

高功率激光与材料相互作用机理研究进展

陆建 倪晓武 贺安之

(南京理工大学理学院, 南京, 210094)

摘要: 本文综述了高功率激光和材料相互作用物理机理研究现状和存在问题, 着重阐述了笔者在这方面已进行的理论和实验工作, 并指出了本方向可继续进行的研究工作。

关键词: 相互作用机理 高功率激光 材料

A research advance on the interaction mechanism of high - power laser and materials

Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi

(Nanjing University of Science & Technology, School of Science)

Abstract: The present situation and questions in physical mechanism research of laser interaction to some materials are summarized in this paper. The theoretical and experimental works finished in our lab are emphasize. And the further research direction on this field is pointed out.

Key words: mechanism of interaction high - power laser materials

一、研究背景

激光与材料相互作用机理研究是激光应用研究的重要课题之一。随着激光应用的日益发展, 这一基础研究受到人们的重视^[1-5]。

激光与材料相互作用的结果之一就是材料产生的破坏。该相互作用过程既取决于激光光源因素, 又与被作用材料及外部环境有关。激光光源的因素主要有波长、能量、功率、脉宽、脉冲结构、重复率以及作用次数等, 其中的任一种因素都将对作用过程产生重要影响。而激光参数的多样化也给该研究增添了活力, 这些研究为合理地使用激光器提供了理论基础和实验依据, 从而进一步开拓了激光的应用范围。

当激光束尚未照射到靶材上时, 激光和靶材是两个相对独立的部分。一旦激光照射到靶材表面, 该表面就会吸收和反射激光, 这种吸收和反射主要取决于靶表面的光学性质。靶表面吸收激光能量, 使自身温度上升, 从而能够改变靶材表面的结构和性能, 甚至造成不可逆的破

Reference

- 1 Arakawa Y, Yariv A. IEEE J. Q E, 1985, QE-21:1666
- 2 Yariv A. Circuit and Devices, 1989, 5(6):25
- 3 Botez D, Channin D J, Ettenberg M. Opt Engng, 1982, 21(6):1066
- 4 Casey H. C, Panish M B. Heterostructure Semiconductor Lasers. New York: Academic Press, (1982)
- 5 Kaminow I P, Nahory, R E, Pollack M A *et al.* Electron Lett, 1979, 15:763

收稿日期: 1995-02-17

坏。这在激光加工,如切割、淬火、焊接、辐射以及材料表面处理等过程中,已得到广泛应用。靶面在高功率激光作用下吸收激光能量,温度迅速上升至汽化温度,从而出现汽化。汽化产生的蒸汽继续吸收激光,使其温度进一步升高,形成蒸汽等离子体^[1],这种等离子体的出现对靶与激光相互作用产生巨大的影响。这种影响主要表现在三个方面:一是蒸汽等离子体自身对激光有很强的吸收作用,能使后续的激光脉冲部分地甚至全部不能到达靶面,即在靶与激光束之间形成一个屏蔽激光能量的“墙”;二是蒸汽等离子体对靶材的作用^[4],主要是力学和热学作用(包括压力和冲量传递、靶材内部应力波等力学效应);三是相互作用过程中蒸汽等离子体的点燃和发展过程^[6](包括等离子体时间和空间行为)。另外,激光和靶材的相互作用还受到外部环境的影响,这包括靶面周围气体的性质(包括成分、压力、有无杂质等)对相互作用有着重大的影响。

激光与靶材相互作用的物理过程是十分复杂的,该复杂因素既有靶材的多样化的影响,又有激光参数的多样化和作用条件的多样化等的影响。况且激光和材料相互作用过程的研究还涉及许多学科领域,包括激光物理、传热学、等离子体物理学、非线性光学、热力学、气体动力学、流体力学、材料力学、固体物理学、固体材料的光学性质等方面。因此,要逐条逐项地对每种情况均用理论或实验描绘出来,无疑是一项巨大而复杂的研究课题,需要大量的财力、物力和人力。

二、研究进展

早在第一台红宝石激光器问世的第二年,人们就开始研究高功率激光在大气中产生的火花现象^[7],认为高强度的激光束将致使空气介质发生雪崩电离,即击穿,并从电子的增长等方面解释了光学击穿现象。同时,人们也开展了高功率激光与靶材的相互作用机理研究。并通过各种方法与手段观察和测量了激光熔融^[1]、汽化^[1]和激光等离子体现象^[9]。研究了等离子体的形成、激光支持的吸收波([Laser supported absorptive wave 简称 LSA]^[10]),它包括激光支持的燃烧波(Laser supported combustion 简称 LSC)^[10]、激光支持的爆轰波(Laser supported detonation 简称 LSD)^[11]、等离子体对激光的屏蔽效应^[12]、靶冲量的传递以及靶材内部应力波^[17]和靶的热耦合等方面的问题。中国工程物理研究院流体物理研究所孙承纬等人在高功率激光与靶材相互作用方面做了大量的实验研究和理论工作,得到了1064nm高功率激光与铝靶相互作用过程中熔融、汽化、吸收波等系列物理图象照片和大量有价值的实验数据。虽然国内外近三十年来科学工作者在高功率激光与靶材相互作用方面做了大量的研究工作,并且还在继续开展工作,但是有关高功率激光和靶材相互作用问题还远没有得到圆满的结果。其主要原因有:1. 研究对象本身的复杂性和多样化;2. 激光器件的迅速发展带来了许多新的研究内容,激光的新应用也带来新的理论问题。3. 对一些基本问题和观点、模型以及适应范围等仍没有得到能清楚地解释的理论模型和令人信服的验证方法与结果。

我们在高功率激光和材料相互作用领域亟待解决的高功率激光与靶材相互作用过程中等离子体产生的物理机理研究,高功率激光产生吸收波的点火机理和发展模型及其数值计算研究,高功率激光等离子体和吸收波的诊断和测量手段和方法研究,高功率激光对靶材的力学效应的理论模型、数值计算以及实验观测研究等方面进行了一些基础性理论分析和实验研究工作。

在高功率激光和靶材相互作用过程中等离子体点燃和时空发展行为、激光支持吸收波的点火和时空行为、激光对靶的力学效应等方面进行的理论分析和实验研究工作有:

1. 在激光等离子体点燃方面,主要研究了铝靶面蒸汽的电离过程。并从 Saha 方程出发,讨论了蒸汽等离子体电离度与等离子体状态参量之关系。根据靶表面蒸汽等离子体的性质,并考虑靶表面蒸汽的热辐射和表面反射效应,建立了靶蒸汽等离子体的一维发展模型,得到了一维激光能量传播方程的解析解,并提出了多层蒸汽等离子体激光传播方程的数值解法。根据能量守恒定律,提出了等离子体点燃时间的近似计算方法。并从等离子体形成机理和等离子体电子密度变化出发,总结出等离子体点燃时间的精确计算方法。

我们还研究了激光等离子体的屏蔽能量现象,激光等离子体屏蔽能量的屏蔽机制是逆韧致辐射效应。采用光学阴影同步照相方法,测量了调 Q Nd:YAG 激光作用于铝靶产生蒸汽等离子体的发展变化情况。采用光强延时对比法,测量等离子体的光学厚度。提出了利用等离子体闪光性质作为等离子体是否点燃的客观依据的判别方法。并设计了全面测量等离子体屏蔽效应时空分布和屏蔽指数的原理装置。

在激光等离子体参数测量方面,我们提出了应用激光同步干涉装置测量等离子体流体折射率的方法。依据等离子体形成机制、逆韧致吸收、Saha 方程、等离子体状态方程等,建立了一套等离子体参量(温度、密度、压力、电离度、电子密度等)的测量方法。并采用 Mach-Zehnder (M-Z)干涉仪在一台调 Q Nd:YAG 激光振荡放大激光器上同步诊断和测量了激光和铝靶等相互作用产生等离子体的早期过程^[16],得到了靶蒸汽等离子体各参量的实验结果。

2. 在激光产生吸收波方面,我们讨论了激光支持燃烧波(LSCW)的基本结构,运用流体动力学方程组,得到 LSC 波后压力和传播速度,并对 LSCW 的点火机制进行了深入的讨论。在讨论激光支持爆轰波结构的基础上,研究了 LSCW 到 LSDW 的转化过程,提出了 LSDW 的结构模型,由流体动力学方程组和等离子体状态方程等得到了 LSDW 速度、波后压力等物理参量公式,并提出了 LSDW 和 LSCW 之间的区别与联系以及判别方法。在 LSDW 的点火机理方面,我们提出了 LSDW 的等离子体击穿模型,推导出靶蒸汽等离子体的击穿阈值公式,全面分析和讨论了影响 LSDW 点火的几大主要因素。

采用光学干涉探测方法,对调 Q Nd:YAG 激光与铝靶等材料作用时 LSDW 的产生和发展进行了实验研究^[14,18],得到了反映靶蒸汽等离子体和 LSDW 时空行为的系列 M-Z 干涉图,并由系列干涉图条纹变化采集数据,计算得到 LSDW 传播速度、LSDW 波后压力等参量。采用光学干涉等诊断手段,对水中 LSAW^[20],水中铝靶表面 LSAW 以及空气介质中 LSAW^[15]等现象的动力学发展行为进行了实验研究。

3. 在激光对靶的力学效应方面,主要研究了激光与靶材相互作用过程中压力、冲量的传递机理,并运用 Tayler 波理论推导出 LSDW 波后压力和靶表面作用压力;依据 LSDW 性质,提出了激光靶面压力历史模型和衰减模型,并从理论上推导出激光作用下靶材表面面积有限与无限两种情况下靶材传递冲量的系列计算公式。我们对激光作用于靶材传递冲量过程进行了细致的实验观察,采用悬摆测量法获得各种情况下冲量大小与冲量耦合系数;并从冲量产生机理及影响因素对实验结果进行了详细的讨论^[13,19]。

我们还提出了 LSDW 的新的判断方法——冲量耦合系数判断方法。依据激光与靶材相互作用过程中,靶材冲量耦合系数随作用激光光强的变化关系中,有无迅速突变来客观判断 LSDW 是否产生。应用这一方法还可客观而又准确地测量 LSD 波的点火阈值。

三、前景展望

激光与材料相互作用是一非常复杂的过程。我们在高功率激光与靶材相互作用产生蒸汽

等离子体和吸收波等方面做了一些基础性的理论分析和实验论证的研究工作,虽然解决了一些问题,但尚有大量的研究工作需要探索、分析和解决。以下列出了一些存在问题和研究方向,其中也包含笔者将要开展的工作。

1. 对高功率激光和材料相互作用产生等离子体的流场和吸收波过程的三维模型进行理论计算和数值模拟工作。这包括:多温电子等离子体模型建立与数值计算, LSDW 时空分布的理论计算和数值模拟等。

2. 激光等离子体流场和激光支持吸收波的新的诊断技术研究。

3. 激光和靶材相互作用过程中等离子体屏蔽参量的时空分布研究。这包括等离子体屏蔽过程的理论探讨和实验技术、诊断方法的研究。

4. 相互作用过程中靶材内部的热力学性质的理论研究和实验诊断。这也包括靶材内部温度分布、热耦合系数,应力波产生和传播等。

5. 高功率激光与不同靶材相互作用机理及现象的研究。如半导体材料、有机材料、复合材料等。这方面研究内容相当丰富。

6. 高功率激光与靶材相互作用过程中,不同激光束的波长和脉宽均不同时的影响研究。

参 考 文 献

- 1 Ready J F. Effects of high power laser radiation. New York: Academic Press Inc, 1971
- 2 Allmen M V. Laserbeam interactions with materials: Physical Principles and Applications, New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1987
- 3 尚惠春, 吴俭保译. 激光加工物理学基础. 长春: 吉林科学技术出版社, 1987
- 4 倪晓武, 陆建, 李永年. 激光眼科手术作用机理与临床应用. 北京: 兵器工业出版社, 1993
- 5 陈时胜. 物理学报, 1987; 36(11): 1395
- 6 Weyl G, Pirri A N, Root R. AIAA J, 1981; 19(4): 460
- 7 Ramsden S A, Savic P. Nature (London), 1964; 203: 1217
- 8 沈元壤著. 非线性光学原理. 北京: 科学出版社, 1987; 213
- 9 David C, Avizonis P V, Weichel H *et al.* IEEE JQE, 1996; QE-2(9): 493
- 10 Stegman R L, Schriempf J T, Hettch L R. J A P, 1973; 44(8): 3675
- 11 Maher W E, Hall R B. J A P, 1975; 46(2): 761
- 12 刘常龄, 袁永华. 强激光与粒子束, 1990, 2(3): 230
- 13 陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光技术, 1994; 18(6): 361
- 14 Lu J, Ni X W, He A Z. Chinese Journal of Lasers, 1993; B2(4): 327
- 15 He A Z, Lu J, Ni X W. Chinese Phys Lett, 1993; 8(11): 574
- 16 Lu J, Ni X W, He A Z. SPIE Proc, 1991; 1553: 430
- 17 倪晓武, 陆建, 贺安之. 中国激光, 1992; A19(4): 305
- 18 Lu J, Ni X W, He A Z. SPIE Proc, 1993; 2004: 215
- 19 Lu J, Ni X W, He A Z. SPIE Proc, 1993; 2005: 142
- 20 陆建, 倪晓武, 贺安之. 中国激光, 1994; A21(2): 110



作者简介: 陆建(附照片), 男, 1965年8月出生。博士。现任室主任、副教授。主要从事激光与物质相互作用机理研究工作。

倪晓武, 男, 1955年7月出生。硕士, 教授。主要从事激光与物质相互作用机理研究工作。

收稿日期: 1995-04-10 收到修改稿日期: 1995-05-08