

文章编号:1001-5078(2015)11-1355-05

· 光学技术 ·

大气湍流对高斯光束瑞利区间的影响

王 慧, 杨 军, 章 曦
(解放军理工大学理学院, 江苏南京 211101)

摘要:采用 Andrews 修正谱(M 谱), 通过解析分析与数值计算研究了相干双曲余弦高斯光束在自由空间和中强度大气湍流中传输时瑞利区间的影响因素。研究表明, 大气湍流中激光束的瑞利区间明显小于在自由空间的瑞利区间; 相干参数 α 、光束参数 β 、大气湍流内尺度 l_0 及束腰宽度 ω_0 的增加均利于激光束瑞利区间 Z_R 的增大, 而光束波长 λ 的增大及湍流强度 C_n^2 的增强将导致瑞利区间 Z_R 的减小; 此外瑞利区间 Z_R 受湍流外尺度 L_0 变化的影响较小, 而受湍流内尺度 l_0 变化的影响较大, 表现出明显的尺寸效应。相关结果与相同条件下运用 Von Karman 谱计算得出的结论相一致。

关键词: 瑞利区间; 高斯光束; 大气湍流; Andrews 修正谱; Von Karman 谱

中图分类号: O436 文献标识码: A DOI: 10.3969/j. issn. 1001-5078. 2015. 11. 014

Influence of atmospheric turbulence on the Rayleigh range of Gaussian beams

WANG Hui, YANG Jun, ZHANG Xi
(Institute of Science, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The influences of turbulent atmosphere on the Rayleigh range are studied by analytical and numerical calculation with Andrews modified fluctuation spectrum (or M spectrum) when coherent cosh-Gaussian beams transfer both in free space and in atmospheric turbulence. The results show that the Rayleigh ranges in turbulent atmosphere are less than that in free space. The Rayleigh range Z_R increases with the increase of the beam coherence parameter α , the beam parameter β , the inner size of atmospheric turbulence l_0 and the Gaussian waist width ω_0 , while decreases with the increase of the wave length λ and the turbulent strength C_n^2 . It is also showed that the Rayleigh range Z_R is affected significantly by the inner size of atmospheric turbulence l_0 while it is affected little by the outer size of atmospheric turbulence L_0 , hence the size effect appears. The results are consistent with what is derived with the Von Karman fluctuation spectrum under the same condition.

Key words: Rayleigh range; Gaussian beam; atmospheric turbulence; Andrews modified fluctuation spectrum; Von Karman fluctuation spectrum

1 引言

激光束在大气中传输时由于受到大气湍流的

影响, 易发生光强闪烁、波前失真以及光束快速扩展等现象, 从而限制了激光的实际应用。大气湍

基金项目: 总参谋部信息化部通信指挥装备军内科研基金(No. KYLYZXJK140002)资助。

作者简介: 王 慧(1981-), 男, 讲师, 主研领域为激光传输理论。E-mail: wanghuij@foxmail.com

收稿日期: 2015-03-23; 修订日期: 2015-04-09

流还可以使得激光光束的相干性发生退化^[1]。1990 年, Wu^[2] 从理论上证明了部分空间相干光受大气湍流的影响比完全相干光受到的影响小。2002 年, Gbur 等^[3] 给出了部分空间相干光受大气湍流影响的条件, 并得到了 Dogariu 等^[4] 的实验验证。考虑到大气湍流的随机性, 可以运用大气折射率起伏功率谱密度模型来描述大气湍流的特征, 本文主要采用 L. C. Andrews 修正谱(M 谱), 并将计算结果与 Von Karman 谱的计算结果进行对照。在激光理论中, 瑞利区间表示完全相干激光光束无明显扩展的传输距离, 后来 Gbur 等^[3] 把这一概念拓展到部分相干光, 最近激光束瑞利区间的概念进一步从自由空间拓展到大气湍流中, 大气湍流使得激光光束瑞利区间缩短, 湍流越强瑞利区间越短^[5]。本文根据部分相干双曲余弦高斯光束在自由空间和湍流大气中传输光束瑞利区间的解析结果, 采用 M 谱进行数值分析, 研究了大气湍流的尺寸效应、相干参数、光束参数、大气湍流内尺度、束腰宽度和折射率起伏结构常数等对部分相干双曲余弦高斯光束在自由空间和实际空间中传输的影响, 并将结果与其他相关研究工作进行对比^[6-7], 为实际应用提供参考。

2 理论模型

利用直角坐标系中部分相干双曲余弦高斯光束在 $z = 0$ 的平面处的交叉谱密度函数^[8-9] $W(x'_1, x'_2, z = 0)$ 及其通过自由空间传输的光强 $I(x, z)$, 根据二阶束宽的定义^[10] :

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 I(x, z) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(x, z) dx}, \text{部分相干双曲余弦高}$$

斯光束通过自由空间传输的二阶矩束宽^[6] 可写为:

$$\langle x^2 \rangle = A + Bz^2$$

其中:

$$A = \frac{\omega_0^2}{4} \left[1 + \frac{\beta^2 \exp(\beta^2/2)}{\exp(\beta^2/2) + 1} \right]$$

$$B = \frac{1}{k^2 \omega_0^2} \left[1 - \frac{\beta^2}{\exp(\beta^2/2) + 1} + \frac{1}{\alpha^2} \right]$$

式中, ω_0 为对应基模高斯光束在 $z = 0$ 的平面处的束腰宽度; 光束参数 $\beta = \Omega_0 \omega_0$; Ω_0 为与双曲余弦有关的光束参数; 波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ 为激光束波长; 光束相干参数 $\alpha = \sigma_0/\omega_0$ 。

在自由空间中, 瑞利区间 Z_{Rfree} 定义为光束横截面积扩展到源场处面积的两倍时光束所传输的距

离。因此部分相干双曲余弦高斯光束通过自由空间传输的瑞利区间为:

$$Z_{Rfree} = \sqrt{\frac{A}{B}} \quad (1)$$

根据文献^[11-12]可知, 在大气湍流中部分相干光的二阶矩 $\langle x^2 \rangle$ 可写为:

$$\langle x^2 \rangle = A + Bz^2 + \frac{2}{3}Tz^3 \quad (2)$$

其中, $T = \pi^2 \int_0^\infty k^3 \Phi_n(k) dk$, $\Phi_n(k)$ 为大气折射率起伏功率谱密度函数。参照自由空间, 湍流大气中光束的瑞利区间仍定义为光束横截面积扩展到源场处面积两倍时光束所传输的距离, 于是有 $\frac{2}{3}Tz_R^3 + Bz_R^2 - A = 0$, 满足此方程的实根即湍流大气中激光束的瑞利区间 Z_R 。一般 $Z_R < Z_{Rfree}$, 说明大气湍流使得激光束扩展加快, 瑞利区间减小。

3 数值计算结果与分析

大气折射率起伏功率谱模型的选取非常重要^[13], 本文主要采用适用于各种强度湍流大气的 M 谱, 即:

$$\Phi_n(k) = 0.033 C_n^2 \left[1 + a_1 \left(\frac{k}{k_l} \right) - a_2 \left(\frac{k}{k_l} \right)^{7/6} \right] \cdot \frac{\exp(-k^2/k_l^2)}{(k^2 + k_0^2)^{11/6}} \quad (3)$$

其中, $0 \leq k < \infty$; $a_1 = 1.802$; $a_2 = 0.254$; $k_l = 3.3/l_0$; $k_0 = 1/L_0$; l_0 、 L_0 分别为湍流内尺度和湍流外尺度, 典型值为 $l_0 = 0.01$ m, $L_0 = 10$ m; C_n^2 为折射率结构常数, 它表征湍流的强度, 典型值为 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。在实际激光通信中波长一般选在红外波段, 典型值为 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 。

大气湍流对激光相位保持和远距离传输的影响比较显著^[14-20]。图 1~4 为部分相干双曲余弦高斯光束瑞利区间 Z_R 随折射率结构常数 C_n^2 、光束相干参数 α 、光束参数 β 以及对应基模高斯光束在 $z = 0$ 的平面处的束腰宽度 ω_0 的变化曲线。由图 1~4 可以看出湍流大气中的瑞利区间 Z_R 明显小于自由空间中的瑞利区间 Z_{Rfree} , 但当 C_n^2 、 α 、 β 以及 ω_0 值较小时有 $Z_R \approx Z_{Rfree}$ 。根据 M 谱计算得出的瑞利区间又小于相同条件下根据 Von Karman 谱计算得出的瑞利区间, 但经两种谱计算得出的瑞利区间差别较小。图 5 和图 6 为部分相干双曲余弦高斯光束瑞利区间 Z_R 随光束波长 λ 与束腰宽度 ω_0 、湍流外尺度 L_0 和湍流内尺度 l_0 变化的三维图, 此计算中仅采用 M 谱。

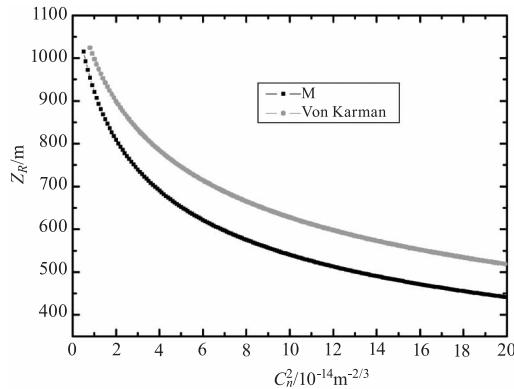


图1 Z_R 随 C_n^2 变化关系图($\omega_0 = 0.02 \text{ m}$, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$)

Fig. 1 The Rayleigh range Z_R versus the turbulent strength C_n^2
where $\omega_0 = 0.02 \text{ m}$, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$

图1为Von Karman谱和L.C. Andrews修正谱(M谱)瑞利区间 Z_R 随折射率起伏结构参数 C_n^2 变化曲线。折射率起伏结构参数(即湍流强度) C_n^2 是描述激光通信质量的重要物理量,从图中可以看出,随着折射率起伏结构参数的增加,即介质的折射率起伏增强,激光的瑞利区间快速衰减,但到达一定的数值后基本保持不变,说明此时折射率起伏的影响达到饱和,所以在实际应用中要充分考虑到折射率起伏对激光传输有效性的影响。Von Karman谱和M谱对瑞利区间随湍流强度变化的影响趋势相同,但是M谱计算得出的瑞利区间比相同条件下Von Karman谱计算得出的瑞利区间稍小。

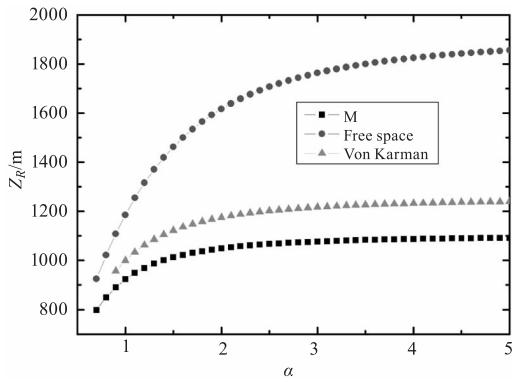


图2 Z_R 随 α 变化关系图($\omega_0 = 0.02 \text{ m}$, $\beta = 1$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)

Fig. 2 The Rayleigh range Z_R versus the beam coherence parameter α
where $\omega_0 = 0.02 \text{ m}$, $\beta = 1$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

图2给出了Von Karman谱和M谱的瑞利区间 Z_R 随光束相干参数 α 变化关系曲线,作为对比同时给出了自由空间的瑞利区间。从图2中可以看出,相比于自由空间,大气湍流的存在大幅度降低了激

光传输的瑞利区间,瑞利区间 Z_R 随相干参数 α 的增加而增加,但当 $\alpha > 2$ 时,曲线斜率明显减小,说明继续增加光束的相干性对提高瑞利区间 Z_R 影响较小。同样,Von Karman谱和M谱对瑞利区间随光束相干参数 α 变化的影响趋势相同,但是M谱计算得出的瑞利区间比相同条件下Von Karman谱计算得出的瑞利区间稍小。

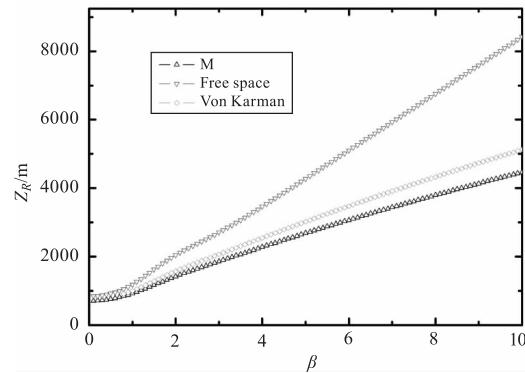


图3 Z_R 随 β 变化图($\omega_0 = 0.02 \text{ m}$, $\alpha = 1$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)

Fig. 3 The Rayleigh range Z_R versus the beam parameter β
where $\omega_0 = 0.02 \text{ m}$, $\alpha = 1$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

图3是Von Karman谱和M谱的瑞利区间 Z_R 随光束参数 β 变化曲线,从图中可以看出,瑞利区间 Z_R 随光束参数 β 的增加而增加,特别当 $\beta > 2$ 则近似于线性增加,说明激光传输过程中的光束参数和束腰宽度都对瑞利区间的变化影响显著,在实际应用中,应该尽可能提高光束参数的大小以利于瑞利区间的增加,提高通信质量。

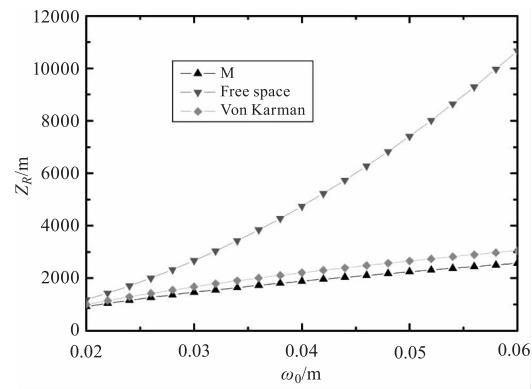


图4 Z_R 随 ω_0 变化关系图($\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)

Fig. 4 The Rayleigh range Z_R versus the Gaussian waist width ω_0
where $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

图4给出的是Von Karman谱和M谱的瑞利区间 Z_R 随束腰宽度 ω_0 变化曲线,图中可以看出,在自

由空间中,瑞利区间随高斯束宽的增加而显著增大,但在实际空间中,瑞利区间仍然呈现出增加的趋势,但增加趋势明显降低,所以增加束腰宽度对激光的相位保持是有利的。

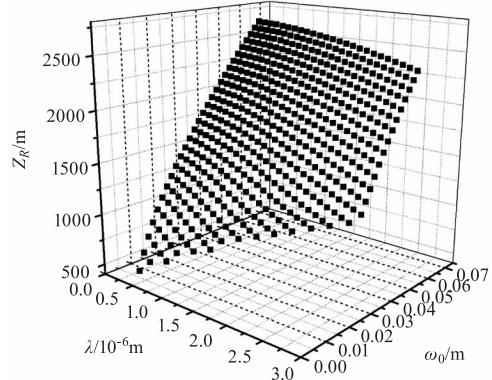


图 5 Z_R 随 λ 与 ω_0 变化关系图

$$(\alpha = 1, \beta = 1, C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3})$$

Fig. 5 The Rayleigh range Z_R versus the wave length λ and the Gaussian waist width ω_0 where $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$

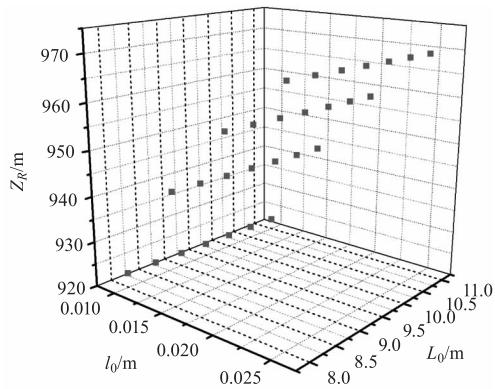


图 6 Z_R 随 l_0 与 L_0 变化关系图 ($\alpha = 1$, $\beta = 1$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $\omega_0 = 0.02 \text{ m}$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$)

Fig. 6 The Rayleigh range Z_R versus the inner size of atmospheric turbulence l_0 and the out size of atmospheric turbulence L_0 where $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $\omega_0 = 0.02 \text{ m}$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$

图 5 和图 6 给出了瑞利区间随湍流尺寸及激光波长的对应关系。图 5 表明波长 λ 越小、束腰宽度 ω_0 越大,瑞利区间 Z_R 越大。光束波长越小,则光子的能量越大,其受散射作用相对越弱,因此瑞利区间越大。因此实际应用中可以通过提高相干参数 α 、提高光束参数 β 、增加束腰宽度 ω_0 以及减小光束波长 λ 来提高瑞利区间 Z_R 。图 6 表明瑞利区间 Z_R 受湍流外尺度 L_0 变化的影响较小,而受湍流内尺度 l_0 变化的影响较大,湍流内尺度 l_0 越大,瑞利区间 Z_R 越大,表现出明显的尺寸效应。大气湍流内尺度在地面附近的典型测量结果是几个毫米,并且随高度

的增加而增加,最大能够达到几十厘米,因此选择湍流内尺度较大的区域有利于提高瑞利区间。

4 结 论

大气湍流使得激光束的瑞利区间缩短,湍流越强,瑞利区间越小。本文利用部分相干双曲余弦高斯光束在自由空间和湍流大气中传输的瑞利区间的公式,采用 L. C. Andrews 修正谱(M 谱),通过数值计算,研究了中强湍流大气对瑞利区间的影响,结果表明:选择湍流强度参数 C_n^2 较小、相干参数 α 较大、光束参数 β 较大、束腰宽度 ω_0 较大、光束波长 λ 较小以及湍流内尺度较大的区域均有利于提高光束的瑞利区间 Z_R 。通过与相同条件下运用 Von Karman 谱计算得出的结果对比可知,运用两种谱计算得出的瑞利区间较一致,均明显小于激光束在自由空间的瑞利区间。所得结果可为部分相干光在湍流大气中传输的实际应用提供参考。

参 考 文 献:

- [1] JI X L, Eyyuboglu H T, Baykal Y. Influence of turbulence on the effective radius of curvature of radial Gaussian array beams [J]. Opt. Express, 2010, 18(7): 6922–6928.
- [2] Wu J. Propagation of a Gaussian-Schell beam through turbulent media [J]. J. Mod. Opt., 1990, 37: 671–684.
- [3] Gbur G, Wolf E. Spreading of partially coherent beams in random media [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2002, 19: 1592–1598.
- [4] Dogariu A, Amarande S. Propagation of partially coherent beams: turbulence-induced degradation [J]. Opt. Lett., 2003, 28: 10–12.
- [5] JI Xiaoling. Influence of the atmospheric turbulence on propagation properties of laser beams [J]. Journal of Sichuan Normal University: Nature Science, 2012, 35: 127–136. (in Chinese)
- 季小玲. 大气湍流对激光束传输特性的影响 [J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2012, 35: 127–136.
- [6] JI Xiaoling. Influence of turbulence on the Rayleigh range of partially coherent cosh-Gaussian beams [J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60: 064207. (in Chinese)
- 季小玲. 湍流对部分相干双曲余弦高斯光束的瑞利区间的影响 [J]. 物理学报, 2011, 60: 064207.
- [7] LI Jinhong, LÜ Baida. Comparative study of partially coherent vortex beam propagations through atmospheric turbulence along an uplink path and a downlink path [J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60: 074205. (in Chinese)

- 李晋红,吕百达.部分相干涡旋光束通过大气湍流上行和下行传输的比较研究 [J]. 物理学报, 2011, 60:074205.
- [8] Caspelson L W, Tovar A A. Hermite-sinusoidal-Gaussian beams in complex optical systems [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1998, 15(4):954–961.
- [9] Zahid M, Zubairy M S. Directionality of partially coherent Bessel-Gauss beams [J]. Opt. Comm., 1989, 70 (5): 361–364.
- [10] Siegman A E. New developments in laser resonators [C]. SPIE, 1990, 1224:2–14.
- [11] Dan Y, Zhang B. Second moments of partially coherent beams in atmospheric turbulence [J]. Opt. Lett., 2009, 34 (5):563–565.
- [12] Ji X L, Li X Q. Effective radius of curvature of partially coherent Hermite-Gaussian beams propagation through atmospheric turbulence [J]. Opt., 2010, 12(3):035403.
- [13] LIU Yangyang, LÜ Qiunbo, ZHANG Wenxi. Simulation for space target interference imaging system distorted by atmospheric turbulence. Acta Phys. Sin., 2012, 61 (12): 124201. (in Chinese)
- 刘扬阳,吕群波,张文喜. 大气湍流畸变对空间目标清晰干涉成像仿真研究 [J]. 物理学报, 2012, 61 (12):124201.
- [14] Salem M, Korotkova O, Dogariu A, et al. Polarization changes in partially coherent electromagnetic beams propagating through the turbulent atmosphere [J]. Waves in Random Media, 2004, 14(4):513–523.
- [15] Zhang E T, Ji X L, Lv B D. Propagation of the off-axis superposition of partially coherent beams through atmospheric turbulence [J]. Chin. Phys. B, 2009, 18 (2): 571–580.
- [16] Caspelson W L, Hall D G. Sinusoidal-Gaussian beams in complex optical system [J]. J. Opt. Soc. Am. A., 1997, 14 (12):3341–3348.
- [17] YUAN Zhongheng, ZHANG Wentao. The analysis and research for the laser beam through onflow atmosphere channel [J]. Laser & Infrared, 2006, 36 (4):272–274. (in Chinese)
- 袁纵横,张文涛. 大气湍流对激光信号传输影响的分析研究 [J]. 激光与红外, 2006, 36(4):272–274.
- [18] XIANG Libin, YUAN Yan, LÜ Qunbo. Spectral transfer function of the fourier transform spectral imager [J]. Acta Phys. Sin., 2009, 58(8):5400. (in Chinese)
- 相里斌,袁艳,吕群波. 傅里叶变换光谱成像仪光谱传递函数研究 [J]. 物理学报, 2009, 58(8):5400.
- [19] WU Lin, YING Jiaju, GENG Biao. Effect on laser propagation in the atmosphere turbulence [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10):974–977. (in Chinese)
- 武琳,应家驹,耿彪. 大气湍流对激光传输的影响 [J]. 激光与红外, 2008, 38(10):974–977.
- [20] ZHU Lin, SONG Miao. Numerical simulation of the impact of atmospheric turbulence on the laser signal [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(11):1268–1272. (in Chinese)
- 朱耀麟,宋苗. 大气湍流对激光信号影响的数值模拟 [J]. 激光与红外, 2013, 43(11):1268–1272.