

# 大气中的激光自聚焦及其对传播的影响

许方晓 乐时晓

(电子科技大学应用物理所, 成都)

**摘要:** 本文综述了强激光束在大气中的自聚焦效应及其与大气击穿、受激喇曼散射、热晕的关系, 并就其对激光大气传播的影响和对大型实用激光系统设计的要求进行了初步的分析和讨论。

## Laser self-focusing in the atmosphere and its effects on propagation

Xu Fangxiao, Le Shixiao

(University of Electronic Science and Technology of China)

**Abstract:** Self-focusing of a high power laser beam in the atmosphere and its relations with air-breakdown, Stimulated Raman Scattering (SRS) and thermal blooming are reviewed. The effects on the propagation through the atmosphere and the requests on designing future large practical laser systems are analysed and discussed preliminarily.

### 一、引言

对于激光束在大气中的传播, 已经做了很多工作<sup>[1]</sup>, 主要涉及如吸收、散射等线性效应<sup>[2]</sup>。近几年, 强激光大气传播中的非线性效应日益引起人们的重视<sup>[3]</sup>, 这些非线性过程包括热晕、大气击穿<sup>[4-5]</sup>和受激喇曼散射 (SRS)<sup>[6-7]</sup>等。由于大气本身的复杂性, 大气中这些非线性过程尚有许多值得研究的问题, 同时, 综合考虑这些效应对强激光大气传播的

影响是必要的。

光束自聚焦效应在1964年首次于固体中观测到<sup>[8]</sup>，随之建立了自聚焦和自陷模型<sup>[9]</sup>。同时发现，自聚焦是在SRS中观测到的许多反常现象的原因<sup>[10,11]</sup>，由于自聚焦，在达到理论阈值之前，SRS就急剧地开始。实验还观测到<sup>[12]</sup>，光束先因自聚焦而缩小，然后分裂成许多细丝，这种多丝结构来源于光束中微弱的多模结构。如果自聚焦作用始终比衍射作用强，光束的自聚焦可以持续进行下去，直到某种其它非线性光学效应（如SRS，受激布里渊散射（SBS）、双光子吸收或光致击穿等）开始，从而使自聚焦过程终止。关于大气中的自聚焦，近年刚开始引起人们的注意。

## 二、自 聚 焦 理 论

自聚焦由下面的非线性波动方程来描述<sup>[10]</sup>。

$$\nabla^2 E - (\partial^2 / c^2 \partial t^2) [(n_1 + n_2)^2 E] = 0 \quad (1)$$

式中， $n_1$ 、 $n_2$ 分别是介质折射率系数的线性和非线性部分。

考虑准直激光束，在无衰减媒质中，得到自聚焦的临界功率<sup>[10]</sup>

$$P_c = \epsilon_0 n_1 c \lambda / 4\pi n_2 \quad (2)$$

式中， $\lambda$ 是波长。有

$$n = n_1 + \frac{1}{2} n_2 |\vec{E}|^2 \quad (3)$$

式中， $\vec{E}$ 是电磁波的电场分量。

解波动方程(1)，导出

$$Z_f = \frac{Z_R}{\sqrt{P/P_c - 1}} \quad (4)$$

式中， $Z_f$ 是自聚焦长度， $Z_R$ 是瑞利距离， $P$ 是功率。光束半径随距离的变化由下式给出

$$a(z) = a_0 \sqrt{1 - (P/P_c - 1) Z^2 / Z_R^2} \quad (5)$$

式中， $a_0 = w_0 / \sqrt{2}$ ， $w_0$ 为光束进入媒质时的光腰。

对非准直光束，可用同样的方法处理。在实际衰减媒质中，由于不稳定性的限制，进入媒质时会聚和发散的光束的自聚焦长度小于这里给出的值。

在吸收媒质中，产生自聚焦的最小功率 $P_m$ 由下式给出<sup>[14]</sup>

$$P_m / P_c = 1 + \left( \frac{\pi n_1 \alpha_1}{2\lambda} \right) a_0^4 \quad (6)$$

式中， $\alpha_1$ 为波动方程中吸收项的系数。由于大气密度的变化，自聚焦临界功率随高度指数增加。

$$Z_f = -1/\alpha_1 \ln(1 - \alpha_1 P_{sc}) \quad (7)$$

式中，

$$P_{sc} = \frac{\pi n_1 \alpha_0^2}{2\lambda \sqrt{P/P_c - 1}} = \frac{n_1 Z_R}{4 \sqrt{P/P_c - 1}} \quad (8)$$

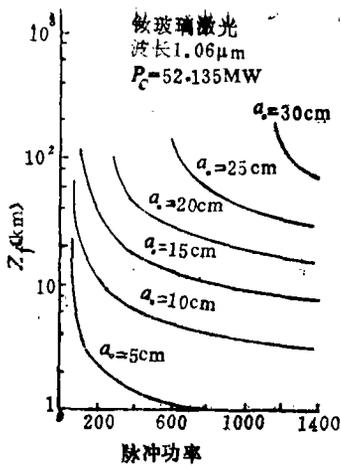


图1 吸收大气中自聚焦长度同激光功率和初始光束半径的关系

图1给出了在一个大气压的空气中,  $1.06\mu\text{m}$  波长激光脉冲 ( $a_0 = 0.035$ ,  $P_c \approx 52\text{MW}$ ) 自聚焦的  $Z_f$ 、 $a_0$ 、 $P$  之间的关系。

### 三、光束分裂与细丝的形成

由于激光束横向空间不均匀性造成微扰的非线性增长, 自聚焦光束会分裂成一些很强很细的细丝<sup>[12, 15]</sup>, 强度可高达约  $10\text{GW}/\text{cm}^2$ , 进而破坏光束。实际上, 已经观测到在光束被破坏前, 这些细丝有时会进一步分裂成更小的细丝<sup>[14]</sup>。由于光束分裂, 实际的聚焦长度将大大地小于  $Z_f$  的值。

利用Akhmanov等发展的微扰理论<sup>[13]</sup>, 从波动方程推得波的振幅和相位畸变随传播距离指数增长, 增益系数为

$$g = \frac{k_{\perp}^2}{2k} \left( \frac{8}{n_1 a_0^2 k_{\perp}^2} \cdot P/P_c - 1 \right)^{1/2} \quad (9)$$

式中,  $|k_{\perp}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ,  $k_x$  和  $k_y$  是畸变的横向空间频率。

形成细丝的不稳定性的  $e$  倍长度近似为

$$Z_e = 1/g \approx \frac{1}{\frac{1}{2} g_{\text{max}}} = \frac{kn_1 a_0^2}{P/P_c} = \frac{2\pi n_1 a_0^2}{\lambda P/P_c} \quad (10)$$

对于有限截面的激光束, 分离和整体的自聚焦之间可能发生竞争。如果光束的总功率  $P$  超过临界功率  $P_c$  不太多, 那么光束就不会分裂, 而是发生整体自聚焦。

$1.06\mu\text{m}$  激光束在1个大气压空气中传播的计算结果见图2、图3<sup>[17]</sup>。可见, 当  $a_0$  较大时,

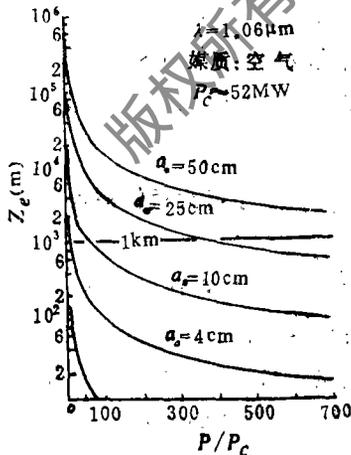


图2 形成细丝的不稳定性的倍长度

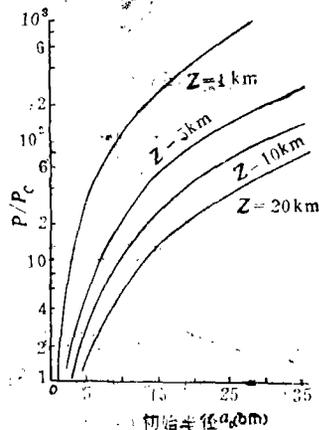


图3 光束分裂所需功率比 ( $P/P_c$ ) 同光束半径和传播距离的关系

要发生光束分裂, 需要很长的传播距离和非常高的功率; 对初始半径50cm的激光束, 约 $10^8 P_c$ 的功率就足以在小于1km的距离内导致光束分裂。

最近, P. L. Kelley<sup>[18]</sup>从光克尔效应导致的SLLS效应的角度考虑, 讨论了由于光束横向不稳定性经非线性效应放大的过程, 及对SRS的影响和光束分裂。

#### 四、大气击穿

在理想非线性媒质中, 自聚焦激光束将继续聚焦, 最后光束半径在自聚焦点达到零(如(4)、(5)式所示)。实际大气中, 当光束自聚焦时随着功率密度的增加, 最终达到媒质的击穿点<sup>[19]</sup>, 产生等离子体, 阻断光束。

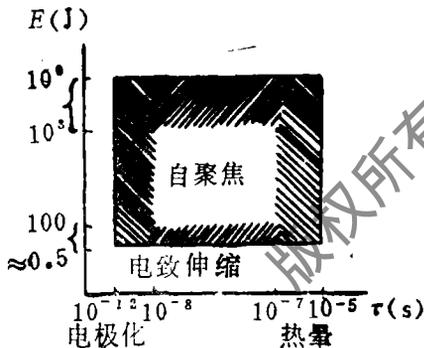
设 $I_{bd}$ 为大气中击穿时的功率密度, 由(5)式可得自聚焦光束达到击穿点时的距离。

$$Z_{fbd} = \frac{Z_R}{\sqrt{P/P_c - 1}} \cdot \sqrt{1 - \frac{P}{2a_0^2 I_{bd}}} \quad (11)$$

对 $1.06\mu\text{m}$ 的激光束, 在一个很宽范围的功率( $0\sim 1400\text{MW}$ )和初始半径( $10\sim 25\text{cm}$ ),  $Z_{fbd}$ 、 $Z_f$ (用(7)、(8)式)的计算表明<sup>[17]</sup>, 由于衰减, 光束在达到击穿点之前已经达到自聚焦点, 光束半径不再缩小, 不会导致击穿。光束在 $Z_f$ 达到最小半径时会出现的情况, 目前并不很清楚, 可能会开始向外发散。一种可能是<sup>[20]</sup>, 在传播距离远大于 $Z_f$ 时, 光束半径可能在 $a_0$ 和 $a(Z_f)$ 之间振荡。这里没有考虑光束分离自聚焦的情况。

#### 五、自聚焦窗口

激光脉冲的形状对大气中的自聚焦有重要限制。图4近似给出了可能发生自聚焦的窗口, 由脉冲的宽度和能量所限制。



脉冲宽度的下限, 由使介质折射率随光强而改变的物理机制的响应时间决定, 对电极化约1ps, 对电致伸缩约10ns; 上限为热晕所致, 在脉宽大于100ns~10μs时将发生热晕效应。脉冲能量的限制较难确定。下限是由自聚焦临界功率乘以最短脉宽得到的; 上限则由光束分裂及击穿所决定。

#### 六、上下行大气传播计算

图4 钕玻璃激光脉冲在空气中的自聚焦窗口

W.E.Martin和R.J.Winfield<sup>[21]</sup>(1988年)

用实际大气模型, 计算了激光束上下行传播的情况, 其中考虑了自聚焦效应, 分析了光束分裂的可能及整体自聚焦对SRS的影响。

图5显示了上行传播时, 光束半径因整体自聚焦随传播距离减小的关系。图6给出了大气中强度 $100\text{MW}/\text{cm}^2$ , 半径2m的高斯光束上行传播( $3\sim 400\text{km}$ )时大气透射率、氮的转动喇曼增益系数( $\Gamma$ )和光束分裂参量( $B$ )同波长的关系。 $B$ 描述了非线性折射率系数对激光束传播的影响, 对大型固体激光系统 $B>5$ 时, 通常意味着可能发生自聚焦导致的光束分

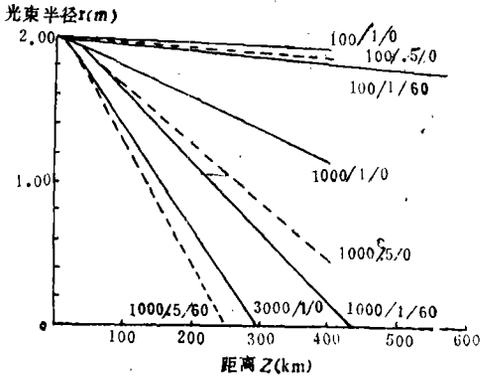


图5 上行传播时光束半径因整体自聚焦随传播距离减小的关系。数标为：光强 (MW/cm<sup>2</sup>) / 波长 (μm) / 天顶角 (deg)

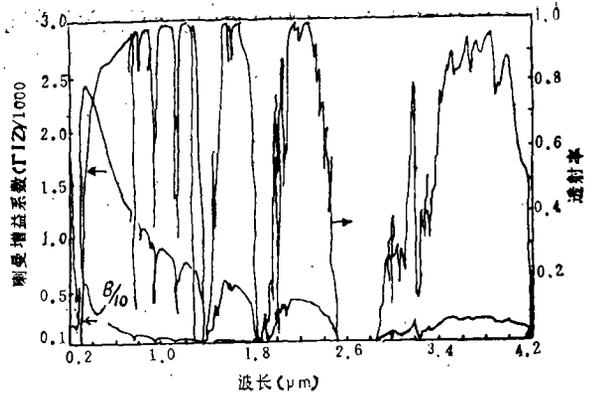


图6 大气透射率、氮的转动喇曼增益系数和光束分裂参量同波长的关系。上行传播，3~400km

下行传播的计算表明，从空间到25km的高度，对自然的发散高斯光束，半径的变化是很小的，但对会聚光束，则意味着非线性效应的显著增强。图7即表示了激光束从400km高度垂直向下传播，会聚在不同高度的情况。

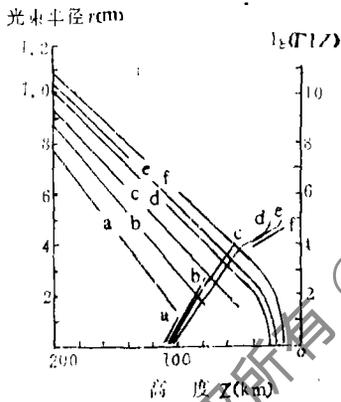


图7 从空间向地面聚焦的激光束的束半径变化和转动喇曼增益。初始高度400km，聚焦高度：a.100；b.75；c.50；d.25；e.15；f.0km

### 七、结果及讨论

自聚焦效应和热晕效应，都是由光场感应的介质非线性折射率导致的光波自作用，但产生光场感应折射率的物理机制不同。大气中脉宽在10ns到10μs，功率在10<sup>2</sup>P<sub>c</sub>到10<sup>3</sup>P<sub>c</sub>范围内的激光束，有可能发生自聚焦，即存在一个发生自聚焦效应的窗口(图4)。热晕是一个响应较慢的过程，对较长的脉宽(≥10μs)和连续波激光(CW)需要考虑；对更短的脉宽，考虑由光克尔效应产生的SLLS是必要的。

自聚焦发生的结果，可能进一步导致光束分裂、大气击穿及加剧SRS的发生，导致能量的损失和光束质量的破坏。而它们之间的关系及合作效应目前则没有更深入的讨论。在实际大气中，目前的计算表明，至少对1.06μm的钕玻璃激光器，不存在因自聚焦而导致大气击穿的问题。上行传播时，光束存在某一高度因衍射衰减到小于临界功率或者因横向不稳定性导致光束分裂的可能。而自聚焦对SRS增益的贡献是不容忽视的；非常大的传播距离意味着很高的增益的出现。下行传播时，若是会聚光束，会聚到50km高度以下的激光束，因自聚焦产生的半径急剧减少引起的SRS、光束分裂或击穿效应的结果，将是灾难性的。斜程传播时，由

于传播距离变大, 自聚焦的影响会更加显著。

减小这里考虑的非线性效应的最明显的方法是降低光束功率密度。对给定的总能量, 这要求较长的脉宽或较大的光束截面。而较长的脉宽则意味着必须考虑其它较慢的非线性过程; 较大截面的光束又有需要非常大直径的光学部件或大量小光束的精确定相的困难。由于响应时间的不同, 热晕和自聚焦对激光束的脉宽有不同要求。因此, 在设计实用的强激光系统时, 从热晕和自聚焦的角度考虑脉宽及相应的补偿方式是必要的。光束分裂的可能, 对激光束横模质量也有一定的要求; 为避免极大功率激光束导致光束分裂, 有必要用空间滤波器将光束横向畸变降到最低程度。同时, 对SRS效应的更精细讨论, 考虑自聚焦效应, SLLS效应是需要的。

大型实用激光系统的设计, 必须权衡各种参数, 找到适于特定需要的最佳值。显然, 在适用于大气中的高功率脉冲激光系统的总体设计中, 包括自聚焦的非线性过程是必须考虑的。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] V.E.Zuev, Laser beams in the atmosphere, Consultants Bureau (Plenum), New York, 1982.
- [ 2 ] 吴健、乐时晓, 《随和介质中的光传播理论》, 成都电讯工程学院出版社, 1988年。
- [ 3 ] 乐时晓等编校, 《高能激光非线性传播》, 成都电讯工程学院出版社, 1988年。
- [ 4 ] J.A.Fleck et al., Appl.Phys., 1976, Vol.10, P.129.
- [ 5 ] R.L.Armstrong et al., J.O.S.Am., (A), 1985, Vol.2, P.1739.
- [ 6 ] M.A.Henesian et al., Opt.Lett., 1985, Vol.10, P.565.
- [ 7 ] M.Rokni et al., IEEE J.Q.E., 1986, Vol.22, P.1102.
- [ 8 ] Hercher, M., J.O.S.Am., 1964, Vol.54, P.563.
- [ 9 ] Chiao, R.Y.et al., Phys.Rev.Lett., 1964, Vol.13, P.479; Erratum, Phys.Rev.Lett., 1965, Vol.14, P.1056.
- [ 10 ] 沈元壤, 《非线性光学原理》, 科学出版社, 1987年。
- [ 11 ] Y.R.Shen et al., Phys.Rev.Lett., 1965, Vol.15, P.1008.
- [ 12 ] E.Garmire et al., Phys.Rev.Lett., 1966, Vol.16, P.347.
- [ 13 ] S.A.Akhmanov et al., Laser handbook, NorthHolland, New York, 1972, P.1151~1228.
- [ 14 ] S.A.Akbmanov et al., Sov.Phys.Usp., 1968, Vol.93, P.609.
- [ 15 ] R.G.Brewer et al., Phys.Rev., 1968, Vol.166, P.326.
- [ 16 ] J.F.Reintjes, Nonlinear optical parametric processes in liquids and gases, Academic, New York, 1984.
- [ 17 ] Ronald I.Miller et al., Appl.Opt., 1987, Vol.26, P.4570.
- [ 18 ] P.L.Kelley et al., Appl.Opt., 1988, Vol.22, P.4787.
- [ 19 ] L.V.Gorgachev, Soviet.J.Q.E., 1977, Vol.7, P.510.
- [ 20 ] C.J.K.Virmanian et al., Optik, 1974, Vol.40, P.431.

- [21] W.E.Martin et al., Appl.Opt., 1988, Vol.27, P.567.  
[22] J.F.Holzrichter, Nature (London), 1985, Vol.316, P.311.  
[23] D.C.Brown, Opt.Sci., 1981, Vol.25, P.188.

\* \* \*

作者简介：许方晓，男，1965年3月出生。助教。现从事大气光学、非线性光学的研究。

收稿日期：1989年10月16日。

·单位简介·

## 国营红光仪器厂

### Hongguang Instrument Factory

国营红光仪器厂是1965年内迁三线建设的军工企业。位于四川省华蓥市内，属中国北方光电集团总公司所辖的大型二类军工企业。地处襄、渝铁道干线，水、陆交通方便。厂房建筑面积10多万平方米，固定资产总额达4000万元。现有职工2000多人，具有高级职称的工程技术、管理人员39人，工程师300多人。国营红光仪器厂技术力量雄厚，设备先进，是光、机、电综合性产品的研制和生产厂家。

二十多年来，红光厂担负研制和生产多种高、精、尖的光、机、电军用产品，同时不断开发民用产品并打入国际市场。如35mm电影放映机、照相机、电动照排机、大型线切割机、光电扫描仪、微机冷库测温仪、高压开关柜等，由国家定点生产的摩托车系列化油器在国内享有较高的信誉。特别是华莹AE-1型多次曝光、多功能135照相机，它以功能齐全、性能优良、照出的象质艳丽多姿著称，曾获国家专利，专利号为87216565。现年产量达10多万架。投放市场后，多次获奖，深受广大用户欢迎。

红光仪器厂欢迎国内外各界友好人士咨询、合作，开发各种高技术、高水平的光、机、电产品。可根据用户需要，优惠提供各类产品。

通讯地址：四川华莹市803信箱

Addr.: P.O.Box 803, Huaying City,  
Sichuan, China

电 话：重庆长专1号转18号

Tel.: No.1 Chongqing long-distance  
telephone for special use exit  
No.18

电 挂：4767

Cab.: 4767

邮政编码：638652