

Theoretical Analysis of the Output of a Diode Face-Pumped Nd:YVO₄ Slab Laser with Periodic Gain

Ying Zhou¹, Yu Dai¹, Jun Liu¹, Shufen Chen¹, Jiabin Chen², Jianguo Xin^{1*}

¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing

²School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing

Email: *xinjgbit@163.com

Received: Aug. 17th, 2012; revised: Aug. 29th, 2012; accepted: Sep. 6th, 2012

Abstract: The theoretical analysis of the output of a diode face-pumped Nd:YVO₄ slab laser structure with periodic gain is presented, with which in-phased locked output with highly spatially suppressed single-peak intensity distribution could be obtained. We demonstrate respectively that the intensity of the far field distribution with the filling factor of the periodic gain being 60%, 70%, 80%, 90% and obtain a suppressed far-field single peak with barely side-lobes. We discuss the difference of the far-field single-peak intensity distribution between the uniform periodic gain and non-uniform periodic gain, and get the result that the non-uniform periodic gain distribution makes the far-field single-peak rough and asymmetrical.

Keywords: Phase Locking; Periodic Gain; Nd:YVO₄ Slab; LD Face-Pumping

一种新型 LD 大面泵浦周期性增益 Nd:YVO₄ 板条晶体的理论分析

周英¹, 戴玉¹, 刘军¹, 陈淑芬¹, 陈家斌², 辛建国^{1*}

¹北京理工大学光电学院, 北京

²北京理工大学自动化学院, 北京

Email: *xinjgbit@163.com

收稿日期: 2012年8月17日; 修回日期: 2012年8月29日; 录用日期: 2012年9月6日

摘要: 提出了一种新型的 LD 大面泵浦周期性增益 Nd:YVO₄ 板条晶体的激光器结构, 这种结构能产生远场空间压窄的同相锁定极窄单峰输出; 分析了周期性增益源的填充因子分别为 60%, 70%, 80%, 90% 时对远场输出光斑强度分布的影响, 填充因子为 90% 时获得了几乎无旁瓣的远场理想光斑分布; 对比了周期性增益源均匀分布与非均匀分布时, 远场输出光斑光强分布的差异, 结果显示周期性增益源的非均匀分布将导致远场输出光斑的强度分布图形不光滑, 且对称性降低。

关键词: 锁相; 周期性增益; Nd:YVO₄ 板条晶体; LD 大面泵浦

1. 引言

LD 泵浦固体激光器由于具有结构紧凑, 转换效率高, 使用寿命长, 光束质量好等优点, 成为了目前激光领域的研究热点^[1-4]。对于单通道 LD 泵浦固体激

光器, 高功率的激光输出需要高功率的泵浦源, 但泵浦源的功率越高, 激光器的热致双折射与热透镜等热效应对激光晶体的影响就会越大, 从而导致输出激光的功率降低, 同时光束质量变差^[5-7]。为了克服单通道固体激光器在提高输出激光功率与获得高光束质量的激光输出的局限, 同相锁定周期性增益激光器得以

*通讯作者。

发展。同相锁定周期性增益激光器技术^[8,9]，从广义上讲，就是将 N 个一维线性阵列的增益通道，或者 MN 个二维面阵列的增益通道，采用一定的相干合成技术实现相位锁定，输出光场相干叠加，从而实现输出光远场光束空间压缩和获取高亮度激光输出的技术。相比于单通道结构激光器，同相锁定周期性增益激光器的远场光束的中心光密度可以达到 N^2 倍，同时输出光束发散角能压窄到近衍射极限。同相锁定周期性增益激光器的独特优势引起了国内外学者极大的兴趣，许多关于同相锁定周期性增益激光器的技术与激光结构被提出，如光纤耦合的 LD 端泵腔内空间滤波结构^[10]和 Talbot 腔效应^[11]。

本文提出了一种新的同相锁定周期性增益激光结构-LD 大面泵浦周期性增益 Nd:YVO₄ 板条晶体结构；理论计算了周期性增益源的填充因子分别为 60%，70%，80%，90%时的输出激光的远场强度分布图形；分析了周期性增益源均匀分布与非均匀分布时输出激光的远场强度的变化。

2. 实验结构

图 1 为 LD 大面泵浦周期性增益 Nd:YVO₄ 板条晶体结构的示意图。LD 垂直叠阵的输出泵浦光经由四个柱面镜与一个板条波导组成的光束整形系统后，沿 y 方向光强分布均匀，沿 z 方向具有固定填充因子(A/D)光分布的周期性增益，然后大面泵浦 Nd:YVO₄ 板条晶体。周期性增益泵浦源产生周期性谐振激光分布，相邻周期间的激光光场漏模耦合形成相干锁定，从而产生远场压窄单峰输出。激光器谐振腔为平平腔结构，晶体另一大面冷却。

为了实现相邻单元间的相干锁定，周期性增益泵浦的单元间的间距 D 需要足够小，使得相邻激光光场存在重叠。如果相邻单元的光场没有重叠，激光器无法相干，输出激光为各个单元输出光的空间重加，远场光强度密度与泵浦源的周期数成正比，光源也无法聚焦或者准直；对于相干锁定的激光器，相邻单元间的相位锁定，远场光强度密度与泵浦源的周期数的平方成正比，远场发散角与泵浦源的周期数成反比。图 2 为非相干激光器与相干锁定激光器的近场，远场输出激光光场强度沿 z 方向的分布图，横轴为 z 独立，远场发散角很大；图 2(a-2)和图 2(b-2)显示，方向，竖轴为光场强度。由图 2(a-1)和图 2(b-1)可知，

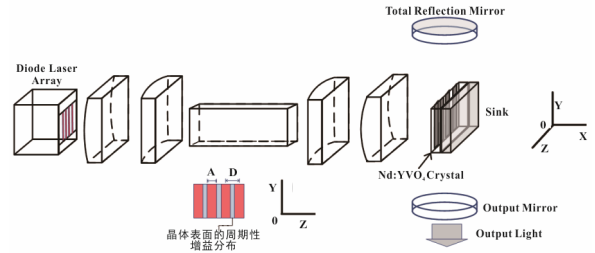


Figure 1. The schematic of the diode face-pumped solid-state laser
图 1. LD 大面泵浦周期性增益 Nd:YVO₄ 板条晶体结构的示意图

非相干周期性增益激光器的各个单元在近场中相互相干锁定周期性增益激光器的各个单元相互耦合，远场光束发散角极窄，远场光束中心光密度很高。

3. 填充因子的影响分析

周期性增益的填充因子(A/D)对有效实现激光器的有效锁定影响很大。当填充因子达到 100%时，激光振荡阈值最低，谐振腔中高阶模可能起振，高阶模会使谐振腔内损耗加大，输出激光光束质量变差。降低填充因子能防止高阶模的产生。但是，填充因子的减小会影响输出激光远场光强的分布。下文模拟仿真了填充因子分别为 60%，70%，80%，90%时的输出激光的远场强度分布图形。

根据论文^[12-15]中阐述的 N 元锁相阵列激光光场(如图 3 所示)分布耦合公式可知，沿 x 方向传播的光场强度 $E(x, y, z)$ 表达式：

$$E(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{n\pi}{N+1}\right) \varepsilon_n(y) \varepsilon_n(z) e^{i\beta x}$$

$$\varepsilon_n(z) = \frac{F}{w_z(x)} \times e^{-\frac{(z-nD)^2}{w_z(x)^2}} \times e^{-i \times k_z \times \left(x + \frac{(z-nD)^2}{2 \times R(x)}\right)}; \quad \varepsilon_n(y) = 1$$

$\varepsilon_n(z)$, $\varepsilon_n(y)$ 分别为第 n 个阵列单元沿 z , y 方向的光强分布函数，由于光场沿 y 方向均匀分布，所以 $\varepsilon_n(y) = 1$ 。 N 为锁相阵列单元总数； F 为常数； β 为光沿 x 方向的传播常数； $w_z(x)$ 是光传播到 x 平面时沿 z 方向的光斑尺寸； D 是两个相邻单元的中心距， k_z 为激光沿 z 方向的传播常数， $R(x)$ 为激光传播到 x 点等相位面的曲率半径。

图 4 所示为周期性增益源间距 D 固定，各单元强度分布均匀时，不同填充因子时对远场光强分布的影响。当填充因子为 90%时，远场光斑为空间压窄的，几乎没有旁瓣的单峰分布。随着填充因子的降低，远

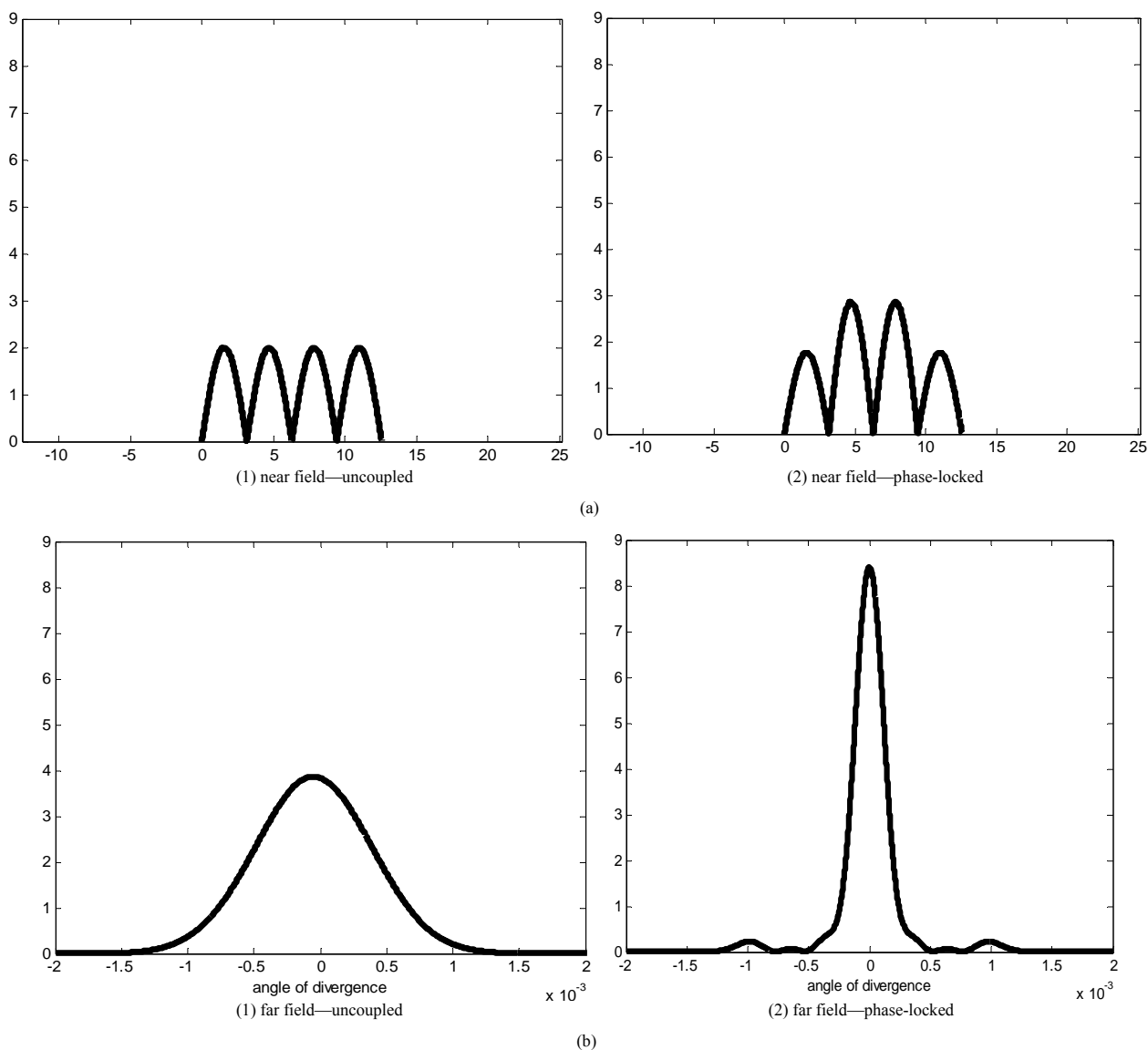


Figure 2. The intensity distributions of uncoupled array and phase-locked array
图 2. 非相干锁定激光器与相干锁定激光的强度分布图

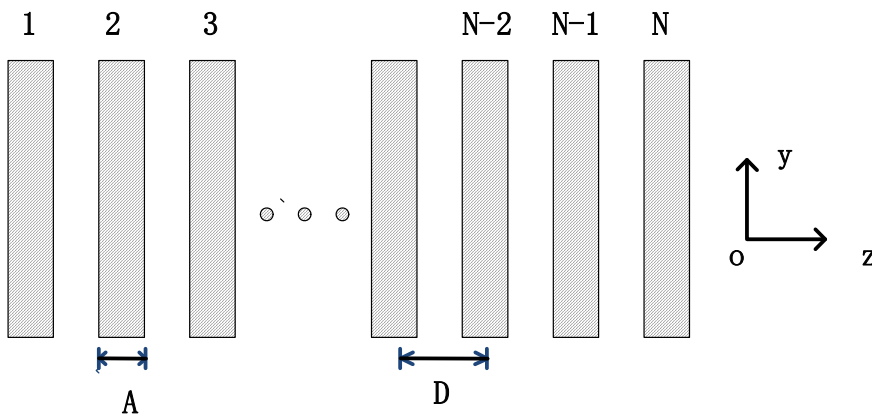


Figure 3. The intensity distributions of a phase-locked array with N elements in y - z plane
图 3. N 元锁相阵列在 y - z 平面的光强分布示意图

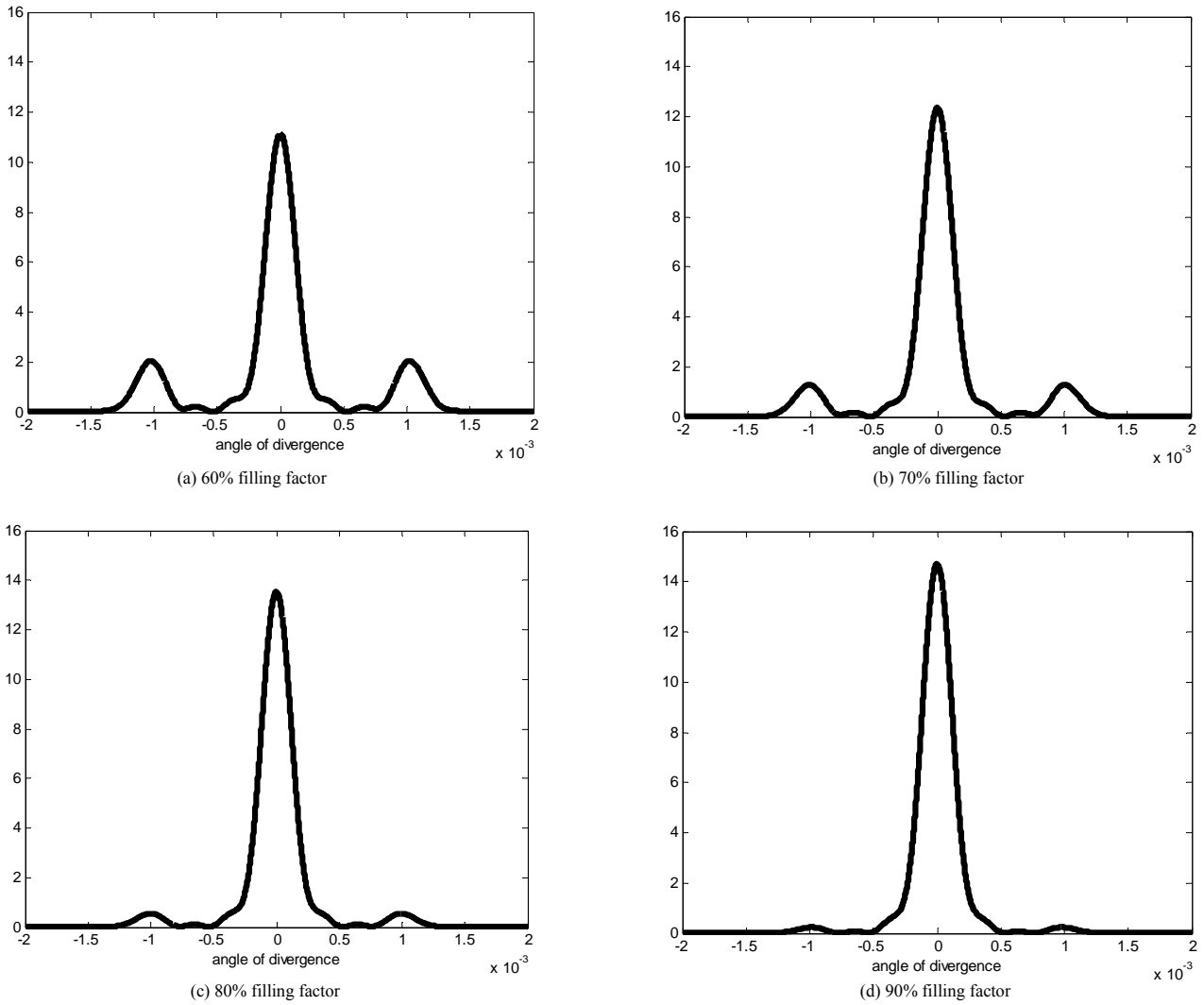


Figure 4. The far-field intensity distribution with different filling factors
图 4. 不同填充因子的远场强度分布

场光斑的中心光强度降低，旁瓣效应加剧。填充因子减小到 60% 时，远场光斑的旁瓣光强达到了中心单峰光强的 20% 左右。

4. 周期性增益源的光强分布均匀性的影响

相干锁相周期性增益激光器输出激光的远场光斑除受增益单元的填充因子影响外，还与周期性增益单元的光强均匀性有关。图 5 为激光器的填充因子为 80% 时，4 个周期的增益单元的光强分布。图 5(a-1)，5(b-1) 显示了 4 个周期单元的周期性增益光强均匀分布时近场与远场的光斑分布，由图可知均匀分布的周期性增益源产生的近场光斑为对称分布，远场光斑对称且光滑；图 5(a-2)，5(b-2) 为 4 个周期单元中一个单

元的光强降到 75% 时锁相激光器的近场，远场光强分布图。图 5(b-2) 所示的远场光斑对称性下降，同时主峰边开始出现凸起。图 5(a-3)，5(b-3) 为 4 个周期单元中一个单元的光强降到 50% 时锁相激光器的近场，远场光强分布图。图 5(b-3) 所示的远场光斑的主峰边上的凸起加大，不对称性明显，光束质量降低。

5. 总结

本文提出了一种新型的 LD 大面泵浦周期性增益 Nd:YVO₄ 板条晶体的激光结构，这种机构能输出激光的远场光斑为高度空间压窄的单峰分布；分析了周期性增益单元间的填充因子对输出激光远场光斑强度的影响，仿真结果显示，但填充因子为 90% 时，远场

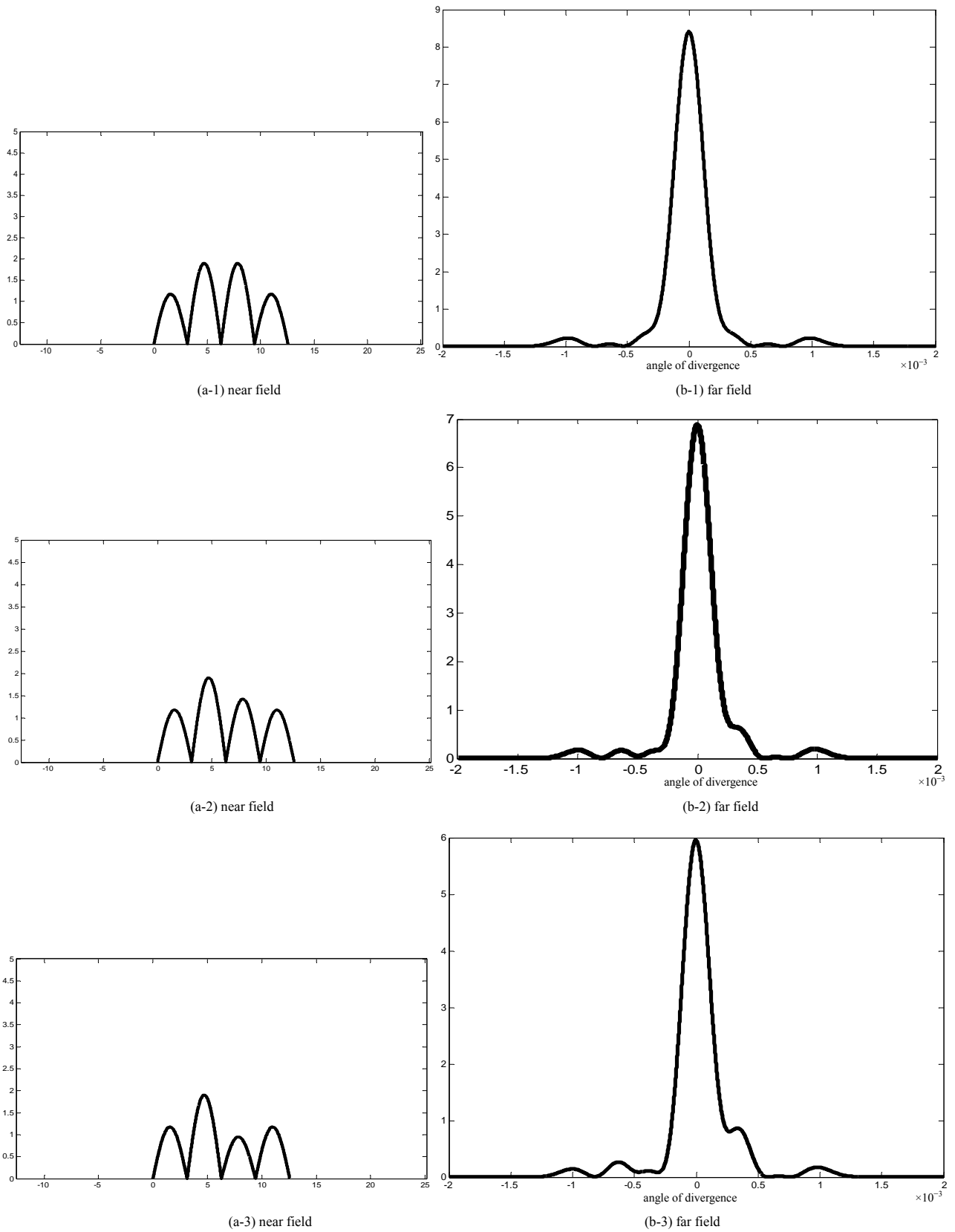


Figure 5. The intensity distribution of the uniform and non-uniform periodic gain
图 5. 光场强度分布图

光斑强度分布为几乎没有旁瓣的高度空间压窄的单峰分布, 填充因子降到 60% 时, 远场光斑的旁瓣效应加大; 对比了周期性增益源均匀分布与非均匀分布时, 远场输出光斑光强分布的差异, 结果显示周期性增益源的非均匀分布将导致远场输出光斑的强度分布图形不光滑, 且对称性降低。

参考文献 (References)

- [1] W. Koechner. Solid-state laser engineering (5th edition). Berlin: Springer-Verlag, 1999: 710-900.
- [2] 闫莹. LD 泵浦板条激光器技术研究[D]. 北京理工大学, 2009.
- [3] Y. Yan, H. L. Zhang, Y. Liu, et al. Near-diffraction-limited 35.4 W laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ slab laser operating at 1342 nm. Optics Letter, 2009, 34(14): 2105-2107.
- [4] C. Li, H. L. Zhang, X. Liu, et al. Laser-diode end-pumped Nd:YVO₄ slab laser under direct pumping into the emitting level. Chinese Physics Letter, 2010, 27(11): 114204-114206.
- [5] Z. Ma, D. J. Li, J. C. Gao, et al. Thermal effects of the diode end-pumped Nd:YVO₄ slab. Optics Communications, 2007, 275(1): 179-185.
- [6] 杨永明. LD 端面泵浦固体激光器中晶体的热效应研究[D]. 西安电子科技大学, 2007.
- [7] 艾庆康, 常亮, 陈檬等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO₄ 热效应分析[J]. 中国激光, 2011, 38: 0402001-1.
- [8] P. F. Sha, J. G. Xin, L. P. Fang, et al. In-phase coupled single-mode gain waveguide array laser. Optics Letter, 2010, 35(14): 2329-2331.
- [9] 沙鹏飞. 射频激励扩散性冷却高光束质量 CO₂ 激光器的技术研究[D]. 北京理工大学, 2011.
- [10] M. Nixon, N. Davidson and M. Fridman. Passive phase locking of 25 fiber lasers. Optics Letter, 2010, 35(14): 1434-1436.
- [11] Y. Kono, M. Takeoka, et al. A coherent all-solid-state laser array using the Talbot effect in a three-mirror cavity. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(5): 607-613.
- [12] K. D. Laakmann, W. H. Steier. Waveguides: Characteristic modes of hollow rectangular dielectric waveguides. Applied Optics, 1976, 15: 1334-1340.
- [13] A. Yariv. Optical electronics in modern communication. Beijing: Electronics Industry Press, 2002.
- [14] W. Streifer, D. R. Scifres. Phased-array lasers with a uniform, stable supermode. Applied Physics Letters, 1986, 49(22): 1496-1500.
- [15] P. F. Sha, X. J. Guo, Y. Zhou, et al. Output mode characteristics of an in-phase locked gain waveguide array CO₂ laser. Chinese Physics B, 2011, 20(8): 084204-084209.