

物理学报 Acta Physica Sinica



Chinese Physical Society



Institute of Physics, CAS

光纤激光基模光束的 β 因子*

张雨秋 黄良金 常琦 安毅 马鹏飞 冷进勇 周朴†

(国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

(2021年2月6日收到; 2021年6月3日收到修改稿)

光纤激光器凭借其优良特性已在众多领域中得到广泛应用, 光束质量是衡量其性能的重要指标之一。 M^2 因子是应用较为广泛的一种评价因子, 但已被证明并不适用于非高斯分布的光斑, 此时常用 β 因子来评价. 本文以光纤激光基模光束为研究对象, 理想光束选取包含 LP_{01} 模99%能量的圆形实心均匀光束, 理论研究了 β 因子与阶跃折射率光纤中 LP_{01} 模的各项参数之间的关系. 研究发现: 采用经典的 β 因子定义方法, 当归一化频率 V 大于1.8时, LP_{01} 模的 β 值小于1, 远场聚焦能力优于理想光束. 此外, β 因子随归一化频率 V 、纤芯半径 a 或数值孔径 NA 的增大而减小, 并且与 M^2 因子呈非线性关系.

关键词: 光纤激光, 激光光束质量, 衍射极限倍数 β , M^2 因子

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Jf, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.70.20210281

1 引言

光纤激光器具有阈值低、效率高、结构紧凑、免维护等优点, 在光纤通信、传感、工业加工、国防等多个领域中有巨大的应用潜力^[1-4]. 随着光纤制备、半导体激光器^[5]等相关技术的快速发展, 光纤激光器的输出功率日益增长^[6-8]. 光束质量是高能激光系统的重要性能指标, 因此在追求更高的输出功率的同时, 研究人员也在不断探寻光束质量的评价方法.

目前为止, 针对不同的应用, 人们对光束质量提出了多种定义, 主要包括: 聚焦光斑尺寸、斯特列尔比、远场发散角、衍射极限倍数 β 因子、桶中功率(能量)、光束参数乘积、光束传输因子和 M^2 因子^[9-13]. 其中, M^2 因子同时考虑了近场和远场的光场分布特性, 避免了只使用远场半径或者远场发散角给光束质量的测量带来的不确定性, 被国际标准化组织(ISO)推荐为评价光束质量的重要标准^[14], 目前大多数光纤激光光束质量的评价采用

了 M^2 因子^[15-20], 且已有通用测量设备^[21]. 但是, 当激光光斑呈现非高斯分布时, M^2 因子并不能准确地反映光束质量的优劣^[22]. 如在高能激光束能量输运和激光工业制造等应用场合中, 人们更关注实际光束的远场集中度(即光束可聚焦能力)^[10]. 在此类情形中, 衍射极限倍数 β 因子常作为光束质量的评价标准^[23-28]. 一方面, β 因子能反映光束的能量传输效率和可聚焦能力, 且比 M^2 因子更方便测量, 至今已有较多文献对 β 因子进行了研究^[27-30]; 另一方面, 光纤激光输出的光束并不是严格的高斯分布(即便是基模光束), 到目前为止, 研究光纤激光输出光束 β 因子的相关工作还比较欠缺^[27]. 与其他激光器不同的是, 在光纤激光器中光束被限制在纤芯中传输, 且光纤归一化频率 V 对光纤激光器输出光束的能量集中度和光强分布影响较大^[31], 因此, 需要详细讨论光束质量评价标准中理想光束的选取.

本文利用衍射极限倍数 β 因子作为光纤激光基模(LP_{01} 模)的光束质量评价参数, 根据 LP_{01} 模光强分布的规律采取了新的理想光束定义方式, 分

* 国家自然科学基金(批准号: 61805280)和湖南省自然科学基金(批准号: 2019JJ10005)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhoup203@163.com

别研究了 LP_{01} 模的光束质量 β 因子随归一化频率 V 、纤芯半径 a 和数值孔径 NA 的变化. 目前高功率光纤激光器大都采用掺杂阶跃折射率光纤 (SIF) 作为增益介质, 不失一般性, 本文选取基于 SIF 的激光光束作为研究对象. 以往激光器系统常用 M^2 因子作为光束质量评价标准, 因此, 本文还将 β 因子与 M^2 因子进行对比分析, 并对主要结论进行了合理的解释.

2 理论模型

本节将给出光纤中 LP_{01} 模的光场表达式, 并对适用于光纤激光的光束质量 β 因子和 M^2 因子的计算公式进行分析讨论.

2.1 LP_{01} 模电场分布

高功率光纤激光器所用的 SIF 基本都能满足弱导近似, 因此, 在纤芯半径为 a 的 SIF 中, LP_{01} 模的电场分布为^[32]

$$E(r) = \begin{cases} J_0\left(\frac{U}{a}r\right), & r \leq a, \\ \frac{J_0(U)}{K_0(W)} K_0\left(\frac{W}{a}r\right), & r > a, \end{cases} \quad (1)$$

式中, J_0 和 K_0 分别表示 0 阶第一类贝塞尔函数和第二类修正贝塞尔函数. U 和 W 的定义为

$$U = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{eff}^2}, \quad (2)$$

$$W = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{eff}^2 - n_{cl}^2}, \quad (3)$$

式中, λ 表示波长, n_{co} 和 n_{cl} 分别表示纤芯和包层折射率, n_{eff} 为 LP_{01} 模的等效折射率, 归一化频率 V 可表示为 $V^2 = U^2 + W^2$, 数值孔径 NA 可表示为 $NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}$. 同时, U 和 W 满足特征方程^[33]:

$$U \frac{J_1(U)}{J_0(U)} = W \frac{K_1(W)}{K_0(W)}. \quad (4)$$

值得说明的是, 当 LP_{01} 模的 $V < 1.5$ 时, 波导结构不能有效地将光能量约束在纤芯内, 导致大部分光场分布在包层中, 而使光场偏离了高斯分布^[31], 且 $V < 1.5$ 的光纤纤芯尺寸很小, 不适用于高功率激光的产生. 为了抑制非线性效应、热透镜效应等效应的产生, 高功率光纤激光器的纤芯尺寸可能较大, 此时光纤已不再是单模, 即 $V > 2.405$. 为了满足光纤传输、工业加工等应用的需求, 可以通过模

式控制手段或者采用特种光纤, 在多模光纤中实现等效单模输出^[34,35]. 综上所述, 本文中归一化频率 V 的取值范围在 1.5—20.0, 将多模光纤所支持的基模情况考虑在内.

2.2 衍射极限倍数 β 因子

衍射极限倍数 β 因子定义为^[36]

$$\beta = \theta/\theta_0, \quad (5)$$

式中, θ 和 θ_0 分别表示实际光束和理想光束的远场发散角 (半角). 一般情况下, $\beta > 1$, β 越小, 实际光束远场能量集中度越高, 光束质量越好. 然而, 采用不同的理想光束选取标准时, 会得到 $\beta < 1$ 的结果^[27]. 文献^[27] 分别选取纤芯半径为圆形实心均匀光束和高斯光束的半径作为理想光束, 对两种计算方式得到的 β 因子进行对比. 分析指出, LP_{01} 模的束腰比纤芯半径小, 将高斯光束作为理想光束计算得到的 β 值并不能准确反映 LP_{01} 模的光束质量. 因此, 在实际测量中, 作者提出以 LP_{01} 模作为理想光束, 计算不同光纤参数下光纤激光器的 β 因子. 实际上, LP_{01} 模取不同归一化频率 V 时其远场聚焦能力是不同的. 根据 LP_{01} 模的光强分布变化规律, 本文采用圆形实心均匀光束 (其半径为包含 LP_{01} 模 99% 能量的环围半径 (r_{99})), 对 LP_{01} 模的光束质量 β 因子进行了研究. 归一化频率 V 取不同值时, 纤芯半径 a 和 r_{99} 的变化如图 1 所示. 由图可知, 当 $V < 2$ 时, LP_{01} 模的较大部分能量分布在纤芯外, r_{99} 是纤芯半径的一倍以上, 特别地, 当 $V = 1.5$ 时, 圆形实心均匀光

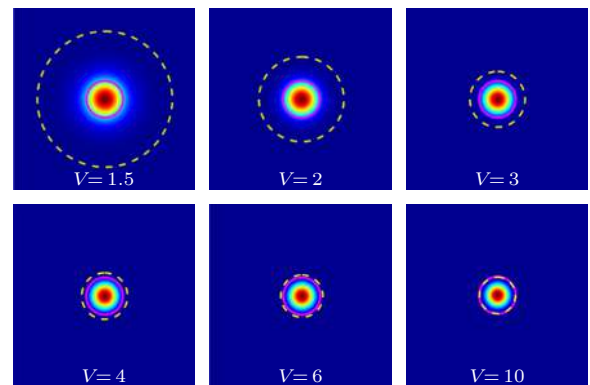


图 1 不同归一化频率 V 下, 纤芯半径 (洋红色实线) 和包含 LP_{01} 模 99% 能量的环围半径 (黄色虚线) 示意图

Fig. 1. Schematic of core radius (magenta solid line) and the radius containing 99% of the energy of LP_{01} mode (yellow dotted line) for different values of normalized frequency V .

束的半径约为纤芯半径的 3.7 倍; 当 $V > 6$ 时, 圆形实心均匀光束的半径约等于纤芯半径. 半径为 r_{99} 的圆形实心均匀光束对应的远场发散角为 $\theta_0 = 0.61\lambda/r_{99}$ ^[10], 实际光束远场发散角 θ 的定义为 $\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z}$, 实测时通常用近场方法测量远场发散角^[26]. 也就是说, 将光束用焦距为 f 的无像差聚焦光学系统进行聚焦, 在像方焦平面测得聚焦光斑半径 w_f , 则远场发散角为 $\theta = w_f/f$. 因此, 只要在焦平面测出光斑半径 w_f 便能求得 β 因子的值.

在远场平面处, 本文将分别采用环围功率 (能量) 桶半径定义和二阶矩束宽定义^[36] 对 β 因子的计算进行比较分析. 环围功率也叫作桶中功率 (power in the bucket, PIB), 用来表征光束的能量集中度, 它反映了激光束的远场聚焦能力. 其定义为给定“桶”半径 b 内的激光功率占总功率的百分比^[13]:

$$\text{PIB} = \frac{\int_{-b}^b \int_{-b}^b |E(x, y)|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy}, \quad (6)$$

对于任意电场分布 $E(x, y)$, “桶”半径 b 称为其环围功率桶半径, 常用的 PIB = 86.5%, 83.8%. 圆形实心均匀光束远场发散角 $\theta_0 = 0.61\lambda/a$ 内所占能量比为 83.8%^[10], 因此本文以 83.8% 环围功率桶半径作为聚焦光斑半径 w_f .

光束重心位置 \bar{j} 和二阶矩束宽 w_j 分别定义为^[37]

$$\bar{j} = \frac{\iint j |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy}, \quad (7)$$

$$w_j^2 = \frac{4 \iint (j - \bar{j})^2 |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy}, \quad (8)$$

式中 $j = x, y$, \bar{x} 和 \bar{y} 分别代表 x 和 y 方向光束重心位置, w_x 和 w_y 分别代表 x 和 y 方向光束二阶矩束宽.

2.3 M^2 因子

M^2 因子的定义为^[38]

$$M^2 = \frac{\text{实际光束束腰宽度} \times \text{远场发散角}}{\text{理想高斯光束束腰宽度} \times \text{远场发散角}}. \quad (9)$$

该定义要求光束束腰宽度按照 (8) 式所示二阶矩定义进行计算. 对于理想基模高斯光束, 其束腰宽度和远场发散角的乘积为 λ/π . 通常情况下, 实际

光束 $M^2 > 1$, M^2 值越大, 实际光束越偏离理想基模高斯光束分布, 光束质量越差.

3 数值模拟结果及分析

图 2 为不同归一化频率 V 下, LP₀₁ 模和理想光束在初始平面和焦平面的归一化一维光强分布. 为了方便对比焦平面处的光斑大小, 计算中出射面的均匀平面波和 LP₀₁ 模的总能量相同, 焦平面的光强分布以均匀平面波的最大光强进行归一化. 由图可知, 当归一化频率 V 增大时, 初始平面处均匀平面波的半径减小, 也就是说, LP₀₁ 模的光强分布集中度增大 (见图 2(a1)—(a4)). 图 2(b1)—(b4) 中竖直蓝色实线和洋红色虚线分别表示 LP₀₁ 模和理想光束的环围功率桶半径位置, 从图中可看出, 与理想光束相比, LP₀₁ 模的环围功率桶半径在 V 较小时略大于理想光束, 随着 LP₀₁ 模归一化频率 V 增大, 其环围功率桶半径逐渐小于理想光束, 远场能量集中度逐渐大于理想光束.

当远场半径采用不同定义方式时, β 因子随归一化频率 V 的变化曲线如图 3 所示. 由图 3 可知, 当理想光束选取包含 LP₀₁ 模 99% 能量的圆形实心均匀光束时, LP₀₁ 模的 β 值随着 V 的增大而减小, 当到达极小值后 β 值又缓慢增大. 该变化趋势说明随着归一化频率的增大, LP₀₁ 模的远场聚焦能力迅速提高, 后以微小的幅度逐渐减弱, 当 $V > 5$ 时, LP₀₁ 模的光场分布被限制在纤芯中并趋于稳定. 图 3 中 β 取最小值的位置 ($V = 7.6$) 已用实心圆点标识出来, 该点处 LP₀₁ 模的远场聚焦能力最强, 当以二阶矩束宽定义远场半径时 $\beta_{\min} = 0.7439$; 当以环围功率半径定义远场半径时 $\beta_{\min} = 0.7119$. 在 $V > 5$ 时 LP₀₁ 模有着较好的远场聚焦能力, 并且此时的 β 值变化幅度较小, 在二阶矩束宽和环围功率半径定义下的 β 值分别处在 0.75 和 0.72 附近. 此外, 以二阶矩束宽定义的 β 值略大于环围功率半径定义的 β 值, 实际测量中, 可以根据测量方法和误差大小选取合适的远场光斑光束半径定义方式. 特别地, 当 $V > 1.8$ 时, β 值小于 1 (见图 3 绿色区域), 结合图 1 可知, 当 V 小于 1 时, 表示 LP₀₁ 模的远场能量集中度大于理想光束, 随着归一化频率 V 的增大, LP₀₁ 模 β 值减小, 远场能量集中度增大, 光束质量越好. 值得说明的是, 本文中 LP₀₁ 模小于 1 时并不是超衍射的情形, 该结果

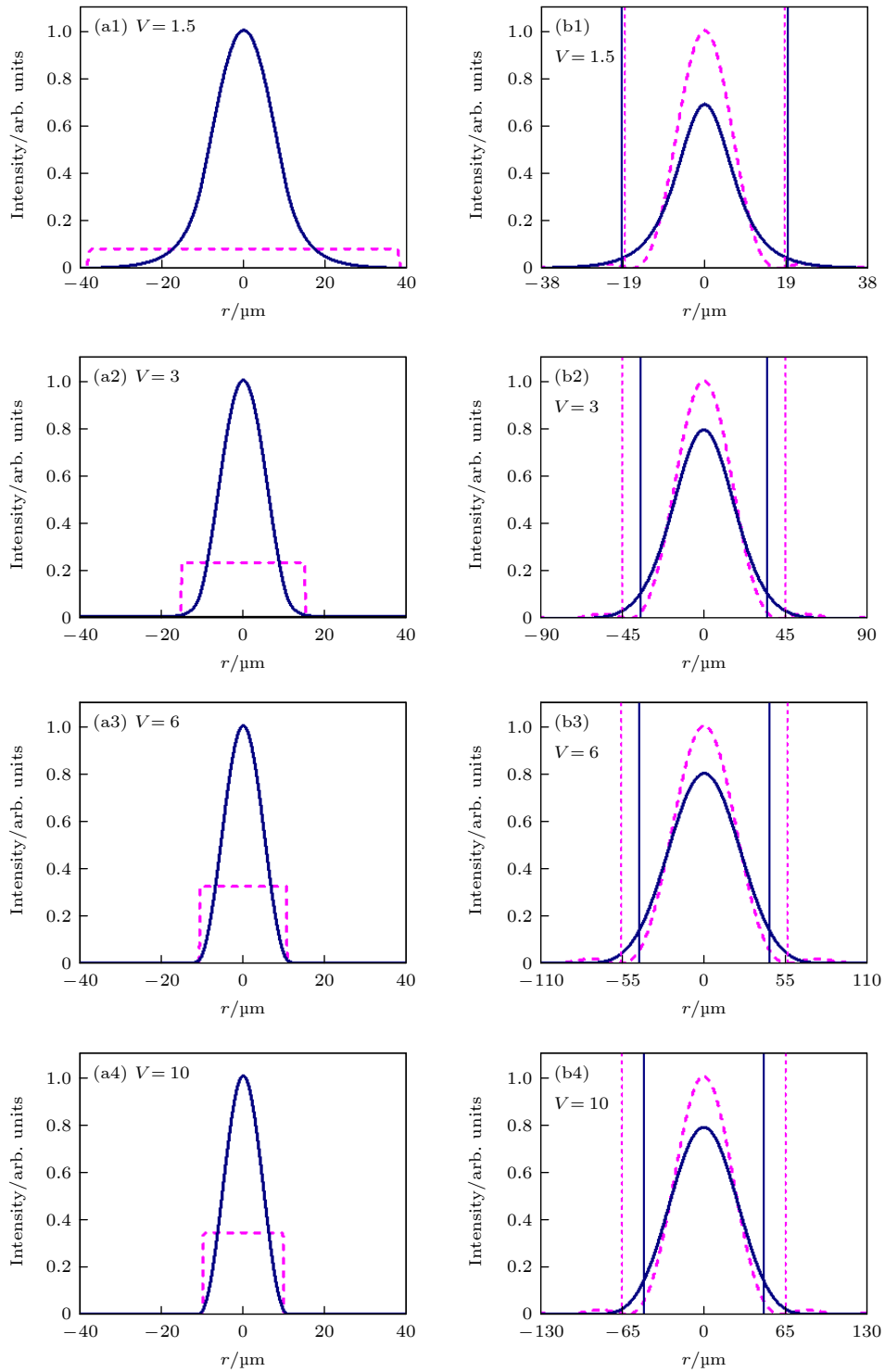


图 2 不同归一化频率 V 下, LP₀₁ 模 (蓝色实线) 和理想光束 (洋红色虚线) 在出射面 ((a1)—(a4)) 和焦平面 ((b1)—(b4)) 的一维光强分布

Fig. 2. For different values of normalized frequency V , 1D intensity distributions of LP₀₁ mode (blue solid line) and ideal beam (magenta dotted line) in the initial plane ((a1)—(a4)) and focal plane((b1)—(b4)).

是由于理想光束选取标准的不同所造成的. Yan 等 [27] 曾分析了双包层光纤在理想光束分别以均匀平面波和高斯光束定义下的光束质量因子 β 取值,

两种不同的定义方式其光束质量 β 值差别较大, 在均匀平面波作为理想光束时其 β 值小于 1, 这是由于高斯光束与平面波传输特性的不同造成的.

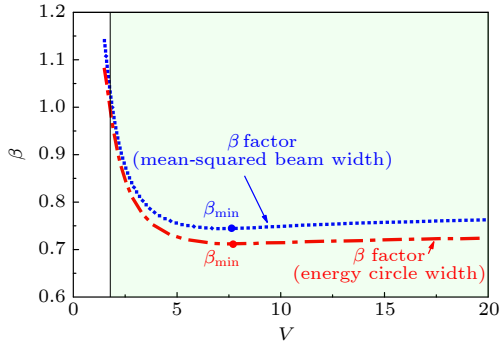


图3 不同半径定义下 β 因子随归一化频率 V 的变化关系
Fig. 3. β factor versus normalized frequency V for different definitions of radius.

接下来, 分别研究纤芯半径 a 和数值孔径 NA 对 β 因子的影响. 图 4(a), (b) 分别为 β 因子随纤芯半径 a 和数值孔径 NA 变化曲线图. 由图 4(a) 可知, 固定数值孔径 NA 不变时, β 因子随纤芯半径 a 增大先减小后缓慢增大. 当纤芯半径 a 小于 $20\ \mu\text{m}$ 时, 纤芯半径的变化对 β 因子的影响较大. 由图 4(b) 可知, 固定纤芯半径 a 不变时, β 因子随

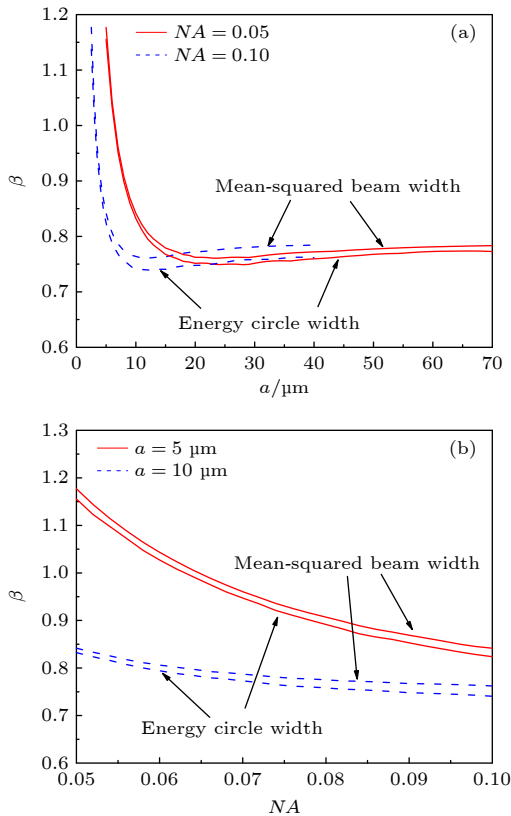


图4 β 因子随纤芯半径 a (a) 和数值孔径 NA (b) 的变化关系图
Fig. 4. β factor versus core radius a (a) and numerical aperture NA (b).

数值孔径 NA 的增大而减小. 纤芯半径 a 越小, 数值孔径 NA 的变化对 β 因子的影响越大. 事实上, 归一化频率 V 与纤芯半径和数值孔径成正比, 纤芯半径或数值孔径的增大都会造成归一化频率 V 的增大, 因此 β 因子随纤芯半径和数值孔径的变化趋势和 β 因子随归一化频率 V 的变化趋势一致.

从 β 因子评价角度来看, 以上计算结果表明光纤激光 LP_{01} 模的光束质量 β 因子随着归一化频率 V 先减小后缓慢增大, 当 $V > 1.8$ 时 β 值小于 1, 并且在 $V > 5$ 时基本保持不变; 从 M^2 因子评价角度看, LP_{01} 模的 M^2 因子始终大于 1(图 5(a)), 并且 M^2 因子随着归一化频率 V 的增大先减小后增大, 与文献 [32, 39] 的结果一致. 这就表明当选用不同的理想光束和光束质量评价标准时, 得到了不同的结论. 将图 5(a) 中同一归一化频率 V 所对应的 M^2 和 β 值表示在图 5(b) 中, 得到 β 因子随 M^2 因子的变化关系图, 由图可知 LP_{01} 模的 β 因子和 M^2 因子的变化关系图呈非线性关系, 也就是说, M^2 因子和 β 因子并无一一对应关系.

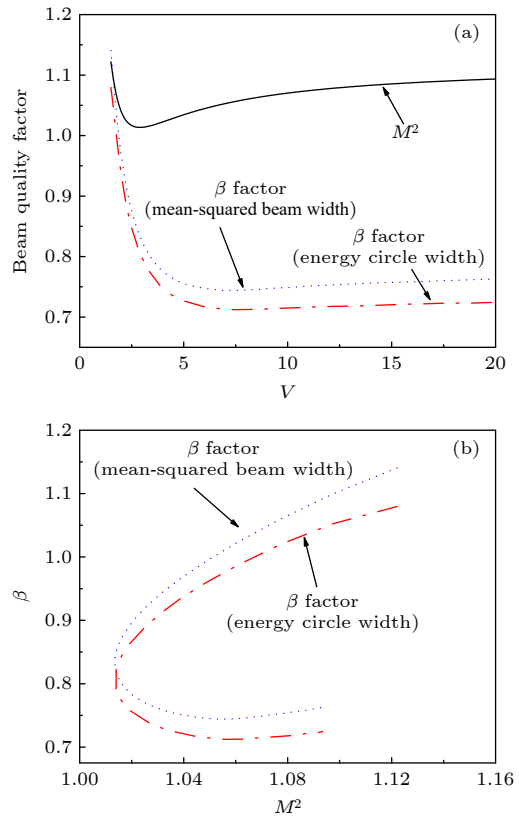


图5 (a) 光束质量因子随归一化频率 V 和 (b) β 因子随 M^2 因子的变化关系图
Fig. 5. (a) Beam quality factor versus normalized frequency V and (b) β factor versus M^2 factor.

众所周知, M^2 因子是以基模高斯光束作为理想光束评判实际光束的光束质量, M^2 因子越接近 1, 光束的传输特性越接近基模高斯光束, 一般认为其光束质量越好. 而 β 因子是评价光束能量集中度的物理量, 其远场发散角越小, 认为其光束质量越好. 因此, 对于非基模高斯光束来说, 两种评价标准无绝对的联系, 具体应采用哪种评价标准评价光束质量需结合实际应用需求进行讨论. 对于高功率激光能量输运、对靶目标进行损伤、惯性约束核聚变驱动器、工业材料激光加工等应用场合中, 考虑采用 β 因子作为光束质量评价标准; 对于激光通信、光束经过望远镜系统等应用中, 考虑采用 M^2 因子作为光束质量评价标准.

4 结 论

本文研究了阶跃折射率光纤中 LP_{01} 模的光束质量 β 因子变化规律. 结果表明: 当理想光束选取包含 LP_{01} 模 99% 能量的圆形实心均匀光束时, 随着归一化频率 V 的增大, LP_{01} 模的 β 值先减小后缓慢增大, 能量集中度增大. 特别地, 当 $V > 1.8$ 时, LP_{01} 模的 β 值小于 1, 其光束质量要优于理想光束; 当 $V > 5$ 时, β 值基本保持不变. 固定数值孔径 NA 不变时, β 因子随纤芯半径 a 增大而减小, 并且在纤芯半径 a 小于 $20 \mu\text{m}$ 时, 纤芯半径的变化对 β 因子的影响较大; 固定纤芯半径 a 不变时, β 因子随数值孔径 NA 增大而减小, 纤芯半径 a 越小, 数值孔径 NA 的变化对 β 因子的影响越大. 此外, 本文研究了 LP_{01} 模 β 因子和 M^2 因子之间的关系, 结果显示 β 因子和 M^2 因子呈非线性关系, 即 LP_{01} 模的 β 因子和 M^2 因子并无一一对应的关系. 以上结果可为高能光纤激光系统设计提供重要参考.

参考文献

[1] Shi W, Fang Q, Zhu X, Norwood R A, Peyghambarian N 2014 *Appl. Opt.* **53** 6554
 [2] Zervas M N, Codemard C A 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **20** 0904123
 [3] Zhou J, Wang P, Zhou P 2017 *Chin. J. Lasers* **44** 0201000 (in Chinese) [周军, 王璞, 周朴 2017 中国激光 **44** 0201000]
 [4] Yang Y Q, Wu S B, Zhang Y, Zhu Y Q 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 0500012 (in Chinese) [杨永强, 吴世彪, 张越, 朱勇强 2020 中国激光 **47** 0500012]
 [5] Chen L H, Yang G W, Liu Y X 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 0500001 (in Chinese) [陈良惠, 杨国文, 刘育衡 2020 中国激光

47 0500001]
 [6] Jauregui C, Limpert J, Tuennermann A 2013 *Nat. Photonics* **7** 861
 [7] Tao R M, Zhou P, Wang X L, Si L, Liu Z J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085202 (in Chinese) [陶汝茂, 周朴, 王小林, 司磊, 刘泽金 2014 物理学报 **63** 085202]
 [8] Yang C S, Xu S H, Zhou J, He B, Yang Y F, Qu H W, Zhao Z D, Yang Z M 2017 *Scientia Sin. Technol.* **47** 1038 (in Chinese) [杨昌盛, 徐善辉, 周军, 何兵, 杨依枫, 渠红伟, 赵智德, 杨中民 2017 中国科学: 技术科学 **47** 1038]
 [9] Siegman A E 1993 *Laser Resonators and Coherent Optics: Modeling, Technology, and Applications* Los Angeles, CA, United States, August 13, 1993 pp1-12
 [10] Du X W 1997 *Chin. J. Lasers* **24** 327 (in Chinese) [杜祥琬 1997 中国激光 **24** 327]
 [11] Liu Z J, Zhou P, Xu X J 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 773 (in Chinese) [刘泽金, 周朴, 许晓军 2009 中国激光 **36** 773]
 [12] Su Y, Wan M 2004 *High Energy Laser System* (Beijing: National Defense Industry Press) pp39-50 (in Chinese) [苏毅, 万敏 2004 高能激光系统 (北京: 国防工业出版社) 第39—50页]
 [13] Feng G Y, Zhou S H 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1643 (in Chinese) [冯国英, 周寿桓 2009 中国激光 **36** 1643]
 [14] International Organization for Standardization. Laser and Laser-Related Equipment: Test Methods for Laser Beam Parameters, Beam Width, Divergence Angle and Beam Propagation Factor 1999 ISO11146
 [15] Ophir-Spiricon's M2-200 s Automated M2 Laser Beam Propagation Analyzer Enhances Robust Packaging for 24/7 Operation, Gary Wagner <https://www.ophiropt.com/laser-measurement/node/9283> [2021-6-9]
 [16] Beier F, Hupel C, Nold J, Kuhn S, Hein S, Ihring J, Sattler B, Haarlammert N, Schreiber T, Eberhardt R 2016 *Opt. Express* **24** 6011
 [17] Flores A, Robin C, Lanari A, Dajani I 2014 *Opt. Express* **22** 17735
 [18] Gray S, Liu A, Walton D T, Wang J, Li M J, Chen X, Ruffin A B, DeMeritt J A, Zenteno L A 2007 *Opt. Express* **15** 17044
 [19] Ma P F, Tao R M, Su R T, Wang X L, Zhou P, Liu Z Z 2016 *Opt. Express* **24** 4187
 [20] Huang L J, Wang W L, Leng J Y, Guo S F, Xu X J, Cheng X A 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 33
 [21] Chen Z L, Lei C M, Wang Z F, Zhou P, Ma Y X, Xiao H, Leng J Y, Wang X L, Xu X J, Chen J B, Liu Z J 2018 *Chin. J. Lasers* **45** 324 (in Chinese) [陈子伦, 雷成敏, 王泽锋, 周朴, 马阎星, 肖虎, 冷进勇, 王小林, 许晓军, 陈金宝, 刘泽金 2018 中国激光 **45** 324]
 [22] Siegman A E 1998 *Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues* Washington D.C., United States, January 1, 1998 pp184-199
 [23] Chen Z Z, Xu Y T, Guo Y D, Wang B S, Xu J, Xu J L, Gao H W, Yuan L, Yuan H T, Lin Y Y 2015 *Appl. Opt.* **54** 5011
 [24] Sean Ross T 2013 *Laser Beam Quality Metrics* (Bellingham: SPIE Press) pp42-51
 [25] Liu Z J, Lu Q S, Zhao Y J 1998 *Chin. J. Lasers* **25** 193 (in Chinese) [刘泽金, 陆启生, 赵伊君 1998 中国激光 **25** 193]
 [26] Gao W, Wang Y P, Li B 2003 *Infrared Laser Eng.* **32** 61 (in Chinese) [高卫, 王云萍, 李斌 2003 红外与激光工程 **32** 61]
 [27] Yan P, Wang X J, Gong M L, Xiao Q R 2016 *Appl. Opt.* **55** 6145
 [28] Tan Y, Li X Y 2012 *High-Power Lasers and Applications VI* Beijing, China November 5-7, 2012 p85511 C
 [29] Ji Z Y, Zhang X F 2017 *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology* Beijing, China, October

- 28–30, 2017 p10619
- [30] Gao W 2003 *Acta Photon. Sinica* **32** 1038 (in Chinese) [高卫 2003 光子学报 **32** 1038]
- [31] Zhou P 2018 *High Power Laser Part. Beams* **30** 060201 (in Chinese) [周朴 2018 强激光与粒子束 **30** 060201]
- [32] Belanger P A 1993 *Opt. Eng.* **32** 2107
- [33] Liao Y B, Jin H M 2000 *Fiber Optics* (Beijing: Tsinghua University Press) p28 (in Chinese) [廖延彪, 金慧明 1992 光纤光学 (北京: 清华大学出版社) 第28页]
- [34] Jain D, Jung Y, Kim J, Sahu J K 2014 *Opt. Lett.* **39** 5200
- [35] Marciante J R, Roides R G, Shkunov V V, Rockwell D A 2010 *Opt. Lett.* **35** 1828
- [36] Lü B D 2003 *Laser Optics* (Beijing: Higher Education Press) p76 (in Chinese) [吕百达 1992 激光光学 (北京: 高等教育出版社) 第76页]
- [37] Rao R Z 2005 *Chin. J. Lasers* **32** 53 (in Chinese) [饶瑞中 2005 中国激光 **32** 53]
- [38] Siegman A E 1990 *Optical Resonators* Los Angeles, CA, United States, June 1 pp1–14
- [39] Yoda H, Polynkin P, Mansuripur M 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 1350

β factor of fundamental mode of fiber laser beam*

Zhang Yu-Qiu Huang Liang-Jin Chang Qi An Yi
Ma Peng-Fei Leng Jin-Yong Zhou Pu[†]

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 6 February 2021; revised manuscript received 3 June 2021)

Abstract

Owing to the advantages of high conversion efficiency, compactness and reliability, the fiber lasers are widely applied to many scientific areas, such as optical fiber communication, sensing and industrial processing. Beam quality is an important criterion for evaluating the performances of high-energy laser beam systems. Therefore, researchers have been constantly searching for the methods of evaluating the beam quality while pursuing higher output power. Until now, the researchers have proposed many definitions of beam quality. In practice, the evaluation parameters of beam quality include focused spot size, Strehl ratio, far-field divergence angle, diffraction limited β factor, energy circle rate, beam parameter product, and M^2 factor. Among them, the M^2 factor is the most suitable for the assessment of beam quality in both the near-field and far-field, which avoids the inaccuracy of the measurement of the beam quality only by the far-field radius or the far-field divergence angle. Thus, the M^2 factor is recognized as an important standard for evaluating beam quality by the International Organization for Standardization (ISO). However, it proves that the M^2 factor is not suitable for non-Gaussian distribution spot. On the other hand, in applications of high-energy laser beam transmission and laser industrial manufacturing, people pay more attention to the focusability of laser energy. In this case, the diffraction limited β factor is more suitable for evaluating beam quality. In this paper, we investigate the beam quality of LP₀₁ mode of fiber laser by β factor, and a circular and solid homogenous beam with the energy of 99% of LP₀₁ mode is considered as an ideal beam. The relationship between β factor and the parameters of LP₀₁ mode in a step-index fiber is studied theoretically. It is found that the value of the beam quality β factor is lower than 1 when the normalized frequency V is bigger than 1.8, and the far-field energy focusability of LP₀₁ mode is better than the case of ideal beam. Besides, the value of β factor decreases with the increase of normalized frequency V , core radius a or numerical aperture NA . In addition, the relationship between M^2 factor and β factor is non-linear.

Keywords: fiber lasers, laser beam quality, diffraction limited β factor, M^2 factor

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Jf, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.70.20210281

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61805280) and the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant No. 2019JJ10005).

[†] Corresponding author. E-mail: zhoup203@163.com