

飞秒激光在三维微细体系中的应用*

李承德 王丹翎 罗乐 杨宏 龚旗煌¹⁾

(北京大学物理系 人工微结构与介观物理国家重点实验室 北京 100871)

摘要 飞秒激光的超快特性使其能以极低的脉冲能量获得超强光场,并且激光辐照区淀积的能量难以通过热扩散途径逸出辐照区域,其与透明物质相互作用是通过双光子或多光子吸收过程实现,故作用区限于焦点核心很小体积内,因而在三维微制备及生物医学领域有着独到优势.文章介绍了飞秒激光应用于微爆炸、高密度三维光学数据存储、直写光波导及三维光子晶体制备、生物医学工程等方面的最新进展.飞秒激光三维微制备技术在微电子、计算机、光通信、生物医学等高新技术领域有着广阔的应用前景.

关键词 飞秒激光,三维激光微制备,光聚合,光损伤,生物医学

FEMTOSECOND LASER APPLICATIONS IN THREE DIMENSIONAL MICRO SYSTEMS

LI Cheng-De WANG Dan-Ling LUO Le YANG Hong GONG Qi-Huang

(State Key Laboratory for Mesoscopic Physics and Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Femtosecond lasers exhibit great advantages in three-dimensional microfabrication and ophthalmic surgery since they can machine materials with very high resolution and precision due to their ultrashort pulse duration and ultrahigh peak intensity. Recent developments of the applications of femtosecond lasers in three-dimensional microfabrication of high density 3-D optical data storage, wave guides and photonic crystals, and in refractive surgery, glaucoma treatment and cataract surgery are reviewed. Femtosecond laser three-dimensional microfabrication technology will be extensively used in microelectronics, computer science, optical communication and biomedicine fields.

Key words femtosecond laser, three-dimensional laser microfabrication, photopolymerization, optical damage, ophthalmic surgery

1 引言

超短脉冲激光不仅使人们得以在飞秒级时间分辨下研究物理、化学、生物学、光电子学等学科中的各类瞬态动力学过程,也使人们得以用很低的脉冲能量获得极高的峰值光强.在许多情况下,超快和超强根本性地改变了激光与物质相互作用的机制^[1-10].由于飞秒激光脉冲持续期间极短,激光辐照区淀积的能量难以通过热扩散途径逸出辐照区域,激光与物质相互作用的范围被严格限定,即热影响区很小.对于透明材料,飞秒激光的吸收是通过双光子或多光子过程,由于双光子吸收与光强的平方成正比,吸收过程只发生在焦点处很小的体积内.具体地说,双光子吸收的点分布函数是单光子吸收点

分布函数的平方^[11].这意味着如果我们采用 800nm 波长的飞秒脉冲激光,焦点处由于双光子吸收引起的有机和高聚物光变色、光漂白、光聚合等,其横向尺寸近乎与 400nm 波长光的衍射极限光斑相同,纵向尺寸比 400nm 波长聚焦的瑞利长度还小.多光子吸收及其引发的过程则限于更小的范围内.

基于以上原因,飞秒激光微加工能获得常规长脉冲无法比拟的高精度和低损伤.进入 90 年代以来,超短激光脉冲产生和放大技术获得了长足进展,特别是以掺钛蓝宝石为代表的固体飞秒激光系统引

* 国家基础研究专项经费(批准号:G1999075607)资助项目;国家自然科学基金(批准号:19984001,19525412)资助项目
2000-03-02 收到初稿,2000-07-21 修回

1) 通信联系人

起了微制备和医学领域研究者的广泛关注,为激光在微电子、计算机、光通信、生物医学等高新技术领域的应用开辟了全新的途径。

2 微爆炸与微区折射率改变

哈佛大学 E. Mazur 领导的小组研究了飞秒激光在光学玻璃、熔融石英、单晶蓝宝石等透明介质体内的超强光引起的体内微爆炸^[12]。他们将再生放大飞秒钛蓝宝石激光器输出的波长为 780nm,100fs 超短脉冲激光经 $NA = 0.65$ 的显微物镜聚焦到这些材料体内,发现当脉冲能量低于 $0.5\mu\text{J}$ 时,激光击穿形成的圆点直径小于 $0.5\mu\text{m}$ 。原子力显微镜 (AFM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 分析发现,圆点尺寸可小至 $200\text{--}300\text{nm}$,为激光波长的三分之一至四分之一,并且圆点的核心是空腔,见图 1。



图 1 聚焦飞秒激光在熔融石英中微爆炸所形成微腔的原子力显微镜 AFM 照片 (微腔直径约为 $300\mu\text{m}$,小于光学衍射极限)

他们的研究表明,飞秒强激光在透明介质材料中引起的自聚焦效应使激光焦斑小于衍射极限;在超短脉冲持续时间内,超强光场能形成高密度超热高压等离子体。这等离子体在小于 10ps 的时间内将能量传递给受辐射区材料。由于熔融石英的比热容为 1.75J/gK ,密度为 2.2g/cm^3 ,他们假定如 $0.5\mu\text{J}$ 脉冲能量中只有 30% 被 $0.1\mu\text{m}^3$ 体积所吸收,则辐照区材料的温升将达约 10^6K 。原子力显微镜 (AFM) 研究和光学衍射实验揭示,微腔由微爆炸形成,微腔周围的材料因压缩而致密。然而,要压缩石英和蓝宝石这类材料需要巨大的压力。有关冲击波实验表明^[13],要产生 50% 的体积压缩,熔融石英需要 35GPa ,蓝宝石需要 340GPa 。Mazur 的小组对这种超快超强激光引起的微爆炸用等容升温模型进行估算,石英内部压力随温度变化的速率为 $2 \times 10^5\text{Pa/K}$,蓝宝石为 $3 \times 10^6\text{Pa/K}$,因此 10^6K 温升将导致石英内压力达 200GPa ,蓝宝石内压力达

3000GPa 。

飞秒激光在普通透明材料体内微爆炸形成的亚微米点可用于高密度三维光学数据存储和三维光子晶体的精密制备。同时飞秒激光在石英或蓝宝石材料体内微爆炸可用于开展高温高压研究的微型实验。

多年来,利用紫外准分子激光辐照石英玻璃,特别是掺锗石英玻璃引起折射率的变化研究引起人们的关注,它可以在光纤中制作 Bragg 光栅,构造光纤通信系统中的反射镜、带通滤波器、光纤色散补偿及光纤放大器。近年来,利用飞秒激光双光子或多光子吸收在透明材料中引起折射率变化已引起人们的极大重视。

京都大学的 K. Hirao^[14-16] 等人将波长为 810nm 、脉宽为 120fs 、脉冲重复率为 200kHz 的锁模钛蓝宝石激光经 20 倍的显微物镜聚焦到掺锗石英玻璃中,由于焦点处峰值功率密度达 10^{14}W/cm^2 ,通过非线性多光子吸收机制,焦点物质结构由玻璃态向结晶态转变,折射率变化最高可达 0.035 。将焦点沿平行光轴方向移动,即可在掺锗石英玻璃体内绘制微米级折射率变化的线,并且这线的直径随激光平均功率增大而增大,折射率变化随脉宽的减小(即峰值光强升高)而提高,因此很容易设计成光波导。Hirao 等人的实验表明,这样制成的波导属梯度折射率型,横截面折射率分布为中央高,边缘低。他们制成的 800nm 波长光波导损耗为 0.1dB/cm 。直径为 $8\mu\text{m}$, $17\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$ 波导分别能传输 800nm 光的 LP_{01} 模, LP_{11} 模和 LP_{22} 模,见图 2。

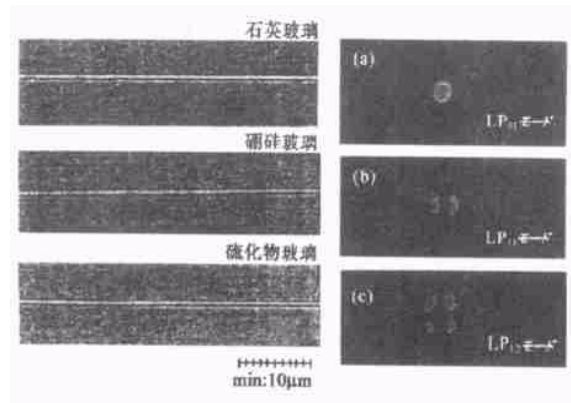


图 2 飞秒激光在掺杂玻璃内直写光波导及其传输特性 (左图分别为石英玻璃、硼硅玻璃和硫化物玻璃中写入的光波导,标尺的最小分度 min 为 $10\mu\text{m}$;右图为此些光波导传输 800nm 光 LP_{01} 模, LP_{11} 模和 LP_{22} 模的照片)

3 双光子微聚合

M. P. Joshi 和 P. N. Prasad^[17] 等人采用飞秒激光物理

光双光子聚合,研究在高聚物预聚体内制备光波导、三维集成光路、分束器及光栅耦合器等. B. H. Cumpston^[18]等人则是应用飞秒激光双光子聚合法制备三维周期性介电结构,引起了科学界的极大关注.

由两种或两种以上的介电介质在空间中作二维或三维周期性排列就得到二维或三维的光子晶体. 电磁波在这种具有介电常数周期性的复合介质中传输时,可以和实际晶体中电子的传播相类比,也就是介电周期结构中麦克斯韦方程与晶体中薛定谔方程的类比. 从光子及电子运动方程的可类比性,人们发现在一个折射率周期性变化的结构中,光子的运动将类似于在周期场中电子的运动. 因此,折射率周期性变化的介电结构应具备光子能带结构,在一定条件下也具有光子能隙. 以光子在光子晶体材料中运动规律为基础发展起来的光子器件,比起通常的电子器件会有更高的运行速度及其他一系列新特点. 以半导体材料为例,如果光子带隙能够覆盖半导体中几个 kT 能量的电子禁带,则电子-空穴复合过程被极大地抑制,从而导致半导体中自发辐射的禁戒,显然这对提高半导体激光器的综合特性具有重要意义.

这种介电结构的周期为光波长量级. 自然界中不存在这种天然的周期性介电结构. 1987年, E. Yablonovitch^[19]提出了建立这种周期性介电结构的设想,并在微波频段得到了证实^[20]. 原则上,人们可以通过按比例缩小晶格常数,在近红外和可见光区制作出有着完全光子带隙(PBG)的这种三维结构. 然而要实现晶格常数在微米和亚微米范围且晶格对称性严格的三维光学光子晶体还有很多技术难关. 已经有许多方法被提出来,如 K. A. McIntosh 等人^[21]用常规微电子技术在硅片上制作红外光子晶体; S. Noda^[22,23]提出采用选择刻蚀、晶片键合等结合制备近红外和可见光光子晶体;此外还有电子束刻蚀^[24,25]、胶体颗粒自组织^[26]等方法. 所有这些方法仍然受到严厉的技术限制.

飞秒激光双光子聚合法^[27-29],将超短脉冲激光经高倍显微物镜聚焦到可见光聚合预聚物材料里,利用双光子激发光聚合形成固化,通过控制聚焦光束的空间移动生成三维立体微结构,未曝光的材料用溶剂溶解掉,则得到所需的固化三维结构. 这种方法提供了一种可控制晶格常数和晶格对称性,实现近红外和可见光波段光子晶体的简洁方法. 诚然,普通材料的双光子吸收截面很小,寻求、研制双光子

吸收截面大的有机或高分子聚合物材料就成为飞秒激光双光子微制备应用的前提. 这方面的研究目前已取得喜人进展^[18,30,31].

加利福尼亚理工学院的 B. H. Cumpston^[18]等人于 1999 年在《自然》杂志上报道了一类有着 D- π -D、D- π -A- π -D 和 A- π -D- π -A (其中 π 是共轭链, D 是给体, A 是受体) 结构的 π 共轭化合物,如 4,4'-bis(N,N'-di-*n*-butylamino)-E-stilbene, 其双光子吸收截面 σ_2 可高达 $1250 \times 10^{-50} \text{cm}^4 \cdot \text{s} / \text{光子}$. 他们发现,增加共轭长度及给体和受体强度能提高 σ_2 , 并且这种提高与对称分子间电荷转移的程度有关. 当给体置换物使得分子中电子富余时,单光子或双光子激发后,这些发色团能够将一个电子转移到甚至是较弱的受体,这个过程可用于激活多种化学反应. 由光子激发这种发色团转移到丙烯酸盐的电子形成的基因离子或后继的基团产物,会引发丙烯酸单体(甲基丙烯酸、异丁烯酸甲酯及各类三和五丙烯酸盐)发生光聚合.

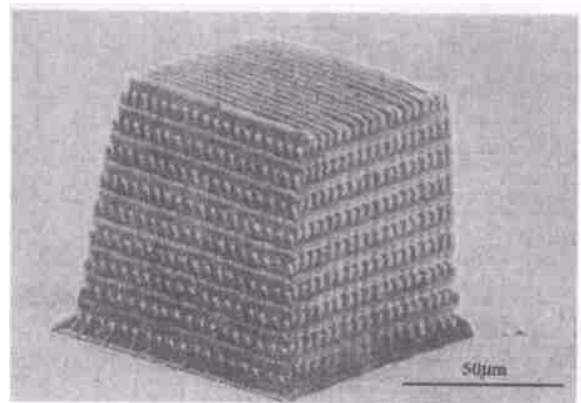


图3 双光子光聚合制备的三维光子晶体
(其晶格常数为亚微米,可望应用于可见光波段)

Cumpston 等人将波长为 800nm、脉宽为 150fs、脉冲重复率为 76 MHz 的激光束聚焦到这类光聚合预聚物材料里进行三维微制备. 图 3 为他们采用三维微制备方法制成的具有三维光子带隙的微结构器件. 进一步,如果需要更高介电常数的陶瓷结构,则可以聚合物结构为塑胚制作出来.

4 飞秒微切割

由于飞秒激光能以极低的能量获得极高的光强,且因超快,故其激光能量丝毫不扩散到焦点以外,这使得聚焦飞秒激光光束成为常规长脉冲激光无法比拟的锐利而精密的手术刀. 飞秒激光的低能量、小损伤特点,使之非常适合于超精细切割.

密西根大学 Kellogg 眼科中心的 R. Kurtz 和 Intralase 公司的 T. Juhasz 建立起一台用于促进近视眼、青光眼及白内障手术的超快激光系统^[32]。激光器工作于 1060nm, 脉宽为 800fs, 脉冲重复率为 2kHz, 最高脉冲能量为 40 μ J。

在进行折射率矫正手术时, 医生通常用剖刀在角膜上切出一块粘连着的角膜瓣。如果不小心将角膜瓣全切下来, 则当病人眨眼时膜瓣移动、丢失。如果切得太深则会发生眼球切穿, 剖刀进入眼球而导致严重损伤。计算机控制的飞秒激光刀可以精确地定位于角膜里任意位置, 眼科医生可按所需的任意形状来切角膜, 并在需要的时候中断手术。图 4 所示为飞秒激光在眼睛角膜上切开的角膜瓣。

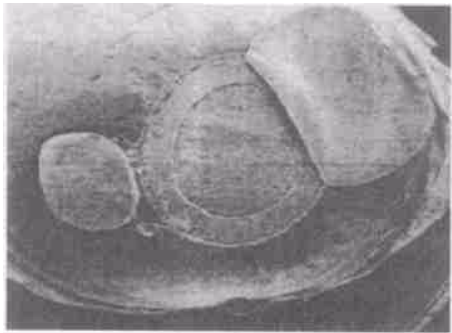


图 4 飞秒激光在眼睛上切开的角膜瓣
(计算机数控的飞秒激光刀可以精确地定位于角膜里任意位置)

患青光眼的眼球内眼压高, 现在用于引流减压的技术很难避免感染、白内障、出血和渗漏。Kurtz 用 0.6 NA 的镜头将飞秒激光聚焦到 5 μ m 光斑, 穿过巩膜后从组织的后壁开始将焦点移向前表面, 直至表面被刻蚀。由于飞秒激光的精确性, 不损伤周围组织, 极大地减少了上述危险。

Kurtz 的小组还利用飞秒激光诱导光学击穿, 与超声技术相结合, 选择性地破坏晶状体组织, 来进行白内障摘除手术。他们先将超快近红外激光脉冲聚焦到晶状体组织里, 诱导光学击穿产生微小汽泡, 这些汽泡在超声场的作用下形核生长, 直至晶状体组织碎裂。这种方法提高了晶状体周围膜囊保持完好的机会。完好的晶状体膜囊能更好地支持眼内晶状体移植, 从而获得较好的视力。

5 结语

飞秒激光应用于三维微细系统有着独到的优势, 它避免了传统长脉冲红外和可见区激光能量大及热影响区大的缺点, 能获得比常规紫外激光更高

的精密密度; 同时它又克服了紫外激光对大多数材料不透明的缺点, 近红外飞秒激光能几乎不衰减地进入到普通透明介质体材深部进行三维立体操作。当然作为一个新兴的前沿领域, 还存在许多问题急需解决: 如飞秒激光与各种不同物质的相互作用机制; 研制双光子吸收和多光子吸收截面大的材料; 降低飞秒激光器的价格等。我们有理由相信, 随着研究工作的深入, 三维微制备技术在微电子、计算机、光通信、生物医学等高技术领域有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Du D, Liu X, Korn G *et al.* Appl. Phys. Lett., 1994, 64: 3071
- [2] Stuart B C, Feit M D, Rubenchik A M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 74: 2248
- [3] Pronko P P, Dutta S K, Du D *et al.* J. Appl. Phys., 1995, 78: 6233
- [4] Von der Linde D, Schuler H. J. Opt. Soc. Am. B, 1996, 13: 216
- [5] Stuart B C, Feit M D, Herman S *et al.* J. Opt. Soc. Am. B, 1996, 13: 459
- [6] Varel H, Ashkenasi D, Rosenfeld A *et al.* Appl. Phys., 1997, A65: 367
- [7] Von der Linde D, Sokolowski D, Bialkowski M *et al.* J. Appl. Surf. Sci., 1997, 109: 110
- [8] Lenzner M, Kruger J, Sartania S *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 4076
- [9] Kruger J, Kautek W. Laser Physics, 1999, 9: 33
- [10] Lenzner M, Kruger J, Kautek W *et al.* Appl. Phys., 1999, A68: 369
- [11] Nakamura O. Optik, 1993, 93: 39
- [12] Glezer E N, Mazur E. Appl. Phys. Lett., 1997, 71: 882
- [13] Marsh S P ed. LASL Sock Hugoniot Data. Berkeley: University of California Press. 1980
- [14] Davis K M, Miura K, Sugimoto N *et al.* Opt. Lett., 1996, 21: 1729
- [15] Miura K, Qiu J, Inouye H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 71: 3329
- [16] Hirao K, Miura K. J. Non-Cryst. Solid, 1998, 239: 91
- [17] Joshi M P, Pudavar H E, Swiatkiewicz J *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 74: 170
- [18] Cumpston B H, Ananthavel S P, Barlow S *et al.* Nature, 1999, 398: 51
- [19] Yablonovitch E. Phys. Rev. Lett., 1987, 58: 2059
- [20] Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1991, 67: 2295
- [21] McIntosh K A, Mahoney L J, Molvar K M *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 70: 2937
- [22] Noda S, Yamamoto N, Sasaki A *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. Part 2, 1996, 35: L909

- [23] Noda S, Yamamoto N, Kobayashi H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 75 :905
- [24] Baba T, Matsuzaki T. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, 1996, 35 : 1348
- [25] Cheng C C, Scherer A. J. Vac. Sci. Technol., 1995, B13 :2696
- [26] Miguez H, Lopez C, Meseguer F *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 71 :1148
- [27] Borisov R A, Dorojkina G N *et al.* Appl. Phys., 1998, B67 : 765
- [28] Borisov R A, Dorojkina G N, Koroteev N I *et al.* Laser Physics, 1998, 8 :1105
- [29] Sun H B, Matsuo S, Misawa H *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 74 :786
- [30] Dvornikov A S, Rentzepis P M. Opt. Commun., 1997, 136 :1
- [31] Albota M, Beljonne D, Bredas J L *et al.* Science, 1998, 281 : 1653
- [32] Reiss S M. Opt. & Pho. News, 1999, 10 :31

超短脉冲激光同位素分离*

陈正林 张杰

(中国科学院物理研究所 光物理实验室 北京 100080)

摘要 同位素的分离极为重要.传统的分离方法是气相分离法.文章详细介绍了有别于该方法的两种激光同位素分离方法.其基本原理是利用离心分离作用产生同位素的分离.具体说来就是,一个旋转等离子体柱在一定条件下达到流体力学平衡时,其中的同位素离子沿径向将形成高斯密度分布.质量数越高的离子,密度分布的高斯半径越大,从而在径向形成具有不同丰度的同位素分布.理论和实验表明,该方法能产生较高丰度的同位素,具有良好的实用化前景.

关键词 超短脉冲激光,同位素分离

ISOTOPE SEPARATION WITH ULTRA-SHORT PULSE LASERS

CHEN Zheng-Lin ZHANG Jie

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Isotope separation is of great value and traditionally it is achieved by dissipation, which is very complicated and inconvenient. Isotope separation with lasers is quite different from the traditional method, and is expected to give richer isotope yields. The principle of isotope separation with lasers is based on centrifugal force. Generally, when the rotating plasma column is in hydrodynamic equilibrium, the density distribution of different isotope ions is Gaussian along the radial direction, with a larger Gaussian width for ions with larger mass. Consequently, the enrichment along the radial direction radius is different for ions with different mass, thus isotopes with different mass can be separated.

Key words ultra-short pulse laser, isotope separation

1 引言

同位素的分离极为重要.在曼哈顿计划中,科学家们为了分离 U-238 和 U-235 建立了庞大的工厂,直到今天,同位素的分离仍然保持了相当大的规模.同位素分离的主要实用方法是气相分离,其原理是:利用轻重离子的扩散速度不同而产生分离.后来,随着研究的进展,人们开始发展了等离子体离心

分离技术.最初的等离子体离心分离技术起源于五六十年代,其原理是利用气体放电产生部分电离的气体等离子体,该等离子体在外加的轴向磁场作用下产生角向旋转从而产生径向分离.1971年,Bonnevier 在部分电离旋转氦放电等离子体中得到了丰

* 国家自然科学基金(批准号:19825110)和国家高技术惯性约束聚变计划资助项目
2000-04-18 收到初稿,2000-06-07 修回