

文章编号: 2095-4980(2020)06-0957-05

## 基于等离子体镜的太赫兹单脉冲选择方法

赵苏宇, 吴 岱\*

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 研究了一种用于中国工程物理研究院太赫兹自由电子激光装置(CTFEL)输出的太赫兹的单脉冲选择方法, 以满足一些对太赫兹脉冲的时间分辨率和峰值强度提出较高要求同时要保证较低平均功率的实验的需要。利用自诱导等离子体开关技术, 太赫兹能够被短脉冲激光打靶产生的等离子体镜反射, 从而使等离子体镜可以作为门控开关, 选出单个太赫兹微脉冲。通过理论分析计算出等离子体临界密度和激光功率密度阈值, 采用辐射流体模拟软件对激光打靶过程进行数值模拟。模拟结果表明, 激光激发出的等离子体密度远大于临界密度。由此证明了实验的可行性, 进而给出实验所需装置参数指标以及实验光路设计。

**关键词:** 太赫兹; 自由电子激光; 等离子体镜; 太赫兹开关; 单脉冲选择

**中图分类号:** TN248.6

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019359

## Theoretical analysis and experimental design of terahertz single-pulse picking based on plasma mirror

ZHAO Suyu, WU Dai\*

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** China Academy of Engineering Physics Terahertz Free Electron Laser(CTFEL) needs a terahertz switch for picking of single-pulse, which can facilitate the experiments that require high peak power but low average power. With the self-induced plasma switching technology, single pulses can be reflected by a plasma mirror on a slab that is generated by short pulse laser. The critical density of the plasma and the threshold of the laser power density are calculated and the numerical simulation of the laser targeting process is carried out by using the radiation fluid simulation software. The simulation results show that the plasma density generated by the laser is much larger than the critical density, which proves the feasibility of the experiment. In addition, the parameters of the experimental equipment and the experimental optical path design are given.

**Keywords:** terahertz; Free Electron Laser(FEL); plasma mirror; terahertz switch; single-pulse picking

自由电子激光器(FEL)可产生波长从远紫外到微波范围内的强相干光源, 其中太赫兹(THz)范围的 FEL 在分子光谱学领域吸引了众多科研人员, 这是由于许多分子的振动和转动能级处于太赫兹频段<sup>[1]</sup>。中国工程物理研究院的太赫兹自由电子激光装置是国内首台工作在高重复频率、高占空比状态下的太赫兹谐振腔型自由电子激光器。该装置可输出宏脉冲平均功率约为 20 W, 频率在 1.87~3.3 THz 范围内连续可调的太赫兹光。宏脉冲工作模式下, 每个宏脉冲中包含间隔为 18.5 ns 的连续微脉冲<sup>[2]</sup>。目前, 在 FEL 装置上开展的众多实验中, 有一些实验会对时间分辨率和峰值强度提出较高要求。如, 生物分子<sup>[3]</sup>或超导材料<sup>[4]</sup>的诱导相变实验要求较高的脉冲能量, 但同时需要尽可能地避免高平均功率引起的热效应对实验造成的影响。对于涉及长寿命光激发态样品的实验, 往往需要考虑这些光激发态在 FEL 脉冲周期的时间尺度上不能恢复平衡的问题。

近年来国内外已经有许多关于太赫兹开关技术的研究报道<sup>[5-12]</sup>, 但这些太赫兹开关的工作频率普遍不适用于

收稿日期: 2019-09-23; 修回日期: 2019-11-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11575264)和青年项目(11605190;11805192); 中国工程物理研究院创新基金项目(CX2019036;CX2019037)

作者简介: 赵苏宇(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹技术及应用。email:zhaosuyu17@gscaep.ac.cn

\*通信作者: 吴 岱 email:wudai04@163.com

中国工程物理研究院太赫兹自由电子激光装置(CTFEL)。本文通过分析激光打靶产生等离子体以及激光在等离子体中传播的物理过程,并结合辐射流体软件 MULTI 进行数值模拟,从理论上论证,使用等离子体镜作为 CTFEL 输出的太赫兹宏脉冲的时间门控开关进而把单个微脉冲切选出来,CTFEL 适用于那些对时间分辨率和峰值强度提出较高要求的实验,并在此基础上给出该单脉冲选择系统的实验设计方案。

### 1 理论分析

#### 1.1 等离子体镜太赫兹开关的原理

选取激光打靶的基片材料,如锗、铝和熔融石英等。考虑到需要尽量减少太赫兹在靶面未产生等离子体镜时的反射,令 CTFEL 输出的太赫兹为 p 偏振光,并且照射靶面的入射角为布儒斯特角,使绝大部分太赫兹透射穿过靶体。在另一个方向上,使用一台和 CTFEL 同步的激光器照射靶面并在靶面上形成等离子体镜,此时太赫兹到达靶面前要先经过等离子体镜。如果激光在靶面上激发出的等离子体的电子密度达到入射太赫兹在等离子体中相应的临界密度时,太赫兹会被等离子体镜反射。此外,产生的等离子体镜可以在太赫兹微脉冲的时间间隔内迅速衰减,保证选出一个单脉冲后下个微脉冲可以透射穿过靶体,即等离子体镜对太赫兹起到门控开关的作用,可以从宏脉冲模式或连续脉冲模式运行的太赫兹中切选出单个的太赫兹微脉冲。CTFEL 脉冲结构示意图见图 1。

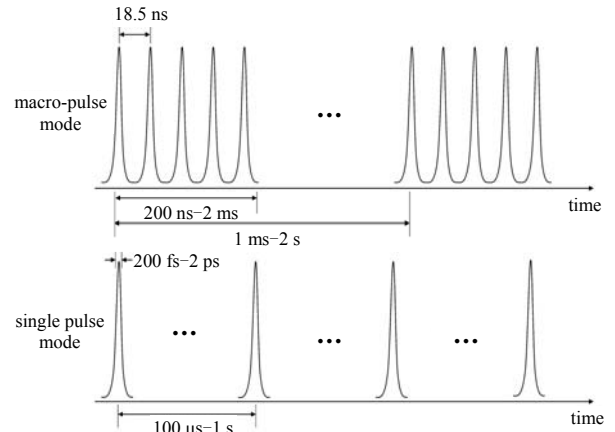


Fig.1 Temporal structure of CTFEL  
图 1 CTFEL 脉冲结构示意图

#### 1.2 激光等离子体的产生机制

激光照射下,靶面介质转变为等离子体的主要机制分为光电离、热电离和碰撞电离<sup>[13]</sup>。在温度较低的初始载流子萌生阶段,电子凭借多光子效应吸收能量发生电离,此时光电离机制占主导。当靶蒸汽温度不断升高,原子热运动加剧,部分激发态电子能量超过电离势,此时热电离机制占主导。当靶蒸汽充分电离,临界面上沉积的能量主要由电子热传导向稠密介质区传播,此时碰撞电离机制占主导。在形成等离子体的过程中,多种电离机制互相耦合在一起,若靶材料中存在杂质或缺陷,电离过程会更加复杂。

#### 1.3 等离子体临界密度的计算

太赫兹作为一种电磁波,在等离子体中传播时也必须符合色散关系<sup>[14]</sup>:

$$\omega_1^2 = \omega_p^2 + c^2 k^2 \tag{1}$$

式中:  $\omega_1$  和  $k$  分别为太赫兹波的频率和波数;  $c$  为光速; 等离子体频率  $\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$ ,  $n_e$  为等离子体电子密度,  $e$  为电子电荷量,  $m_e$  为电子质量,  $\epsilon_0$  为真空介电常量。

可以看出,当太赫兹的频率等于等离子体频率时,  $k=0$ , 定义这时的  $n_e$  为等离子体临界密度<sup>[13]</sup>:

$$N_{ec} = \epsilon_0 m_e \omega_1^2 / e^2 = 1.1 \times 10^{21} \lambda_0^{-2} \tag{2}$$

图 2 为等离子体临界密度随太赫兹波长的变化关系曲线,取太赫兹真空波长  $\lambda_0 = 120 \mu\text{m}$  代入式(2),可得  $N_{ec} = 7.64 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 满足 CTFEL 工作频率的等离子体镜需要达到  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  的电子密度需求。

#### 1.4 激光功率密度阈值的计算

考虑激光照射靶面物理过程的热电离机制。蒸汽点燃阶段中,为简化传热过程的公式推导,假设铝靶的材料均匀,各向同性,热力学参数取各温度范围内的平均值,忽略热对流和热辐射,简化写出一维热传导方程:

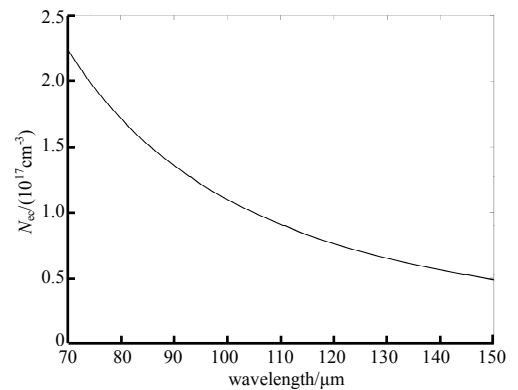


Fig.2 Relation between  $N_{ec}$  and wavelength  
图 2 等离子体临界密度随太赫兹波长的变化曲线

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{a_t} \times \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

式中： $a_t = \frac{k_t}{\rho c_p}$  为靶的热扩散系数， $k_t$ 、 $\rho$  和  $c_p$  分别为热传导系数、密度和比热容； $T$  为靶材温度。假设激光为高斯光束：

$$I_{\text{las}}(r, t) = \begin{cases} I_0(0, t) \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right), & 0 < t < \tau_{\text{las}} \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\omega$  为电磁场降至轴向  $1/e$  的点的半径； $r$  为离轴距离。结合边界条件：

$$\begin{cases} z=0 & -k_t \frac{\partial T}{\partial z} = (1-R)I_{\text{las}}(0, t) \\ z=\infty & t=0, T=0 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $R$  为靶面反射率。解得激光照射靶面中心温度表达式：

$$T(0, 0, t) = \frac{(1-R)I_{\text{las}}\omega}{k_t\sqrt{2\pi}} \arctan \frac{\sqrt{8a_t t}}{\omega} \approx \frac{(1-R)I_{\text{las}}\omega}{k_t\sqrt{2\pi}} \times \frac{\sqrt{8a_t t}}{\omega} = \frac{2(1-R)I_{\text{las}}}{k_t} \sqrt{\frac{a_t t}{\pi}} \quad (6)$$

设环境温度为  $T_0$ ，熔化温度为  $T_f$ ，蒸发温度为  $T_v$ ，熔化潜热为  $\Delta H_f$ ，靶面由固态变为气态 3 个阶段的热传导系数和比热容的平均值记为  $k_1, k_2, k_3, c_1, c_2, c_3$ ，结合式(6)可得蒸发时间：

$$\tau_v = \frac{\frac{\pi\rho}{4} \left[ \frac{k_1 c_1 (T_f - T_0)^2}{(1-R_1)^2} + \frac{k_2 c_2 (T_v - T_f)^2}{(1-R_2)^2} \right] + \frac{\rho k_3 \Delta H_f^2}{c_3 (1-R_3)^2}}{I_{\text{las}}^2} \quad (7)$$

考虑电子原子碰撞电离<sup>[15]</sup>：

$$\frac{dE}{dt} = \left( \frac{e^2 \lambda^2}{4m_e c^3 \pi^2 \epsilon_0} I_{\text{las}} - \frac{2m_e}{m_a} E \right) \nu_{\text{coll}} \quad (8)$$

式中： $E$  为电子能量； $m_a$  为原子质量； $\lambda$  为波长； $\nu_{\text{coll}}$  为碰撞频率。设原子电离能为  $E_1$ ，电离时间  $\tau_1 = 10\tau_0$ ，则电离时间  $\tau_1$  为：

$$\tau_1 = \frac{5m_a}{m_e \nu_{\text{coll}}} \ln \left( 1 - \frac{E_1}{I_{\text{las}}} \times \frac{8\pi^2 m_e^2 c^3 \epsilon_0}{m_a e^2 \lambda^2} \right)^{-1} \quad (9)$$

碰撞频率和原子密度  $n_n$  满足如下关系：

$$\nu_{\text{coll}} = n_n u_{\text{th}} \sigma_{\text{coll}} \quad (10)$$

式中： $u_{\text{th}}$  为电子平均速度； $\sigma_{\text{coll}}$  为碰撞截面。

$$n_n = \frac{I_{\text{las}}(1-R_4)}{\Delta H_v u_0 m_a} \quad (11)$$

$$u_{\text{th}} = \sqrt{8k_B \frac{T_e}{\pi} m_e} \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{coll}} = 7.9 \times 10^{-18} \left( \frac{E_1}{h\nu} \right)^3 \left( \frac{I_H}{E_1} \right)^{1/2} \quad (13)$$

式中： $\Delta H_v$  为蒸发潜热； $u_0$  为蒸汽运动速度， $u_0 = \sqrt{\gamma k_B \frac{T_s}{m_a}}$ ， $\gamma$  为比热容比，铝的  $\gamma$  为 1.4， $k_B$  为玻兹曼常数， $T_s$  为蒸汽表面温度； $h\nu$  为光子能量； $I_H$  为氢的电离势 13.6 eV。假设蒸汽电离初期，电子温度与靶面温度近似相等，即  $T_e = T_s$ ，将式(10)~(13)代入式(9)，可得蒸汽电离时间  $\tau_1$  为：

$$\tau_1 = \frac{5m_a^2 \Delta H_v}{m_e \sigma_{\text{coll}} I_{\text{las}} (1-R_4)} \times \left( \frac{8}{\pi\gamma} \right)^{-1/2} \left( \frac{m_a}{m_e} \right)^{-1/2} \ln \left( 1 - \frac{8E_1 \pi^2 m_e^2 c^3 \epsilon_0}{I_{\text{las}} m_a e^2 \lambda^2} \right)^{-1} \quad (14)$$

式中： $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 。激光脉度  $\tau_{\text{las}} = \tau_v + \tau_1$ ，代入表 1 中的参数<sup>[16]</sup>，可得激光功率密度的阈值为  $6.75 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。因此，若要满足实验要求，用来打靶的激光器的功率密度必须大于  $6.75 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。

表1 铝靶的各项物理参数

Table1 Parameters of aluminium slab

$E_i/\text{eV}$	$m_d/\text{g}$	$\Delta H_f/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\Delta H_v/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_f/\text{K}$	$T_v/\text{K}$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$k_1/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$k_2/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
5.986	$4.51 \times 10^{-23}$	388	10 800	933	2740	2.7	2.4	1.5
$k_3/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c_1/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c_2/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c_3/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	
1.1	1.0	1.15	1.18	0.95	0.94	0.92	0.90	

1.5 数值模拟

使用 MULTI-1D 辐射流体模拟软件对激光打靶过程进行数值模拟。参考上文中计算出的激光器功率密度阈值，采用功率密度为  $3 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  的 1 064 nm 激光照射 0.5 mm 厚的铝靶，时间步长为 0.01 ns，划分网格数为 100，计算该算例得到相应的电子数密度分布图，见图 3。可以看出，激光激发出等离子体的电子密度大于文中理论计算的临界电子密度，且在 18.5 ns 内可以迅速衰减，因此该功率密度的激光器可以产生满足太赫兹单脉冲选择实验要求的等离子体镜。

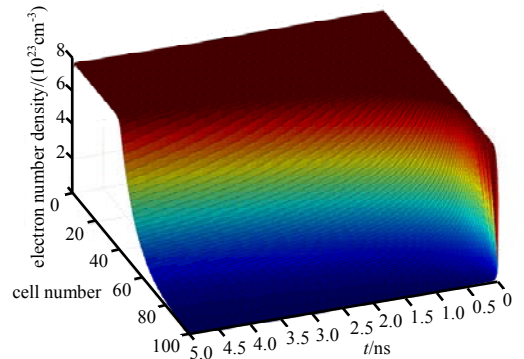


Fig.3 Electron density profile  
图 3 电子密度分布图

2 实验设计

2.1 装置选择

CTFEL 装置提供太赫兹光源，采用 Nd-YAG 激光器照射靶面诱导产生等离子体镜，从太赫兹脉冲序列中提取出单脉冲。结合上述理论计算和数值模拟结果，给出主要装置的参数指标见表 2<sup>[2]</sup>。

2.2 光路设计

实验光路见图 4，CTFEL 输出的太赫兹脉冲经过一个线栅偏振器使光束偏振到水平方向(p 偏振)后被一个离轴抛物面镜聚焦，通过旋转台调整到相应的布儒斯特角，然后入射到靶面，以尽量减少表面反射。本实验采用太赫兹宏脉冲作为 Nd:YAG 激光器外触发信号的方法来实现太赫兹和纳秒激光的同步。每个太赫兹宏脉冲触发一次纳秒激光器，再通过调节延迟光路，保证两路光同时到达靶面，纳秒激光在靶面激发出等离子体镜后，太赫兹会被等离子体镜反射，再经另一个离轴抛物面镜聚焦，由探测器采集被等离子体镜反射出来的单个太赫兹微脉冲信号。

表 2 主要装置参数指标

Table2 Summary of specifications of the major instruments

instrument	specification
CTFEL	tunable frequency range: 1.87–3.3 THz
	spectral FWHM: 2–3%
	macro-pulse average power: ~20 W
	macro-pulse repetition: 1–20 Hz
	macro-pulse length: 0.3–2 ms
	micro-pulse RMS length: 400–500 fs
Nd:YAG-laser	micro-pulse interval: 18.5 ns
	micro-pulse power: >0.3 M
	wavelength: 1 064 nm
	pulse width: 5 ns
	Rep. rate: 1–20 Hz
	pulse energy: 800 mJ

3 结论

通过分析激光照射靶面产生等离子体的物理过程，理论计算出等离子体镜反射 CTFEL 工作频率下的太赫兹所需要的临界电子密度以及激光功率密度阈值。从 MULTI 辐射流体程序模拟激光打靶产生的等离子体密度分布结果可以看出，拟定参数激光器在靶面上激发出的等离子体密度远大于临界密度。本文从理论上证明了用等离子体镜作为太赫兹门控开关进行单脉冲选择的可行性，为 CTFEL 进行太赫兹开关调制提供了一种新方式。结合理论分析结果给出具体的装置参数和光路设计，可为下一步开展实验做好铺垫工作。

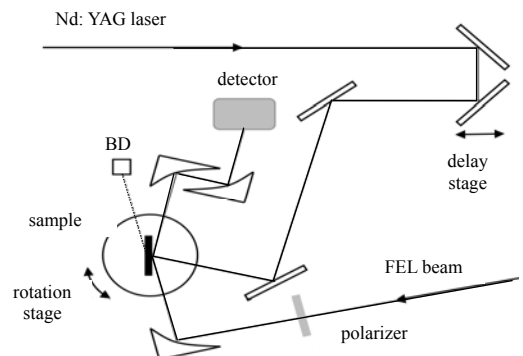


Fig.4 Experimental setup  
图 4 实验装置示意图

## 参考文献：

- [ 1 ] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2007. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. Terahertz technology and applications[M]. Beijing:Peking University Press, 2007.)
- [ 2 ] WU D,LI M,YANG X,et al. First lasing of the CAEP THz FEL facility driven by a superconducting accelerator[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2018,1067(3):032010-1–032010-8.
- [ 3 ] HUELGA S F,PLENIO M B. Quantum dynamics of bio-molecular systems in noisy environments[J]. Procedia Chemistry, 2011,3(1):248–257.
- [ 4 ] DIENST A,CASANDRUC E,FAUSTI D,et al. Optical excitation of Josephson plasma solitons in a cuprate superconductor[J]. Nature Materials, 2013,12(6):535–541.
- [ 5 ] NIKOLAENKO A E,PAPASIMAKIS N,CHIPOULINE A,et al. THz bandwidth optical switching with carbon nanotube metamaterial[J]. Optics Express, 2012,20(6):6068–6079.
- [ 6 ] SHI Q,HUANG W,LU T,et al. Nanostructured VO<sub>2</sub> film with high transparency and enhanced switching ratio in THz range[J]. Applied Physics Letters, 2014,104(7):071903-1–071903-5.
- [ 7 ] LYU T T,ZHU Z,SHI J H,et al. Optically controlled background-free terahertz switching in chiral metamaterial[J]. Optics Letters, 2014,39(10):3066–3069.
- [ 8 ] 周雯,季珂,陈鹤鸣. 基于平行磁控的磁化等离子体光子晶体 THz 波调制器[J]. 物理学报, 2017,66(5):154–160. (ZHOU Wen,JI Ke,CHEN Heming. Parallel magnetic controlled THz modulator based on two-dimensional magnetized plasma photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2017,66(5):154–160.)
- [ 9 ] GREBENCHUKOV A N,ZAITSEV A D,KHODZITSKY M K,et al. Optically controlled narrowband terahertz switcher based on graphene[J]. Chinese Optics, 2018,11(2):166–173.
- [10] 常铁强. 激光等离子体相互作用与激光聚变[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 1991. (CHANG Tieqiang. Laser plasma interaction and laser fusion[M]. Changsha,China:Hunan Science and Technology Press, 1991.)
- [11] 郭超,罗振飞,王度,等. 基于二氧化钒薄膜的太赫兹开关器件[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):644–646. (GUO Chao,LUO Zhenfei,WANG Du,et al. Terahertz switching device based on vanadium dioxide film[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):644–646.) DOI: 10.11805/TKYDA201405.0644.
- [12] 张化福,沙浩,吴志明,等. 太赫兹波段二氧化钒薄膜的研究进展[J]. 材料导报, 2019,33(15):2513–2523. (ZHANG Huaifu,SHA Hao,WU Zhiming,et al. Research progress of terahertz band vanadium dioxide film[J]. Materials Review, 2019,33(15):2513–2523.)
- [13] 熊瑛. 硅基二氧化钒薄膜制备及在太赫兹开关器件方面的应用[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (XIONG Ying. Preparation of silicon-based vanadium dioxide film and its application in terahertz switching devices[D]. Chengdu,China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [14] 孙承纬,陆启生. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. (SUN Chengwei,LU Qisheng. Laser irradiation effect[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2002)
- [15] 郝达福. 激光等离子体点燃机理分析与阈值测试研究[D]. 南京:南京理工大学, 2006. (HAO Dafu. Analysis of laser plasma ignition mechanism and threshold test[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science and Technology, 2006.)
- [16] WEBER M J. Handbook of optical materials[M]. NewYork,USA:CRC Press, 2018.