

# 基于平面光波导注入锁定技术的 分布式反馈激光器阵列相干合束光源

章郑豪<sup>1,2</sup>, 魏芳<sup>1,3\*</sup>, 武慧敏<sup>1</sup>, 苏庆帅<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 叶青<sup>1</sup>, 蔡海文<sup>1,3\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>张江实验室, 上海 201210

**摘要** 面向芯片化空间激光通信、激光雷达等应用对高功率激光光源的需求, 笔者将注入锁定到同一种子光的分布式反馈激光器(DFB激光器)阵列通过平面波导耦合器进行相干合束, 解决了单个DFB激光器功率受限的问题。为了研究基于注入锁定技术的DFB激光器阵列的相干合束效果, 测量了不同数目的注入锁定激光器在相干合束前后的光功率、相位噪声、相对强度噪声, 通过计算得到2、3、4个DFB激光器的合束效率分别为91.6%、87.8%、78.3%, 实现了相对于单个激光器的光功率放大, 同时通过理论分析和实验研究了相干合束对相位噪声及相对强度噪声的影响。

**关键词** 激光器; 注入锁定; 相干合束; 相位噪声; 相对强度噪声

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230467

## 1 引言

小型化、轻量化、低功耗是当前空间激光通信、激光雷达等应用对激光应用终端的共性需求<sup>[1-4]</sup>, 硅基光电芯片具有尺寸小、耗电少、成本低、集成度高、调制带宽大以及与CMOS制备工艺相兼容等优势, 为集成化激光应用终端提供了良好的解决方案<sup>[5-8]</sup>。但是, 硅是间接带隙半导体材料, 发光效率极低, 直接在硅基光电芯片上单片集成光源具有很高的工艺难度。当前较为成熟的方案是将III-V族激光器与硅基光电芯片进行混合集成, 为硅基光电芯片提供光源, 但在耦合过程中光源与硅基光电芯片的耦合损耗较大<sup>[9-11]</sup>, 对激光光源的功率要求较分立器件高<sup>[12-13]</sup>, 而目前采用单片集成或者混合集成的方法实现的高边模抑制比、窄线宽激光器的输出功率一般只有几十毫瓦<sup>[14-16]</sup>, 通常需要使用掺铒光纤放大器(EDFA)对片上光源的光功率进行放大, 但这又限制了光电芯片的集成度。因此, 高功率片上光源是当前芯片化激光应用系统亟待解决的问题。使用相干合束的方法可以使输出功率突破单一激光器输出功率的限制。相干合束通常包括两种方法, 一种是采用主振荡器功率放大器(MOPA)的方法, 另一种是采用注入锁定技术的相干合束方法<sup>[17]</sup>。近些年有许多关于片上MOPA方

案的研究, 如: Hou等<sup>[18]</sup>采用磷化铟单片集成的放大器阵列对分布式反馈激光器(DFB激光器)进行相干合束的光放大, 实现了大于100 mW的空间光输出。Morito等<sup>[19]</sup>利用偏振分集技术通过一个放大器芯片实现了相干合束的光放大。McKinzie等<sup>[14]</sup>采用包含4个半导体光放大器的放大器阵列, 实现了对波长在C波段可调的激光器的磷化铟单片集成的相干合束光放大, 平均输出功率达到180 mW。然而, 半导体光放大器产生的放大自发辐射会提高输出光噪声(噪声指数典型值为7 dB), 使得激光应用系统受到影响<sup>[20]</sup>, 而注入锁定技术中的从激光器会随着注入光功率的增大重现主激光器的光谱特性<sup>[21]</sup>, 故而研究人员提出了采用注入锁定技术的DFB阵列相干合束光源, 该技术更适合应用于对激光噪声较为敏感的相干探测激光应用系统。Musha等<sup>[17]</sup>使用两个注入锁定的Nd:YAG激光器实现了空间光的相干合束, 合束效率达到了94%, 但是该方案采用的是分立器件, 耦合器各臂之间的臂长差需要通过电子反馈环路进行实时补偿。笔者使用种子光源对内含4个DFB激光器的激光器阵列进行注入锁定, 之后使用平面光波导(PLC)耦合器进行相干合束来实现片上的光功率倍数增加(由于平面光波导具有小型化的优势, 耦合器各分支加工精度高, 而且配合主动温控后的相位波动

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-03-06; 录用日期: 2023-03-13; 网络首发日期: 2023-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(62275253)、上海市自然科学基金(21ZR1472100)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB43030400)

通信作者: \*weifang@siom.ac.cn; \*\*hwcai@siom.ac.cn

较小), 然后通过理论分析结合实验测量来探究影响合束功率、相位噪声、相对强度噪声的因素, 并使用合束效率来评价相干合束的效果。

## 2 实验装置

用于合束的激光器是一个四通道合束光发射组件 (TOSA), 采用的是蝶形封装, 其内部包含 4 个沿着从激光器出光方向平行排列的 DFB 激光器, DFB 激光器

阵列通过一个  $4 \times 1$  平面波导耦合器与管壳的尾纤进行耦合, 整体尺寸为  $30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 。4 个激光器的供电电流可以独立控制, 每两个激光器共用一个负极, 激光器的温度均由管壳内的一个 TEC (半导体制冷器) 进行控制。4 个 DFB 激光器具有良好的波长一致性, 当温度控制在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  并且供电电流均维持在  $350 \text{ mA}$  的情况下, DFB 激光器的波长偏差不超过  $0.24 \text{ nm}$ , 如图 1 所示。

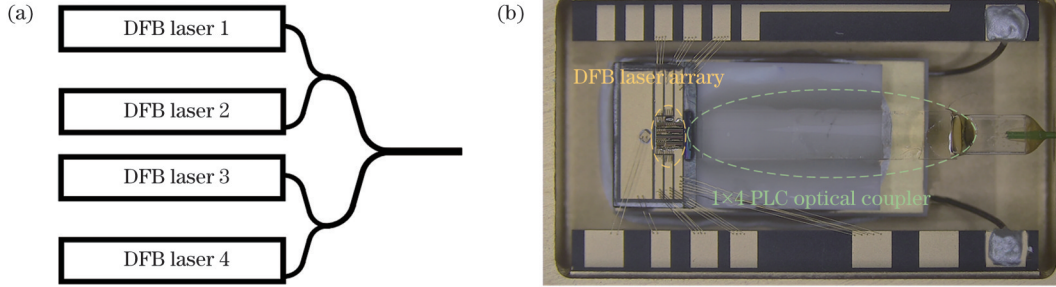


图 1 蝶形封装的四通道合束 TOSA。(a)原理图;(b)实物图 ( $30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ )

Fig. 1 Butterfly packaged four-channel combined transmitter optical subassembly. (a) Schematic; (b) physical diagram ( $30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ )

基于注入锁定的平面光波导的相干合束效果测试实验装置如图 2 所示。注入锁定的主激光器采用中心波长为  $1550.12 \text{ nm}$  的单频 DFB 光纤激光器 (NKT Photonics Koheras BASIK, X15)。主激光器输入到环形器端口 1 的光功率大小可以通过与二者相连的可调式光衰减器改变, 衰减后的主激光器激光作为种子光经过环形器端口 2 注入到从激光器, 通过调节激光器供电电流的方式改变 DFB 激光器

自由运转时的中心波长, 使 4 个 DFB 激光器的激光同时与主激光器激光完成注入锁定。由于从激光器的尾纤是单模光纤, 从激光器的注入锁定受到注入光偏振的影响, 因此采用偏振控制器改变注入光偏振态的方式来获得稳定的注入锁定。使用 OE4000 噪声测试仪对注入锁定状态下从激光器的输出光进行线宽、相位噪声和相对强度噪声测量。

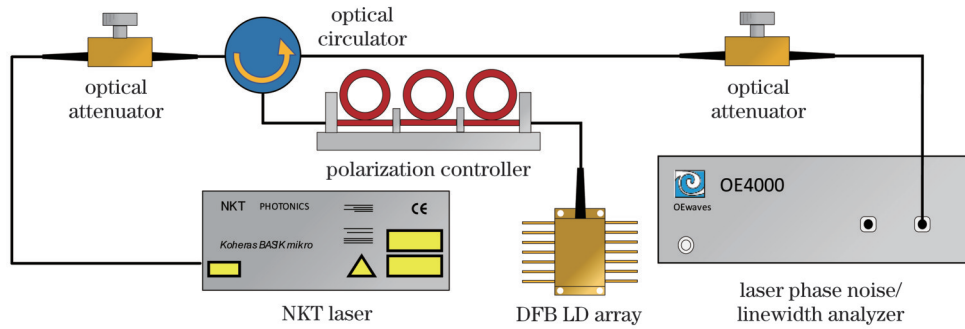


图 2 通过平面光波导耦合的注入锁定 DFB 激光器阵列的相干合束效果测试实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for testing the coherent beam combining effect of injection-locked DFB laser array coherently combined via planar lightwave

## 3 理论与实验结果分析

根据光的干涉原理<sup>[22]</sup>, 两束光强分别为  $I_1$ 、 $I_2$  的相干光的光场叠加后的光功率  $I_{\text{add}}$  为

$$I_{\text{add}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi), \quad (1)$$

式中:  $\Delta\phi$  表示两束光的相位差。同时, 根据注入锁定理论<sup>[23]</sup>, 在注入锁定之后主激光器相位  $\phi_M$  和从激光器相位  $\phi$  之间存在固定的相位差  $\Delta\phi$ , 这个相位差由注入

锁定的锁定范围  $\omega_{\text{lock}}$  以及从激光器自由运转频率  $\omega_s$  与主激光器频率  $\omega_M$  的差值共同决定, 即

$$\Delta\phi = \phi - \phi_M = \arcsin\left(\frac{\omega_s - \omega_M}{\omega_{\text{lock}}}\right). \quad (2)$$

将式(1)、(2)合并, 可以得到由从激光器频率偏移引起的相干叠加光功率为

$$I_{\text{add}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[\arcsin\left(\frac{\omega_s - \omega_M}{\omega_{\text{lock}}}\right)\right]. \quad (3)$$

实际情况下,由于平面光波导制作工艺的限制,耦合器各臂之间存在细微的臂长差,因此,为了在耦合器输出端实现光场的同相位叠加,需要各个激光器与主激光器之间保持不同的频率差。具体做法是:首先,给两个DFB激光器供电,通过调节电流的大小使两个激光器输出光波长与NKT激光器输出光波长一致。当DFB激光器电流变化时,载流子浓度会随之改变,从而引起有源区折射率和材料增益系数改变;当工作电流变大时,激光器的输出波长变大。所使用的激光器的电流调谐系数为0.002 nm/mA,温

度调谐系数为0.1 nm/°C。其次,将NKT激光器的输出衰减为1 mW后从环形器端口1注入,微调各个激光器的供电电流,使得环形器端口3的光功率达到最大值。此时激光器1和激光器2的工作电流分别为329.77 mA和302.01 mA,光功率分别为7.78 mW和7.06 mW。最后,在固定激光器1的工作电流的同时改变激光器2的工作电流,继续使用光功率计监控环形器端口3的光功率大小,并通过式(3)对测量结果进行曲线拟合,拟合结果和测量结果如图3所示。

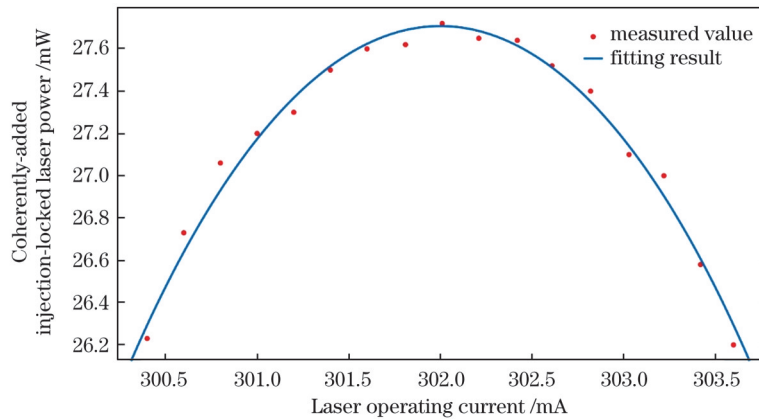


图3 激光器工作电流对两束注入锁定激光相干叠加后功率的影响

Fig. 3 Effect of laser operating current on the power after coherent addition of two injected locked laser beams

定义合束效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{I}{NI_{\text{total}}} = \frac{I}{N \left( \sum_{n=1}^N I_n \right)^{-1}}, \quad (4)$$

式中: $I$ 是在环形器端口3测得的DFB激光器阵列输出光合束后总的光功率; $N$ 是阵列中包含的激光器的数目,代表耦合时存在的固有损耗; $I_{\text{total}}$ 是指在环形器端口3测得的各个激光器的光功率之和; $I_n$ 指的是第 $n$ 个DFB激光器的输出光功率。对于 $N$ 个DFB激光器的激光注入锁定到同一个主激光器的情况,当 $N$ 个激光器的光场在耦合器输出端同相位相干叠加时,电场强度是单个激光器输出时的 $N$ 倍,而光功率是单个激光器输出光功率的 $N^2$ 倍。测量结果表明:对于两个激光器相干合束,合束效率可以达到91.6%。继续测量3个以及4个激光

器合束时的合束效率,激光器单独工作时输出的光功率以及此时的工作电流如表1所示。功率衰减到1.08 mW的NKT激光器的输出光作为种子光接入环形器端口1,测得3个激光器相干叠加后的输出光功率最大为28.80 mW,合束效率为87.8%,4个激光器相干叠加后的输出光功率最大为40.43 mW,合束效率为78.3%。

实验结果说明,被NKT激光器注入锁定后的各DFB激光器的输出光是存在相干性的,光束经过相干叠加后功率要高于各DFB激光器单独工作时的光功率之和。根据式(1)和式(4),不同DFB激光器在相同供电电流下的输出波长存在偏差,同时,平面波导耦合器输出端来自各激光器的光之间会存在残余相位差,所以合束效率会随着阵列中DFB激光器数目的增加而降低。

表1 DFB激光器的工作电流以及输出光功率

Table 1 Operating current and output optical power of the four DFB lasers

Serial number of the laser	Operating current for three lasers /mA	Optical power for three lasers /mW	Operating current for four lasers /mA	Optical power for four lasers /mW
1	257.3	3.895	255.4	3.874
2			134.2	2.368
3	179.2	3.273	171.9	3.105
4	186.9	3.764	179.5	3.561

在半经典理论中,激光电场矢量的大小<sup>[24]</sup>可以表示为

$$E(t) = [A_0 + a(t)] \exp\{j[\phi_0 + \phi(t)]\}, \quad (5)$$

式中: $A_0$ 、 $\phi_0$ 分别代表电场矢量在稳态下的均值幅度

和相位; $a(t)$ 、 $\phi(t)$ 分别代表幅度和相位的随机波动。

根据注入锁定频率噪声的分析理论<sup>[23]</sup>,注入锁定后DFB激光器的相位噪声由相位波动 $\phi_{\text{inj}}(t)$ 的功率谱



密度  $S_{\phi\text{INJ}}(\omega)$  表示, 而  $S_{\phi\text{INJ}}(\omega)$  可由主激光器相位波动  $\phi_M(t)$  的功率谱密度  $S_M(\omega)$  和功率谱密度传递函数  $|H_{\text{master}}(\omega)|^2$ , 以及 DFB 激光器自由运转时相位波动  $\phi_S(t)$  的功率谱密度  $S_S(\omega)$  和功率谱密度传递函数  $|H_{\text{slave}}(\omega)|^2$  共同决定, 即

$$S_{\phi\text{INJ}}(\omega) = |H_{\text{master}}(\omega)|^2 S_M(\omega) + |H_{\text{slave}}(\omega)|^2 S_S(\omega). \quad (6)$$

主激光器的相位波动与注入锁定后的从激光器的相位波动之间存在联系, 可以由差分相位波动  $\phi_{\text{inj}}(t) - \phi_M(t)$  的功率谱密度  $S_{\phi\text{DIFF}}(\omega)$  表示为

$$S_{\phi\text{DIFF}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi f\tau) \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [\phi_{\text{inj}}(t) - \phi_M(t)][\phi_{\text{inj}}(t-\tau) - \phi_M(t-\tau)] dt \right\} d\tau = |H_{\text{slave}}(\omega)|^2 [S_M(\omega) + S_S(\omega)], \quad (7)$$

式中:  $f$  为傅里叶频率, 它和角频率  $\omega$  之间的关系为  $\omega = 2\pi f$ ;  $T$  为积分区间。

当角频率  $\omega$  远小于从激光器的注入锁定带宽时, 主激光器功率谱密度传递函数  $|H_{\text{master}}(\omega)|^2$  近似为 1, 并且  $S_S(\omega) \gg S_M(\omega)$ 。此时的差分相位波动功率谱密度可以表示为

$$S_{\phi\text{Dlow}}(\omega) = S_{\phi\text{INJ}}(\omega) - S_M(\omega) = |H_{\text{slave}}(\omega)|^2 S_S(\omega). \quad (8)$$

当处于注入锁定状态, 从激光器的 DFB 激光器阵列中有两个激光器的供电电流超过激光器阈值电流时, 从激光器的输出光是两束激光的相干叠加, 如图 4 所示。图中  $\phi_{\text{inj}1}(t)$ 、 $\phi_{\text{inj}2}(t)$  分别表示两个 DFB 激光器的相位随时间的波动, 可以写成

$$\phi_{\text{inj}1,2}(t) = \phi_{\text{MO}1,2}(t) + \phi_{\text{SO}1,2}(t), \quad (9)$$

式中:  $\phi_{\text{MO}1}(t)$ 、 $\phi_{\text{MO}2}(t)$  与主激光器的相位波动有关。在理想状态下, 两个 DFB 激光器的工作状态一致, 所以具有相同的传递函数  $|H_{\text{slave}}(\omega)|^2$ , 而且  $\phi_{\text{MO}1}(t)$  与

$\phi_{\text{MO}2}(t)$  相关、大小相等。 $\phi_{\text{SO}1}(t)$ 、 $\phi_{\text{SO}2}(t)$  与处于自由运转下的两个 DFB 激光器各自的相位波动有关, 理想状态下二者相等但并不相关。

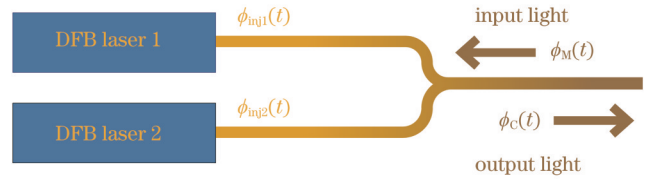


图 4 两个注入锁定的 DFB 激光器输出光相干叠加原理图  
Fig. 4 Schematic figure of coherent addition of the output light from two injection-locked DFB lasers

考虑平面波导不同臂的臂长的光程差  $\frac{n\Delta l}{c}$ , 其中  $n$  是平面波导的有效折射率,  $c$  是真空中光速,  $\Delta l$  为不同臂的臂长差, 同时用  $R(\tau)$  代表  $\phi_{\text{MO}1,2}(t)$  的自相关函数, 则两个注入锁定的 DFB 激光器相干叠加后的总相位波动  $\phi_C(t)$  的功率谱密度  $S_C(\omega)$  可以表示为

$$S_C(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi f\tau) \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [\phi_{\text{inj}1}(t) + \phi_{\text{inj}2}(t)][\phi_{\text{inj}1}(t-\tau) + \phi_{\text{inj}2}(t-\tau)] dt \right\} d\tau = 2S_{\phi\text{INJ}}(\omega) + \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi f\tau) \left[ R\left(\tau - \frac{n\Delta l}{c}\right) + R\left(\tau + \frac{n\Delta l}{c}\right) \right] d\tau = 2S_{\phi\text{INJ}}(\omega) + 2|H_{\text{master}}(\omega)|^2 S_M(\omega) \cos\left(\frac{n\Delta l}{c}\right). \quad (10)$$

实验中的相位噪声全部由 OE4000 激光相位噪声/线宽分析仪进行测量。首先测量两个激光器相干合束的相位噪声, 将主激光器的输出光功率大小衰减为 1.08 mW, 测试主激光器的相位噪声  $S_M(\omega)$ ; 然后按照图 1 搭建实验装置, 使用 ILX 公司的 3724 以及 3736 激光器驱动控制两个 DFB 激光器的工作电流, 将注入从激光器的光功率固定为 1.018 mW, 此时 DFB 激光器的锁定带宽在 GHz 量级。通过改变从激光器中工作的 DFB 激光器的数目, 在端口 3 分别测量一个注入

锁定 DFB 激光器的相位噪声  $S_{\phi\text{INJ}}(\omega)$  以及两个注入锁定 DFB 激光器光场相干叠加后的相位噪声  $S_C(\omega)$ 。

相位噪声测量结果见图 5。由于噪声分析仪测量的频率范围 ( $10^0 \sim 10^8$  Hz) 小于激光器的注入锁定带宽, 所以根据注入锁定理论<sup>[23]</sup>, 测得的注入锁定后的 DFB 激光器的相位噪声主要受主激光器相位噪声的影响。实验结果表明, 在低频段 ( $10^0 \sim 10^3$  Hz) 以及高频段 ( $4 \times 10^6 \sim 10^8$  Hz), 注入锁定的 DFB 激光器的相位噪声要略高于 NKT 激光器。根据式 (8), 此时相位

噪声超出部分是  $S_{\phi_{Dlow}}(\omega)$ , 代表主激光器与注入锁定后从激光器之间的相对相位波动,  $S_{\phi_{Dlow}}(\omega)$  已在图 5 中标出。在中频段, 注入锁定激光器的噪声水平较低。NKT 激光器本身的弛豫振荡峰并没有引入到锁定从激光器的相位噪声中, 但是从激光器的相位噪声在 50 Hz 工频以及其倍频处有明显的尖峰, 这是由激光器的电流驱动引入的。在  $10^3 \sim 10^8$  Hz 频率范围内,

$S_{\phi_{INJ}}(\omega)$  和  $S_C(\omega)$  近似相等, 光场相干叠加引入的相位噪声主要体现在低频部分。当两个激光器输出光进行相干合束光放大时, 式(10)中的  $\cos(n\Delta l/c)$  大于 0 小于 1, 所以  $S_C(\omega)$  是  $S_{\phi_{INJ}}(\omega)$  的 2~4 倍。在  $10^0 \sim 10^3$  Hz 频率范围内, 噪声测试仪共采集了 7779 个点, 计算得到此时  $S_C(\omega)$  与  $S_{\phi_{INJ}}(\omega)$  比值的平均值为 2.8577, 与理论分析结果相符。

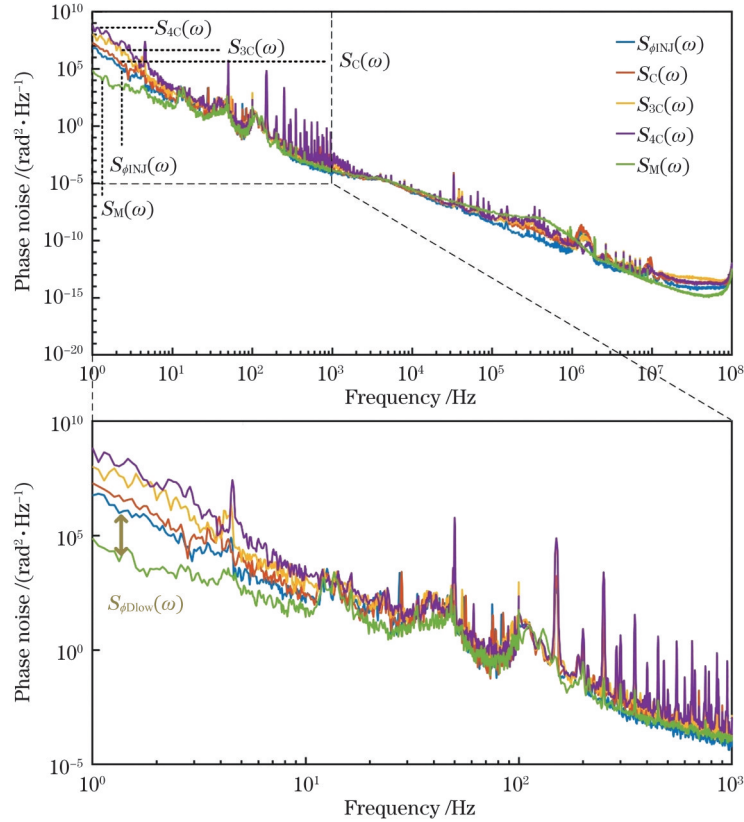


图 5 主激光器和包含不同 DFB 激光器数目的注入锁定从激光器的相位噪声

Fig. 5 Phase noise of the master laser and injection-locked slave lasers containing different numbers of DFB lasers

紧接着使用 Vescent 公司的 D2-105 激光器控制器对从激光器中的另外两个激光器分别供电。测量 3 个注入锁定 DFB 激光器光场相干叠加后的相位波动功率谱密度  $S_{3C}(\omega)$ , 以及 4 个注入锁定 DFB 激光器光场相干叠加后的相位波动功率谱密度  $S_{4C}(\omega)$ , 结果同样在图 5 中显示。在低频段 ( $10^0 \sim 10^3$  Hz), 参与相干合束的激光器数目与输出光的相位噪声正相关。其中  $S_{4C}(\omega)$  的工频噪声有明显增加, 在中高频段 ( $10^0 \sim 10^3$  Hz) 相位噪声  $S_{4C}(\omega)$  相对于  $S_{3C}(\omega)$  有所减小, 由式(10)可知这是由 4 个 DFB 激光器输出光的相位在耦合器输出端未能达到同相导致的。

采用 OE4000 对 DFB 激光器阵列的线宽进行测量, 测量过程中改变阵列中激光器的数目以及主激光器注入光功率的大小, 线宽测试结果如表 2 所示。结果显示, 随着阵列中激光器数目增多, 激光器的本征线宽整体上成非线性增加, 这是由于光的相干合束过程中各子光束中包含的由主激光器引入的噪声之间存在相

关性。相反的趋势出现在 1 mW 光注入锁定 4 个激光器时, 此时本征线宽随着激光器数目的增加而降低, 这是因为 4 个激光器相位不一致导致各个子光束所包含的由主激光器引入的相位噪声相互抵消。同时, 测量结果还表明, 当阵列中的激光器数目多于一个时, 本征线宽整体上随着注入光功率的减小而增大, 这一点同一个激光器注入锁定时的线宽随注入功率变化的规律相反。

采用同样的实验装置, 使用 OE4000 分别测量了

表 2 激光器数目以及注入功率对本征线宽的影响

Injected power / mW	Intrinsic linewidth / Hz			
	1 laser	2 lasers	3 lasers	4 lasers
1.00	12.15	25.35	99.18	63.11
1.25	12.42	29.29	88.89	98.30
1.50	14.59	23.94	53.00	55.24

包含不同数目DFB激光器的注入锁定从激光器和主激光器的相对强度噪声,测量结果如图6所示。 $S_{RM}(\omega)$ 、 $S_{RINJ}(\omega)$ 、 $S_{RC}(\omega)$ 、 $S_{R3C}(\omega)$ 、 $S_{R4C}(\omega)$ 分别代表主激光器相对强度噪声以及1、2、3、4个注入锁定DFB激光器相干合束后的相对强度噪声。随着从激光器内

的DFB激光器数量增多,测得的相对强度噪声增加。在低频段( $10^0 \sim 10^3$  Hz)以及高频段( $4 \times 10^6 \sim 10^8$  Hz),注入锁定的从激光器的相对强度噪声高于主激光器的相对强度噪声,而中频段由于弛豫振荡峰的存在,主激光器的相对强度噪声较高。

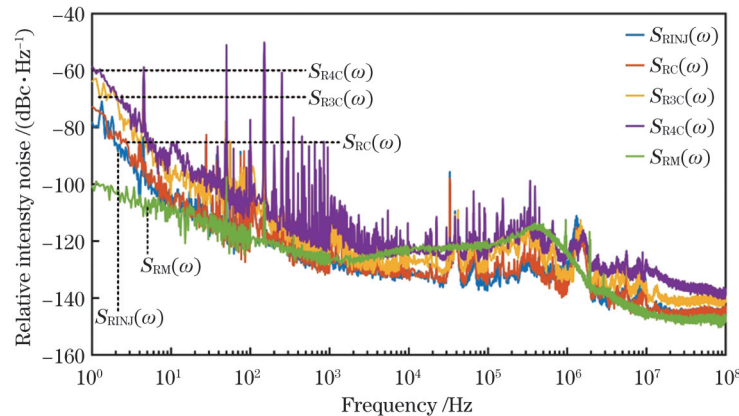


图6 主激光器和包含不同DFB激光器数目的注入锁定从激光器的相对强度噪声

Fig. 6 Relative intensity noise of the master laser and injection-locked slave lasers containing different numbers of DFB lasers

实验过程中,由于4个DFB激光器由一个TEC进行温度控制,所以只能通过微调激光器的工作电流来调整激光器间的相位差,这会导致同相位时各个激光器的输出光功率不一致,进而使得合束效率下降。除此之外,随着DFB激光器数目增多,发热量增加,需要降低激光器的供电电流,以便TEC能够维持在恒定的温度下。实验过程中还发现DFB激光器之间存在着热串扰,改变某个激光器的电流会导致其余3个激光器的输出波长发生变化。综上所述,提高TEC的热泵能力可以降低激光器温度对激光器工作电流的限制,从而获得更大的相干合束输出光功率。本实验中的相干合束还可以进行进一步改进:1)在耦合器的每一分支上添加移相器,这样在通过改变移相器电压调整从激光器间相位差时不会影响激光器的输出功率以及波长;2)使用随机并行梯度下降等迭代算法,通过合束后的光强变化来实时反馈控制移相器电压<sup>[14]</sup>,以获得更高的合束效率。最后,本文验证了注入锁定在激光合束进而实现高功率输出上的可行性,后续工作中可以对DFB激光器以及TEC的选择进行优化,实现更高的合束功率。

## 4 结 论

基于平面波导注入锁定技术的DFB激光器阵列相干合束光源具有小型化的优势,耦合器的各分支在合束过程中不会因为热噪声等的影响而引入明显的相位差,因此,相较于空间光及光纤相干合束,平面波导的相干合束不需要电子学反馈控制环路,可极大地简化系统的复杂度。本研究通过理论分析和实验研究了相干合束对相位噪声、相对强度噪声的影响,注入锁定后的DFB激光器阵列能够通过光场相干叠加的方式

对输出光功率进行放大,四路DFB激光器合束时的输出功率最大为40.43 mW,合束效率为78.3%,但合束后的相位噪声以及相对强度噪声也均会随着从激光器内包含的DFB激光器数目的增加而增大。本研究成果可为DFB激光器阵列相干合束提供简单有效的技术手段,有望应用于芯片化空间激光通信、激光雷达等激光应用系统中。

致谢 感谢张江实验室对本项目的资助。

## 参 考 文 献

- [1] Krainak M A, Yu A W. 1047-nm master oscillator power amplifier free-space optical communications laser transmitter[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(1): 112-117.
- [2] Caplan D O. Laser communication transmitter and receiver design [J]. Journal of Optical and Fiber Communications Reports, 2007, 4 (4): 225-362.
- [3] Hemmati H, Biswas A, Djordjevic I B. Deep-space optical communications: future perspectives and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2020-2039.
- [4] Zhao H W, Pinna S, Song B W, et al. Widely tunable integrated laser transmitter for free space optical communications[C]//2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC), September 16-19, 2018, Santa Fe, NM, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [5] Dong P, Liu X, Chandrasekhar S, et al. Monolithic silicon photonic integrated circuits for compact 100+ Gb/s coherent optical receivers and transmitters[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(4): 150-157.
- [6] 苏庆帅, 魏芳, 陈晨, 等. 可调谐自注入锁定窄线宽片上光源[J]. 中国激光, 2023, 50(2): 0216002.  
Su Q S, Wei F, Chen C, et al. Tunable self-injection locking narrow linewidth on-chip light source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(2): 0216002.
- [7] 陈晨, 魏芳, 苏庆帅, 等. 混合集成窄线宽半导体激光器实现220 mW功率输出[J]. 中国激光, 2023, 50(3): 0316002.  
Chen C, Wei F, Su Q S, et al. Hybrid integrated narrow linewidth semiconductor laser achieves 220 mW power output[J]. Chinese



- Journal of Lasers, 2023, 50(3): 0316002.
- [8] 阳琴, 陈孝林, 曾诚, 等. 硅基片上激光雷达技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(16): 1600002.
- Yang Q, Chen X L, Zeng C, et al. Overview of LiDAR technology on silicon substrate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(16): 1600002.
- [9] Fang A W, Park H, Kuo Y H, et al. Hybrid silicon evanescent devices[J]. Materials Today, 2007, 10(7/8): 28-35.
- [10] Roelkens G, van Campenhout J, Brouckaert J, et al. III-V/Si photonics by die-to-wafer bonding[J]. Materials Today, 2007, 10(7/8): 36-43.
- [11] Park H, Sysak M N, Chen H W, et al. Device and integration technology for silicon photonic transmitters[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(3): 671-688.
- [12] Caplan D. High-performance free-space laser communications and future trends[C]//Optical Amplifiers and Their Applications, August 7-10, 2005, Budapest, Hungary. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2005: TuB1.
- [13] Pinna S, Zhao H, Brunelli S T Š, et al. High-power integrated indium phosphide transmitter for free-space optical communications [C]//2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 2-5, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [14] McKinzie K A, Wang C, Noman A A, et al. InP high power monolithically integrated widely tunable laser and SOA array for hybrid integration[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 3490-3502.
- [15] Stern B, Ji X C, Dutt A, et al. Compact narrow-linewidth integrated laser based on a low-loss silicon nitride ring resonator[J]. Optics Letters, 2017, 42(21): 4541-4544.
- [16] Kobayashi N, Sato K, Namiwaka M, et al. Silicon photonic hybrid ring-filter external cavity wavelength tunable lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(6): 1241-1246.
- [17] Musha M, Kanaya T, Nakagawa K, et al. Intensity and frequency noise characteristics of two coherently-added injection-locked Nd:YAG lasers[J]. Applied Physics B, 2001, 73(3): 209-214.
- [18] Hou L P, Marsh J H. 1.55- $\mu\text{m}$  distributed feedback laser monolithically integrated with amplifier array[J]. Optics Letters, 2015, 40(2): 213-216.
- [19] Morito K, Tanaka S. Record high saturation power (22 dBm) and low noise figure (5.7 dB) polarization-insensitive SOA module[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(6): 1298-1300.
- [20] Briant T, Grangier P, Tualle-Brouiri R, et al. Accurate determination of the noise figure of polarization-dependent optical amplifiers: theory and experiment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(3): 1499-1503.
- [21] Spano P, Piazzolla S, Tamburrini M. Frequency and intensity noise in injection-locked semiconductor lasers: theory and experiments[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(3): 427-435.
- [22] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- Shi S X, Zhang H X, Liu J S. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000.
- [23] Farinas A D, Gustafson E K, Byer R L. Frequency and intensity noise in an injection-locked, solid-state laser[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1995, 12(2): 328-334.
- [24] 杨飞. 单频光纤激光器及光纤时频传递技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2013: 44-46.
- Yang F. Research on single-frequency fiber laser and fiber time-frequency transfer technology[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optical Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, 2013: 44-46.

## Coherent Beam Combining Laser Source Based on an Injection-Locked DFB Laser Array Using Planar Lightwave Circuit Technology

Zhang Zhenghao<sup>1,2</sup>, Wei Fang<sup>1,3\*</sup>, Wu Huimin<sup>1</sup>, Su Qingshuai<sup>1</sup>, Chen Chen<sup>1</sup>, Ye Qing<sup>1</sup>,  
Cai Haiwen<sup>1,3\*\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Zhangjiang Laboratory, Shanghai 201210, China

### Abstract

**Objective** A silicon-based optoelectronic chip provides a good solution for integrated space laser communication and LiDAR applications owing to its small size, low power consumption, low cost, high integration, high modulation bandwidth, and CMOS preparation process compatibility. During hybrid integration of III-V lasers with silicon-based optoelectronic chips, the coupling loss between the light source and the silicon-based optoelectronic chip is large. Therefore, the power requirement of the laser light source is higher than that of discrete devices, and the output power of the laser which was realized with single-chip integration or hybrid integration to achieve high side mode suppression ratio and narrow linewidth is generally a few tens of milliwatts. Erbium-doped fiber amplifiers are typically required to amplify the optical power of on-chip light sources, but this in turn limits the integration of optoelectronic chips; therefore, high-power on-chip light sources are a pressing problem for current on-chip laser applications. Coherent beam combining can be used to break the output power limit of a single laser. Coherent beam combining typically consists of two methods: one using a master oscillator and power amplifier (MOPA), and the other using an injection-locking technique. However, the spontaneous radiation of the optical amplifier increases the beam noise and makes the laser application system less effective; therefore, the coherent beam combining technique using injection-locking technology is more suitable for coherent detection systems that are more sensitive to laser noise. In 2001, Musha *et al.* used two injection-locked Nd:YAG lasers to achieve coherent beam combining of spatial light with a beam combining efficiency of 94%; however, the scheme used discrete devices, and the arm length difference between the coupler arms had to be compensated in real time by an electronic feedback loop. In this study, to

overcome the large coupling loss in hybrid integration and meet the requirements of laser light source power for space laser communication, an array of lasers containing four DFB lasers was injected and locked using a seed source, followed by coherent beam combining using a planar optical waveguide coupler to achieve on-chip optical power multiplication.

**Methods** To achieve on-chip optical power amplification, a laser array containing four DFB lasers was injection-locked to a seed light source, and a planar optical waveguide coupler was used for coherent beam combining. To study the coherent beam combining effect of the injection-locked laser array, an experimental setup was built to measure the optical power, phase noise, and relative intensity noise of different numbers of injection-locked lasers before and after coherent beam combining, and the beam combining efficiency was calculated. First, the beam combining efficiency of the laser array was measured. The number of injected-locked DFB lasers in the laser array was varied by adjusting the magnitude of the operating current of the DFB lasers. Second, we measured the phase noise and intrinsic linewidth of different numbers of lasers after coherent beam combining. The relationship between phase noise and the number of lasers was investigated by theoretical analysis. Finally, the relative intensity noise after the coherent beam combining was measured.

**Results and Discussions** The beam combining efficiencies for the two, three, and four DFB lasers were calculated to reach 91.6%, 87.8%, and 78.3%, respectively. According to the theoretical analysis in this study, the phase noise after the coherent beam combining contains the noise introduced by the master laser and that introduced by the slave laser. The phase noise introduced by the master laser is proportional to the square of the number of DFB lasers, whereas that introduced by the slave laser is proportional to the number of DFB lasers. The intrinsic linewidth after the coherent beam combining is dependent on the power of the master laser and the number of slave lasers; this tends to increase as the number of slave lasers increases, and decreases as the injected optical power increases. The relative intensity noise is demonstrated to increase as the number of slave lasers increase.

**Conclusions** The coherent beam combining laser source based on injection-locking technology using a planar waveguide and a DFB laser array has the advantage of miniaturization, and the branches of the coupler do not introduce significant phase differences during the beam combining process owing to thermal noise. Therefore, compared with spatial light and fiber coherent beam combining, the planar waveguide coherent beam combining does not require the feedback control loop of electronics, greatly simplifying the system complexity. In this study, the effect of coherent beam combining on the phase noise and relative intensity noise is investigated through theoretical analysis and experiments. However, both the phase noise and relative intensity noise of the combined beam increase with an increase in the number of DFB lasers contained in the laser array. The present results provide a simple and effective technical means for coherent beam combining of DFB laser arrays; this is expected to be applied to laser applications such as chip-based space laser communication and LiDAR.

**Key words** lasers; injection-locking; coherent beam combining; phase noise; relative intensity noise