

谱合成系统串扰及其对合束特性的影响

晏青青¹, 钟哲强¹, 张彬^{1*}, 吴真², 蔡伟²¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065;²西华大学理学院, 四川 成都 610039

摘要 在二极管激光阵列(DLA)光栅-外腔谱合成(SBC)系统中,DLA子单元的发散角、指向角偏差等非完善因素会导致子单元光束经外腔反馈后产生串扰,从而降低合成光束质量和合束效率。为深入研究谱合成系统的光束串扰及其对合束特性的影响,建立了DLA在外腔往返的光传输模型,并结合含串扰光注入的半导体激光器速率方程,构建了考虑串扰光影响的谱合成系统的合束效率物理模型。在此基础上,详细探讨了串扰光经外腔往返传输之后的反馈机制及其对合束特性的影响规律,进而分析了谱合成系统DLA子单元间距、透镜焦距和光栅线密度等因素对合束效率的影响,可为DLA光栅-外腔谱合成系统的串扰抑制提供参考。

关键词 激光光学; 光谱合成; 光束串扰; 光束质量; 合束效率

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221145

1 引言

作为光束合成的典型方式之一,二极管激光阵列(DLA)光栅-外腔谱合成技术由于无需控制阵列单元的偏振态、相位和振幅即可实现非相干合成,并且合成光束的光强分布在近场和远场皆能保持较好的重叠,因而受到了广泛关注^[1-3]。然而,在DLA封装过程中,阵列子单元通常会发生偏移,在合束方向上出现一定的弯曲起伏,导致指向角出现偏差^[4],从而产生串扰光,再加上DLA子单元在准直后通常会存在数毫弧度的发散角^[5],因此最终导致合成光束的合束效率和光束质量急剧下降^[6]。目前,国内外学者已对DLA谱合成技术展开了大量深入研究,但现有研究的重点主要集中于DLA快慢轴整形^[7-12]、“smile”效应测量与封装^[13-17]、DLA子单元发散角和“smile”效应对光束质量的影响^[18-22]、DLA谱合成系统中光束串扰行为的产生机理^[23]、串扰光束对光谱特性的影响^[24-26]以及串扰光束的抑制措施^[27-29]等,尚未有深入分析谱合成系统串扰光束与合成效率、光束质量之间定量关系的公开报道。基于对谱合成系统中光束往返传输行为的分析,本团队建立了DLA子单元光束在光栅外腔往返的传输模型,并进一步结合含串扰光注入的半导体激光器速率方程模型,定量分析了DLA子单元发散角、指向角偏差等非完善因素对光栅外腔反馈机制、合束效率和光束质量的影响。在此基础上,进一步讨论了DLA子单元间距、透镜焦距和光栅线密度等参数对合束特

性的影响,以期能为DLA光栅-外腔谱合成系统的串扰抑制提供参考。

2 理论模型

图1给出了DLA子单元发出的光束在光栅外腔往返传输的示意图。以中心子单元为例,由于光束自身发散角、指向角偏差等非完善因素^[18-21]的影响,当光束入射至输出耦合镜时,与理想传输方向(实线)相比,出射光束的传输方向(点划线)与镜面不再保持垂直。因此,经输出耦合镜部分反射后,反馈光束的传输路径(圆点)将偏离原返回光路(短划线),并进一步经光栅和变换透镜后传输至其他子单元,形成串扰^[23-25]。串扰光的存在会进一步影响子单元的发光特性,进而对合束性能造成影响。

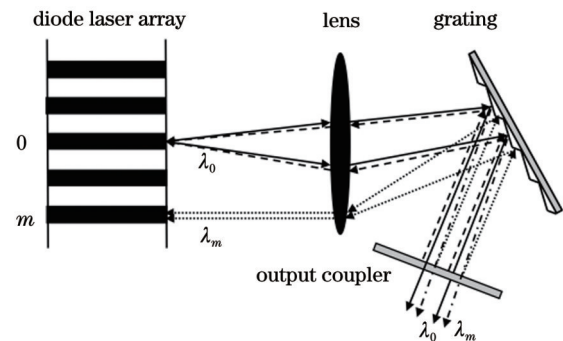


图1 光束串扰示意图

Fig. 1 Schematic of beam crosstalk

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-09-20; 录用日期: 2022-09-28; 网络首发日期: 2022-10-10

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2018JY0553)、四川省科技厅项目(2021ZYD0036)

通信作者: *zhangbinff@sohu.com

2.1 含串扰光束的谱合成系统的往返传输模型

以透镜前焦平面为 x'' 轴、透镜光轴为 z'' 轴建立坐标系,图 2 给出了考虑光源发散角和指向角偏差后,子光束经过透镜和光栅的衍射模型^[20-21]。图 2 中, α_0 和 λ_0 分别表示中心光束的入射角和波长, d 为光栅周期, β 为光束的衍射角, γ 为刻槽倾角, f 为理想薄透镜的焦距, z_0 为 x' 轴与 x 轴之间的距离, MM' 为透镜的后焦面, LL' 表示经透镜变换后的中心光线在光栅中心的垂线。设 T_1 为变换透镜的透射系数, R_c 为输出耦合

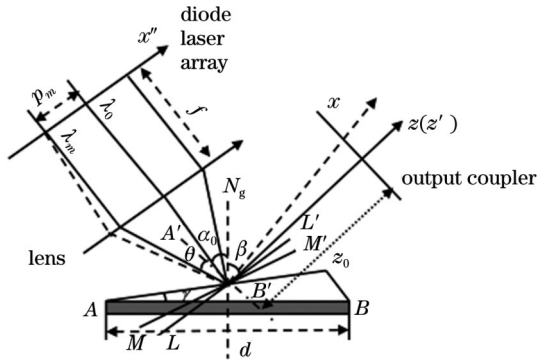


图 2 光束经过透镜和光栅的传输示意图

Fig. 2 Schematic of beams passing through lens and grating

镜的反射系数, η_g 为光栅的衍射效率, η_0 为光在外腔中往返一次的耦合效率。令 DLA 中相邻两个子光源的间距为 Δp , 则编号为 m 的子光源的中心坐标为 $p_m = m\Delta p$ ^[30-32]。

以 +1 级衍射为例, 根据光栅方程, 由光束在图 2 中的传输路径可以推导得到编号为 m 的子光束在光栅面的入射角 α_m 、衍射角 β 和中心波长 λ_m 分别为

$$\alpha_m = \alpha_0 + \theta = \alpha_0 - \arctan \frac{m\Delta p}{f}, \quad (1)$$

$$\beta = a \sin \left[\sin(\alpha_m) - \frac{\lambda_0}{d} \right], \quad (2)$$

$$\lambda_m = \lambda_0 + d \left[\sin \left(\alpha_0 - \arctan \frac{m\Delta p}{f} \right) - \sin(\alpha_0) \right]. \quad (3)$$

以第 m 个子单元和第 n 个子单元发生串扰为例, 此时串扰光的波长^[24-25]为

$$\lambda_{mn} = \frac{1}{2}(\lambda_m + \lambda_n), \text{ if } \begin{cases} m = n, & \text{feedback} \\ m \neq n, & \text{crosstalk} \end{cases} \quad (4)$$

假设每个子光束均近似是束腰宽度为 w_0 、振幅为 E_0 的基模高斯光束^[33], 在综合考虑光源自身发散角与指向角偏差后, 第 m 个子单元出射光束的光场分布可以表示为

$$E_{mn}(x_0, 0) = E_0 \exp \left[-\frac{(x_0 - p_m)^2}{w_0^2} \right] \exp \left[ik_{mn}(x_0 - p_m) \tan(\Phi_m) \right] \exp \left[\frac{ik_{mn}(x_0 - p_m)^2}{2R} \right], \quad (5)$$

式中: $k_{mn} = 2\pi/\lambda_{mn}$; 球面相位 $\exp[ik_{mn}(x_0 - p_m)^2/(2R)]$ 表征光源自身的发散角; Φ_m 为第 m 个子单元出射光的指向角偏差。

根据柯林斯公式, 光束经过变换透镜后传输到衍射光栅入射面的光场分布可以表示为

$$E_{mn}(x'', z'') = \sqrt{-\frac{iT_1}{\lambda_{mn}B}} \exp(ik_{mn}z'') \times \int_{-\infty}^{+\infty} E_{mn}(x_0, 0) \exp \left[\frac{ik_{mn}}{2B} (Ax_0^2 - 2x_0x'' + Dx''^2) \right] dx_0, \quad (6)$$

式中: $A = (2f - z'')/f$, $B = f$, $C = -1/f$, $D = 0$; $z'' = 2f - x'' \tan(\theta) = 2f + \mu d \cos(\alpha_0) m \Delta p / f$, 其中 μ 为槽序号。

假设衍射光栅每个周期内的入射光波复振幅相等, 则衍射光栅入射面上的光波复振幅仅与刻槽序号 μ 有关, 将其记为 $E(\mu)$ 。依据衍射积分方程, 入射到输出耦合镜上的光场分布为

$$E_{mn}(x, z) = \sum_{\mu=-N}^N \sqrt{-\frac{ik_{mn}}{2\pi z_{mn}}} \exp(ik_{mn}z_{mn}) \int_{x_1}^{x_2} E_{mn}(\mu) \exp(ik_{mn}\Delta_{\text{total-}mn}) \exp \left[ik_{mn} \frac{(x - x')^2}{2z_{mn}} \right] dx', \quad (7)$$

式中: $z_{mn} = [z_0 - \mu d \sin(\beta)] / \cos(\beta_{mn} - \beta)$, β_{mn} 为有串扰光时光束的衍射角; $2N + 1$ 为光栅刻槽总数; $\Delta_{\text{total-}mn}$ 为串扰光束经过光栅面时的光程差^[24, 30-31]; 当衍射光栅为闪耀光栅时, $x_1 = \mu d \cos(\beta_{mn}) - a' \cos[(\gamma + \beta_{mn})/2]$, $x_2 = \mu d \cos(\beta_{mn}) + a' \cos[(\gamma + \beta_{mn})/2]$, $\mu = -N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N$, 其中 a' 为光栅刻槽宽度。

经输出耦合镜反射后, 光束逆向传输至光栅, 当不

考虑外腔中的光串扰行为时, 入射角与衍射角^[25]互换; 当考虑外腔中的光串扰行为时, 入射角 α'_m 和衍射角 β'_{mn} 满足^[26]

$$\alpha'_m = -[\beta + (\beta - \beta_{mn})],$$

$$\beta'_{mn} = -a' \sin \left[\sin(\alpha'_m) - m\lambda_{mn}/d \right]. \quad (8)$$

根据菲涅耳衍射积分公式, 从耦合镜到光栅入射面上的光场分布为

$$E'_{mn}(x', z) = \sqrt{-\frac{ik_{mn}R_c}{2\pi z'_{mn}}} \exp(ik_{mn}z'_{mn}) \int_{-\infty}^{+\infty} E_{mn}(x, z) \exp \left[ik_{mn} \frac{(x' - x)^2}{2z'_{mn}} \right] dx, \quad (9)$$

式中: $z'_{mn} = [z_0 - \mu d \sin(\beta)] / \cos(\alpha'_m + \beta)$ 。光束经光栅反馈进入内腔的光场分布为

$$E'_{mn}(x'', z) = \sum_{\mu=-N}^N \sqrt{\frac{T_1}{i\lambda_{mn} B''}} \exp(ik_{mn} z'') \int_{\mu d \cos(\beta'_{mn}) - (a'/2) \times \cos(\gamma + \beta'_{mn})}^{\mu d \cos(\beta'_{mn}) + (a'/2) \times \cos(\gamma + \beta'_{mn})} E'_{mn}(x', z) \exp(ik_{mn} \Delta'_{\text{total-mn}}) \cdot \exp\left[\frac{ik_{mn}}{2B''}(A''x'^2 - 2x'x'' + D''x''^2)\right] dx', \quad (10)$$

式中: $A''=0, B''=f, C''=-1/f, D''=2-z''/f; \Delta'_{\text{total-mn}}$ 为串扰光束逆向传输经过光栅面时的光程差; 当 $m=n$ 时, $E'_{mn}(x'', z)$ 简化为光束经光栅反馈回子单元自身的光场分布 $E'_m(x'', z)$ 。

当考虑外腔中的光串扰行为时, 第 m 个子单元经过输出耦合镜后的光强分布为

$$I_{2m}(x, z) = (1 - R_c) \eta_g \left[(1 - \rho_m) |E_m(x, z)|^2 + \rho_m |E_{mn}(x, z)|^2 \right], \quad (11)$$

其中,

$$\rho_m = \frac{\int_a^b E'_{mn}(x'', z) dx_0}{\int_a^b E'_m(x'', z) dx_0 + \int_a^b E'_{mn}(x'', z) dx_0}, \quad (12)$$

式中: $|E_m(x, z)|^2$ 为 $m=n$ 时第 m 个子单元发出的光束经过输出耦合镜后的光强分布; ρ_m 为第 n 个子单元发出的光束串扰到第 m 个子单元的比例; a 和 b 表示第 m 个子单元发光面的尺寸。

于是, 当考虑外腔中的光串扰行为时, 第 m 个子单元发出的光束经过输出耦合镜反馈注入内腔的光强分布为

$$I'_m(x'', z) = \eta_0 \eta_g \left[(1 - \rho_m) |E'_m(x'', z)|^2 + \rho_m |E'_{mn}(x'', z)|^2 \right]. \quad (13)$$

$$\frac{d\tilde{E}_m(t)}{dt} = \frac{1}{2} (1 + i\alpha) \left[G_N [N_m(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right] \tilde{E}_m(t) + \frac{\kappa_m}{\tau_{\text{int}}} \tilde{E}_m(t - \tau_{\text{ext}}) \exp(-i\omega_m \tau_{\text{ext}}) + \sum_{j=1}^m \frac{\kappa_j}{\tau_{\text{int}}} \tilde{E}_j(t - \tau_j) \exp(-i\omega_j \tau_j), \quad (14)$$

式中: 等号右边第二项表示外腔反馈作用, 第三项代表其他发光单元的串扰作用; $\tilde{E}_m(t)$ 为激光阵列中第 m 个子单元内腔的电场强度; α 为线宽加强因子; G_N 为微分增益系数; N_0 和 N_m 分别表示无光反馈和有光反馈时内腔有源区的载流子密度; τ_p 为光子寿命; τ_{int} 和 τ_{ext} 分别为光子在内腔和外腔中的往返时间 (即 $\tau_{\text{int}} = 2n_{\text{eff}} L_{\text{int}}/c, \tau_{\text{ext}} = 2L_{\text{ext}}/c$); $\omega_m = 2\pi c/\lambda_m$ 为第 m 个子光束在外腔中的振荡频率; ω_j 为串扰光在外腔中的振荡频率; τ_j 为串扰光在外腔的往返时间; κ_j, κ_m 分别为串扰光反馈因子和第 m 个子单元反馈因子, 可表示为

$$\kappa = (1 - R_2) \sqrt{\frac{R_{\text{eq},m}}{R_2}}, \quad (15)$$

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = \frac{1}{2} \left[G_N [N_m(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right] E_m(t) + \frac{\kappa_m}{\tau_{\text{int}}} E_m(t - \tau_{\text{ext}}) \cos[\psi_m(t)] + \sum_{j=1}^m \frac{\kappa_j}{\tau_{\text{int}}} E_j(t - \tau_j) \cos[\psi_j(t)], \quad (17)$$

式中: $\psi_m(t) = \omega_m \tau_{\text{ext}} + \varphi_m(t) - \varphi_m(t - \tau_{\text{ext}}), \psi_j(t) = \omega_j \tau_j + \varphi_j(t) - \varphi_j(t - \tau_j)$ 。

载流子密度速率方程为

2.2 光束谱合成系统的合束效率模型

半导体激光阵列子单元与外腔构成的谐振腔等效结构如图 3 所示, 其中, R_1, R_2 和 R_{eq} 分别为激光器内腔前端面、后端面和外腔的等效反射率, I_1, I_2 和 I_3 分别表示由激光器后腔面出射的光强、耦合镜输出光强和经过外腔反馈入内腔的光强, n_{eff} 为内腔有效折射系数, L_{int} 和 L_{ext} 分别为内腔腔长和外腔腔长 (后腔面与输出耦合镜之间的空间为外腔)。

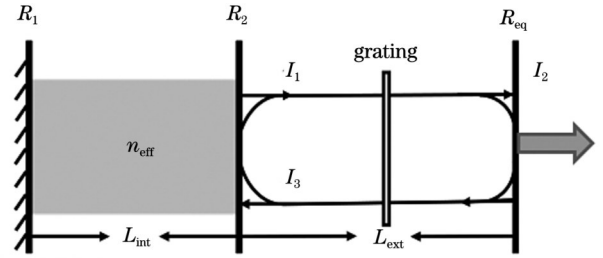


图 3 光栅-外腔谱合成的等效腔结构示意图

Fig. 3 Schematic of equivalent cavity of grating-external cavity spectral beam combining (SBC) system

将光栅-外腔谱合成系统视为中弱度反馈系统, 只考虑光在外腔中的一次反馈^[34]。采用 Lang-Kobayashi 方程描述含串扰光注入的半导体激光器速率方程^[23], 即

式中: $R_{\text{eq},m}$ 为外腔对第 m 个子单元总的等效反射系数^[25]。考虑到单元 n 串扰到单元 m , 结合式 (13), 可以得到

$$R_{\text{eq},m} = \frac{P_{\text{reflected}}}{P_{\text{emitted}}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I'_m(x'', z) dx''}{\int_{-\infty}^{+\infty} I_0(x_0, 0) dx_0}, \quad (16)$$

式中: P 表示功率; $I_0(x_0, 0)$ 表示直接从第 m 个子单元输出的光束的光强分布, 其表达式为 $I_0(x_0, 0) = |E_m(x_0, 0)|^2$ 。

将 $\tilde{E} = E(t) \exp[i\varphi(t)]$ 代入式 (14), 并分离实部可得

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = R - \frac{N_m(t)}{\tau_c} - G_N [N_m(t) - N_0] |E_m(t)|^2, \quad (18)$$

式中:等号右边三项从左到右分别代表由注入电流产生的载流子密度增加、由载流子寿命决定的载流子减少以及由光增益引起的载流子减少; R 为单位体积的载流子注入率,即 $R=J/(eV)$,这里 e 为电子电量, J 为

注入电流密度, V 为二极管有源区体积; τ_c 为载流子寿命。当激光稳定连续输出时, $dE_m(t)/dt=0$ 并且 $dN(t)/dt=0$,此时,激光器后端面的输出光强可以表示为

$$I_m = (1 - R_2) |E_m|^2 = (1 - R_2) \frac{\tau_p}{\tau_c} \times \frac{R\tau_c - N_T + 2\kappa_m \frac{\cos(\omega_m \tau_{ext})}{G_N \tau_{int}} + 2 \sum_{j=1}^m \frac{\kappa_j \cos(\omega_j \tau_j)}{G_N \tau_{int}}}{1 - 2\kappa_m \tau_p \frac{\cos(\omega_m \tau_{ext})}{\tau_{int}} - 2 \sum_{j=1}^m \frac{\kappa_j \tau_p \cos(\omega_j \tau_j)}{\tau_{int}}}, \quad (19)$$

式中: $N_T=N_0+1/(G_N \tau_p)$ 为阈值载流子密度。具有光反馈的激光器的输出光经过光栅外腔后的光强分布为

$$I_{2m} = I_m T_{eq,m}, \quad (20)$$

式中: $T_{eq,m}$ 为光栅外腔对第 m 个子光束总的等效透射系数^[25]。考虑到单元 n 串扰到单元 m ,可得

$$T_{eq,m} = \frac{P_{transmitted}}{P_{emitted}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I_{2m}(x, z) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} I_0(x_0, 0) dx_0}. \quad (21)$$

由式(19)知,当激光器无反馈光进入时($\kappa_m=0, \kappa_j=0$),激光器后腔面的输出光强为

$$I_{0m} = (1 - R_2) \frac{\tau_p}{\tau_c} (R\tau_c - N_T). \quad (22)$$

于是,第 m 个子单元通过光栅外腔后的合束效率为

$$\eta_m = \frac{I_{2m}}{I_{0m}} = \frac{1 + 2\kappa_m \cos(\omega_m \tau_{ext}) / [G_N \tau_{int} (R\tau_c - N_T)] + 2\kappa_j \cos(\omega_j \tau_j) / [G_N \tau_{int} (R\tau_c - N_T)]}{1 - 2\kappa_m \tau_p \cos(\omega_m \tau_{ext}) / \tau_{int} - 2\kappa_j \tau_p \cos(\omega_j \tau_j) / \tau_{int}} \cdot T_{eq,m}. \quad (23)$$

假设DLA每个子单元发出的激光能量相同,则可得到光栅外腔总的合束效率为

$$\eta = \frac{\sum_{m=-M}^M \eta_m}{2M + 1}, \quad (24)$$

式中: M 为子单元数量。

3 考虑光串扰的合束特性分析

基于建立的光束谱合成系统模型,以5束子光源为例,分别就子单元发散角、指向角偏差等非完善因素以及谱合成系统参数对合成效率及光束质量的影响进行数值模拟与分析。所采用的计算参数^[21,23-24,31,35-36]如表1所示。

表1 谱合成系统模型所用模拟参数

Table 1 Simulation parameters used in spectral beam combining system model

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
$w_0 / \mu\text{m}$	100	T_1	99%	n_{eff}	3.50
$\Delta\rho / \mu\text{m}$	500	R_c	10%	t_p / ps	3.50
f / cm	20	V / cm^3	1.60×10^{-10}	t_c / ns	2.00
$\gamma / (^\circ)$	15.80	$R_2 / \%$	3.00	$G_N / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.25×10^{-12}
λ_0 / nm	808	z_0 / cm	20	N_0 / cm^{-3}	2.50×10^{18}
d / mm	1/600	$L_{\text{int}} / \mu\text{m}$	500	I / mA	50
$\eta_g / \%$	90	$\eta_0 / \%$	75	$L_{\text{ext}} / \text{cm}$	30

3.1 子单元发散角对合束性能的影响

根据当前的制造工艺水平,二极管巴条快轴方向准直之后的发散角可在 $400 \mu\text{m}$ 巴条间距下控制在

$0.5^\circ \sim 1.5^\circ$ 范围内^[37-40]。以Lumibird公司的QD-Q1yzz系列连续波(CW)二极管巴条为例进行计算分析,DLA子单元经准直后在合束方向上的光束发散角约

为 8 mrad。为更加充分地说明发散角对合束特性的影响规律,以最大发散角 θ_{\max} 在 0~12 mrad 之间为例,进行多次重复计算,得到一系列结果。在考虑光束自身发散角的影响时,每一子光束经透镜传输后的波前曲率半径 R_m 对应一个发散角 θ_m 。采用伪随机方式进行模拟计算,第 m 个子光束的球面相位因子可表示为 $R_m = \text{random}(0, 1) \times R_{\max}$, 其中, $\text{random}(0, 1)$ 表示在区间 (0, 1) 内随机分布的随机数, R_{\max} 为最大曲率半径。在大量计算过程中发现,由于子单元数目较少,如果只进行单次计算就会产生较大的随机偏差。为充分展现发散角和指向角偏差等因素对合束特性的影响规律,

进行了多次计算。多次计算后发现,重复进行 11 次计算之后的计算结果已经收敛,因而本文以 11 次为例进行计算分析。图 4(a)、(b) 分别给出了 $\theta_{\max}=6$ mrad 和 $\theta_{\max}=12$ mrad 时,每一个子单元发出的子光束返回到子单元自身的光强分布。为了更直观地观察子单元返回自身的光强分布,在图 4(a)、(b) 中加入了各个子单元的发光窗口(黑色短划线)。本文随机产生了 11 组球面相位因子 R_m , 用多次计算结果的均值分析发散角对合成光束质量和合束效率的影响,用方差表征多次计算结果的偏离程度。图 4(c) 和图 4(d) 给出了合束效率、光束质量和反馈强度随子单元发散角的变化。

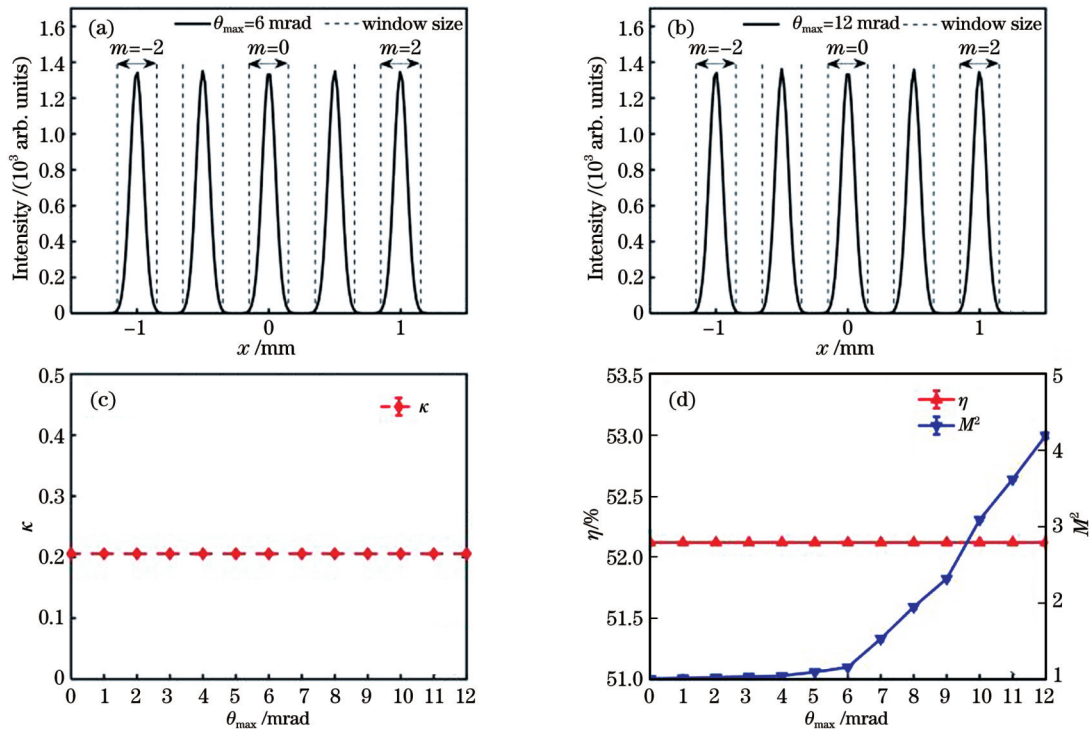


图 4 反馈回子单元自身的光强分布以及反馈强度、合束效率和光束质量因子随最大发散角的变化。(a)最大发散角 $\theta_{\max}=6$ mrad 时的光强分布;(b)最大发散角 $\theta_{\max}=12$ mrad 时的光强分布;(c)反馈强度随最大发散角的变化;(d)合束效率(η)和光束质量因子(M^2)随最大发散角的变化

Fig. 4 Intensity distribution of feedback to sub-unit itself, and the variations of feedback intensity, combined beam efficiency and beam quality factor with maximum divergence angle. (a) Intensity distribution at maximum divergence angle of 6 mrad; (b) intensity distribution at maximum divergence angle of 12 mrad; (c) variation of feedback intensity with maximum divergence angle; (d) variation of combined beam efficiency (η) and beam quality factor (M^2) with maximum divergence angle

分析图 4(a) 和图 4(b) 可知:当子单元仅存在发散角时,各子单元发出的光束经输出耦合镜部分反射后均可以反馈回子单元自身,从而形成自激振荡;在最大发散角为 1~12 mrad 的情况下,反馈回自身的光强峰值几乎都下降为初始光强的 10^{-3} 量级。由图 4(c) 和图 4(d) 可知,随着子单元最大发散角增大,光束质量因子 M^2 、合束效率 η 和反馈强度 κ 的变化并不明显。特别地,当 $\theta_{\max}=6$ mrad 时,合成光束质量发生突变。这是因为当子单元自身最大发散角 $\theta_{\max}<6$ mrad 时,合成光束的光斑与理想情况相比只是略微增大,因此光束质量恶化不明显;然而,随着发散角进一步

增大,特别是增大到 12 mrad 时,合成光束的光斑尺寸显著增大,导致合成光束质量急剧降低。不过,随着发散角增大,子单元中心并未发生偏移,进而对串扰的影响比较小,所以对反馈强度和合束效率的影响较小。

3.2 子单元指向角偏差对合束性能的影响

在 DLA 谱合成系统中,除了激光二极管(LD)阵列面封装应力等引起的“smile”工艺误差外,在传输过程中出现的合束准直等误差,均会导致 LD 阵列面存在指向角偏差,使得输出耦合镜部分反射的反馈光无法返回子单元自身,进而导致光束质量和合束效率严

重降低。为了探究指向角偏差对串扰行为和合束性能的影响,采用随机分布模型描述系统的指向角偏差 Φ ,并在区间 $(-1,1)$ 内的随机数中抽取 11 组指向角偏差进行模拟。

当只考虑子单元指向角偏差时,得到了 $\Phi_{\max}=0.65$ mrad、 $\Phi_{\max}=1.00$ mrad、 $\Phi_{\max}=1.24$ mrad 时 DLA

阵列光束返回到阵列面的光强分布,如图 5(a)~(c)所示。图 5(d)以编号为-1的子单元串扰到编号为-2的子单元中的光束为例,给出了串扰光反馈强度(κ_{-2-1})随 Φ_{\max} 的变化。此外,模拟得到的合束效率 η 、光束质量因子 M^2 随 Φ_{\max} 的变化,如图 5(e)所示。

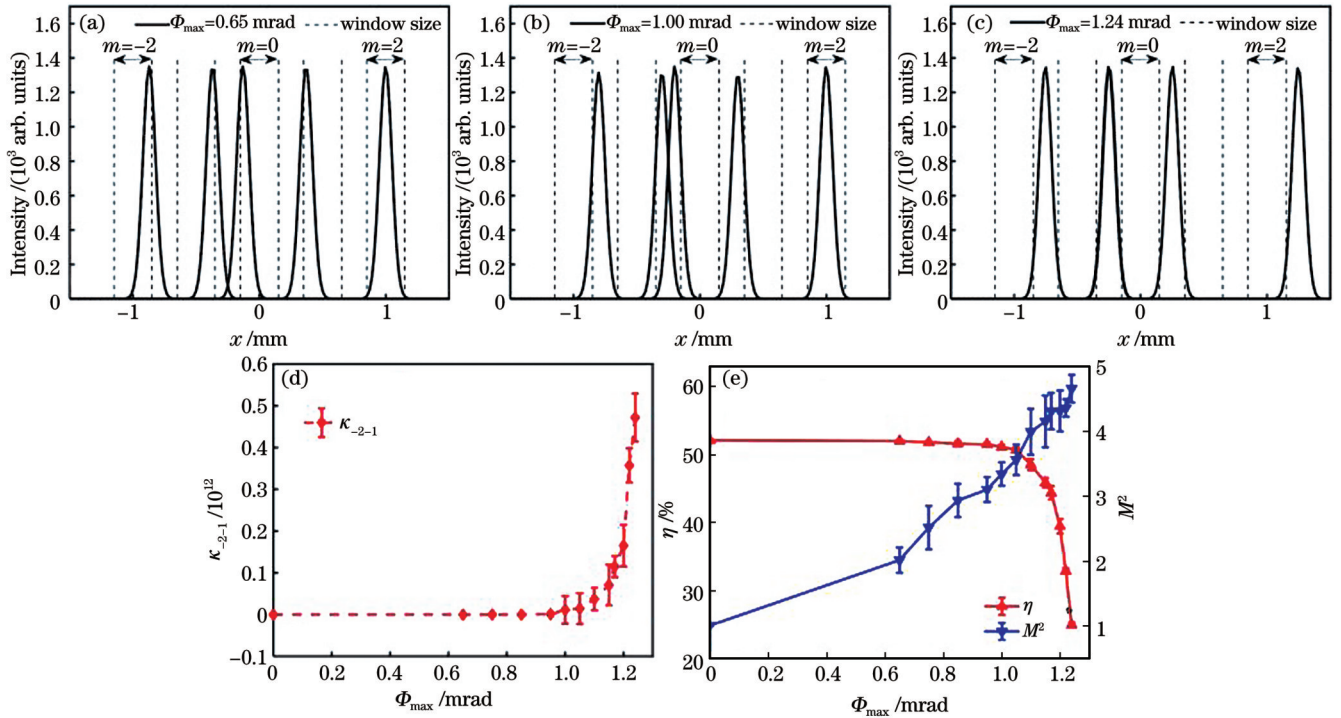


图 5 反馈回阵列面的光强分布以及串扰光反馈强度、合束效率和光束质量因子随最大指向角偏差 Φ_{\max} 的变化。(a) $\Phi_{\max}=0.65$ mrad 时的光强分布;(b) $\Phi_{\max}=1.00$ mrad 时的光强分布;(c) $\Phi_{\max}=1.24$ mrad 时的光强分布;(d)串扰光反馈强度随 Φ_{\max} 的变化;(e)合束效率和光束质量因子随 Φ_{\max} 的变化

Fig. 5 Intensity distribution of feedback to array plane, and variations of cross beam feedback intensity, combined beam efficiency and beam quality factor with maximum deflection angle Φ_{\max} . (a) Intensity distribution when $\Phi_{\max}=0.65$ mrad; (b) intensity distribution when $\Phi_{\max}=1.00$ mrad; (c) intensity distribution when $\Phi_{\max}=1.24$ mrad; (d) variation of crosstalk beam feedback intensity with Φ_{\max} ; (e) variation of combined beam efficiency and beam quality factor with Φ_{\max}

从图 5(a)~(c)可以看出,由于各个子单元具有不同的指向角偏差,反馈回子单元自身的光场发生了不同程度的偏移。以编号为 $m=0$ 的子单元为例,随着子单元指向角偏差增大,反馈回自身子单元的子光束能量份额逐渐减少,当 Φ_{\max} 增大到 1.24 mrad 时,子光束几乎无法返回到自身,有很大一部分子光束反馈到其他子单元,出现了明显的串扰。

分析图 5(d)和图 5(e)可知,串扰光的反馈强度随着 Φ_{\max} 的增大先基本不变而后迅速增大,合束效率随着 Φ_{\max} 的增大先基本不变而后迅速降低,光束质量随着 Φ_{\max} 的增大而明显降低。并且,与发散角相比,指向角偏差对合束性能的影响更大。特别地,当 Φ_{\max} 在 1.00~1.24 mrad 范围内时,随着 Φ_{\max} 增加,合束效率和光束质量迅速下降,串扰光反馈强度快速增加。这是因为指向角偏差使得发光单元的光轴出现严重偏离,导致输出耦合镜上的光斑变大,进而导致子单元自身

发射光束大部分返回到其他子单元的发光区域,因此自身反馈强度降低,影响了谱合成系统的合成效率和光束质量。

从图 5(e)还可以看出,当最大指向角偏差 $\Phi_{\max}=1.00$ mrad 时,合束效率急剧降低。为了分析这一现象产生的原因,进一步给出了 $\Phi_{\max}=0.95$ mrad、 $\Phi_{\max}=1.00$ mrad 和 $\Phi_{\max}=1.05$ mrad 时返回 LD 阵列面的光强分布,如图 6 所示。分析图 5 可知,当最大指向角偏差从 $\Phi_{\max}=0.95$ mrad 增大到 $\Phi_{\max}=1.05$ mrad 过程中,以编号为 $m=0$ 的子单元的串扰情况为例,编号为 $m=1$ 的子单元串扰到该子单元(编号为 $m=0$ 的子单元)的能量份额逐渐加大,导致串扰光的反馈强度快速增强,进而导致合成效率急剧下降。

为了进一步分析发散角和指向角偏差综合作用对合束效率和光束质量的影响,图 7 给出了发散角一定时谱合成系统的合束效率和光束质量因子随最大指向

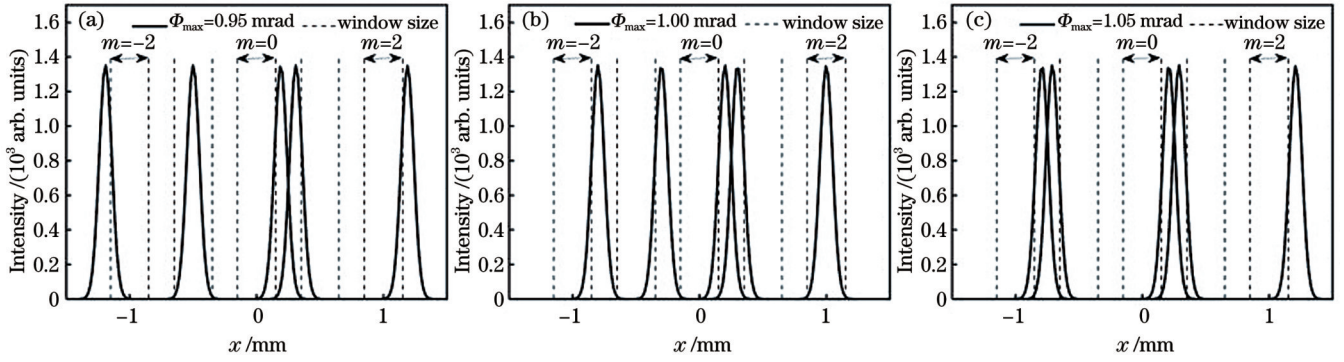


图 6 不同 Φ_{\max} 下反馈回 LD 阵列面的光强分布。(a) $\Phi_{\max} = 0.95$ mrad; (b) $\Phi_{\max} = 1.00$ mrad; (c) $\Phi_{\max} = 1.05$ mrad

Fig. 6 Intensity distribution of feedback to LD array plane under different Φ_{\max} values. (a) $\Phi_{\max} = 0.95$ mrad; (b) $\Phi_{\max} = 1.00$ mrad; (c) $\Phi_{\max} = 1.05$ mrad

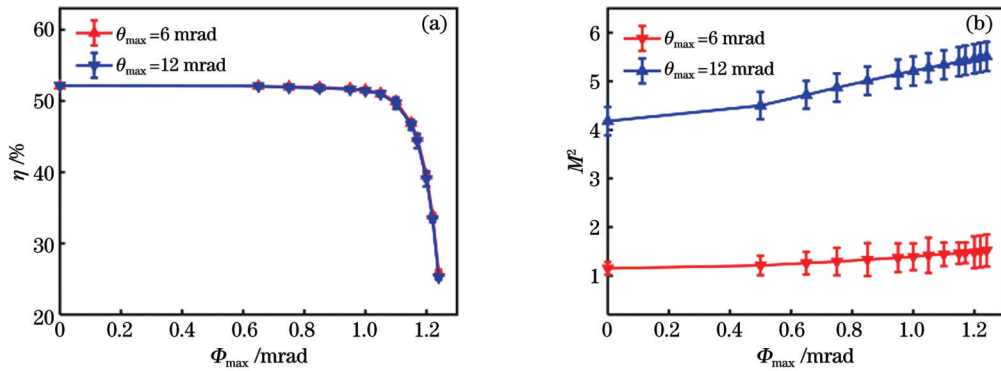


图 7 合束效率、光束质量因子随最大发散角 θ_{\max} 和最大指向角偏差 Φ_{\max} 的变化。(a) 合束效率; (b) 光束质量因子

Fig. 7 Variations of combined beam efficiency and beam quality factor in maximum divergence angle θ_{\max} and maximum deflection angle Φ_{\max} . (a) Combined beam efficiency; (b) beam quality factor

角偏差的变化。

分析图 7 可知,在给定的最大发散角下,合束效率随着最大指向角偏差 Φ_{\max} 的增大先基本保持不变,而后急剧下降,而光束质量则明显恶化。在给定的最大指向角偏差 Φ_{\max} 下,最大发散角在 12 mrad 以内时,合束效率随最大发散角的增大基本保持不变,但光束质量会明显降低。进一步结合图 4(c)和图 4(d)可知,虽然发散角对串扰和反馈强度的影响不大,但发散角和指向角偏差二者的综合作用使得子光束的传输方向发

生了严重偏离,最终导致合束效率显著降低,光束质量明显恶化。

3.3 系统参数对临界指向角偏差的影响

进一步分析图 5(e)和图 7(a)可知存在一个临界最大指向角偏差。为探究系统参数对临界最大指向角偏差的影响,研究了不同系统参数下,合束效率随最大指向角偏差的变化,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,对于给定的透镜焦距、子单元间距和光栅线密度,合束效率随最大指向角偏差 Φ_{\max} 的

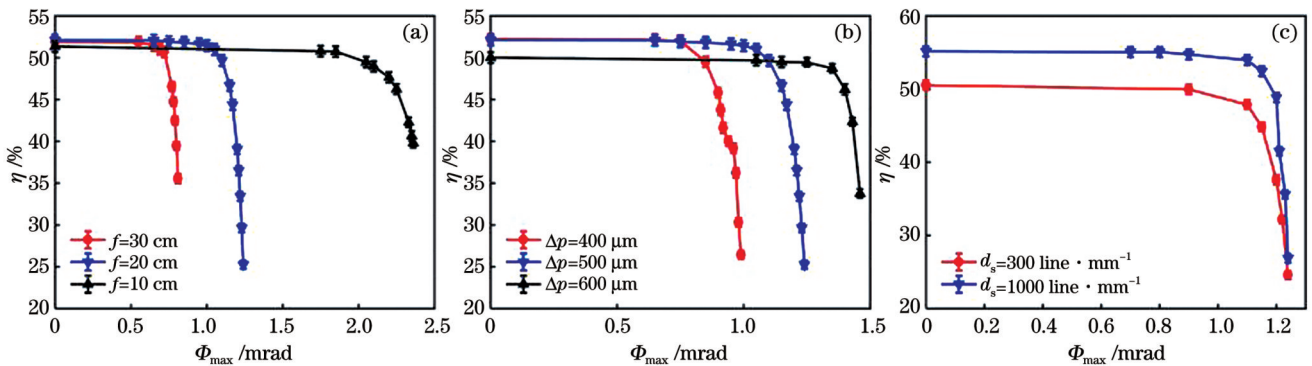


图 8 系统参数对合束效率的影响。(a) 透镜焦距 f 的影响; (b) 子单元间距 Δp 的影响; (c) 光栅线密度 d_s 的影响

Fig. 8 Influence of system parameters on combined beam efficiency. (a) Influence of transform lens focus; (b) influence of distance Δp between adjacent emitters; (c) influence of grating line density d_s

增大先基本保持不变而后急剧下降。进一步分析图 8(a)可知,改变透镜焦距,临界指向角偏差会发生变化,并且透镜焦距越小,临界指向角偏差越大。这是由于当子单元间距、光栅线密度给定时,透镜焦距越小,输出耦合镜上的光斑越小,只有当临界指向角偏差变大时,反馈光才会更容易串扰到其他子单元,导致串扰比例增大,进而导致合束效率降低。从图 8(b)可以看出,子单元间距越小,临界指向角偏差越小。这是由于当透镜焦距、光栅线密度给定时,对于较小的子单元间距,即使较小的指向角偏差也会导致反馈回阵列面的子光束更容易串扰到其他子单元,导致合束效率降低。分析图 8(c)可知,改变光栅线密度对临界指向角偏差基本没有影响,但线密度越低时合束效率越小。这是由于当透镜焦距、子单元间距给定时,光栅线密度的变化主要引起衍射效率发生变化,但几乎不会引起串扰现象。由此可见,透镜焦距、子单元间距对临界最大指向角偏差存在明显影响,而光栅线密度对临界最大指向角偏差的影响较小。

对于实际的系统而言,短焦距透镜除了加工难度较大外,像差也较难控制,增大子单元间距则不利于子光束数量的增加以及合束功率的提升。因此,在实际工程应用中,可以先对谱合成前的列阵光源进行预处理,压缩其输出光束的发散角,从而降低对变换透镜焦距的要求,同时也可以适当减小系统光学元件的尺寸^[41]。此外,还应采取措施抑制串扰光的产生,避免串扰光束降低合束性能,并在像差可控的范围内适当减小透镜焦距,在子光束数量尽可能增多的情况下适当增大子单元间距。

4 结 论

为深入研究谱合成系统的光束串扰行为,基于 DLA 光栅-外腔谱合成系统中的光束传输特性,建立了 DLA 在外腔往返的光传输模型,并结合含串扰光注入的半导体激光器速率方程,构建了考虑串扰光影响的谱合成系统合成效率物理模型。在此基础上,开展了串扰光形成机制及其对合束性能影响的理论研究,并详细讨论了透镜焦距、子单元间距和光栅线密度等因素对合束性能的影响。结果表明:在 DLA 光栅-外腔谱合成系统中,串扰光反馈强度随着指向角偏差的增加而明显增大,导致合束效率和光束质量显著下降。子单元自身发散角对合束效率和反馈强度的影响并不大,但会导致光束质量明显劣化。总体来说,子单元指向角偏差对合束性能的影响明显大于发散角的影响,在实际应用中需要严格控制。此外,透镜焦距、子单元间距对临界最大指向角偏差具有明显影响,而光栅线密度的影响则相对较小,但线密度越小时合束效率就越低。本文研究结果可为 DLA 谱合束系统合束效率和光束质量的提升提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 郑也,倪庆乐,张琳,等.受激拉曼散射对高功率激光传输特性影响研究[J].中国激光,2021,48(7):0701005.
Zheng Y, Ni Q L, Zhang L, et al. Influence of stimulated Raman scattering on propagation properties of high-power laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0701005.
- [2] 张俊,王靖博,彭航宇,等.分离反射式中继成像光谱合束光源[J].中国激光,2022,49(23):2301001.
Zhang J, Wang J B, Peng H Y, et al. Spectral beam combining of diode lasers based on separate reflective relay imaging lens[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2301001.
- [3] 郑也,何苗,刘小溪,等.基于二向色镜的高功率激光组束实验研究[J/OL].激光与光电子学进展:1-11[2022-09-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220709.1833.018.html>.
Zheng Y, He M, Liu X X, et al. Experimental study on high power laser beam combining by dichroic mirrors[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress: 1-11[2022-09-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220709.1833.018.html>.
- [4] Trela N, Baker H J, Wendland J J, et al. Dual-axis beam correction for an array of single-mode diode laser emitters using a laser-written custom phase-plate[J]. Optics Express, 2009, 17(26): 23576-23581.
- [5] Zhu Z D, Gou L, Jiang M H, et al. High beam quality in two directions and high efficiency output of a diode laser array by spectral-beam-combining[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17804-17809.
- [6] 孟慧成.半导体激光器光栅-外腔光谱合束技术研究[D].北京:中国工程物理研究院,2015.
Meng H C. The study of spectral beam combining on diode laser by grating and external cavity[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2015.
- [7] Yu H, Ma X H, Zou Y G, et al. Beam shaping design for fiber-coupled laser-diode system based on a building block trapezoid prism[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 366-369.
- [8] Yu H, Zhao X, Wu X J, et al. Integrated beam shaping and polarization beam combining design for fiber-coupled semiconductor laser stacks system[J]. Applied Optics, 2017, 56(34): 9510-9514.
- [9] 武德勇,吕文强,魏彬,等.高功率叠阵二极管激光器光束整形[J].强激光与粒子束,2014,26(10):38-42.
Wu D Y, Lü W Q, Wei B, et al. Beam reshape of high power laser diode stack[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(10): 38-42.
- [10] Yan Y X, Zheng Y, Duan J A. Influence of positioning errors of optical shaping components for single emitter laser diode on beam shaping effects[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(10): 2814-2821.
- [11] 邵晓阳.大功率半导体激光器阵列光束整形[D].大连:大连理工大学,2011.
Shao X Y. High-power diode laser array beam shaping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [12] 彭航宇,顾媛媛,单肖楠,等.大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J].中国激光,2011,38(2):0202010.
Peng H Y, Gu Y Y, Shan X N, et al. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 0202010.
- [13] 王祥鹏,李再金,刘云,等.半导体激光器阵列的 smile 效应与封装技术[J].光学精密工程,2010,18(3):552-557.
Wang X P, Li Z J, Liu Y, et al. Smile effect and package technique for diode laser arrays[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(3): 552-557.
- [14] 贾冠男,尧舜,潘飞,等.探针扫描法快速测量半导体激光阵列 smile 效应[J].红外与激光工程,2015,44(12):3576-3579.
Jia G N, Yao S, Pan F, et al. Smile effect of laser diode arrays measured by stylus scan method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(12): 3576-3579.

- [15] 李景, 曹银花, 刘友强, 等. 基于外腔反馈二极管阵列的 smile 效应测量方法[J]. 发光学报, 2017, 38(10): 1302-1306.
Li J, Cao Y H, Liu Y Q, et al. Smile effect measurement of laser diode line arrays based on external cavity[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(10): 1302-1306.
- [16] 李弋, 郑钢, 雷军, 等. 二极管激光器阵列封装工艺对 smile 效应影响因素分析[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 30-33.
Li Y, Zheng G, Lei J, et al. Relation between smile effect and packaging of laser diode arrays[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(3): 30-33.
- [17] 张宏友. 半导体激光器阵列近场非线性形变机理及降低方法研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2020.
Zhang H Y. Study on the near-field nonlinearity deformation of semiconductor laser diode array and the reduction methods[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [18] Bai G, Shen H, Yang Y F, et al. Theoretical analysis of beam quality degradation in spectral beam combining of fiber laser array with beam deviation[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 281-287.
- [19] Wu Z, You S D, Du Q, et al. Influence of smile effect on beam properties of spectrally combined beams based on diode laser stacks[J]. Optics Communications, 2020, 471: 126031.
- [20] Wu Z, Yang L, Zhong Z Q, et al. Influence of laser array performance on spectrally combined beam[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(19): 1972-1980.
- [21] 杨磊, 钟哲强, 吴真, 等. DLA 光源质量对光栅-外腔谱合成系统光束质量的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(10): 3381-3387.
Yang L, Zhong Z Q, Wu Z, et al. Effects of the DLA light source quality on the beam quality of combined beam in spectral beam combining systems with grating-external cavity[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(10): 3381-3387.
- [22] 郎超, 尧舜, 陈丙振, 等. 半导体激光器阵列的“Smile”效应对光束质量的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502006.
Lang C, Yao S, Chen B Z, et al. “Smile” effect on the beam quality for diode laser arrays[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0502006.
- [23] 钟哲强, 杨磊, 胡小川, 等. 二极管激光阵列光栅-外腔谱合成系统中光束串扰行为及其对合成效率的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1002010.
Zhong Z Q, Yang L, Hu X C, et al. Light crosstalk and its effect on combining efficiency of diode laser array grating-external cavity spectral beam combining system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1002010.
- [24] Yang L, Wu Z, Zhong Z Q, et al. Effect of crosstalk on combined beam characteristics in spectral beam combining systems[J]. Optics Communications, 2017, 384: 30-35.
- [25] Wu Z, Yang L, Zhang B. Effect of crosstalk on spectrally combined beam properties and efficiency in external cavities[J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2834-2842.
- [26] Ma H J, Xiao Y, Hu C, et al. Theoretical and experimental research on crosstalk in spectral beam combining of a laser diode bar with a high fill factor[J]. Applied Optics, 2021, 60(26): 8213-8220.
- [27] Song Y Y, Yu X, Hu C, et al. Analysis of crosstalk in spectral beam combining of diode laser bar[J]. Applied Optics, 2022, 61(12): 3390-3399.
- [28] Haas M, Rauch S, Nagel S, et al. Beam quality deterioration in dense wavelength beam-combined broad-area diode lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017, 53(3): 2600111.
- [29] Haas M, Rauch S, Nagel S, et al. Thin-film filter wavelength-stabilized, grating combined, high-brightness kW-class direct diode laser[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17657-17670.
- [30] 潘雷雷, 张彬, 阴素芹, 等. 掺 Yb 光纤激光器阵列谱合成系统的光束传输模型及光束特性分析[J]. 物理学报, 2009, 58(12): 8289-8296.
Pan L L, Zhang B, Yin S Q, et al. Analysis of the beam characteristics and the propagation model of spectral combining systems for Yb-doped fiber lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(12): 8289-8296.
- [31] 张艳, 张彬, 祝颂军. 谱合成光束特性的模拟分析[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4590-4595.
Zhang Y, Zhang B, Zhu S J. Analysis of the property of the beam after spectral beam combining[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4590-4595.
- [32] 吴真, 钟哲强, 杨磊, 等. 基于多层介质膜光栅的谱合成系统光束特性分析[J]. 物理学报, 2016, 65(5): 054205.
Wu Z, Zhong Z Q, Yang L, et al. Analysis of characteristics of combined beam in spectral beam combining system based on multilayer dielectric grating[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(5): 054205.
- [33] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. High power diode lasers: technology and applications[M]. New York: Springer, 2007.
- [34] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.
- [35] 祝颂军, 张彬, 阴素芹, 等. 光纤激光器谱合成系统合成效率的计算分析[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 11-15.
Zhu S J, Zhang B, Yin S Q, et al. Analysis of combining efficiency of spectral combining technique for fiber lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1): 11-15.
- [36] 张艳, 张彬. 半导体激光器光束谱合成效率的分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 864-868, 872.
Zhang Y, Zhang B. Analysis of the spectral beam combining efficiency of diode laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 864-868, 872.
- [37] 潘春艳, 崔庆丰, 佟静波, 等. 变发散角半导体激光器光束整形发射系统设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1287-1293.
Pan C Y, Cui Q F, Tong J B, et al. Optical design of laser diode beam-shaping system with variable divergence angle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1287-1293.
- [38] 彭航宇. 大功率半导体激光光束整形及合束研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
Peng H Y. Study on high power diode laser with beam shaping and beam combining[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [39] 郭林辉, 高松信, 吕文强, 等. 二极管激光器快轴光准直[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2270-2273.
Guo L H, Gao S X, Lü W Q, et al. Fast axis beam collimation of diode laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2270-2273.
- [40] 于贺. 大功率半导体激光整形及光纤耦合系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
Yu H. High power semiconductor laser shaping and design of fiber coupling system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [41] 张艳. 光束谱合成技术及相关问题研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
Zhang Y. Study on beam combining technology and related problems[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.

Crosstalk of Spectral Combining System and Its Influence on Beam Combining Characteristics

Yan Qingqing¹, Zhong Zheqiang¹, Zhang Bin^{1*}, Wu Zhen², Cai Wei²

¹College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

²School of Science, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China

Abstract

Objective In diode laser array (DLA) grating-external cavity spectral beam combining (SBC) systems, the combining efficiency and beam quality are very important indicators. However, the beam crosstalk caused by imperfect factors including the divergence angle and deflection angle of DLA emitters results in the degradation of the output beam quality and combining efficiency. Therefore, to understand the physical mechanism of crosstalk in the round-trip propagation of the beams in a DLA grating-external cavity SBC system and further analyze its influence on the performance of the SBC system, the relationship between the crosstalk and the combining efficiency or beam quality is established. In addition, the influences of key factors, including the DLA spacing, focal length of the lens, and line density of the grating, on the performance of the SBC system are analyzed.

Methods To study the behavior of beam crosstalk and its influence on the performance of an SBC system, a round-trip propagation model of a DLA is established. On this basis, by taking the semiconductor laser rate equation involving beam crosstalk injection into consideration, a physical model of combining efficiency of the SBC system is also developed. Furthermore, the influence of the divergence angle and deflection angle on the beam combining performance is studied using numerical calculations and statistical analysis.

Results and Discussions With only the divergence angle considered, there is no obvious crosstalk (Fig. 4). This is because the beam emitted by each emitter can be fed back to itself after being reflected by the external cavity. Even when the divergence angle increases to 12 mrad, the beam quality factor M^2 , beam combining efficiency η , and feedback intensity κ are not strongly affected by the divergence angle. With only the deflection angle considered, the feedback beam from the external cavity exhibits different degrees of deviation (Fig. 5). With an increase in the deflection angle, the feedback beam reflected to its own emitter decreases in intensity, whereas the feedback intensity from the other emitters increases, resulting in crosstalk. When the effects of the divergence and deflection angles are considered comprehensively, the feedback beam to the emitters deviates significantly, resulting in an obvious degradation of the output beam quality and combining efficiency (Fig. 6). For a given maximum divergence angle, the combining efficiency remains almost unchanged as the maximum deflection angle increases and then decreases sharply beyond a certain angle. The output beam quality exhibits the same trend. For a given maximum deflection angle, the beam combining efficiency remains almost unchanged up to a divergence angle of 12 mrad, whereas the beam quality decreases significantly. In addition, the DLA spacing, focal length of the lens, and line density of the grating have almost no influence on the combining efficiency with an increase in the maximum deflection angle up to a certain angle, after which the efficiency decreases dramatically (Fig. 7).

Conclusions We established a round-trip propagation model of a DLA that can reveal the behavior of beam crosstalk and its influence on the performance of the SBC system. By taking the semiconductor laser rate equation involving beam crosstalk injection into consideration, we established a physical model for the combining efficiency of an SBC system. Based on numerical calculations and statistical analysis, we found that the influence of the deflection angle on the beam combining performance is greater than that of the divergence angle. In addition, we found that the focal length of the lens and the DLA spacing have obvious effects on the critical maximum deflection angle, whereas the line density of the grating has little effect on the critical maximum deflection angle. In conclusion, it is necessary to appropriately reduce the focal length of the lens and increase the DLA spacing in practical applications.

Key words laser optics; spectral beam combining; beam crosstalk; beam quality; combining efficiency