

文章编号: 0258-7025(2009)04-0857-05

二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导慢光研究

张曼 潘炜 闫连山 罗斌 郑狄 徐小果 王亮 刘聪 刘海涛

(西南交通大学信息科学与技术学院信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要 以二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导为研究对象, 通过平面波展开(PWE)法对光在波导中传输时的慢光特性进行了仿真分析, 发现光子晶体的填充因子以及线缺陷中的柱子半径大小决定了慢光导模在光子带隙中的传输特性。随着填充因子的增大, 光子晶体波导的导模群速度迅速减小。缺陷柱的半径大小对导模群速度的影响要强于填充比。通过调整填充因子和缺陷柱半径, 得到了导模群速度小于 $0.01c$ 的波导结构。结合慢光导模的群速度色散(GVD)特性分析, 发现极慢光区域的 GVD 值位于 $10^5 \sim 10^6$ 量级, 能够保证光的高效传输。

关键词 光通信; 光子晶体波导; 带隙; 慢光; 群速度色散

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0857

Research of Slow Light in the Two-Dimensional Triangular Rods Photonic Crystal Line Defected Waveguide

Zhang Man Pan Wei Yan Lianshan Luo Bin Zheng Di Xu Xiaoguo Wang Liang
Liu Cong Liu Haitao

(Center for Information Photonics & Communications, School of Information Science and Technology,
Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract The characteristics of slow light in the 2D triangular rods photonic crystal line defected waveguide have been investigated with plane wave expansion (PWE) method. It is found that the filling factor of the photonic crystal and the radius of defect rods decide the propagating characteristic of the guided mode in the photonic crystal band gap. The group velocity of the guided mode decreases rapidly as increasing the filling factor. The effect of radius of the defect rods on the group velocity is stronger than the former. The waveguide structure with group velocity smaller than $0.01c$ is demonstrated through detuning the filling factor and defect rods size. Group velocity dispersion (GVD) of the slow light is analyzed, and it is found that the magnitude of GVD value in the area of ultra slow light is about $10^5 \sim 10^6$ and propagation with high efficiency can be guaranteed.

Key words optical communications; photonic crystal waveguide; band gap; slow light; group velocity dispersion (GVD)

1 引言

全光缓存器件^[1~4]作为实现下一代光接入网的核心器件之一, 近年来已经成为光通信领域研究的热点。目前一般是通过无源的光纤延时线或有源的光纤环路来模拟光缓存功能的, 但得到的光缓存器

体积较大, 同时也妨碍了缓存容量的扩展。

光子晶体作为一种新材料对其控制光传输能力的研究越来越成为热点^[5,6]。光子晶体的介质周期性结构会产生“光子带隙”(Photonic band gap)^[7,8], 任何频率的光将无法在带隙内传输。如果在二维光

收稿日期: 2008-08-15; **收到修改稿日期**: 2008-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(10174057, 90201011)、教育部科学技术研究重点项目(105148)和宽带光纤传输与通信网络技术教育部重点实验室开放基金(KF2006)资助课题。

作者简介: 张曼(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事光通信和光子晶体等方面的研究。

E-mail: mandy_cheung850529@yahoo.com.cn

导师简介: 潘炜(1959—), 男, 博士, 教授, 主要从事光通信系统的基础理论和非线性光学等方面的研究。

E-mail: weipan80@sina.com

子晶体中移除一行介质柱或改变其半径尺寸,形成光子晶体线缺陷波导,带隙中会产生平坦导模,并且群速度较小,即实现了慢光^[9~11]。用光子晶体慢光实现光缓存,具有其他方式实现慢光不可比拟的优势。光子晶体通过改变结构可以实现对慢光的灵活控制,且作为一种微结构材料,体积微小便于集成,可实现大容量存储;存储时间也可以通过对材料和结构的调节进行调整;便于与光纤系统耦合匹配。三维光子晶体具有更好的光子带隙特性,对于实现慢光具有更大的灵活性和调制性,但其计算的复杂度太高,而制作问题是个最大的困扰。二维光子晶体因其制作相对简单,又存在众多的应用,所以利用二维光子晶体慢光来实现光缓存有着广阔的发展前景。

目前光子晶体慢光研究很多是基于二维光子晶体线缺陷波导结构的,相比光子晶体耦合腔波导,其具有较大的慢光带宽和传输效率。本文以二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导为研究对象,通过平面波展开(PWE)法对光在波导中传输时的慢光特性进行了仿真分析,针对光子晶体的填充因子以及线缺陷中的柱子半径大小对慢光导模在光子带隙中的传输特性影响进行了研究。

2 填充因子对慢光特性的影响

2.1 二维光子晶体线缺陷波导

二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导结构如图 1 所示,由沿着 x 方向减小或增大其中一行介质柱的半径而形成。图 1 中 a 为晶格常数,介质柱介电常数取 $\epsilon_a = 8.9$,背景介质为空气,介电常数 $\epsilon_b = 1$,介质柱半径为 R ,定义基本结构中 $R = 0.2a$,缺陷行介质柱半径为 R_d 。光在光子晶体波导中的传播方向为图 1 中 x 方向。

光子晶体线缺陷波导(PCW)中单一导模的群速度可以由色散曲线计算获得

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n_g} \quad (1)$$

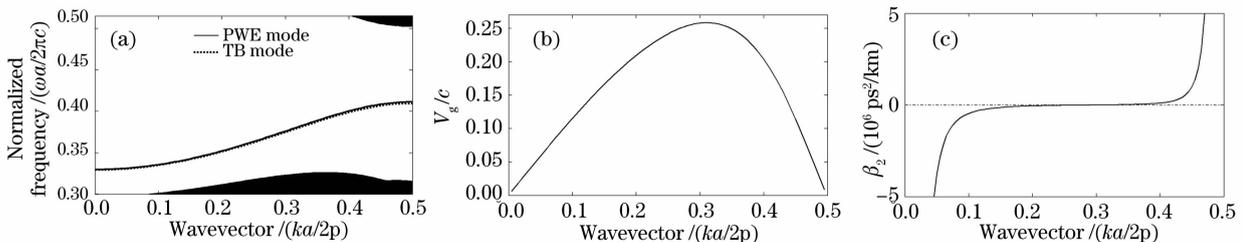


图 2 $R=0.2a$, $R_d=0.13a$ 时所对应的导模色散曲线(a);群速度曲线(b);GVD 系数曲线(c)

Fig. 2 Guided mode dispersion (a); group velocity (b); GVD (c) of the structure with $R=0.2a$, $R_d=0.13a$

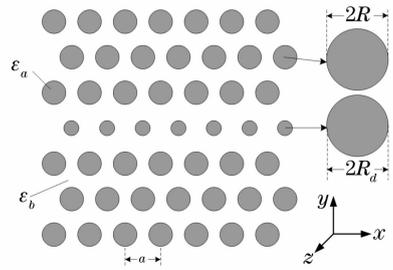


图 1 二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导结构示意图
Fig. 1 Structure of two-dimensional triangular rods photonic crystal line defected waveguide

式中 ω 为波导中所传输光波的角频率, k 为沿波导方向的波矢, c 为真空中的光速, n_g 为色散材料的群折射率。PWE 计算获得的色散关系 $\omega(k)$, 可以直接进行微分用来计算群速度 v_g 。群速度色散(GVD)系数 β_2 强烈影响 PCW 中传输的光脉冲, 可以从色散曲线 $\omega(k)$ 的二阶导数计算获得:

$$\beta_2 = \frac{d^2k}{d\omega^2} = \frac{dn_g}{d\omega} \frac{1}{c} \quad (2)$$

根据慢光群速度(1)式可知,如果能得到色散曲线,可计算出慢光值。三角晶格介质柱结构二维光子晶体的 TM 模带隙比较明显,下面将通过 PWE 对其 TM 模的色散曲线进行分析。当减小缺陷柱尺寸,取 $R_d=0.13a$ 时, TM 模色散曲线如图 2(a) 所示,分别用 PWE(实线)和 TB^[12] (Tight-binding) (点线)两种方法描述了 $\omega-k$ 的关系,从得到的导模来看, PWE 方法得到的结果与 TB 方法得到的结果非常吻合,证明了仿真的准确性。具体分析可知,光子晶体线波导在频率范围 $0.3256\omega a/2\pi \sim 0.5041\omega a/2\pi$ 内是光子禁带(PBG),在禁带中有一个单一导模,导模频率跨度为 $0.3330\omega a/2\pi \sim 0.4113\omega a/2\pi$,这是一个单模波导。图 2(b)为根据(1)式得到的导模群速度 v_g 曲线,可见,在波矢 0.31 处, v_g 具有最大值为 $0.258c$,在带边处(波矢为 0.5), v_g 取值接近于 0。图 2(c)绘出了缺陷导模的群速度色散曲线,计算得出导模的 GVD 系数 β_2 从

小于 $-10^6 \text{ ps}^2/\text{km}$ 一直增加到大于 $10^6 \text{ ps}^2/\text{km}$, 有几个数量级的变化。在大色散区, 波导中光脉冲的传输受到色散影响会严重变形; 但是由于光子晶体波导的微结构特性, 其几何尺寸很小, 在微纳米量级, GVD 在 $10^5 \sim 10^6 \text{ ps}^2/\text{km}$ 范围内是可以接受的。当群速度在导模的尾部区域 v_g 降到 $0.05c$ 以下时, 具有 10^6 量级的正色散。最小的 GVD 出现在导模中部, 即群速度 v_g 最大值附近。实际应用中可根据具体要求来选择合适的导模区域作为慢光传输带。

2.2 填充因子对慢光特性的影响分析

定义填充因子为 R/a , 通过调整填充因子大小研究光子晶体中的慢光值变化情况。改变介质柱半径 R , 并选择合适的缺陷柱尺寸 R_d , 首先分析它的色散关系。 R 分别取 $0.15a, 0.18a, 0.20a, 0.23a, 0.25a, 0.28a, 0.30a$, R_d 分别取 $0.08a, 0.11a, 0.13a, 0.16a, 0.18a, 0.21a, 0.23a$ 时, 由于不同半径下的带隙部分互相重叠, 只绘出了带隙中的导

模部分, 如图 3(a) 所示。可见, 禁带中的导模随着填充因子的增大迅速向低频方向移动, 且导模的有效传输区域在逐渐扩大, 这是由导模色散曲线的变化趋势所决定的。与此同时, 随着填充因子的增大, 导模的形状逐渐平坦化, 说明群速度 v_g 依次减小。图 3(b) 是各个导模对应的群速度 v_g 曲线, 计算可知, 随着填充因子的增大, v_g 最大值分别为 $0.29c, 0.28c, 0.26c, 0.23c, 0.21c, 0.18c$ 和 $0.17c$, 可见, 随填充因子增大群速度下降很快。经计算可得, v_g 最大值变化率为 41.37% 。另外还计算了随填充因子的变化群速度色散曲线, 如图 3(c) 所示。可见, 沿着频率增加方向, GVD 非常迅速地从色散系数非常小的负色散区变化到比较平坦的小色散区域, 之后进入到大的正色散区。由于群速度 v_g 在带边处 ($k=0.5$) 接近于零, 在容许的 GVD 范围内, 可将导模尾部的平坦部分作为慢光区域, 在这一区域群速度 v_g 小于 $0.02c$ 。

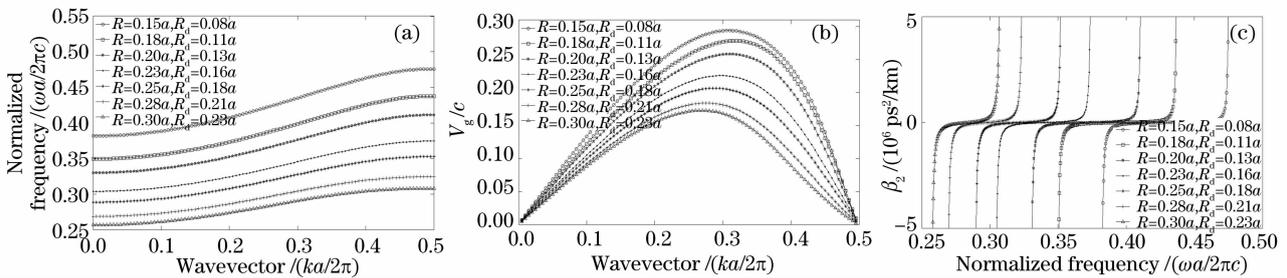


图 3 不同填充因子下所对应的导模色散曲线(a); 群速度曲线(b); GVD 系数曲线(c)

Fig. 3 Guided mode dispersion (a); group velocity (b); GVD (c) of the structure with various filling factor

3 缺陷柱尺寸对慢光特性的影响

当固定构成光子晶体波导的基本介质柱尺寸, 调整线缺陷介质柱尺寸 R_d 时, 导模的色散关系也会随之改变。缺陷柱半径 R_d 既可以小于 R , 也可以大于 R , 下面针对这两种情况分别进行讨论。

3.1 减小缺陷柱尺寸对慢光特性的影响

首先确定 $R=0.2a, R_d < R$ 。令 R_d 依次取值为 $0.08a, 0.10a, 0.12a, 0.14a, 0.16a, 0.18a$, 所对应的导模曲线和群速度曲线依次如图 4(a), 图 4(b) 所示。可见, 随着缺陷柱尺寸的增大, 导模向低频方向移动, 且越来越平坦, 即群速度越来越小, 如图 4(b) 所示, 计算可得群速度 v_g 最大值依次为 $0.37c, 0.33c, 0.28c, 0.23c, 0.19c, 0.16c$, 可得变化率为 56.75% 。GVD 曲线的变化与 v_g 曲线具有相同的规律。

3.2 增大缺陷柱尺寸对慢光特性的影响

令 $R=0.2a, R_d > R$ 。 R_d 依次取值为 $0.30a,$

$0.34a, 0.38a, 0.42a, 0.46a, 0.50a$, 所对应的导模曲线和群速度曲线依次如图 5(a), 图 5(b) 所示。可见, 随着缺陷柱尺寸的增大, 导模向低频方向移动, 且左边越来越平坦, 即群速度越来越小, 而右边部分变化比较复杂。鉴于右边部分比较平坦, 对其群速度进行研究, 如图 5(b) 所示, 波矢范围取为 $0.36 \sim 0.45$, 可见, 群速度最大值先减小后增大, 当 $R_d=0.38a$ 时 v_g 最大值最小, 为 $0.042c$ 。随着半径增大, 计算可得群速度 v_g 最大值依次为 $0.14c, 0.061c, 0.042c, 0.049c, 0.058c, 0.10c$, 变化率为 71.4% 。GVD 曲线的变化与 v_g 曲线具有相同的规律。经分析可知, 对于二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导, 填充因子对群速度的影响要比缺陷柱对群速度的影响弱。当填充因子变化时, 群速度最大值变化率为 41.37% ; 而缺陷柱半径变化时, 若 $R_d < R$, 群速度最大值变化率为 56.75% , 若 $R_d > R$,

群速度最大值变化率为 71.4%。因此,在应用中可以将二者结合对波导结构进行最优化调整,以得到最佳的慢光特性。通过调整填充因子和缺陷柱半径的大小,得到了导模尾部区域可用慢光的最小群速

度小于 $0.01c$ 的波导结构,这要优于文献[13,14]中得到的结果。结合得到的 GVD 值情况可知,光子晶体波导结构的群速度色散位于 $10^5 \sim 10^6$ 量级,可保证光在波导中的高效传输。

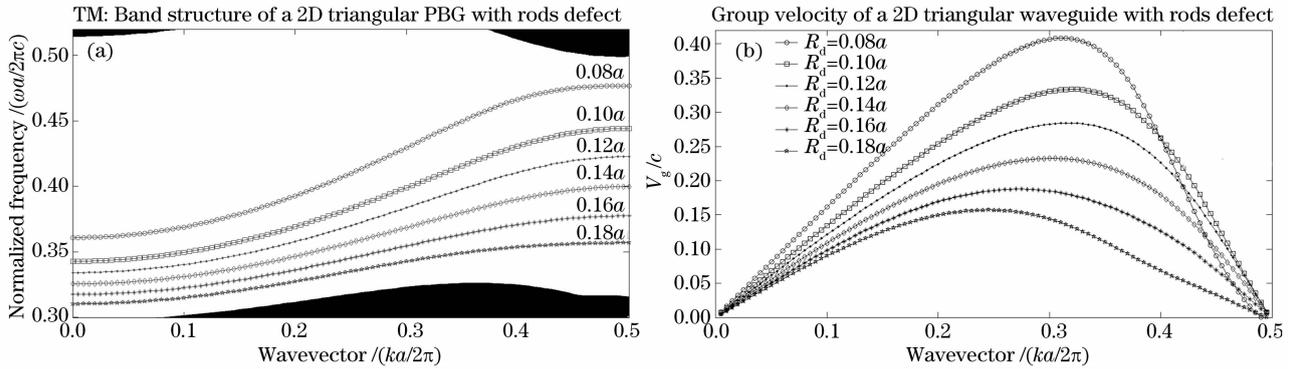


图 4 当 $R=0.2a$, R_d 从 $0.08a$ 增大到 $0.18a$ 时对应的导模曲线(a)和群速度曲线(b)

Fig. 4 Guided mode dispersion (a) and group velocity (b) of the structure with $R=0.2a$ and R_d varying from $0.08a$ to $0.18a$

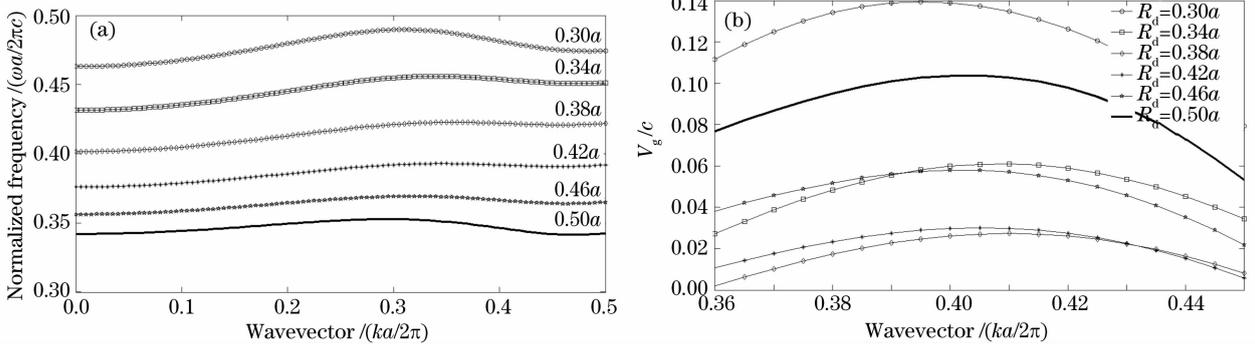


图 5 $R=0.2a$, R_d 从 $0.30a$ 增大到 $0.50a$ 时对应的导模曲线(a)和群速度曲线(b)

Fig. 5 Guided mode dispersion (a) and group velocity (b) of the structure with $R=0.2a$ and R_d varying from $0.30a$ to $0.50a$

4 结 论

以二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导为研究对象,通过平面波展开法对光在波导中传输时的慢光特性进行了仿真。结果表明,光子晶体的填充因子以及线缺陷中的柱子半径大小决定了慢光导模在光子带隙中的传输特性;随着填充因子的增大,光子晶体波导的导模群速度迅速减小;缺陷柱的半径大小对导模群速度的影响要强于填充比;通过调整填充因子和缺陷柱半径的大小,得到了导模群速度小于 $0.01c$ 的波导结构。结合慢光导模的群速度色散特性,发现极慢光区域的群速度色散值位于 $10^5 \sim 10^6$ 量级,能保证光的高效传输。

参 考 文 献

- 1 R. Almeida, J. Pelegriani, H. Waldman. A generic-traffic optical buffer modeling for asynchronous optical switching networks[J]. *IEEE Commun. Lett.*, 2005, **9**(2): 175~177
- 2 A. Fayoumi, A. P. Jayasumana. A surjective-mapping based model for optical shared-buffer cross-connect[J]. *IEEE/ACM*

Trans. Netw., 2007, **15**(1): 226~233

- 3 M. Tokushima, Jun Ushida, A. Gomyo. Pillar photonic crystal waveguides for integrated optical buffers, lasers and electro-optics[C]. CLEO/Pacific Rim 2005. Pacific Rim Conference, 2005. 636~637
- 4 Zhang Lijun, Wu Chongqing, Li Yajie. Novel read/write independently controlled all-optical buffer based on dual-semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1945~1949
- 张立军,吴重庆,李亚捷. 基于双半导体光放大器的读/写分别控制的新型全光缓存器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1945~1949
- 5 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 6 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2486~2489
- 7 Li Yiyu, Gu Peifu, Wang Baoqing et al.. Filling-factor graded wavelike two-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 169~173
- 厉以宇,顾培夫,王保清等. 填充率渐变型波状结构二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 169~173
- 8 Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua et al.. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with

positive-negative index alternant Multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1695~1699

张文富,方 强,程益华等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1695~1699

9 Yurii A. Vlasov, Martin O'Boyle, Hendrik F. Hamann *et al.*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides[J]. *Nature*, 2005, **438**: 65~69

10 H. Gersen, T. J. Karle, R. J. P. Engelen *et al.*. Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**: 073903

11 Jiun Haw Chu, O. Voskoboynikov, C. P. Lee. Slow light in photonic crystals[J]. *Microelectronics J.*, 2005, **36**: 282~284

12 E. Ozbay, M. Bayindir, I. Bulu *et al.*. Investigation of localized coupled-cavity modes in two-dimensional photonic bandgap structures [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(7): 837~843

13 A. Sakai, I. Katoh, D. Mori *et al.*. Anomalous low group velocity and low dispersion in simple line defect photonic crystal waveguides [C]. *Proc. IEEE/LEOS Annual Meet.*, 2004, ThQ5: 884~885

14 M. L. Povinelli, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos. Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**: 7145~7159



基于 MOPA 方式的 150 W 高重复频率、窄脉宽光纤激光器*

高平均功率的高重复频率脉冲光纤激光器在体积、效率、散热和光束质量等方面具有明显优势,是一种新型的高效率固体激光器件,在高精度激光加工、激光探测等领域有重要应用价值。

我们采用主振荡功率放大(MOPA)方式,以级联放大的脉冲激光二极管(LD)为种子光源,以国产大模场面积掺镱双包层光纤为放大介质,成功实现了平均功率为 150 W 的高重复频率、窄脉宽激光输出。

在我们的光纤激光系统中,种子光源采用脉冲驱动 LD 并经光纤级联放大的全光纤化方式,种子激光的平均功率为 2 W 左右。脉冲种子光经隔离器后高效耦合入大模场面积的掺镱双包层光纤(由中国电子科技集团公司第四十六研究所提供),光纤长 5 m,以中心波长 975 nm 的 LD 为抽运源,同向

抽运双包层光纤放大器,获得了平均功率为 150 W 的脉冲放大激光输出,光-光转换效率为 60%。在输出平均功率 120 W 时,测量了其脉冲特性,重复频率为 50 kHz,脉冲宽度为 23.5 ns,峰值功率大于 100 kW。

周 军¹ 杜松涛¹ 刘 侠¹ 薛宇豪¹ 何 兵¹
董景星¹ 魏运荣¹ 楼祺洪¹ 宁 鼎² 潘 蓉²

{¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所,
上海 201800}
² 中国电子科技集团公司第四十六研究所,
天津 300220}

* 国家 863 计划(2008AA03Z405)资助课题。

收稿日期: 2009-03-03