

文章编号: 1001-4322(2007)04-0543-05

多点侧面泵浦双包层光纤激光器的对称夹层结构*

张 帆^{1,2}, 王春灿^{1,2}, 宁提纲^{1,2}, 耿 蕊^{1,2}, 简水生^{1,2}

(1. 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

摘 要: 利用基于亚波长衍射光栅理论的介质-金属-介质的对称夹层结构, 对掺杂的双包层光纤进行多点泵浦, 根据严格的电磁场衍射理论和光栅方程, 分析了多点泵浦时, 这种耦合结构的泵浦光泄露的问题, 证明了多点泵浦时泵浦光的泄露率仅为 15.52%, 而对信号光则不存在泄露。这种对称夹层结构可以用于多个大功率激光二极管阵列的多点侧面泵浦双包层掺杂光纤中, 以制作各种大功率(数 kW 级)稀土光纤激光器, 其最大耦合效率可以达到 80% 以上。

关键词: 光纤激光器; 双包层光纤; 金属衍射光栅; 耦合效率; 泄露率

中图分类号: TN253

文献标识码: A

利用端面耦合的方法, 单个双包层掺杂光纤激光器的输出功率已经可以达到数 W^[1], 乃至上 kW^[2]。然而端面泵浦虽然简单且耦合效率高 (>50%), 但只能通过两个端面注入泵浦光, 有鉴于此, 光纤侧面泵浦耦合技术被提出并且逐渐展开研究, 比如利用微型棱镜侧面耦合^[3-5]、V 型槽侧面泵浦技术^[6-7]、嵌入式微型棱镜技术^[8]以及光纤磨抛技术^[9]。但是这些技术对工艺要求十分严格, 而且对光纤有一定程度上的损害, 实现起来成本高、难度大。R. Herda 等^[10]提出了一种利用二元衍射光栅进行侧面耦合技术, 这种方法由于在二元衍射光栅与光纤内包层表面之间使用了介质折射率匹配层, 以达到折射率匹配和固定二元衍射光栅的作用, 因而不能够承受大功率激光二极管阵列侧面泵浦时所产生的热量, 二元金属衍射光栅也容易脱落。在目前没有超大功率泵浦源的情况下, 为了得到数 kW 乃至上万 W 的激光输出功率, 多点侧面泵浦是唯一的选择。本文利用一种介质-金属-介质(DMD)的对称夹层结构对掺杂的双包层光纤进行多点泵浦, 分析了多点泵浦时, 这种耦合结构的泵浦光泄露率的问题。另外, 本文对这种耦合结构中金属材料的选择与耦合效率之间的关系也进行了比较和分析。

1 实验设置

如图 1 所示, 多个介质-金属-介质的对称夹层耦合结构被制作在双包层光纤的内包层上, 每个耦合结构之间的间距由双包层光纤外包层的厚度与 ± 1 阶衍射波的衍射角共同决定。每个耦合结构的横向长度与条形半导体激光器的慢轴方向长度一致。激光二极管阵列经过柱透镜准直后, 垂直于双包层掺杂光纤的内表面射入。由于在双包层掺杂光纤的矩形结构的内表面上镀上了一定厚度的金属薄膜, 并在其上覆盖上一层二氧化硅(SiO₂)。这样光纤的内包层、金属的薄膜层以及 SiO₂ 层就构成了一个介质-金属-介质的夹层结构, 并且由于所镀的金属薄膜的宽度小于半导体激光器的入射波长, 所以实际上就在光纤的内包层上形成了一个 DMD 结构

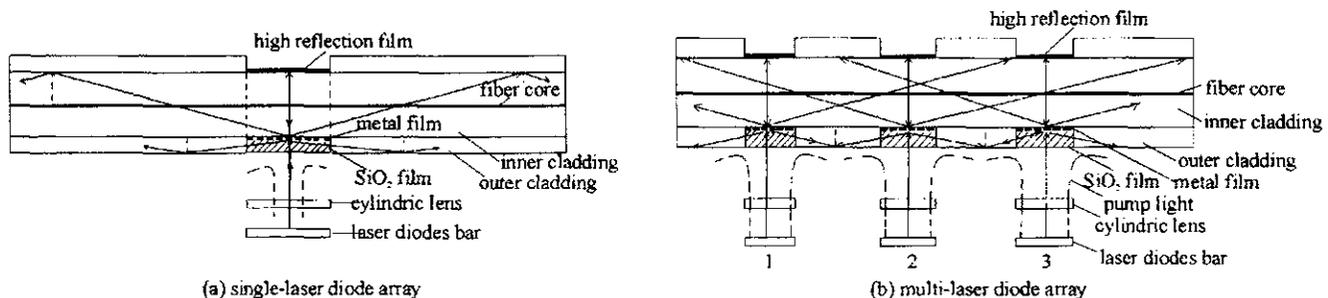


Fig. 1 Experimental setup of dielectric-metal-dielectric sandwich coupling structure for side-pump double-clad fiber laser

图 1 介质-金属-介质的对称夹层侧面耦合结构的实验设置示意图

* 收稿日期 2006-11-29; 修订日期 2007-03-26

基金项目 北京交通大学科技基金资助课题(2006XM003); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0076); 北京市自然科学基金资助课题(4052023)

作者简介 张帆(1981—), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事激光器和光放大器的研究; 04111016@mail.bjtu.edu.cn.

的亚波长光栅。入射的泵浦光在介质与金属的界面发生前向衍射和后向衍射。如果 ± 1 阶衍射波的角度满足 $\theta > \theta_{\text{TIF}}$ (θ_{TIF} 是在双包层光纤的包层中全内反射的临界角), 则经过金属-介质光栅衍射后的泵浦光就被束缚在双包层光纤内部, 一直传输下去。所以 ± 1 阶衍射波的衍射效率即是单个激光器二极管阵列泵浦掺杂双包层光纤的耦合效率。当采用多个激光二极管阵列进行多点侧面泵浦时, 由于被前一个耦合结构后向衍射的泵浦光在外包层中传输至下一个耦合结构时会发生二次衍射, 其中 0 和 -2 阶的前向和后向衍射波可以继续在外包层中以全反射形式传输, 而 -1 阶后向衍射波则会垂直于光纤的侧端面泄露出双包层光纤, 造成泵浦光的泄露和损耗。单独考察图 1(b) 中的耦合结构 2 泵浦光经柱透镜准直后垂直射向 DMD 对称夹层结构, 经亚波长介质-金属-介质光栅衍射后的 1 阶后向衍射波在光纤的外包层中经过一次全反射后, 以相同的角度射向它两侧的耦合结构 1 和 3, ± 1 阶后向衍射波分别经过耦合结构 1 和 3 的亚波长金属-介质衍射光栅再次发生衍射, 衍射波中的 -1 阶后向衍射波会垂直于光纤的侧端面, 泄露出双包层光纤, 这也是利用 DMD 结构进行多个大功率激光二极管阵列多点侧面泵浦时, 泵浦光泄露的主要原因。

2 理论分析

图 2 和 3 描述了多点侧面泵浦时, 每一个泵浦点上的泵浦光第一次和第二次的衍射情况。由图 2 可以看出, 由于第一次是垂直入射, 所以 ± 1 阶前向和后向衍射波的角度和衍射效率对称一致, 并且都满足全反射角, 可以在光纤的内外包层中一直传输下去; 由图 3 可见, 当前一个耦合点衍射过来的 ± 1 阶后向衍射波以大于全反射的临界角的角度入射到当前这个耦合点的衍射光栅时, 再次发生衍射, 其中 -1 阶的后向衍射波会垂直光纤侧面泄露出去。

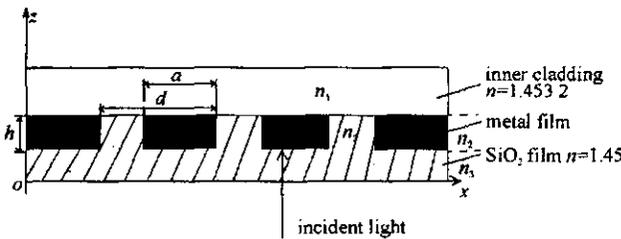


Fig. 2 Presentation of pump light diffracted by sub-wavelength diffraction grating when pump light first went through the DMD structure

图 2 泵浦光入射后第一次经过 DMD 结构时, 被亚波长金属-介质衍射光栅衍射的情况

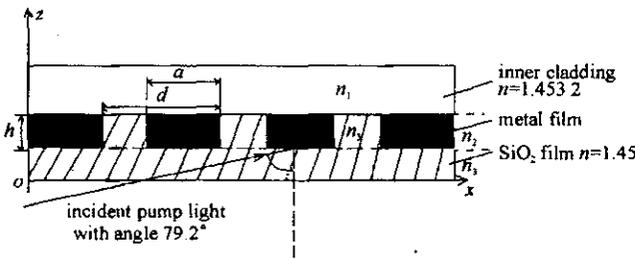
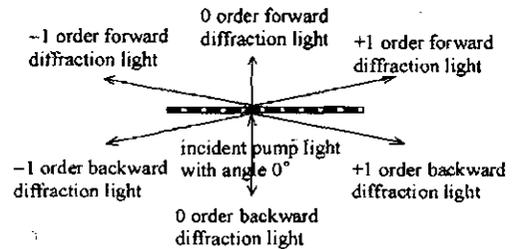
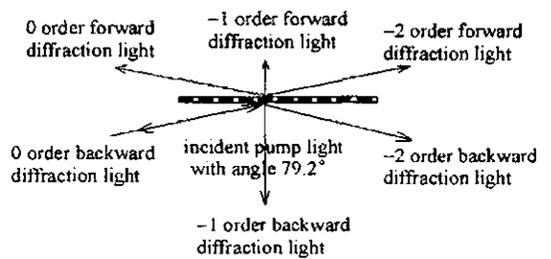


Fig. 3 Presentation of residual pump light diffracted by sub-wavelength diffraction grating

when backward diffraction wave of $+1$ and -1 order went through the DMD structure again

图 3 泵浦光经过一次衍射后, 后向衍射波再次经过另一个邻近的 DMD 结构时, 被亚波长金属-介质衍射光栅衍射的情况



关于这种亚波长金属-介质光栅衍射效率的理论计算在文献 [11] 中已经有详细的推导和计算。对于图 2 和 3 中这种介质-金属-介质夹层结构, 当考虑 TE 偏振模的衍射 (TM 可类推) 时, 根据 Maxwell 方程有

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y(x, z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_y(x, z) + k^2 n_j^2 E_y(x, z) = 0 \quad (1)$$

式中 E_y 为 TE 偏振时的电场分量 $\beta = kn_j$ 为各层的传播常数 $j=1, 3$ 。区域 1 和 3 都是均匀媒质。我们首先考虑区域 1 和区域 3, 总场可以表示为 $U_{\text{total}} = U_1 + U_R$, 这里 U_1 代表入射场, 而 U_R 表示后向衍射场。而在区域 3, U_T 表示前向衍射场 (这里用 U 代表上述传播公式中出现的电场分量, 对 TE 偏振, $U = E_y$)。所以入射场 U_1 、后向衍射场 U_R 和前向衍射场 U_T 分别表示为

$$U_1(x, z) = \exp[ikn_1(x \sin \theta + z \cos \theta)] \quad (2)$$

$$U_R(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m \exp[i(\alpha_m x - r_m z)] \quad (3)$$

$$U_T(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m \exp\{i[a_m x + t_m(z - h)]\} \tag{4}$$

式中 ϑ 是入射角 h 为金属薄膜厚度 $k = 2\pi/\lambda$ 是自由空间的波数 λ 是入射波长 R_m, T_m 分别是第 m 阶后向衍射波和前向衍射波的幅值。这里我们定义 $a_m = kn_1 \sin\theta_m$ ，其中 θ_m 是第 m 阶后向衍射波的衍射角。 t_m 和 r_m 有相似的表达式，只是将 n_1 换作 n_3 。 t_m 和 r_m 的实部代表均匀的平面波，虚部对应于损耗波。

$$\alpha_m = \alpha_0 + 2\pi m/d \tag{5}$$

$$\alpha_0 = kn_1 \sin\theta \tag{6}$$

$$r_m = [(kn_1)^2 - \alpha_m]^2 \tag{7}$$

式中 d 为光栅周期。然后我们考虑区域 2 (即折射率调制区) 中，对于 TE 模介质折射率函数 ε_r 用傅里叶级数展开为

$$\varepsilon_r(x) = n_2(x)^2 = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \varepsilon_p \exp(i2\pi px/d) \tag{8}$$

式中 p 为相应的级数 ε_p 为对应级数的傅里叶系数。如果我们设 $E_y(x, z) = X(x)Z(z)$ ，利用方程 (1)，关于 $X(x)$ 和 $Z(z)$ 的方程可以分别写成

$$\frac{d^2}{dx^2} X(x) + [k^2 \varepsilon_r(x) - \gamma^2] X(x) = 0 \tag{9}$$

$$\frac{d^2}{dz^2} Z(z) + \gamma^2 Z(z) = 0 \tag{10}$$

γ^2 是分离变量常数。设 $X(x)$ 和 $Z(z)$ 的解分别为

$$Z(z) = A \exp(i\gamma z) + B \exp[-i\gamma(z - h)] \tag{11}$$

$$X(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_m \exp(i\alpha_m x) \tag{12}$$

式中 A, B 为常数 P_m 为假设的假周期解的幅值系数。

将方程 (8) (12) 代入方程 (9)，可得

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} (k^2 \varepsilon_{l-m} - \alpha_m^2 \delta_{lm}) P_m = \gamma^2 P_l \tag{13}$$

式中 δ_{lm} 为狄拉克函数 γ 和 P 分别为方程的特征值和特征向量。该特征值方程可以利用数值方法解出。解该方程我们得到

$$E_y(x, z) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{ln} \exp(i\alpha_l x) \{a_n \exp(i\gamma_n z) + b_n \exp[-i\gamma_n(z - h)]\} \tag{14}$$

在图 2 的区域 1 2 3 的 $z = 0$ 和 $z = h$ 处应用边界条件，可得 TE 偏振时的耦合方程

$$\sum_{m=1}^{\infty} (r_l + r_m) P_{lm} a_m + \sum_{m=1}^{\infty} (r_l - \gamma_m) \exp(i\gamma_m h) P_{lm} b_m = 2r_l \delta_{l0} \tag{15}$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} (t_l - \gamma_m) \exp(i\gamma_m h) P_{lm} a_m + \sum_{m=1}^{\infty} (t_l + \gamma_m) P_{lm} b_m = 0 \tag{16}$$

定义第 m 阶前向和后向衍射波的衍射效率为^[12]

$$\eta_{Rm} = \text{Re}\left\{\frac{r_m}{r_0}\right\} |R_m|^2 \tag{17}$$

$$\eta_{Tm} = C \text{Re}\left\{\frac{t_m}{r_0}\right\} |T_m|^2 \tag{18}$$

TE 偏振模时 $C = 1$ 。式中 Re 表示取复数的实数部分。利用上述的方程，我们可以获取利用亚波长衍射光栅侧面耦合双包层光纤的耦合效率。

3 计算结果及讨论

计算图 2 中的 DMD 结构对 1 阶的前向和后向衍射波的衍射效率(也即侧面耦合双包层光纤的耦合效率)所采用的参数与文献 [10] 中的相同。双包层光纤的芯径为 125 μm ，数值孔径为 0.38，内包层的折射率为 1.453，外包层为 1.402。当泵浦波长为 976 nm 时对应的全反射角为 75°，在该波长和全反射角的条件下，根据

光栅方程所需要的光栅周期在 673 到 697 nm 之间。DMD 结构中的金属材料取为金,在此波长下的复折射率为 $0.09 + i6.12$, 以及 SiO_2 的折射率为 1.45。所以光栅的周期选为 683 nm 以满足全反射,并且假设泵浦光最初是垂直于光纤的侧面正入射的。

图 4 是入射泵浦光第一次经过 DMD 耦合结构时,被亚波长金属-介质光栅衍射后,前向和后向 ± 1 阶衍射效率之和(也即 DMD 结构的耦合效率)与金属薄膜的线宽 a 和厚度 h 的对应关系。可以发现当 $a = 0.21 \mu\text{m}$ 时,DMD 结构具有较高的耦合效率,最大可以达到 72%。如果在如图 1 中所示的光纤的另一端侧面镀上高反射膜,则可以使图 2 中所示的 0 阶前向衍射波反射后再次经过衍射光栅而发生二次衍射,进一步提高耦合效率。经过计算,二次衍射后总的耦合效率最大可达 80% 以上。然后我们考虑当第一次衍射效率最大时(即当 $a = 0.21 \mu\text{m}$ 时)入射泵浦光被衍射后的 ± 1 阶后向衍射波以衍射角 $\pm 79.2^\circ$ 射向相邻的下一个 DMD 耦合结构的衍射情况(如图 5 所示,-1 阶后向衍射效率(即泵浦光的泄露率)随金属薄膜的厚度周期性变化,最小仅为 10%,最大也不超过 28%。根据后向衍射波的光栅方程

$$n_1 \sin \theta_m = n_1 \sin \theta + m \lambda / d \tag{19}$$

式中 n_1 为反射场区域的折射率 m 为衍射波的阶数。

由(19)式可知,泵浦光第一次衍射后,分别产生前向和后向的 $\pm 1, 0$ 阶衍射波,其中 ± 1 阶衍射角为 $\pm 79.2^\circ$ 。由于是多点泵浦,如图 1(b)所示 ± 1 阶后向衍射波会射向相邻的下一个 DMD 耦合结构,再次发生衍射,再次根据式(19)可知,第二次衍射后,分别产生 0, -1 和 -2 阶衍射波,其中 0 和 -2 阶衍射角度为 $\pm 79.2^\circ$,而 -1 阶后向衍射波角度约为 0° ,所以会垂直光纤侧面射出,造成多点泵浦时泵浦光的泄露。两次衍射的具体情况如图 6,7 所示。

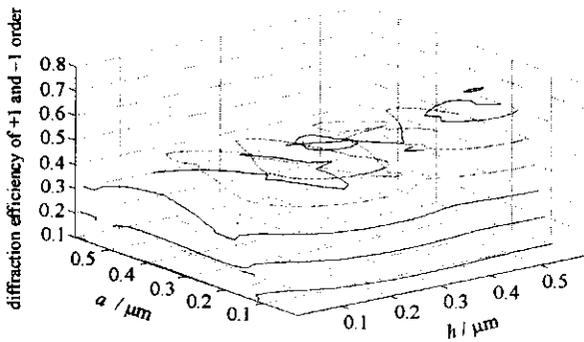


Fig. 4 Sum of backward and forward diffraction efficiency (coupling efficiency of DMD structure) of +1 and -1 order of pump light diffracted by sub-wavelength grating when pump light first went through the DMD structure

图 4 泵浦光入射后第一次经过 DMD 结构时,被亚波长金属-介质光栅衍射后,前向和后向 +1, -1 阶衍射效率之和(也即 DMD 结构的耦合效率)

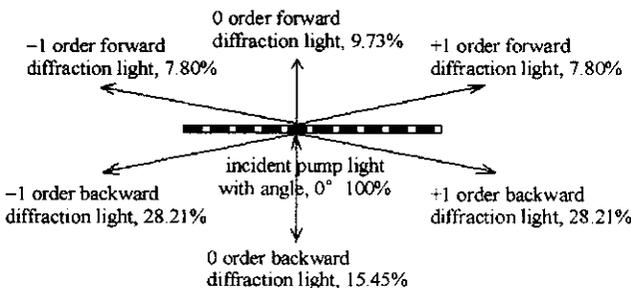


Fig. 6 Backward and forward diffraction efficiency of 0 and ± 1 order when pump light first went through the DMD structure and diffracted by sub-wavelength grating

图 6 泵浦光入射后第一次经过 DMD 结构时,被亚波长金属-介质光栅衍射的衍射效率分布

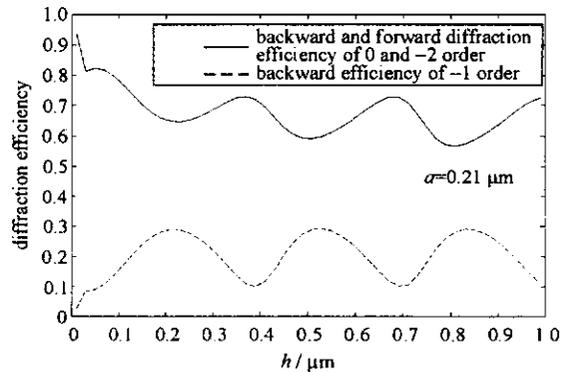


Fig. 5 Backward and forward diffraction efficiency of 0, -1 and -2 order when backward diffraction wave of +1 and -1 order went through the DMD structure again and line-width of gold film $a = 0.21 \mu\text{m}$

图 5 当金属薄膜的线宽 $a = 0.21 \mu\text{m}$ 时,泵浦光被衍射后的 ± 1 阶后向衍射波再次经过下一个 DMD 结构时,被亚波长金属-介质光栅衍射的衍射效率

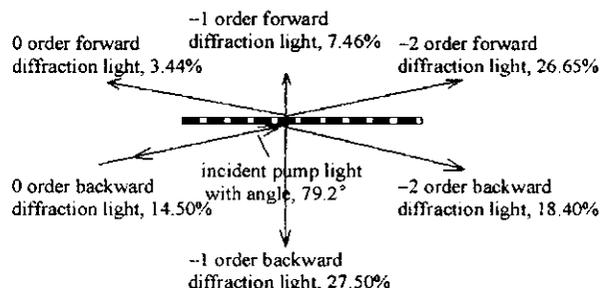


Fig. 7 Backward and forward diffraction efficiency of 0, -1 and -2 order when backward diffraction wave of +1 and -1 order went through the DMD structure again

图 7 泵浦光被衍射后的 ± 1 阶后向衍射波再次经过下一个 DMD 结构时,被亚波长金属-介质光栅衍射的衍射效率分布

由图6,7可知,多点泵浦时的泵浦光泄露率仅为

$$\eta = (28.21\% + 28.21\%) \times 27.5\% = 15.5\% \quad (21)$$

这说明我们提出的这种介质-金属-介质的对称夹层侧面耦合结构可以有效支持多个大功率激光二极管阵列多点侧面泵浦,以制作大功率(数kW级)光纤激光器。

4 结论

利用严格的电磁场衍射理论和光栅方程对一种可用于多点泵浦的介质-金属-介质对称夹层耦合结构进行了分析,发现了利用该结构进行大功率多点泵浦时的泵浦光的泄露率仅为15.52%,而且对信号光不存在泄露,耦合效率高达80%以上。证明了这种新型侧面耦合结构用于多点泵浦的可行性。

参考文献:

- [1] Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110 W fiber laser[J]. *Electron Lett*, 1999, **35**(14):1158-1160.
- [2] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(25):6088-6092.
- [3] 张春伟,向世清,王常安. 双包层光纤抽运光的微型棱镜侧面耦合法的耦合效率分析[J]. 中国激光, 2003, **30**(7):597-600.(Zhang C W, Xiang S Q, Wang C A. Coupling efficiency analysis for the micro-prism sided-coupling method of double-cladding fiber. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(7):597-600)
- [4] 王常安,向世清,陆雨田,等. 利用微型棱镜将激光二极管抽运光耦合进双包层光纤的新技术[J]. 光学学报, 2002, **22**(10):1259-1262.(Wang C A, Xiang S Q, Lu Y T, et al. New side-pumped technology of coupling LD pumping light into double-cladding fiber by micro-prism. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1259-1262)
- [5] 石鹏,李小莉,张贵芬,等. 大功率激光二极管的微片棱镜堆光束整形和光纤耦合输出[J]. 光学学报, 2000, **20**(11):1544-1547.(Shi P, Li X L, Zhang G F, et al. Micro-prism stack beam shaper for high power laser diode array. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(11):1544-1547)
- [6] Rippin D J, Goldberg L. High efficiency side-coupling of light into optical fibers using imbedded V-grooves[J]. *Electron Lett*, 1995, **31**(25):2204-2205.
- [7] Goldberg L, Cole B, Snitsee E, et al. V-groove side-pumped fiber amplifier[J]. *Electron Lett*, 1997, **33**(25):2127-2129.
- [8] Koplou J P, Moore S W, Dahv A V, et al. A new method for side pumping of double-clad fiber sources[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, **39**(4):529-540.
- [9] Xu J Q, Lu J H, Kumar G, et al. A non-fused fiber coupler for side-pumping of double-clad fiber lasers[J]. *Opt Commun*, 2003, **220**(6):389-395.
- [10] Herda R, Liem A, Schnabel B, et al. Efficient side-pumping of fibre lasers using binary gold diffraction gratings[J]. *Electron Lett*, 2003, **39**(3):276-277.
- [11] 张帆,王春灿,童治,等. 用于大功率双包层光纤激光器的侧面耦合的对称夹层结构[J]. 中国激光, 2007, **34**(4):1-5.(Zhang F, Wang C C, Tong Z, et al. Design of a dielectric-metal-dielectric sandwich structure for efficient side-coupling of high power double-clad fiber lasers. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(4):1-5)
- [12] Turunen J, Wyrowski F. Micro-optics: elements, systems and applications[M]. London:HERZIC, 1997:31-52.

Pump light leakage at coupler of side-pumped double-clad fiber laser with a novel dielectric-metal-dielectric sandwich structure

ZHANG Fan^{1,2}, WANG Chun-can^{1,2}, NING Ti-gang^{1,2}, GEN Rui^{1,2}, JIAN Shui-sheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A multi-coupler side-pumped rare-earth-doped double-clad fiber laser with a novel dielectric-metal-dielectric(DMD) sandwich structure based on the theory of sub-wavelength diffraction grating is presented. A rigorous electromagnetic theory which considers the vectorial character of the light has been used to investigate and compute its pump light leakage at adjacent coupler for every coupled structure and it is found that pump light leakage is only 15.52% with an angle perpendicular to side of fiber. So this DMD sandwich structure can be applied to multi-point side-pump double-clad fiber laser effectively and the maximum coupling efficiency is greater than 80% after the second diffraction.

Key words: Fiber laser; Double-clad fiber; Metal diffraction grating; Coupling efficiency; Leakage