

高功率激光装置的

负载能力及其相关物理问题

• 郑万国 祖小涛 袁晓东 向霞 等著

科学出版社



高功率激光装置的负载能力 及其相关物理问题

郑万国 祖小涛 袁晓东 向 霞 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详尽地阐述了高功率激光装置负载能力的相关问题,讲解了绝缘材料激光损伤的物理基础、理论模型和最新进展,并从激光特性、光学元件特性以及运行环境三个方面讨论了影响激光装置负载能力的主要因素和物理问题,最后介绍和讨论了先进处理技术和二氧化碳激光修复技术在高功率激光装置负载能力领域的应用。

本书可作为高年级大学生、研究生和从事本专业及相关专业研究的科技工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高功率激光装置的负载能力及相关物理问题/郑万国等著. —北京:科学出版社, 2014.4

ISBN 978-7-03-040177-9

I. ①高… II. ①郑… III. ①激光器装置—研究 IV. ①TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 047413 号

责任编辑:杨 岭 黄 桥/责任校对:韩 杨

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年4月第一版 开本:889×1194 1/16

2014年4月第一次印刷 印张:19 彩插(8)

字数:600 000

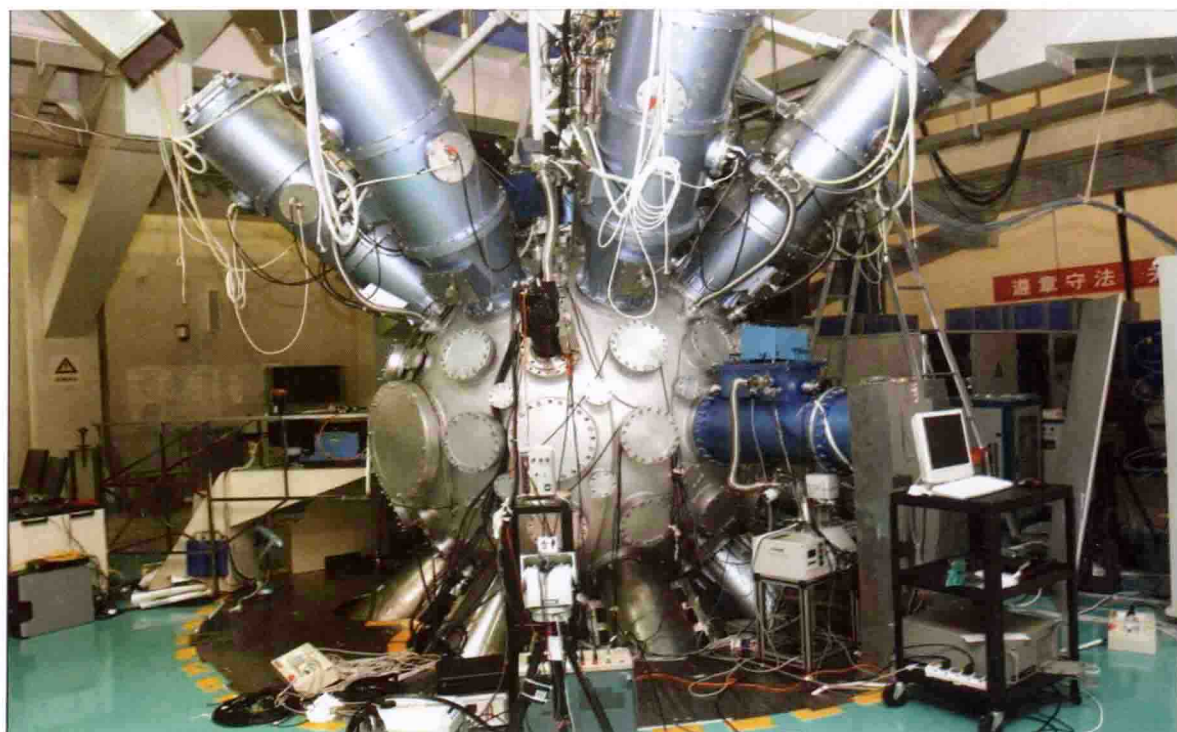
定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

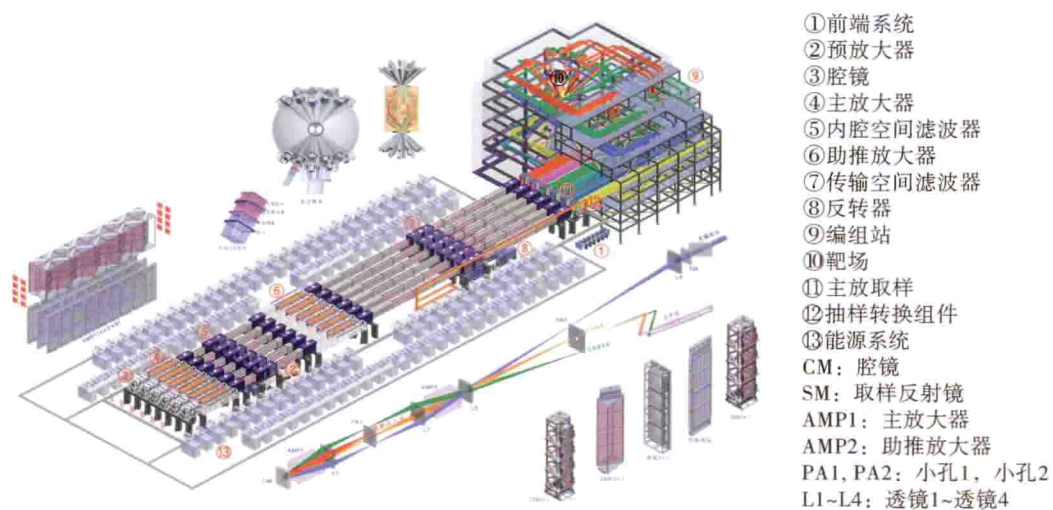




彩图 1 神光Ⅲ原型装置



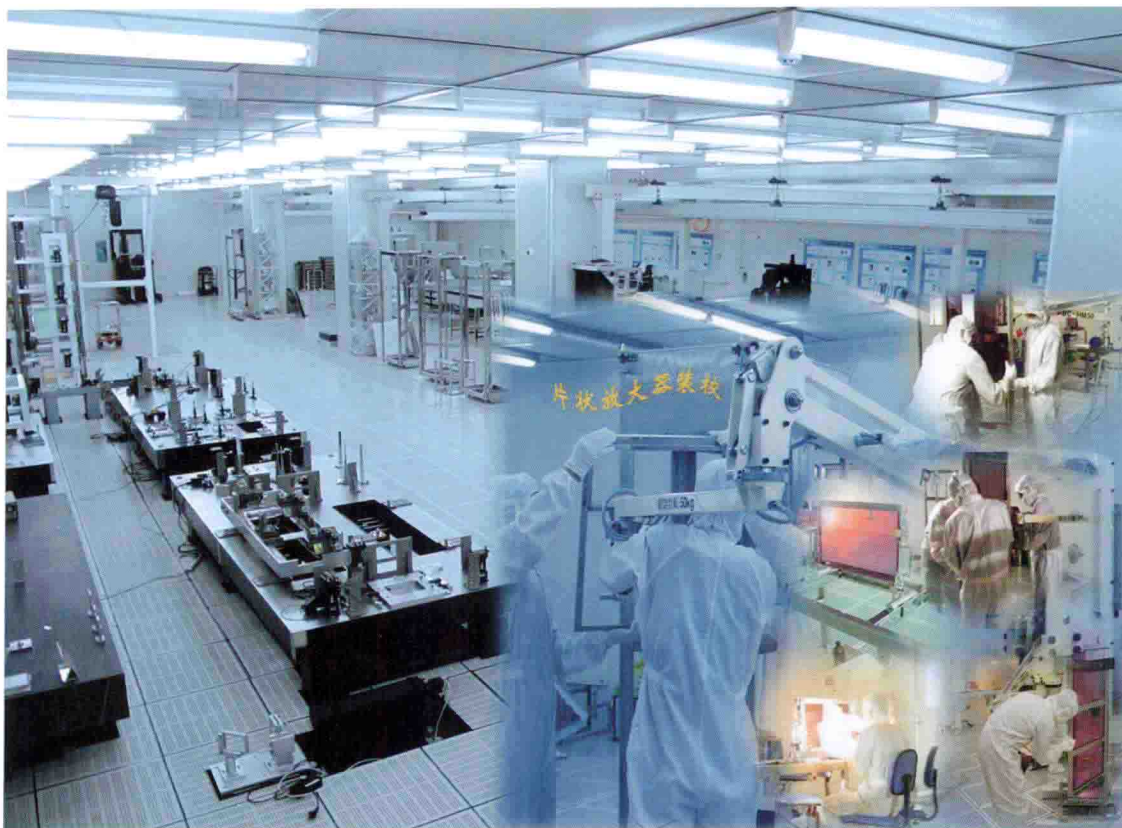
彩图 2 神光Ⅲ原型装置靶球



彩图 3 神光Ⅲ激光装置总体结构设计示意图



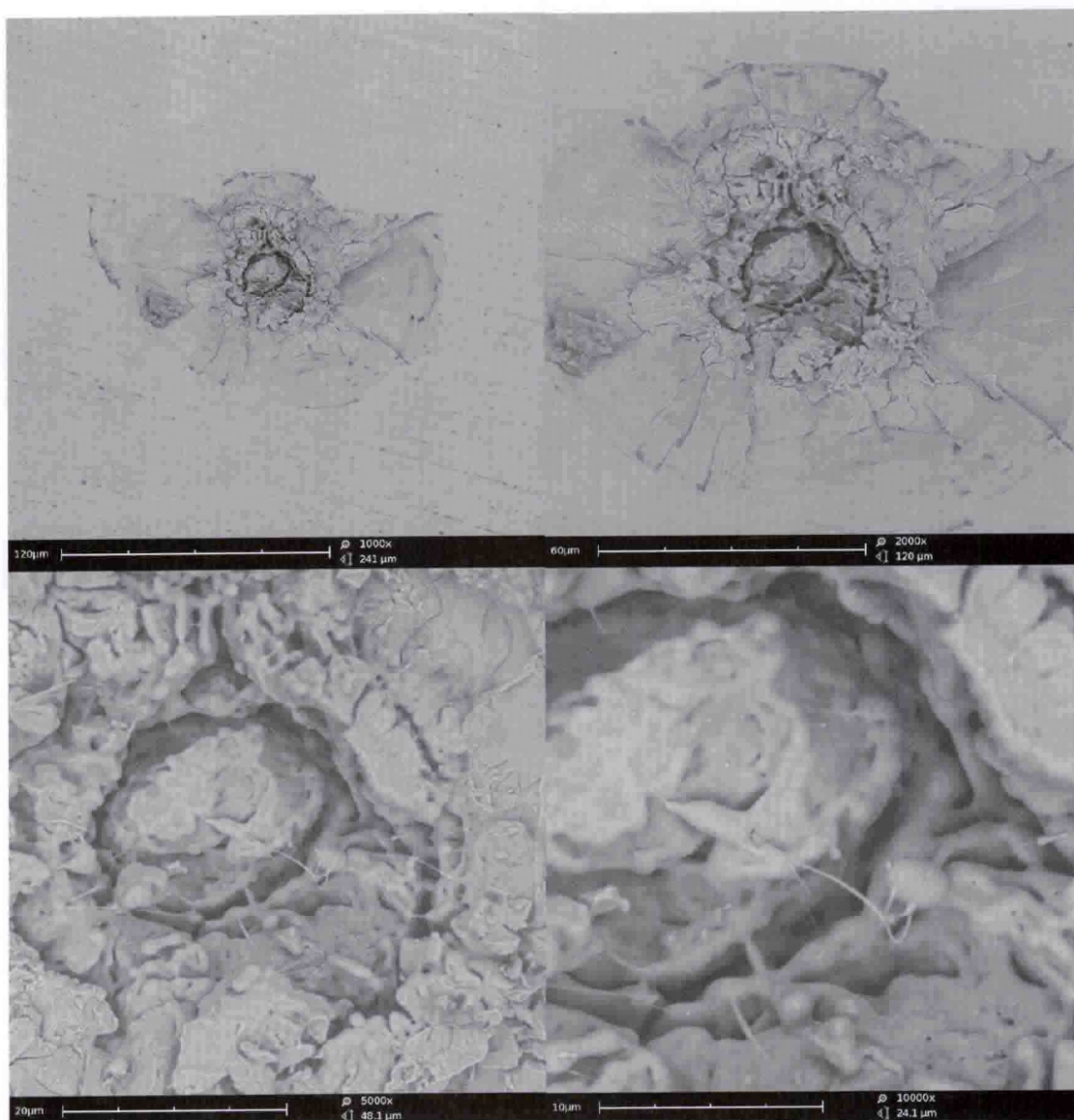
彩图 4 神光Ⅲ激光装置



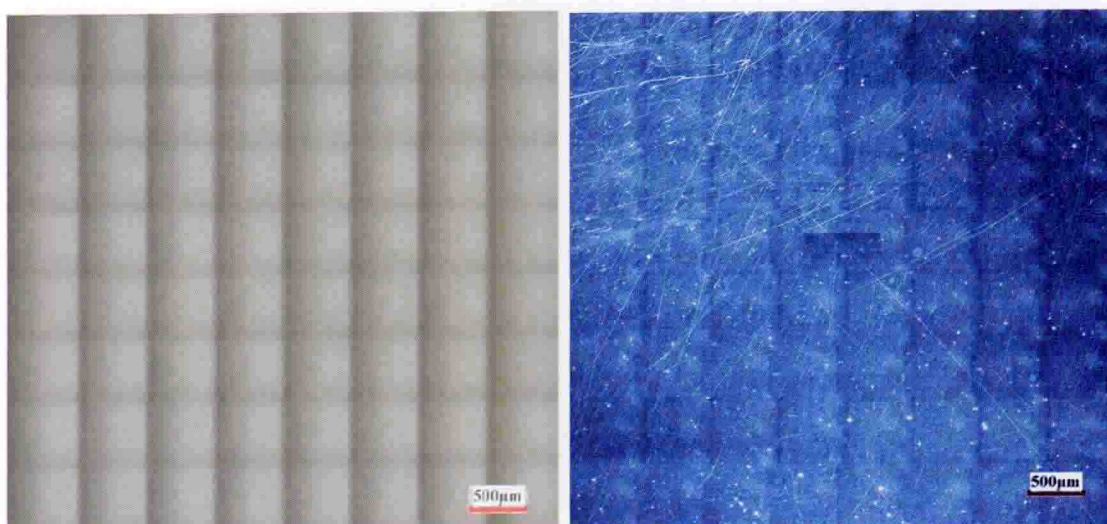
彩图 5 片状放大器精密装校



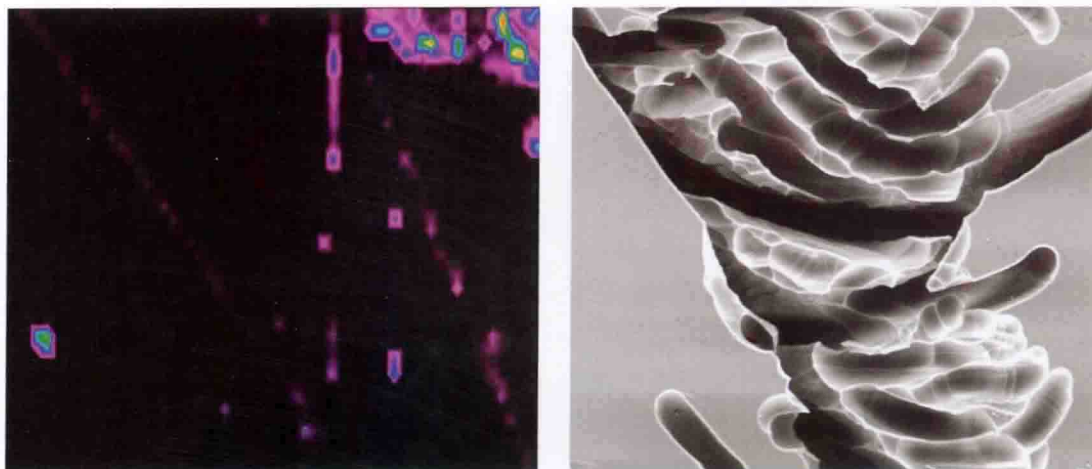
彩图 6 光学元件激光预处理及损伤修复平台



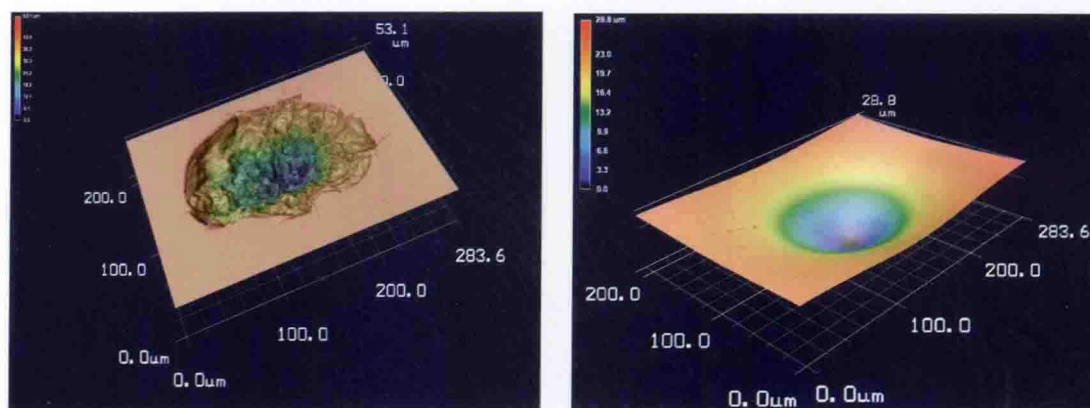
彩图 7 熔石英元件典型的三倍频激光损伤斑在不同放大倍数下的扫描电子显微图



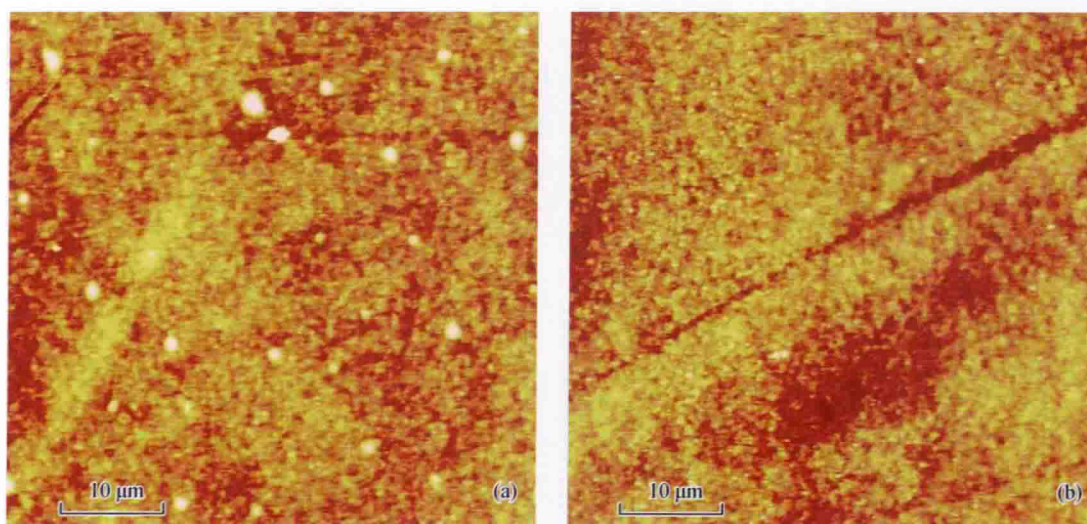
彩图 8 熔石英元件亚表面缺陷的的光学显微镜和共聚焦荧光对比图



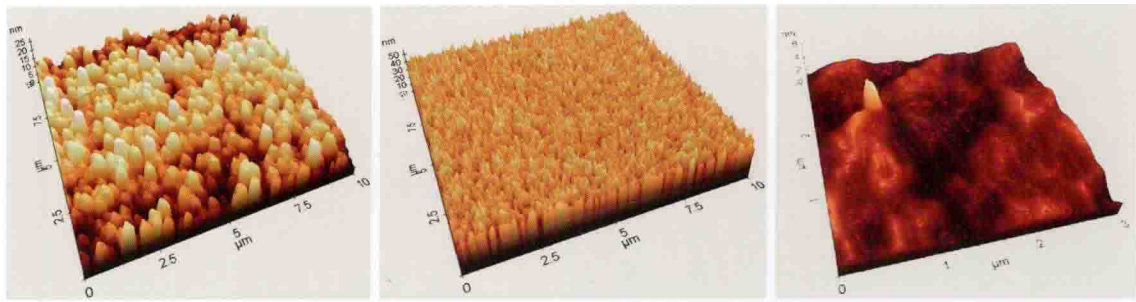
彩图 9 熔石英亚表面缺陷光热吸收分布图和划痕经 HF 酸刻蚀后的扫描电子显微图



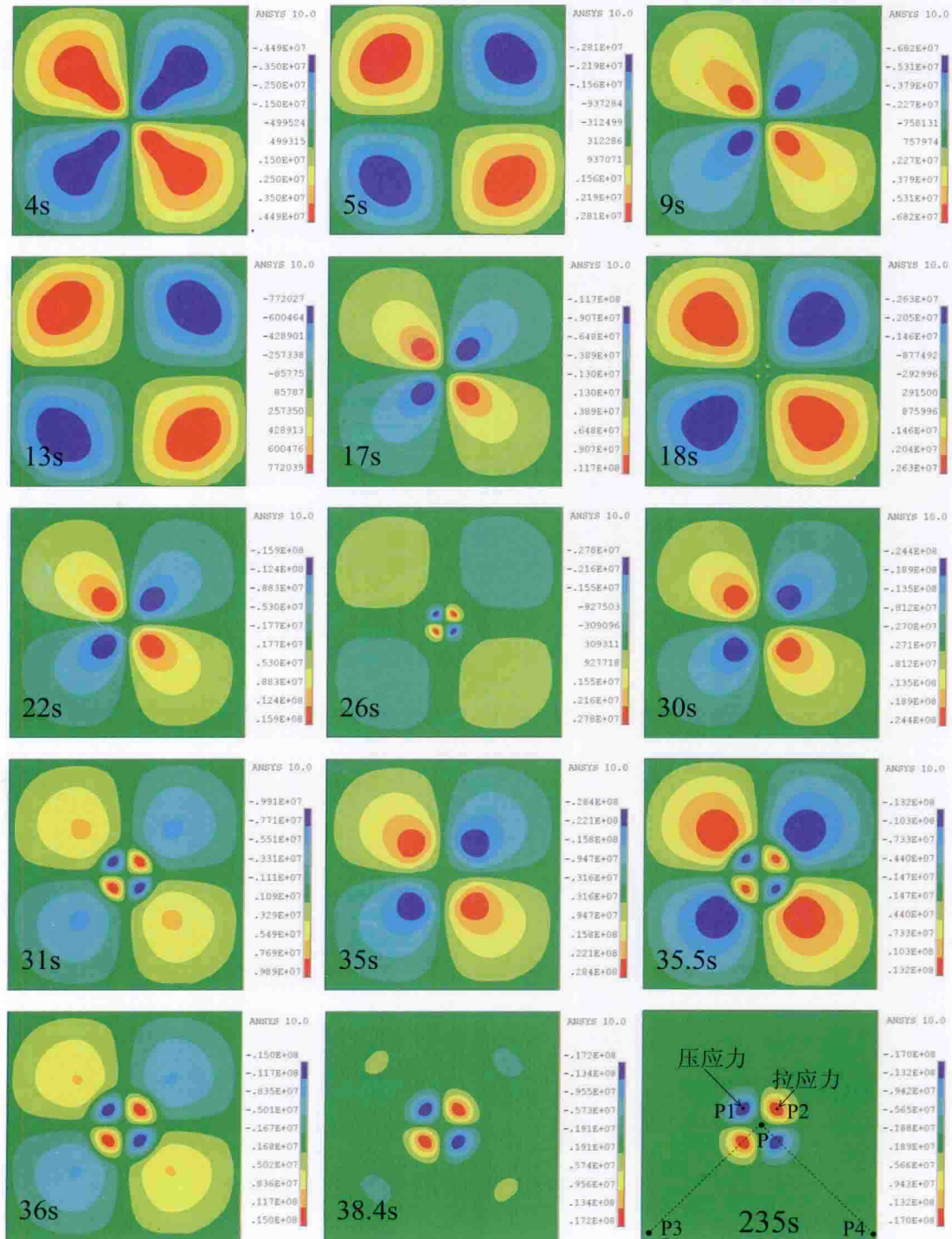
彩图 10 熔石英表面损伤坑采用 CO_2 激光修复前后的三维共聚焦显微形貌



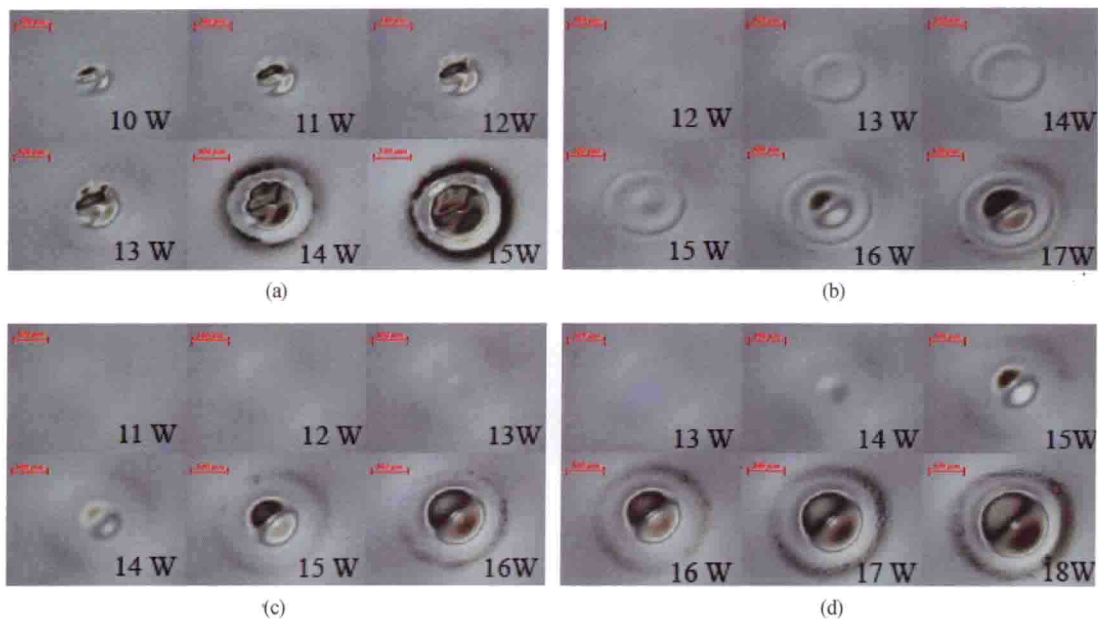
彩图 11 介质反射膜激光预处理前 (a) 后 (b) 原子力显微图



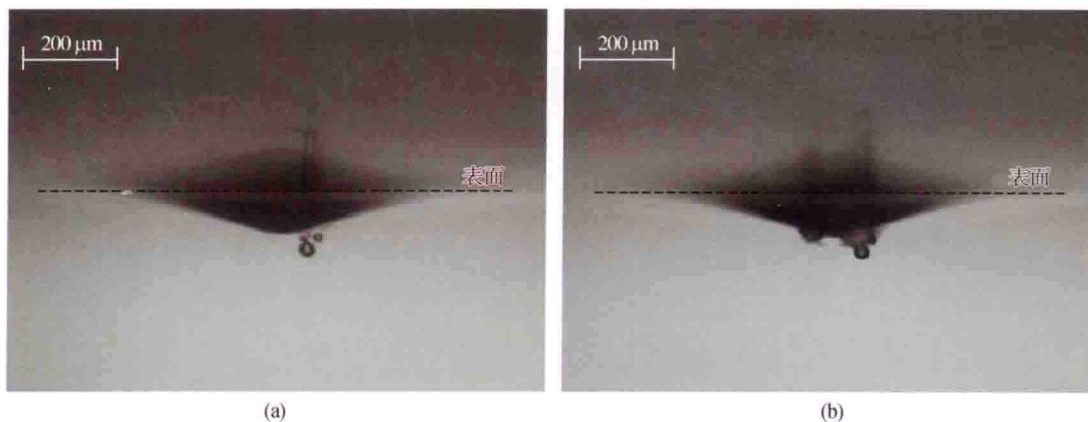
彩图 12 单层 SiO_2 化学膜、单层 ZrO_2 化学膜和 SiO_2 物理膜的原子力图像



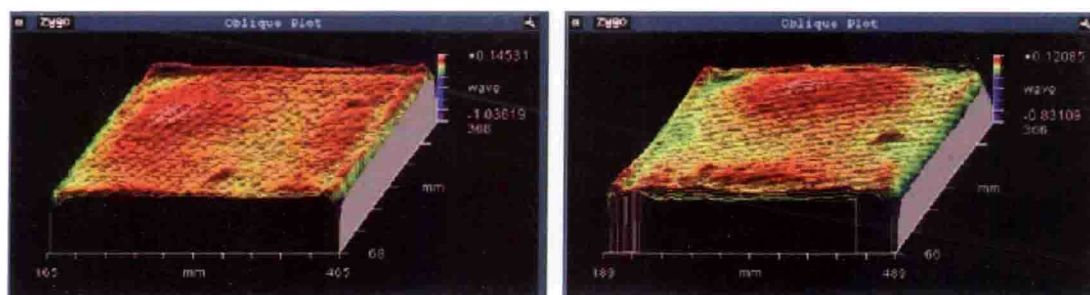
彩图 13 CO_2 激光修复熔石英表面损伤过程中不同时刻环向应力分布图



彩图 14 不同频率 CO_2 激光辐照区域形貌与功率的关系, (a) 0.1 kHz, (b) 1 kHz, (c) 10 kHz, (d) 15 kHz



彩图 15 含有气泡的修复点 (a) 及其再损伤形貌 (b) 的侧视显微图



(a) 元件修复前 (b) 损伤修复并经退火处理

彩图 16 大口径熔石英光学元件处理前后的透射波前图

Quantum Theory for Cold Avalanche Ionization in Solids

H. X. Deng,^{1,2} X. T. Zu,^{1,*} X. Xiang,¹ and K. Sun^{2,†}¹Department of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China²Department of Materials Sciences and Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA

(Received 20 April 2010; published 9 September 2010)

A theory of photon-assisted impact ionization in solids is presented. Our theory makes a quantum description of the new impact ionization—cold avalanche ionization recently reported by P. P. Rajeev, M. Gertssov, P. B. Corkum, and D. M. Rayner [Phys. Rev. Lett. **102**, 083001 (2009)]. The present theory agrees with the experiments and can be reduced to the traditional impact ionization expression in the absence of a laser.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.113603

PACS numbers: 42.50.Ct, 61.80.Ba, 79.20.Ds

An intense laser has been widely used in many fields, including laser-induced inertial confinement fusion, laser-driven accelerators, materials photon-emission property measurement, and laser micromachining [1–4]. However, laser-induced damage (LID) in solid materials is still a limiting factor of its application. For decades, LID has been extensively studied by numerous theoretical and experimental methods [5–8]. It is well known that the generation of conduction band electrons (CBEs) in solids is an important process for LID [7]. Under laser radiation, there are two ways to generate the CBEs in solids. One is by the valence band-conduction band multiphoton process, and the other is by impact ionization [6,7].

Traditional impact ionization (also known as collision ionization) holds that if the kinetic energy of a CBE is larger than the impact ionization threshold, the CBE can knock a valence band electron out of its band and promote it to the conduction band. For traditional impact ionization, impact ionization can happen only if the kinetic energy of the CBE is larger than the threshold of the solid [9] and the avalanche coefficient of impact ionization is a constant with respect to laser intensity [6]. However, recent detailed experiments show that the avalanche coefficient changes with laser intensity, indicating that a new impact ionization mechanism exists in the presence of an intense laser. In Ref. [10], the authors assume that photon absorption plays an important role in the impact ionization and the cold avalanche ionization (a CBE can knock out a new CBE even if the kinetic energy of that CBE is less than the threshold) exists. In this work, we present a quantum approach to describe this new impact ionization mechanism. As described below, the theory directly shows the existence of cold avalanche ionization and naturally reconstructs the experimental results.

In the presence of an external laser, the interaction Hamiltonian for impact ionization can be written as

$$H_{\text{int}} = H_{\text{el}} + H_{\text{ii}}, \quad (1)$$

where H_{el} and H_{ii} are, respectively, the Hamiltonian of electron-laser interaction and the Hamiltonian of traditional band-band impact ionization [9]. For the intense

laser, it is necessary to treat the interaction between the laser and electron as a nonperturbative. The Volkov wave is usually employed to describe the wave function of a free electron in an electromagnetic field [11–13] [in this work, the strong laser field is described as $\vec{A} = \vec{A}_0 \cos(\omega t)$ such as in the Keldysh's photon ionization theory [13], which is now widely employed to study the LID in intense laser [6]]. In solids, the Bloch wave function of an electron, accelerated by the field inside each of the bands, can be written as the analogous forms of the Volkov wave:

$$\begin{aligned} \psi_C(\vec{r}) &= \phi_C(r) \exp \left\{ -\frac{i}{\hbar} \left[E_g t + \frac{p^2}{2m_c^*} t + \frac{e\vec{A}_0 \cdot \vec{p} \sin(\omega t)}{\omega m_c^*} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{e^2 A_0^2}{8m_c^* \omega} \sin(2\omega t) + \frac{e^2 A_0^2 t}{4m_c^*} \right] + \frac{i}{\hbar} \vec{p} \cdot \vec{r} \right\}, \\ \psi_V(\vec{r}) &= \phi_V(r) \exp \left\{ -\frac{i}{\hbar} \left[\frac{p^2}{2m_v^*} t + \frac{e\vec{A}_0 \cdot \vec{p} \sin(\omega t)}{\omega m_v^*} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{e^2 A_0^2}{8m_v^* \omega} \sin(2\omega t) + \frac{e^2 A_0^2 t}{4m_v^*} \right] + \frac{i}{\hbar} \vec{p} \cdot \vec{r} \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

where ψ_C and ψ_V are wave functions of the conduction band and valence band, respectively, $\vec{p}$ and $\vec{A}_0$ the quasi-momentum and the laser vector potential, respectively, m_c^* and $m_v^* (< 0)$ the effective mass of the electron in the conduction band and valence band, respectively, $\phi_C(r)$ and $\phi_V(r)$ the functions that have the translational symmetry of the lattice, E_g the band gap of the solid, and $\frac{p^2}{2m^*} = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m^*}$ the kinetic energy of the electron (for simplicity, we consider only the simple spherical and parabolic band structure in this work). As discussed above, before the impact ionization, one electron is in the conduction band and another is in the valence band. After the impact ionization, the two electrons are both in the conduction band. So we take the initial state as $|i\rangle = \psi_C(\vec{r}_1, \vec{p}_1) \psi_V(\vec{r}_2, \vec{p}_2)$ and the final state as $|f\rangle = \psi_C(\vec{r}_1, \vec{p}_1) \psi_C(\vec{r}_2, \vec{p}_2)$.

We now calculate the probability from the initial state to the final state. The difference between this procedure and the usual perturbation theory lies only in the fact that we calculate the probability of transition not to a stationary

序 一

该书所称的“负载能力”意指激光系统（装置）对光致损伤的容忍程度或承受程度，直接关系到高功率激光装置所能承载和输出的激光功率和能量水准。

早在激光发明初期的 20 世纪 60 年代，就发现了激光导致光学材料损伤（laser-induced damage）的现象，受到国际学术界的广泛关注，并发起了专题国际会议来研讨。与会学者当初预计通过数年和数届会议就可基本弄清和解决问题。然而，由于激光损伤的物理过程极为复杂，涉及众多学科和工程技术；同时，作为损伤诱因的激光功率和能量，半个多世纪以来成数量级地不断攀升，激光损伤的研究不仅没有终结，而且一直与时俱进地持续发展，研究的深度与广度不断扩展。“光致损伤”已形成了激光科技的一个重要分支学科领域。光致损伤问题还是制约激光系统提升输出能力的瓶颈，成为发展高功率激光装置必需面对且极具挑战性的研究课题。美国国家点火装置（NIF）和我国神光系列装置即是其中的典型例证，均有力地促进了近代光致损伤研究的深化和发展。

该书作者们长期从事高功率激光系统发展研究，在光致损伤方面历经十多年的攻关研究，取得丰硕成果，具有深厚的理论积淀、丰富的实践经验和详实的一手数据。在此基础上，编写了这本书，以期系统总结和全面反映这一领域国内外最新研究成果。

该书以“负载能力”为题，标示了以此作为研究损伤问题的出发点和目标。阐述了高功率激光装置中光致损伤从初始发生到快速增长的动态演化规律；揭示了光致损伤的物理机制和理论基础；并从光学元件特性、激光束传输特性以及运行环境等三方面完整详尽地讨论了它们对光损伤发生和发展的影响。此外，还列举了有助于改善、修复光致损伤的技术手段及方法。

期望该书对从事高功率激光系统研究发展的科研教学人员，能够提供有实用价值的参考；对年轻学子，则是一本开卷有益的教科书。

中国工程院院士

花滇元

序 二

激光惯性约束聚变的科学可行性不断驱动各国在聚变能源实现和应用研究领域的竞争，而在将这一科学可行性变为现实的努力中，各种各样的科学和工程难题呈现出来，其中聚变驱动器是该项科学研究中最宏伟、最复杂，也是最艰巨的任务。其难点在于，要实现高功率，高光束质量，高精度和高通量稳定、可靠运行，就要求控制激光装置中光学元件的破坏问题。

国际上激光聚变研究的进展和我国相关领域的发展，促进和加深了对聚变驱动器元件损伤问题的研究，从现在取得的成就和依然存在的问题看，装置负载能力仍然是该领域促使科研人员持续奋斗的标志性课题。对于影响装置负载能力的一系列科学技术问题，美国利弗莫尔国家实验室 LLNL 进行了包括基础研究、应用工艺技术研究等“功课”达三十多年，并且现在仍然在进行相关工作，以解决工程中所出现的“问题”和预测未来可能出现的问题，因此，我们想在解决负载能力问题上一蹴而就是不现实的，建设高负载能力装置必须总结国内外近几十年的工作成果和经验，最终在战略层面上达到两个目的：一是发现了解装置负载能力中提出的课题，并能提供解决方案；二是形成完善的研究体系，为装置的进一步发展甚至聚变能源相关研究提供持续的技术支持。

近年来，国内外学者在激光辐照材料损伤方面进行了很多研究，出版了一些专著。但像该书这样从高功率固体激光装置的实际出发，系统阐述光学元件损伤机理，影响装置负载的几大因素，以及元件损伤抑制工艺的专著还是第一部。该书集结了国内从事高功率聚变驱动器光学元件损伤行为研究团队近二十年的研究结果，并吸纳了国内外同行的一些优秀工作，采用负载能力来描述装置由于元件损伤所导致的可靠性问题，并且综合了元件（材料）、加工工艺以及应用环境等多方面因素，提炼其中的科学技术问题。全书从负载能力及相关参数的概念和定义、表征方法、不同类型元件或材料的损伤行为、损伤机制、环境和光束质量的影响规律等方面入手，从一个系统、全面的角度来诠释激光损伤问题。

该书作者有我国聚变驱动器领域设计专家，也有在一线长期从事光学元件材料激光损伤研究的科技工作者，书中呈现了他们长期的工作积累和创造性成果，相信该书的出版将会推动聚变驱动装置的优化设计、高功率光学材料及元件工艺的进步，甚至也能为跨代新型材料和工艺技术的出现起到重要的作用。

中国科学院院士

张维浩

前 言

高功率激光装置输出能力设计的主要受限条件是功率受限（非线性问题导致破坏，一般以 B 积分表征）、储能受限和负载能力受限；对激光装置的运行与维护，最关键的挑战或许是尽可能地减少及消除激光导致的光学元器件损伤，并尽可能地提升激光装置的负载能力，这是制约目前高功率激光装置发展的瓶颈之一。世界上最具代表性的高功率激光装置，如美国国家点火装置、法国兆焦耳激光装置以及中国神光系列激光装置也已证明了这一担忧。而且，这将是一个持续的挑战，因为当一种新的抗激光损伤材料和加工技术被研发出来时，激光器的设计者们就会将系统的工作能量和功率增加到这些新材料的极限，这是由经济和技术方面的因素所驱使的。为了应对这一挑战，适应我国高功率激光装置的发展形势，我们在长期从事高功率激光装置负载能力科学研究、技术开发和工程应用的基础上，撰写了本书。

本书详尽地阐述了高功率激光装置负载能力的相关问题，讲解了绝缘材料激光损伤的物理基础、理论模型和最新进展，并从激光特性、光学元件特性以及运行环境三个方面讨论了影响激光装置负载能力的主要因素和物理问题，最后介绍和讨论了先进处理技术和二氧化碳激光修复技术在高功率激光装置负载能力领域的应用。全书共分为 8 章：第 1 章介绍了高功率激光装置及负载能力研究的发展概况和现状；第 2 章讨论了负载能力的内涵、定义和表征，并阐述了负载能力与激光损伤特性相关参数之间的联系与区别；第 3 章是本书的理论基础，详细地讨论了绝缘材料激光损伤的微观机制和物理模型；第 4~第 6 章分别讨论了影响高功率激光装置负载能力的三大方面，即激光特性、光学元件特性和激光装置运行环境，讲解了它们对负载能力的影响规律和机制；第 7 章介绍了光学元件先进处理技术，如磁流变抛光技术、化学刻蚀技术等在高功率激光装置负载能力领域的应用；第 8 章详细讨论了二氧化碳激光修复熔石英表面损伤的基本原理、物理问题和技术特点。

本书由郑万国主编，第 1 章由郑万国、韩伟撰写，第 2 章由郑万国、蒋晓东撰写，第 3 章由邓洪祥、祖小涛撰写，第 4 章由袁晓东、韩伟撰写，第 5 章由祖小涛、蒋晓东、李莉、徐世珍、吕海兵、郭袁俊撰写，第 6 章由袁晓东、吕海兵、李志杰撰写，第 7 章由郑万国、向霞、廖威撰写，第 8 章由向霞、刘春明、蒋勇、于景侠撰写。全书由郑万国、祖小涛统稿，袁晓东、向霞校核。中国工程物理研究院激光聚变研究中心的严鸿维、苗心向、倪卫等，电子科技大学的雷雨等对本书的编著做出贡献，在此表示感谢！

本书的读者对象是高年级的大学生、研究生和从事高功率激光装置及负载能力研究或者有兴趣了解此领域研究的科技工作者。希望读者在阅读本书之后，对此领域有一个既全面又有一定深度的了解。特别是对于刚参加此领域工作的读者，如果在阅读过本书后感到能尽快进入角色，对自己从事的研究工作有所裨益，作者将感到由衷的欣慰。由于高功率激光装置负载能力涉及面广，发展快，作者水平有限，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者借此机会真诚感谢中国科学院胡仁宇院士、张维岩院士和中国工程院范滇元院士一直以来对本工作的关心与支持，并在百忙中为本书作序！感谢张小民研究员长期的关注与指导！作者还要感谢科学出版社的成员，他们的支持和辛勤工作使本书顺利出版。

郑万国

2013 年 11 月 5 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 高功率固体激光装置发展概况及应用	1
1.1.1 概况	1
1.1.2 高能量长脉冲激光装置	2
1.1.3 高功率短脉冲激光装置	5
1.1.4 高功率固体激光装置的应用	6
1.1.5 未来高功率激光驱动器的发展趋势	13
1.2 激光器负载能力相关问题概述	13
1.2.1 高功率固体激光装置简述	13
1.2.2 高功率激光装置中的光学元件	15
1.2.3 高功率激光装置中的激光损伤问题	16
1.3 高功率激光装置负载能力研究现状	24
1.3.1 总述	24
1.3.2 国外高功率激光装置负载能力进展	26
1.3.3 NIF 激光装置负载能力现状	29
1.4 本章小结	32
参考文献	32
第 2 章 负载能力定义和表征及损伤物理问题	37
2.1 高功率激光装置负载能力的定义与表征	37
2.1.1 负载能力的内涵	37
2.1.2 与负载能力有关的参数	38
2.2 损伤相关物理问题	40
2.3 激光损伤宏观特性的物理解释	43
2.3.1 光学元件的损伤引发及损伤阈值	43
2.3.2 激光损伤测试中的口径效应	48
2.3.3 损伤的增长问题	50
2.4 光学元件损伤特性参数获得与表征流程	61
2.5 本章小结	63
参考文献	64
第 3 章 绝缘材料强激光损伤的物理机制	65
3.1 固体电子与强激光相互作用的微观理论	65
3.1.1 带内散射	65
3.1.2 带间跃迁	75
3.2 绝缘材料损伤的物理模型	81
3.2.1 短脉冲激光损伤的物理模型	81
3.2.2 长脉冲激光损伤的物理模型	83
3.3 本章小结	86
参考文献	87
第 4 章 激光特性对装置负载能力的影响	88
4.1 概述	88

4.2	光束质量对装置负载能力的影响	88
4.2.1	光束填充因子与近场调制度	89
4.2.2	空间滤波与像传递	89
4.2.3	增益均匀性	90
4.2.4	近场空间整形	92
4.2.5	远场空间整形	99
4.3	激光参数对负载能力影响问题	101
4.3.1	激光波长的影响	101
4.3.2	激光脉冲形状和脉宽的影响	103
4.3.3	多脉冲激光影响	104
4.3.4	光斑面积影响	104
4.4	装置设计通量问题	105
4.4.1	装置输出能量与能流分布	105
4.4.2	B 积分控制	106
4.5	非线性损伤问题	106
4.5.1	自聚焦效应	107
4.5.2	长程传输的受激转动拉曼散射	108
4.5.3	晶体中的横向受激拉曼散射	114
4.5.4	熔石英元件中的横向受激布里渊散射	117
4.6	杂散光控制问题	120
4.6.1	鬼光束控制	120
4.6.2	散射光控制	121
4.7	本章小结	123
	参考文献	124
第 5 章	光学元件特性对装置负载能力的影响	126
5.1	光学元件缺陷诱导光场调制理论	126
5.1.1	三维时域有限差分方法介绍	126
5.1.2	体缺陷对激光场的调制的物理模型	134
5.1.3	表面缺陷对光场调制的物理模型	137
5.2	熔石英元件激光损伤特性	148
5.2.1	熔石英材料基本性质	148
5.2.2	熔石英的本征损伤	149
5.2.3	表面污染诱导损伤	151
5.2.4	加工缺陷诱导损伤	152
5.2.5	初始损伤与损伤增长规律	158
5.3	光学薄膜的激光损伤特性	161
5.3.1	光学薄膜的光学性质	162
5.3.2	光学薄膜激光损伤的因素	163
5.3.3	光学薄膜的激光损伤	164
5.4	倍频晶体的激光损伤特性	169
5.4.1	倍频晶体材料基本性质	169
5.4.2	倍频晶体激光损伤的基本特征	170
5.4.3	激光参数对晶体损伤特性的影响	170
5.4.4	KDP 晶体损伤的原因	175
5.4.5	KDP 晶体损伤阈值提升方法	176

5.5 钕玻璃的激光损伤特性	178
5.5.1 掺钕磷酸盐激光玻璃的应用及生产工艺	178
5.5.2 钕玻璃元件的激光损伤特性	180
5.6 元件应力对负载能力的影响规律	181
5.6.1 应力类型及检测技术	181
5.6.2 应力与负载能力的关系	182
5.6.3 应力控制技术	184
5.7 本章小结	185
参考文献	186
第6章 激光装置运行环境对负载能力的影响	190
6.1 概述	190
6.1.1 洁净度定义	190
6.1.2 高功率固体激光装置洁净度要求	192
6.2 颗粒污染对光学元件性能的影响	192
6.2.1 颗粒污染物的分类与分布	192
6.2.2 颗粒污染物对光学元件损伤的影响	195
6.3 分子态污染物对光学膜层性能的影响	199
6.3.1 分子态污染物的影响分析	199
6.3.2 分子态污染物对溶胶凝胶膜透射性能的影响	200
6.4 真空环境气氛与负载能力的关系	202
6.4.1 真空环境对负载能力的影响原因分析	202
6.4.2 不同真空度和环境气氛下石英元件的损伤性能	203
6.4.3 不同真空度和环境气氛下光学薄膜的损伤阈值	206
6.5 不同环境温度下熔石英的损伤特性	207
6.6 强辐射环境对装置负载能力的影响	209
6.7 本章小结	210
参考文献	211
第7章 先进处理技术对负载能力的影响	213
7.1 概述	213
7.2 传统加工技术简介	213
7.3 磁流变抛光技术	214
7.3.1 磁流变抛光技术简介	214
7.3.2 磁流变液	215
7.3.3 磁流变抛光技术的应用	215
7.3.4 磁流变抛光设备	216
7.4 化学刻蚀技术	216
7.5 离子束处理技术	218
7.5.1 离子束抛光	218
7.5.2 等离子体刻蚀	221
7.6 激光预处理技术	222
7.7 飞秒激光处理技术	224
7.8 微机械修复技术	225
7.9 本章小结	227
参考文献	228