

激光破坏机制的研究

孙利国

(中计公司吉林省分公司, 长春)

摘要: 本文简要评述了激光破坏研究领域的最新进展, 并指出了今后的发展方向。

Researches in laser damage mechanism

Sun Liguó

(Jilin Branch of CCTS)

Abstract: The recent advances in the area of laser damage researches are briefly reviewed, and the trend in the future is pointed out.

一、引言

激光破坏问题早在60年代激光问世不久就被发现了, 但当时人们只是作为实验中的个别现象加以描述的。随着激光功率的提高及激光应用范围的扩大, 激光破坏问题越来越突出, 人们才开始重视这个问题, 并展开专门的研究。

激光破坏研究是一项十分复杂的课题, 它涉及的知识相当广泛, 包括物理学、化学、生物学、机械、半导体、金相学等领域。由于其研究内容丰富, 加上使用术语及破坏定义的差异, 以及实验条件和环境不同, 某次研究很难得以重复, 这大大妨碍了该领域的发展。为此, 由美国材料与试验协会 (ASTM) 主办, 欧洲8个国家实验室及美国参加了称为Round Robin的破坏实验, 旨在建立一种实验标准, 预计将促进这一领域的发展。从1969年由美国国家标准局 (NBS) 等5个单位在Colorado州的Boulder举办了首届“高功率激光材料讨论会”, 主要讨论激光破坏方面的问题, 此后每一、两年举办一次并成为专门的国际学术会议, 称“Boulder (玻尔德) 破坏讨论会”, 到目前为止共开了16届。

激光破坏研究是激光与物质相互作用研究的一个重要方面, 对激光在工业、国防和医学等方面的应用具有实际指导意义。通过损伤机理的研究有可能开发出新的激光介质和激光器材料。此外它也是探索物质结构, 研究生物体奥秘的一种手段。

常用的研究强激光对材料破坏的实验方法有: (1) 改变透镜到样品的距离, (2) 在脉冲时间内改变光强, (3) 改变脉宽, (4) 改变辐照波长, (5) 改变样品尺寸和形状, (6) 改变光束截面形状。对光作用时间内发生的过程及材料中剩余效应的研究可采用: (1) 积分图象法, (2) 高速摄影法, (3) x光结构分析法, (4) 显微镜法, (5) 金相法, (6) 光弹性法, (7) 低能电子衍射技术等。

二、研究进展

在激光发展的30年里,人们围绕激光破坏问题做了大量工作并取得了相当的进展^[1~3]。其研究内容从材料上分已涉及到聚合物、玻璃、晶体、薄膜、金属及合金、半导体、气体及生物体等。现在所说的激光破坏(或激光损伤)通常包括强激光作用下材料出现的裂化、熔化、蒸发、滑错、起坑、断纹、波纹、腐蚀及在介质中产生火花,增加散射和电子发射等。常用的激光破坏阈值的定义有两种,一种是把最高无损伤通量与最低损伤通量的平均值定义为破坏阈值;另一种是取50%样品出现损伤的激光通量为阈值。人们对激光作用下不同条件、不同材料的损伤进行了研究,不仅研究了单次辐照情况,而且研究了多次辐照的累积效应^[4]。研究表明,材料的损伤一般可分为本征损伤和非本征损伤^[5]。由材料自身引起的损伤为本征损伤;而由掺杂物、杂质、缺陷、表面刻痕等引起的为非本征损伤。从实验结果出发,人们提出了一些理论模型,用以解释激光破坏的物理本质。其中属于本征机理的主要包括自聚焦模型^[6],电子雪崩模型^[7~9],多光子电离模型^[10,11],冲击波模型^[12,13],属于非本征破坏的主要有缺陷模型^[14]及热模型^[15,16]。系统地评论这方面的进展是相当困难的,目前这类资料尚不多见,下面从材料上分类简要评述这一领域已取得的某些进展。

1. 激光对金属及合金的破坏

这方面的工作始于60年代初。过去一直认为光压力是金属及合金材料变形的主要原因,但详细的研究表明,当脉冲宽度为 10^{-3} s的激光作用于金属及合金时,表现为迅速的加热和冷却,并伴随着材料熔化、蒸发和崩离,当脉宽小于 10^{-6} s激光作用于材料表面时,材料内的自由电子吸收光能并与晶格频繁碰撞转变为区域加热,导致吸收层的不均匀温升,引起足以使材料变形的应力波,随后加热区域扩大,导致表面的汽化。

通过对不同金属及合金的激光破坏研究,人们获得了一些有益的知识。但到目前为止,涉及到金属结构在辐照时发生变化的机理及实际中的许多问题还没有解决;还没有获得金属结构和特性变化的定量规律,关于激光对光谱特性的影响也了解甚少。激光在工业中日益广泛的应用将促进对金属及合金的研究。

2. 激光对聚合物的破坏

聚合物在激光光学系统,核聚变研究,激光材料,激光医学,受激光散射等方面的应用促使对其激光损伤进行了深入的研究,不但研究了单次辐照情况,而且对多次辐照的累积效应进行了研究。其中最多的是对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的研究。

关于聚合物的损伤机制,一般认为是外因所致^[4,17~20],当辐照的激光能量升高时,样品内吸收体吸收入射光能导致局部加热、熔化,引起分子离解,造成热或冲击破坏。Dyunaev等人^[21]认为样品中缺陷表面存在静电荷,将吸收光能激发电子,而被激发电子使吸收增加导致破坏。辐照通量远大于单次破坏阈值时,产生的汽化和碎裂现象被解释为分子离解所致气体膨胀引起的。

通过对聚合物损伤的研究,已找到一些提高其抗激光能力的方法。消除样品中的吸收缺陷,采用单体提纯及在材料中加入低分子量添加剂均能有效改善材料的抗破坏能力。但对提纯可提高单次及多次辐照阈值方面尚有争议^[19~21]。此外,研究发现,在杂质引起损伤的材料中,其杂质尺寸在亚微米量级^[17]。

3. 激光对玻璃的破坏

人们对玻璃的激光损伤研究早在激光问世不久就开始了,目前研究比较多的是硅酸盐,磷酸盐及氟磷酸盐等激光类玻璃。一般认为造成玻璃破坏的原因可分为本征和非本征原因^[10,22]。由材料内的杂质、缺陷、包容物等吸收入射光能,引起周围局部受热或熔断,因热膨胀系数不同产生热应力导致的损伤为非本征损伤。当材料不存在上述不均匀时,其损伤被认为是本征原因所致^[8,9]。激光辐照下,材料内的雪崩放大过程可导致热击穿。对硅酸盐玻璃,产生雪崩的初始电子由杂质(如氧化铁)和基质玻璃的自由阴离子产生。氟磷酸盐玻璃的主要成分是氟化物。由紫外光谱可知氟离子的电离电位高于自由氧离子,从这一角度来说,氟磷酸盐玻璃的破坏阈值应高于硅酸盐玻璃,但这与实验结果不符^[23]。研究表明,氟磷酸盐破坏阈值在很大程度上取决于是否存在杂质。消除杂质的氟磷酸盐玻璃阈值低,估计与其中的 P_2O_5 含量低有关。这类玻璃有较高的膨胀系数及很低的屈服应力或机械强度,其晶格结合力弱,光作用下易损伤。

有的学者^[24,25]认为硅酸盐玻璃的损伤是由激光辐照激发的分子间键热起伏分解引起的,但该模型在说明光场如何影响分子键并导致键的断裂及激活能的降低方面是不清楚的。研究发现,当以大于二分之一禁带宽度($h\nu > E_g/2$)的激光重复照射时,由于玻璃基质的双光子吸收将出现色心的累积效应和高强度的低阈值电离^[22]。同聚合物相比玻璃的破坏阈值略高。由于到目前为止对玻璃的结构认识得还不很清楚,因而未能建立一个令人满意的破坏理论模型,尚待进一步深入研究。

4. 激光对薄膜的破坏

较早从事这方面工作的是Turner等人^[26]从1965年开始的,国内也于1967年开展了相应工作,目前已成为激光破坏研究领域最活跃的课题之一。研究表明,材料的本征吸收是导致薄膜破坏的基本因素,其表现为热破坏和机械破坏。此外薄膜的吸收系数、热扩散、折射率、比热、紫外吸收限、应力、附着力、基体、结构、散射、杂质和缺陷等都是薄膜破坏的重要因素。D. Ristain等人^[2]利用线性扫描技术发现了破坏阈值与单层或多层吸收的关系。人们除了探讨薄膜的破坏机理外,把主要精力放在改善激光破坏过程的诊断技术及提高薄膜抗破坏性能的工艺上。目前已掌握的可提高破坏阈值的镀膜技术有:电子束技术,超高真空电子束,离子辅助电子束,超高真空连续激光法,改进的分子束外延技术等。但到目前为止研究得并不充分,例如对脉宽大于几百毫秒的激光破坏实验报导很少见到,尤其是对可见光及近红外激光。虽然提出了分析多脉冲破坏介质的方法,但对其产生的机制尚不清楚^[1]。如果解决了短波长激光对薄膜的破坏问题,则 x 、 γ 激光的输出窗问题也就迎刃而解了。

5. 激光对晶体和半导体的破坏

关于强激光作用下晶体和半导体材料的破坏现象,人们已进行了大量的理论和实验研究,并提出了许多破坏理论模型,比较著名的有M. Bass和H. H. Barret提出幸运电子理论^[27,28];Zverev等的电子雪崩模型^[29];A. Schmid^[11]和A. Vaidyanathan^[7]的多光子电离模型。有人^[30]认为冲击波也是造成晶体和半导体破坏的可能原因。研究表明,破坏与晶体及半导体中的缺陷、结晶方向和材料的折射率有关。目前这方面研究已取得相当的结果,但也存在一些问题,例如幸运电子理论不能解释多脉冲现象,破坏阈值是否与辐照的激光频率有关仍是一个有争议的问题。

人们在研究半导体材料损伤的同时,对探测器的抗激光能力进行了研究,并取得了一些有益的结果^[31~33]。

鉴于晶体和半导体作为激光的工作物质、窗口材料及探测器材料与激光密切相关,深入研究其与激光的相互作用显得十分必要。

三、今后的研究方向

由于激光破坏研究的重要性,目前已成为国际学术界激光领域比较活跃的课题之一。从研究趋势看,主要有如下几个方面:

- (1) 寻求改进激光破坏研究的检测手段,发展新的诊断技术,以提供精确的实验数据。目前的实验结果误差很大,绝大多数是由于诊断技术落后造成的。
- (2) 通过实验研究,分析材料成分对损伤的影响,进而改进生产工艺,提高产品性能。
- (3) 对新的材料及新的辐射条件的损伤研究,尤其是模拟实际工作环境的研究,以获得有价值的实验数据。重点是短波长及长脉冲情况。
- (4) 由材料的损伤转向器件的损伤研究,诸如液晶、光栅、探测器等。
- (5) 理论方面的深入探讨。目前研究多为实验上的,理论研究不多。给出的模型十分混乱,不同模型之间,理论与实验结果之间,模型的宏观解释与微观解释之间关系不明确,缺乏系统性。提出的模型带有很大局限性,同一模型在解释不同实验结果时得出的结论也不尽一致,有待进一步发展。

参 考 文 献

- [1] Stewart A F, Guenther A H. *Appl Opt*, 1984, 23(21): 3741
- [2] Bennett H E, Guenther A H, Milan D *et al.* *Appl Opt*, 1987, 26: 813
- [3] Foltyn S R. *激光与红外*, 1987, 17(6): 50
- [4] Mannekov A A, Matyushin G A, Nechitaito V S *et al.* *Opt Engng*, 1983, 22(4): 400
- [5] Glass A J. *Appl Opt*, 1983, 12(4): 637
- [6] 曹渭楼, 邓锡铭. *应用激光*, 1986, 6(6): 253
- [7] Vaidyanathan A, Walker T W, Guenther A H. *IEEE J Q E*, 1980, 16(1): 89
- [8] Sharma B S. *Canad J Phys*, 1967, 45: 3781
- [9] Sharma B S. *Canad J Phys*, 1969, 48: 1178
- [10] Poprawe R, Herziger G. *IEEE J Q E*, 1986, 22(5): 590
- [11] Schmid A, Bräunlich K P. *Phys Rew (B)*, 1977, 16(10): 4590
- [12] Willi O, Lee P H Y, Lin Z Q. *Opt Commun*, 1985, 53(4): 225
- [13] Fedosejevs R, Teng Y, Sigel R *et al.* *激光科学与技术*, 1982, 5(6): 61
- [14] Porteus J O, Seitel S C. *Appl Opt*, 1984, 23(21): 3796
- [15] Bartoli F, Esterowitz L, Allen R *et al.* *Appl Opt*, 1976, 47(7): 2875
- [16] Palmer J R. *Opt Engng*, 1983, 22(4): 435
- [17] Manenkov A A, Nechitaile V S. *Soviet J Q E*, 1980, 10: 347

- [18] Balitskas S K, Maldutis E K. Soviet J Q E, 1981, 11: 541
- [19] Romberger A B, Saito T T, Siegenthaler K E *et al.* SPIE, 1984, 505: 209
- [20] O'Connell R M, Deaton T F, Saito T T. Appl Opt, 1984, 23(5):682
- [21] Dyunaev K M, Manenkov A A, Maslyukov A P *et al.* Soviet J Q E, 1983, 13(4): 503
- [22] Glebov L B, Efimov O M, Petrovski G T *et al.* Soviet J Q E, 1986, 16(9): 1245
- [23] Izumitani. 激光与红外, 1981, (10): 75
- [24] Zhurkov S N, Eron'ko S B, Chmel A E. Soviet Phys Solid State, 1980, 22: 3040
- [25] Zhurkov S N, Eron'ko S B, Chmel A E. Soviet Phys Solid State, 1982, 24: 733
- [25] 中科院上光所, 光学工艺, 1979, (4): 30
- [27] Bass M, Barrett H H. IEEE J Q E, 1971, QE-8: 338
- [28] Bass M, Barrett H H. Appl Opt, 1973, 12: 690
- [29] Zverev G M, Mikhailova T N, Pashkov V A *et al.* Soviet Phys JETP, 1968, 26: 1053
- [30] 王春奎, 方慧英, 傅裕寿. 物理学报, 1987, 36(3): 386
- [31] Bartoli F, Kruer M, Esterowitz L *et al.* J A P, 1973, 44(8): 3713
- [32] Kruer M, Esterowita L, Bartoli F J *et al.* J A P, 1975, 46: 1072
- [33] 孙利国, 李永正, 沈 柯. 光电探测器激光损伤热模型分析. 激光杂志, 1991, 12(2): 72

* * *

作者简介: 孙利国, 男, 1963年11月出生。硕士。从事光电子技术方面的应用与开发。

收稿日期: 1990年9月5日。收到修改稿日期: 1991年1月18日。

· 简 讯 ·

衍射透镜作为CO₂激光器的透镜进入市场

1990年11月美国加州相干光学分公司开始交付有限数量的供CO₂激光材料加工用的衍射透镜。据该公司称, 比起一般标准的弯月形凹凸透镜来, 其优点是衍射极限性能, 因而可提供较小尺寸光斑或较长的工作距离。据说, 已安排原制造厂家生产的一定数量产品在1991年2月1日开始发货。

该公司还向用户提供GaAs, Ga和Zns衬底的衍射透镜, 这一进展表明衍射透镜向多样化应用发展趋势。