

光谱组束半导体激光阵列的多谱线频率变换

朱占达 姜梦华* 尹兴良 惠勇凌 雷 旬 李 强

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 通过对半导体激光阵列进行光谱组束,使阵列中各个发光单元的光束重叠,同时锁定在不同的波长上;将组束后的光束进行频率变换,组束的各个光束同时满足非线性频率变换中的和频条件,产生和频的蓝光输出。光谱组束半导体激光阵列增加了参与非线性频率变换半导体激光发光单元的个数,有利于提高整体频率变换的输出功率。实验采用标准的半导体激光阵列,组束后连续输出功率为 18.2 W,非线性频率变换产生的蓝光的输出功率为 93 mW,光-光转换效率约为 0.51%。实验证明了光谱组束半导体激光阵列多谱线频率变换的可行性。

关键词 激光光学; 半导体激光阵列; 光谱组束; 频率变换; 两波耦合

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1214001

Multispectral Frequency Conversion of a Spectral Beam Combining Diode Laser Array

Zhu Zhanda Jiang Menghua Yin Xingliang Hui Yongling Lei Hong Li Qiang

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The beams of each emitter in the diode laser array are overlapped by spectral beam combination. Each emitter is locked at different wavelengths. Frequency conversion of the combined beam is conducted. When the beams from each emitter satisfy the nonlinear frequency conversion conditions, sum frequency generation of blue light can be obtained. The spectral combined diode laser array can increase the number of lasers participating in the nonlinear frequency conversion, and enhance the whole output power. In the experiment, a standard diode laser array is used. The output power of the spectral combined array is 18.2 W. The output power of the blue light is 93 mW, and the optical-optical conversion efficiency is about 0.51%. The feasibility of the multispectral frequency conversion of the spectral combined diode laser array is proved by the experiment.

Key words laser optics; diode laser arrays; spectral beam combination; frequency conversion; two-wave mixing

OCIS codes 140.2010; 140.3298; 140.3300; 190.7070

1 引 言

半导体激光器由于具有较高的电光效率,在很多领域得到应用,获得了极大的发展^[1-3]。一些工业、通信和军事等方面的应用需要一些特殊的波段,如光存储和激光印刷中需要短波段的光源,显示系统和光刻中则需要蓝光光源^[4-5]。由于材料的限制,半导体激光能够直接产生的波长范围有限,一些波长范围不能产生或者产生的效率很低,限制了其应用^[6-7]。利用非线性频率转换,可很好地解决这一问题^[8-9]。利用半导体激光器,直接通过和频或者倍频等非线性效应,能够产生需要的特定波长。

1970年,Edmonds等^[10]对半导体激光进行倍频,通过角度调节实现相位匹配,当基频光为 4.5 W 时,获

收稿日期: 2016-05-03; **收到修改稿日期:** 2016-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61378023)、北京市自然科学基金(4112005)

作者简介: 朱占达(1985—),男,博士研究生,主要从事半导体激光光谱组束和光纤耦合方面的研究。

E-mail: zhuzhanda@126.com

导师简介: 李 强(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事大功率固体激光器方面的研究。

E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: jmh@bjut.edu.cn

得了倍频光的功率为 $15 \mu\text{W}$, 转换效率很低。从实验上证明了半导体激光和频的可能性。1979年, Günter等^[11]利用非线性晶体 KNbO_3 非临界相位匹配, 对半导体进行了倍频实验, 在基频光功率为 785 mW 时, 获得的倍频光功率为 35 mW 。1991年, 光波导结构的非线性晶体应用到半导体激光器的频率变换中, 两个 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $0.86 \mu\text{m}$ 不同波长的半导体, 在波导内同时进行了倍频和和频, 其和频效率约为 0.1% ^[12]。1997年, Fluck等^[13]利用长度为 14.5 mm 的 KNbO_3 作为非线性晶体, 对两个半导体的光束进行了和频实验, 产生 65 mW 的光束质量接近衍射极限的蓝光, 整体的转换效率约为 7.2% 。2005年, Carruthers等^[14]用两个带微透镜的半导体激光器进行了和频实验, 单次通过偏硼酸钡晶体后, 实际测得的输出功率为 50 nW 。2012年, Müller等^[15]利用体布拉格光栅 (VBG) 对两个不同波长的半导体激光单元进行了光谱组束, 然后利用 PPLN 晶体, 对组束后的光束进行了和频实验, 获得了光束质量接近衍射极限、功率为 3.9 W 的绿光输出, 相对于单个发光单元的倍频输出, 其输出功率提高了 $2.5 \sim 3.2$ 倍。2015年, Hansen等^[16]同时利用了 VBG 的光谱合束和非线性晶体的级联, 先对两个半导体激光单元通过 VBG 进行了光谱合束, 然后经过级联的非线性晶体进行和频, 获得了功率为 5.5 W 的绿光输出。

由于半导体激光光束质量较差, 目前半导体激光的频率变换主要是利用半导体激光单元, 通过非线性晶体直接进行频率变换。已有通过 VBG 等将两个半导体激光单元先进行合束, 然后通过非线性晶体进行和频, 产生所需要的和频光束。光谱合束使两个半导体激光单元的功率进行叠加, 而光束质量与单个发光单元的光束质量相同, 相当于提高了单个发光单元的输出功率, 其功率值变为原来的 2 倍, 和频输出的功率与基频光功率的平方成正比, 因此, 理论上和频光的输出功率可以增大为原来的 4 倍。由于 VBG 光谱合束时, 限制了参与合束的半导体激光单元的个数, 所以目前光谱组束最多只能在两个发光单元之间进行。

本文利用光栅对半导体激光阵列进行光谱组束。光谱组束后, 19 个发光单元锁定在不同的波长上, 组束后的光束与单个发光单元具有相同的光束质量, 将组束后的光束经过非线性晶体, 各个发光单元的光束之间产生倍频和和频效应, 将参与频率变换的半导体激光单元的个数由两个增加到了 19 个, 提高了基频光的功率, 有利于提高非线性频率变换输出的功率, 实现了对光谱组束半导体激光光源的多谱线频率变换, 获得了功率为 93 mW 的蓝光输出。

2 光谱组束半导体激光阵列和频的基本原理

由理论分析和计算可知, 频率变换后, 新产生光束的输出功率与基频光的功率的平方成正比^[17-18], 这样两束光合束后, 再进行频率变换, 提高了频率变换输出的功率理论上相对于单个发光单元的光束进行频率变换, 其输出功率最大可以提高 4 倍, 实际中由于相位匹配的失调, 提高的倍数在 $2 \sim 3$ 倍之间。已有的研究中, 参与非线性频率变换的半导体激光单元的个数最多为 2 个, 由于受参加频率变换的基频光个数 (半导体激光单元个数) 的限制, 获得的频率变换后的输出功率也受到了限制。将半导体激光阵列的多个发光单元 (19 个半导体激光单元, 各个半导体激光器发光单元发出的光束波长不同) 先进行光谱组束, 再经过光栅衍射后实现合束, 输出一束具有不同波长的光束; 当光束与非线性晶体相互作用时, 如图 1 所示, 为简明描述原理, 19 个半导体激光单元由 6 个发光单元表示, 图中对应波长 λ_1 与 λ_6 、 λ_2 与 λ_5 、 λ_3 与 λ_4 的光束之间进行和频, 产生光波长相同的和频光束。该方法增加了参与频率变换的半导体激光单元的个数, 不再局限于两个半

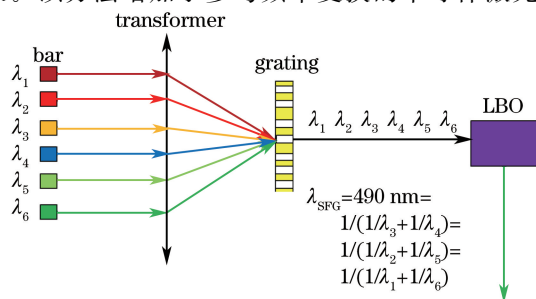


图 1 光谱组束半导体激光器阵列进行和频的原理结构

Fig. 1 Schematic of spectral beam combining diode laser array with subsequent sum frequency generation

导体激光发光单元之间的频率变换,有利于提高和频输出功率。

各个光束之间进行和频后产生的蓝光的波长为

$$\lambda_{\text{SFG}} = 1/(1/\lambda_1 + 1/\lambda_6) = 1/(1/\lambda_2 + 1/\lambda_5) = 1/(1/\lambda_3 + 1/\lambda_4) \quad (1)$$

3 光谱组束半导体激光阵列和频实验结构

图 2 为半导体激光阵列光谱组束后,组束光束进行和频的实验结构。与光谱光束组束结构相似,主要包括前端面镀增透膜(反射率 $R < 0.5\%$)的半导体激光器阵列,快轴准直镜(FAC),光束旋转系统(BTS),慢轴准直镜(SAC),一个起聚焦作用的柱透镜和一个起准直作用的柱透镜(替代原传输透镜),透射光栅,对 980 nm 光全反射(HR)、对 490 nm 增透(AR)、与水平面成 45° 放置的透镜,两个焦距均为 300 mm 的聚焦透镜(组成 $4f$ 系统),非线性晶体,及垂直放置的 980 nm 和 490 nm 双色全反平面镜。

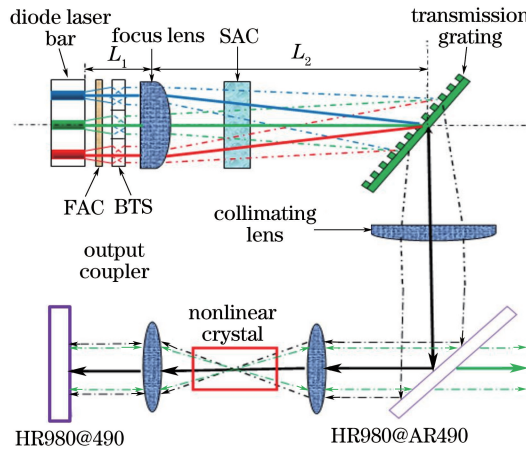


图 2 光谱组束半导体激光器进行和频的实验结构

Fig. 2 Setup of spectral beam combining diode laser arrays with subsequent sum frequency generation

所用的 980 nm 标准半导体激光阵列,条宽为 1 cm,19 个发光单元,填充因子为 20%,每一发光单元水平方向(慢轴方向)宽度为 $100 \mu\text{m}$,空间周期为 $500 \mu\text{m}$,垂直方向(快轴方向)宽度为 $1 \mu\text{m}$,快慢轴发散角为 $70^\circ \times 7^\circ$ (95% 能量)。

阵列出射的光束先经焦距为 $f_t = 500 \mu\text{m}$ 的非球面柱透镜对垂直方向光束进行准直,使发散角变为 8 mrad,然后经 BTS 将各个发光单元的光束旋转 90° ,快慢轴方向光场分布对调^[19]。这样 19 个发光单元发出的光束在水平方向上的发散角变为 8 mrad,垂直方向上的发散角都为 7° 。

然后采用非对称的光谱组束结构^[20],经过 $f_t = 200 \text{ mm}$ 聚焦透镜,在水平方向上,将阵列不同位置的发光单元,以不同角度入射到透射光栅,聚焦透镜与半导体激光器的距离为 $L_1 = 20 \text{ mm}$,其距离远小于聚焦透镜的焦距。

再经 $f_s = 60 \text{ mm}$ 的柱透镜,统一在垂直方向上对各个发光单元光束准直,这样,光束在两个方向上发散角都很小。

通过透射光栅的色散作用,透射光栅刻线数为 1850 lp/mm,将不同角度入射的光束沿同一方向出射,实现光谱组束,合束后的光束经过后柱透镜($f = 250 \text{ mm}$)准直后,光束在水平方向以近似平行的光束,入射到 45° 双色镜上(对 980 nm 的光全反射,490 nm 的光透射),使光路进行了折转,然后经过 $4f$ 系统后,经过 0° 双色全反镜(对 980 nm、490 nm 的光均全反射)反馈到原光路, 0° 全反镜的作用是与每个发光单元的后腔面组成激光谐振腔,使每个发光单元锁定在不同的波长上,形成光谱组束系统。经过非线性晶体产生的和频光束,经过 0° 全反镜,在 45° 490 nm 增透的双色镜处产生输出光束。由于需要反馈基频光到半导体激光阵列,因此光路中不需要加入光隔离系统,减少了插入元件的损耗。

4 实验结果及分析

按实验结构图调节好光路,开始不加非线性晶体,进行光谱组束实验,测定其输出光谱,将中心发光单元的波长锁定在 980 nm。实际测定的结果如图 3 所示,可以看出中间发光单元的波长为 980 nm。各个发光单元的强度有所不同,可能是在光路调节过程中因折转镜和 $4f$ 系统的加入造成的。组束后基频光的光束质量在竖直方向上 $M^2=11.7$,在水平方向上 $M^2=1.3$ 。基频光的光束质量越好,聚焦程度越高,即功率密度越高,非线性频率变换的转换效率越高。通过基频光的光束质量参数,确定了聚焦到非线性晶体的 $4f$ 系统聚焦镜的焦距为 300 mm,此时经过计算,在竖直方向上光斑大小约为 0.3 mm。同时,在基频光聚焦时,保证光束通过非线性晶体时,水平方向最大光斑小于 0.5 mm。

加入非线性系数较大的非线性晶体 PPLN,尺寸为 $0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,使用温度为 $27\text{ }^\circ\text{C}$,通过半导体制冷器(TEC)控制其工作温度,调节其位置,使其在 $4f$ 系统的中心,在 45° 双色镜后得到了和频光束输出,测定了其光谱,见图 4,其中心波长为 490 nm,整体线宽约为 1 nm。证明了各个发光单元之间通过和频产生了频率变换。其中,第 10 个发光单元进行了倍频转换,其余的发光单元两两之间进行了和频转换,如第 1 与第 19 个、第 2 与第 18 个、第 3 个与第 17 个发光单元之间进行了和频转换,

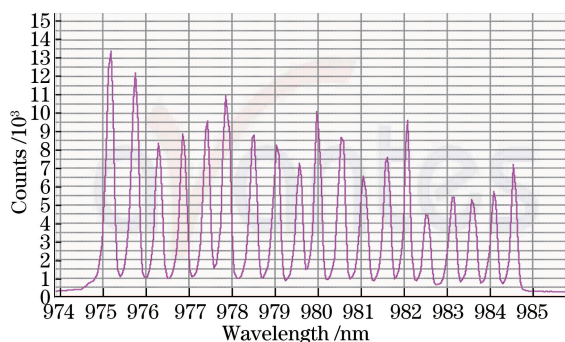


图 3 光谱组束半导体激光阵列的光谱特性曲线
Fig. 3 Characteristic spectrum of spectral beam combining diode laser array

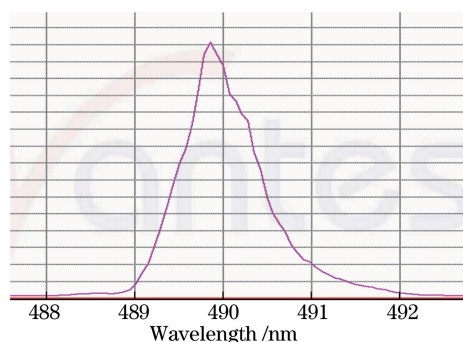


图 4 半导体激光阵列和频后的光谱特性曲线
Fig. 4 Characteristics spectrum of sum frequency generation diode laser array

在电流为 40 A 时,半导体激光阵列自由运转时输出的功率为 20.6 W,光谱组束后输出功率为 18.2 W。通过非线性频率变换,获得蓝光输出,在蓝光输出镜后测量了蓝光的输出功率,并计算了其转换效率,最大输出蓝光功率为 93 mW,效率为 0.51%,见表 1。

表 1 光谱组束半导体激光阵列和频效率

Table 1 Efficiency of the sum frequency generation for a spectral beam combining diode laser array

Parameter	Value						
Current /A	10	15	20	25	30	35	40
Power after spectral beam combination /W	1.5	4.2	6.9	9.7	12.5	15	18.2
Power after sum frequency generation /mW	6.6	14.8	24.4	36	51.3	76	93
Efficiency /%	0.44	0.35	0.35	0.37	0.41	0.5	0.51

由表 1 可知,其整体转换效率较低,目前半导体激光直接进行频率变换,一般采用光栅外腔半导体激光器(ECDL)、分布反馈式半导体激光器(DBF)和分布布拉格反射式半导体激光器(DBR),这些半导体激光器具有单纵模或较窄的线宽(小于 0.1 nm),因此效率较高。而我们用的是普通宽条半导体激光光源,虽然经过光谱组束锁定了其波长,但各个发光单元的线宽相对仍然较宽,约为 0.3 nm,PPLN 晶体具有一定的接收线宽,超过其线宽部分的光不能产生频率变换,使效率降低。同时,光栅的色散不是线性的,因此实际的波长与计算存在微小的误差,不能严格满足和频时的相位匹配。另外宽条半导体激光阵列发光单元光束质量较差(慢轴方向 M^2 约为 12),而和频的转换效率与基频光的光束质量有关,这也是效率较低的原因。

目前,已经有可用于光谱组束的分布反馈式半导体激光光源^[21],通过对刻划光栅参数的控制,将不同的

发光单元锁定在不同的波长上,这样每个接近单纵模的半导体激光单元就可以进行外腔开环式光谱组束,经过合理的计算和设计,使各个发光单元的波长既符合光谱组束的波长要求,又满足各个光束之间的和频的要求,同时其好的光束质量也有利于和频的产生,这样组束后的光束进行和频就能够有较高的效率。

5 结 论

在半导体激光器直接频率变换的基础上,将半导体激光阵列中各个发光单元先进行光谱组束,提高整体光束质量,然后经过非线性晶体,对各个发光单元的光束进行和频,最终获得频率变换后的蓝光输出。该方法增加了参与非线性频率变换发光单元的个数,提高了基频光的功率,有利于提高非线性频率变换输出的功率。实验实现光谱组束 19 个发光单元的半导体激光阵列频率变换的蓝光输出,确定了输出的蓝光是由各个发光单元的光束通过和频产生。验证了光谱组束半导体激光阵列多谱线频率变换的可行性,为半导体激光器直接和频提供了一条新的途径。

参 考 文 献

- Müller A, Marschall S, Jensen O B, *et al.* Diode laser based light sources for biomedical applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(5): 605-627.
 - Bachmann F G. High-power diode laser technology and applications [C]. SPIE, 2000, 3888: 394-403.
 - Durry G, Amarouche N, Joly L, *et al.* Laser diode spectroscopy of H₂O at 2.63 μm for atmospheric applications [J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3): 573-580.
 - 张国轩, 戈鹤中. 用于光存储的半导体激光器的现状及其发展 [J]. *激光与光电子学进展*, 1993, 30(10): 13-17.
 - Chang C M, Fang Y C, Lee C R. A new design mixing RGB LED (red, green, blue light emitting diode) for a modern LCD (liquid crystal display) backlight system [C]. SPIE, 2006, 6338: 63380Q.
 - Kojima K, Schwarz U T, Funato M, *et al.* Optical gain spectra for near UV to aquamarine (Al, In) GaN laser diodes [J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7730-7736.
 - Kojima K, Funato M, Kawakami Y, *et al.* Gain suppression phenomena observed in In_xGa_{1-x}N quantum well laser diodes emitting at 470 nm [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 89(24): 241127.
 - Franken P A, Hill A E, Peters C W, *et al.* Generation of optical harmonics [J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(4): 118-119.
 - Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J, *et al.* Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. *Physical Review*, 1962, 127(6): 1918-1939.
 - Edmonds H, Smith A. Second-harmonic generation with the GaAs laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1970, 6(6): 356-360.
 - Günter P, Asbeck P M, Kurtz S K. Second-harmonic generation with Ga_{1-x}Al_xAs lasers and KNbO₃ crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1979, 35(6): 461-463.
 - Yamamoto K, Yamamoto H, Taniuchi T. Simultaneous sum-frequency and second-harmonic generation from a proton-exchanged MgO-doped LiNbO₃ waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(12): 1227-1229.
 - Fluck D, Günter P. Efficient generation of CW blue light by sum-frequency mixing of laser diodes in KNbO₃ [J]. *Optics Communications*, 1997, 136(3-4): 257-260.
 - Carruthers A E, Lake T K, Shah A, *et al.* Single-scan spectroscopy of mercury at 253.7 nm by sum frequency mixing of violet and red microlensed diode lasers [J]. *Optics Communications*, 2005, 255(4-6): 261-266.
 - Müller A, Jensen B O, Hasler K H, *et al.* Efficient concept for generation of diffraction-limited green light by sum-frequency generation of spectrally combined tapered diode lasers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3753-3755.
 - Hansen A K, Andersen P E, Jensen O B, *et al.* Highly efficient single-pass sum frequency generation by cascaded nonlinear crystals [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5526-5529.
 - Boyd G D, Kleinman D A. Parametric interaction of focused Gaussian light beams [J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(8): 3597-3639.
 - Corner L, Gibb J S, Hancock G, *et al.* Sum frequency generation at 309 nm using a violet and a near-IR DFB diode laser for detection of OH [J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(4): 441-444.
 - Zhu Zhanda, Gou Long, Jiang Menghua, *et al.* High efficiency and high beam quality diode laser array by spectral-beam-combing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): s114008.
- 朱占达, 缙 龙, 姜梦华, 等. 半导体激光阵列高效率高光束质量光谱组束 [J]. *光学学报*, 2014, 34(s1): s114008.

- 20 Gou Long, Zhu Zhanda, Jiang Menghua, *et al.* A method for reducing the optical path in spectral beam combining[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(6): 1053-1056.
缙 龙, 朱占达, 姜梦华, 等. 一种减少光谱组束光程的方法[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(6): 1053-1056.
- 21 Fricke J, Crump P, Decker J, *et al.* High-brilliance diode lasers with monolithically-integrated surface gratings as sources for spectral beam combining[C]. *High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD)*, 2013: 14029586.