加工的区域尺寸,实现超精细加工。

3. 材料

3.1 玻璃

玻璃材料易于加工,适合掺杂一些稀土离子;同时玻璃材料光损耗较低,价格低廉,但是波导的形状不易控制。20世纪90年代,人们就发现了飞秒激光可以诱导石英玻璃局部的折射率升高,并且可以通过调控激光的脉宽、功率和扫描速度等参数来成功制备光波导结构,随后在氟化物玻璃、硼酸盐玻璃和硫系玻璃等材料上写入了光波导。

3.1.1 磁旋光玻璃

磁旋光玻璃是一种自身拥有法拉第效应的新型功能材料,并且在红外和可见光波段这种材料拥有较高的透射率,被广泛应用于磁光器件和控制大功率激光的输出。在这种材料上制备三维光学器件也是集成光学领域的热点,具有深厚的研究前景和应用意义。21世纪初,Shih等人发现脉冲能量为10 nJ,波长为800 nm,重复率为25 MHz,扫描速度为10 mm/s的超短激光脉冲可以写入磁旋光玻璃制备直径为8 μm 的光波导。随后,刘(Liu)等人利用钛宝石激光器横向写入了直径为3至5 μm 的波导结构。

3.1.2 碲酸盐玻璃

碲酸盐玻璃结构复杂,主题材料是氧化碲(TeO_2),结构单元中还含有 TeO_3 和 TeO_4 等其他组

分,且离子间隙较多、声子能量低、化学性质稳定,所以光纤化程度较高,易于进行高浓度掺杂,制备复杂多样的集成光子学器件,因此,飞秒激光写入磷酸盐玻璃光波导成为研究的热点。20世纪初,德田 (Y. Tokuda) 等人用飞秒脉冲激光在掺 Nb^{3+} 磷酸盐玻璃上纵向写入了 I 类单线型光波导。2005年,吉里尼 (G. Righini) 等人又在磷酸盐玻璃中利用飞秒激光诱导了折射率减小。随后,研究者又陆续在掺 Er^{3+} 和 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃中写入了有源和无源 I 类单线型光波导。

最近研究发现,飞秒激光脉冲的重复率为 50 kHz 时不能实现对掺 Er^{3+} 磷酸盐玻璃的刻写,当其 为 1 kHz 时可通过狭缝整形横向刻写出较长光波导。也利用这种方式在材料中成功制备了 I 类单线型光波导和 III 类包层光波导。

如图 6 和图 7 所示,当聚焦在材料的飞秒激光脉冲能量小于 $7 \mu\text{J}$,可以在材料中制备 I 类单线型光波导,所得单线型波导的传输损耗小、单模导光、制作过程简单,缺点是模场的直径难控制;当脉冲能量大于 $7 \mu\text{J}$ 时,可制得 III 类包层光波导,制备过程中可以很好的控制折射率变化量、保留材料性质,缺点是制备过程需经过要多次扫描,波导传输损耗大。

3.1.3 硅酸盐玻璃

硅酸盐是一种具有优良光学、热学和机械性能

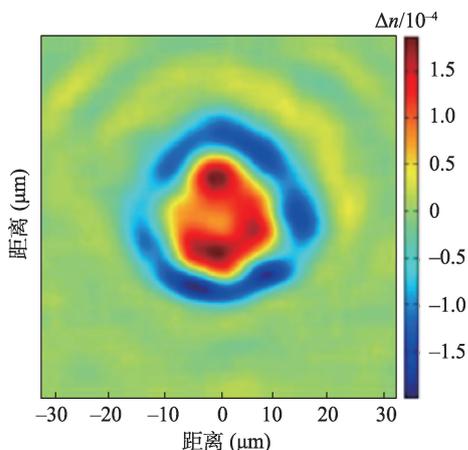


图6 脉冲能量为 $10 \mu\text{J}$,写入深度 $175 \mu\text{m}$,写入速度 $200 \mu\text{m/s}$ 的 III 类波导折射率分布图

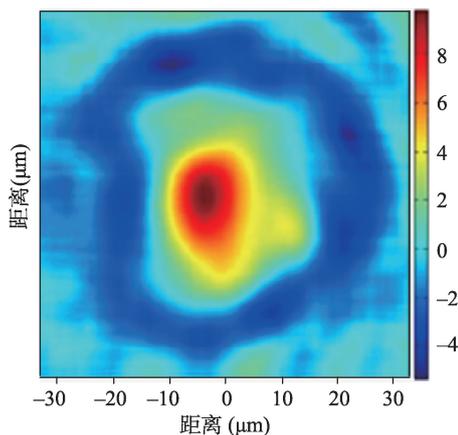


图7 脉冲能量 $5 \mu\text{J}$,写入深度 $175 \mu\text{m}$,写入速度 $30 \mu\text{m/s}$ 的 I 类波导折射率分布图

的非晶物质,可掺杂各种高浓度的稀土离子,折射率接近于光纤,所以被广泛应用于制作各种集成光学器件。近年来,研究者们通过实验发现通过控制激光脉冲能量可以得到性能优良的硅酸盐玻璃光波导,如图 8 所示。扫描速度是 $200 \mu\text{m/s}$,可以发现激光脉冲能量小于 $0.4 \mu\text{J}$ 时,硅酸盐晶体内部的刻蚀痕迹不明显,无法形成波导结构;当脉冲能量大于 $1 \mu\text{J}$ 时,刻蚀痕迹明显,且范围随着能量增长而增大,也不会产生光波导。只有飞秒激光脉冲能量是 $0.4 \mu\text{J}$ 和 $0.6 \mu\text{J}$ 时,损耗最小,写入痕迹是亮线,不产生光质损伤。

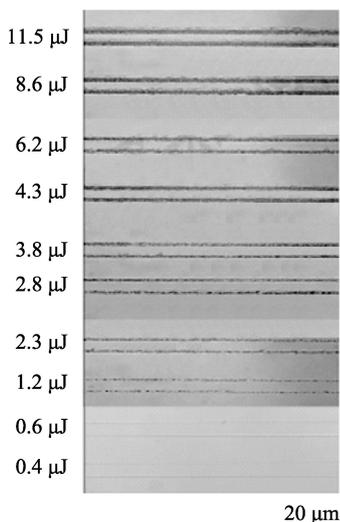


图8 脉冲能量不同时,飞秒激光刻写硅酸盐晶体的痕迹

3.2 激光晶体

激光晶体因其具有优良的机械、物理、化学和光学性能,以及易于掺杂各种高浓度稀土离子,被广泛应用于集成光学领域制备固体激光器。

3.2.1 钛蓝宝石

钛蓝宝石 (Ti:Sapphire) 主要含 Al_2O_3 , 晶体颜色因内部少量的 Ti^{4+} 和 Fe^{2+} 呈蓝色, 有玻璃光泽, 属于三方晶系, 也是具有优良性能的激光晶体。其折射率为 1.76~1.77, 双折射率是 0.008, 在高功率的激光领域应用极其广泛。钛宝石具有良好的导热及光学特性、高电阻率、高硬度、抗腐蚀和透射率稳定等优点, 并且可以产生超短脉冲。2004 年, 阿波斯托洛保罗斯 (V. Apostolopoulos) 等人成功地通过飞秒激光写入钛宝石晶体制备了 I 类单线型光波导, 导光区位于写入痕迹的底端或顶端, 保留了衬底材料的优良特性。同时, 钛蓝宝石双线型光波导热稳定性良好、易控制其折射率该变量、也其偏振敏感导光特性。所以, 钛蓝宝石双线型波导成为集成光学领域重要的光学元件。

3.2.2 激活离子掺杂钇铝石榴石晶和陶瓷

钇铝石榴石晶体 (YAG) 是一种易于掺杂各种激活离子 (Nd^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Er^{3+} 等) 的立方晶系, 具有优良的化学性能、光学质量、导热性和机械性能, 是目前最成熟也最常使用的激光材料之一。研究者们也成功的利用飞秒激光写入在 YAG 晶体和陶瓷上诱导出了单线型、双线型和包层型三种基本的波导结构。罗德纳斯 (A. Rodenas) 等人通过多次扫描制备了 I 类单线型掺 Er^{3+} 钇铝石榴石陶瓷光波导, 但经过加工, 基质材料原有的荧光强度在波导区被大大降低。目前, 研究的热点多集中在钇铝石榴石晶体或陶瓷上制备 II 类双线型光波导, 如 Nd:YAG、Yb:YAG 等, 并探究其荧光寿命、吸收光谱等光学性能。Okhrimchuk 成功的制备了支持单模传输的 III 类矩形包层光波导, 随后, 研究者发现, 衬底材料原有的荧光性能可以被很好保留在包层光波导的波导区, 同时可以制备各种不同端面形状的包层光波导, 实现大小尺寸可控及多种波长下的单模传输。

3.2.3 钕掺杂钷镓石榴石晶体

20 世纪 60 年代, 利纳雷斯 (R.Linares) 等发现了 GGG ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) 晶体是一种优良的固体激光晶体, 而且可以掺入高浓度的钕离子, 形成高质量的钕掺杂钷镓石榴石晶体, 材料的光学特性也随之成为研究的热点。研究者们发现 Nd:GGG 晶体具有高熔点、高机械性能以及优良的激光性能和导热性能, 也因其优势在集成光学领域有着极其广泛的研究和应用。目前, 研究者已经通过飞秒激光写入技术在 Nd:GGG 晶体上成功制备出了 III 类包层型光波导结构, Nd:GGG 包层光波导可以实现 TE、TM 两个偏振方向的多模输出, 是一种高效高功率的光子学器件。如图 9 所示, 测试了一定波长下波导的导波特性和呈现多模模式, 且光强分布紧凑, 有清晰的边界, 在包层内有效限制了激光的传输。

3.3 非线性晶体

铌酸锂晶体 (LiNbO_3) 是一种非常有代表性的非线性多功能晶体材料, 不仅机械与化学性能稳定, 声光效应、热电效应、弹光效应非线性效应和双折射效应优良, 而且通光范围广, 成本也低。所以作为最早被飞秒激光加工的波导晶体, 铌酸锂晶体是集成光学领域的万能材料之一。自 20 世纪初 GUI 等首次在铌酸锂晶体中制备了波导结构, 研究者们陆续的在铌酸锂晶体上实现了三种基本的飞秒激光加工波导类型, 其中 I 类单线型光波导和 II 类双线型光波导一直是研究的热点。

如图 10, 我们可以看到铌酸锂晶体光波导在两种不同情况下导波模式的分布, I 类单线型光波导在偏振沿寻常光的折射率方向上不支持导波的传输。I 类单线型铌酸锂光波导的主要缺陷在于热稳定性差, 且波导区在激光刻蚀区域, 限制了波导材料的性能, 所以, 研究者们多次扫描和精确调整写入参数保存了材料的非线性性能。对比单线型光波导, 双线型铌酸锂光波导则可以较好的保留波导材料的性质。

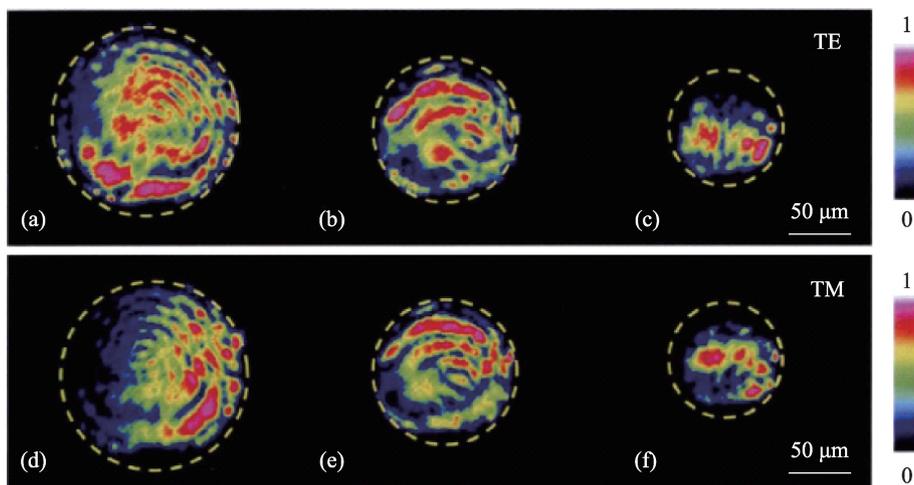


图9 包层光波导632.8 nm波长下近场光强分布:(a~c)TE偏振和(d~f)TM偏振

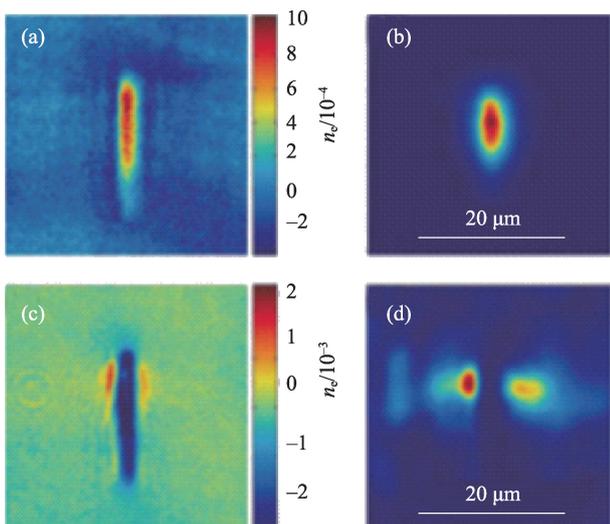


图10 超快写入LiNbO₃光波导(激光脉冲能量为0.2 μJ)在633 nm下,脉宽为220 fs时(a)折射率和(b)导波模式的分布(I类);脉宽为1.1 ps时(c)折射率和(d)导波模式的分布(II类)

3.4 光折变晶体

铌酸锶钡 (SBN) 晶体是常见的光折变晶体,因其具有光电系数大、光折变和非线性性能好等优势,常用于制备红外探测器和电光调制器等。近年来,杰克 (D. Jaque) 等人成功地在SBN晶体中写入了I类单线型光波导。

3.5 聚合物PMMA

与普通的无机材料相比,聚合物材料因其价格

便宜环境稳定性高,并可以通过掺杂调控光学性能等优势,成为集成光学领域材料的研究热点。聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA, 又称有机玻璃) 因具有优良光学性质被广泛使用研究,其折射率大约为1.49,重量只有同体积玻璃和金属材料的一半,透光率好,化学稳定性和机械强度高,是一种长链高分子透明材料,也因其优势为集成光路的研究开辟了新的思路。研究者们通过实验发现,飞秒激光写入PMMA光波导时,高脉冲频率比低脉冲频率条件更易于形成拥有良好对称性的波导结构,并且狭缝整形也有利于修饰波导端面对称。目前,主要应用这类波导制备二维或者三维波导分束器,如图11所示,二维1×2波导分束器软件模拟光路图,基于实验,还可以通过调节飞秒激光的扫描速度和脉冲能量等参数诱导不同折射率变化量,制备分束比例任意的波导分束器,满足了集成光学简化、微型化的要求。

4. 应用

作为光电子学和集成光学的基础元件,光波导具有广阔的应用,为了得到不同功能的光子学器件,可以在拥有不同性质的光学材料上建立多样化的波导结构,比如已经在无源或有源非线性光波导器件中实现了分束器、光开关、耦合器、频率转换器、波导激光器、调制器等。

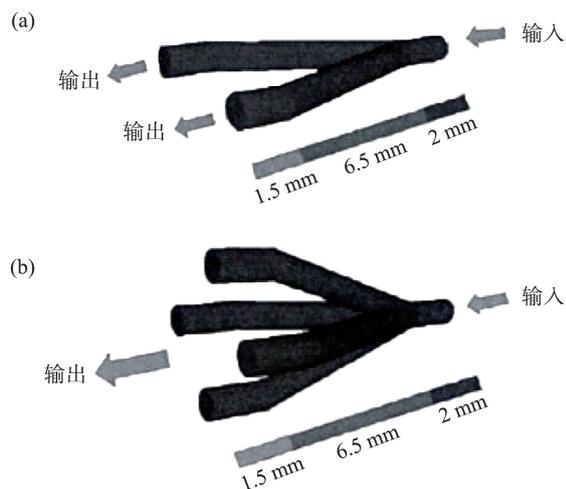


图 11 (a) 二维波导分束器; (b) 三维波导分束器

4.1 频率转换器

频率转换器的核心材料主要是非线性晶体,当飞秒激光写入非线性晶体光波导时,倍频一直是研究的热点,而研究者们已经在 400 至 790 nm 波长范围内实现了倍频光的输出。对于仅支持单模导波的 I 类单线型波导结构,只有准相位匹配时,才会有倍频产生,相位匹配的本质就是被使基频光在各点激发的倍频光以相同的相位到达出射面,并且相互干涉增强,拥有良好的倍频效果;而可能实现 2 个偏振方向多模导波的 II 类双线型光波导,则可以实现相位匹配和准相位匹配两种机制的倍频;支持多模导波的 III 类包层型光波导更有利于实现倍频产生。研究者在研究 II 类 KTP 晶体双线型光波导和 III 类 KTP 晶体包层型光波导倍频转换效率时发现,包层型波导结构的转换效率是双线型的四倍,拥有更加优良的倍频性能。迄今为止,研究者们已经成功的在 KTP、BiBO、PPKTP 等非线性晶体中实现了波导倍频绿光、蓝光、紫光等多种倍频光的产生,且逐步实现有效的倍频转换。

4.2 波导激光

波导激光是一种高效率、低阈值、结构紧凑的

集成化激光光源,其原理是,在衬底材料上通过飞秒激光微加工技术制备出波导结构,在波导的两端加上反射腔镜,构成了激光器的谐振腔,用耦合系统将泵浦光引入波导腔内,形成激光振荡,从而输出激光。主要是以 II 类双线型光波导和 III 类包层型晶体或陶瓷光波导为基础,因掺杂不同离子的增益介质可以输出波长范围 (530 nm ~ 2 μm) 极广的波导激光。目前,研究的热点主要集中于 Nd:GGG、Nd:LGS、Nd:YAG 等钕离子掺杂的激光增益介质来制备波导激光,并且利用飞秒激光在晶体或陶瓷光波导中制备锁模或调 Q 脉冲波导激光。

5. 总结

本论文主要以简明扼要的方式综述了超快激光 (皮秒激光、飞秒激光) 微加工技术在集成光学领域的研究、发展和应用,主要是总结了飞秒激光微加工技术在各种材料上制备集成光子学器件,尤其是光波导结构。虽然,飞秒激光制备光波导时仍存在着波导位置不确定、模式不对称和高损耗等问题,但目前已经可以采用纵向写入、高重复频率激光、柱形棱镜整形、狭缝整形和多次扫描来处理这些问题。飞秒激光微加工技术可以与其他加工系统相结合,制备应用更加广泛的三维光子学器件,满足集成光学微型化、集成化、功能强大化的要求。

