

原子蒸气中空腔增强四波混频过程产生相干蓝光*

白君利 崔晶 岳琳坤 王昱博 周海涛 杨保东†

(山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

(2026年1月9日收到; 2026年2月3日收到修改稿)

基于铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}(F=4)$ 菱形能级系统, 采用 852 nm ($6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$) 和 795 nm ($6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2}$) 两束红外泵浦光共同激励铯原子蒸气, 通过四波混频过程实现频率上转换, 获得了 456 nm ($7P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$) 相干、准直蓝光. 实验中将两泵浦光束以近共线、同向方式单次穿过铯原子蒸气时, 所产生的相干蓝光作为种子光注入一个四镜环形光学谐振腔, 成功实现了相干蓝光的腔增强输出. 与无腔条件下的单次泵浦构型相比, 相干蓝光的输出功率提升了近一个数量级. 系统研究了腔增强相干蓝光输出对泵浦光偏振、频率及原子气室温度等关键参数的依赖关系, 为进一步优化实验条件、提升相干蓝光功率提供了依据. 此外, 光学谐振腔还有助于压窄相干蓝光的线宽. 该窄线宽、频率可调的相干蓝光, 在量子光学实验、自由空间光通信等领域具有潜在的应用前景.

关键词: 四波混频, 非线性光学, 频率转换**DOI:** 10.7498/aps.75.20260040**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260040

1 引言

非线性光学作为现代光学的重要分支, 其核心在研究光与物质相互作用过程中, 介质在强光场下产生的非线性极化及其所引发的新颖光学现象^[1,2]. 在诸多非线性光学过程中, 四波混频 (four-wave mixing, FWM) 作为一种典型的参量过程, 因其能够实现频率转换、产生量子关联及操控光场量子态等能力, 长期以来在基础科学与应用技术领域受到广泛关注^[3-5]. 其中, 基于原子“菱形”能级构型的 FWM 过程, 其输入泵浦场与输出相干光场通常处于不同的光谱波段, 已成为实现高效跨波段频率转换的重要途径^[6]. 在该类系统中, 两束低频泵浦光经由一个虚能级或实能级作为中间态, 以阶梯式方式激发原子, 通过 FWM 过程相干地产生一束频率上转换的信号光, 同时也往往伴随一束频率下转换的闲置光. 得益于原子丰富且分立的能级结构, 研

究已证实, 无论采用单一波长双光子泵浦^[7,8], 还是两不同波长激光的级联泵浦^[9-11], 均可通过 FWM 过程产生紫外光^[12,13]、蓝光^[7-11,14-17]、定向红外辐射^[18-20], 乃至太赫兹波段的相干辐射^[21,22], 展示了其在拓展激光波长范围、构建新型相干光源方面的巨大潜力. 尤其是原子被激发到更高激发态时, 可经由多个不同中间态返回基态, 从而可同时建立多个 FWM 通道, 产生多种不同波长的相干光场. 这些相干光场又源于同一泵浦过程, 致使它们之间具有关联甚至纠缠特性^[4,6,23,24]. 此外, 给泵浦光场施加一定的轨道角动量, 也可通过 FWM 过程转移到产生的相干光场, 为跨波段结构光的产生以及高维光学信息的频率转换提供了实现途径^[5,25], 展现出广泛的应用前景.

在上述众多“菱形”能级构型的 FWM 研究工作中, 相干蓝光的产生作为典型代表研究得较多^[7-11,14-17], 目前主要基于泵浦光单次穿过原子气体的实验构型, 通过优化实验参数, 最大化地提高

* 国家自然科学基金 (批准号: 61975102) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ybd@sxu.edu.cn

相干、准直蓝光 (collimated blue light, CBL) 的输出功率, 其通常约在几微瓦到十几微瓦的量级^[10,11]. 为了进一步提升 CBL 输出功率, 更复杂的技术被引入. 例如, 通过引入一束“再泵浦光”或“种子光”, 以优化原子在参与 FWM 的相关能级上的布居数分布, 或利用种子光诱导效应, 来提升 CBL 的输出功率^[6,26-29]; 此外, 将光学谐振腔与原子气室结合, 构成了腔增强的四波混频系统, 在有效提升 CBL 输出功率的同时, 还能够压窄 CBL 的线宽, 获得光谱纯度更高的相干光源^[7,15,30,31]. 这些高品质的光源, 在精密光谱测量、量子光学实验、以及水下自由空间光通信 (蓝光波段处于水中较小的衰减窗口) 等领域展现出潜在的应用前景^[14-17]. 虽然目前通过 FWM 过程产生 CBL 的实验研究已取得了一系列进展, 但其背后的深层物理机制依然较复杂, 致使对原子蒸气中 FWM 过程进行精确的理论建模依然是一个挑战. 另外, 实验上所产生的 CBL 强度依然较弱, 对其频率^[32,33]、偏振^[34-36]特性的测量与研究仍不够充分.

不同于之前的腔增强 FWM 过程产生相干蓝光 CBL, 其是通过单一波长的泵浦光双光子跃迁激发原子, 使泵浦光与腔共振, 主要是通过提高腔内泵浦光的循环功率来增强 CBL 的产生^[7,15,31]. 本文基于铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}(F=4)$ 菱形能级系统, 用波长 852 nm, 795 nm 两红外泵浦光两步激发原子由基态 $6S_{1/2}$ 经中间

态 $6P_{3/2}$ 到激发态 $8S_{1/2}$, 进而 FWM 过程产生 456 nm CBL; 同时将铯原子气室置于一个四镜环形光学谐振腔内, 仅使所产生的 456 nm CBL 与腔共振, 显著提高了 CBL 输出功率. 实验上测量了 CBL 的强度、偏振等特性对关键参数的依赖关系, 为深入理解通过 FWM 过程产生相干光的物理机制提供了实验数据的支撑.

2 实验原理及装置

四波混频 FWM 是一种三阶非线性光学过程. 在原子蒸气中, 通常是三束入射光通过原子的非线性极化, 产生第 4 束相干光. 与实验相关的铯原子能级如图 1 所示: 852 nm, 795 nm 两红外泵浦光两步激发原子由基态 $6S_{1/2}$, 经中间态 $6P_{3/2}$ 到 $8S_{1/2}$ 激发态, 在 $8S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$, $7P_{1/2}$ 能级之间形成布居数反转, 通过放大荧光辐射产生了波长为 4.2 μm , 3.9 μm 红外光场, 作为 FWM 的第 3 束光, 最后在 $7P_{3/2}$, $7P_{1/2} \rightarrow 6S_{1/2}$ 能级跃迁之间, 产生了 456 nm, 459 nm 的 CBL. 由于不同 FWM 通道能级跃迁强度的差异, 所产生的 459 nm CBL 相对较弱, 本实验中忽略其影响. FWM 过程通常需要满足频率匹配 (能量守恒) 和相位匹配 (动量守恒) 条件^[29,30]:

$$\nu_{852} + \nu_{795} = \nu_{4200} + \nu_{456}, \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_{852} + \mathbf{k}_{795} = \mathbf{k}_{4200} + \mathbf{k}_{456}, \quad (2)$$

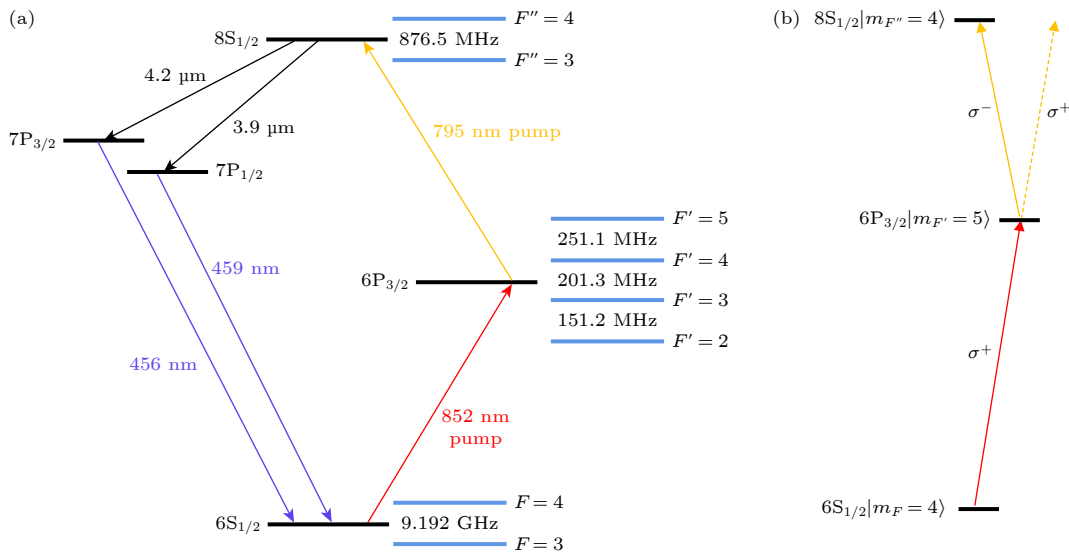


图 1 (a) 通过 FWM 过程在铯原子蒸气中产生 456 nm CBL 的原理; (b) 泵浦光偏振组合对 CBL 强度的影响

Fig. 1. (a) Principle of generating 456 nm CBL via FWM process in cesium vapor; (b) influence of pump light polarization combination on the CBL intensity.

其中, ν_i 为频率, k_i 为波矢, 脚标 i 代表参与 FWM 的各个光场. 频率匹配条件表明所产生 CBL 的频率可通过改变泵浦光的频率去调谐. 相位匹配条件则是决定 CBL 传播方向及转换效率的关键. 通常采用泵浦光共线或成微小夹角入射进入原子气室的方式, 容易满足相位匹配条件, 使产生的 CBL 沿一个特定的方向高效、相干地输出.

产生的 CBL 强度 I_{456} 可表示为

$$I_{456} \propto |\chi^{(3)}|^2 \cdot I_{852} \cdot I_{795} \cdot I_{4200} \cdot l^2 \left| \text{sinc} \left(\frac{\Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{l}}{2} \right) \right|^2, \quad (3)$$

$$\Delta \mathbf{k} = |\mathbf{k}_{852} + \mathbf{k}_{795} - \mathbf{k}_{4200} - \mathbf{k}_{456}|, \quad (4)$$

其中, $\chi^{(3)}$ 为三阶非线性极化张量, I_i 为参与 FWM 的各光场强度, l 为原子气室的长度, 当相位失配量 $\Delta \mathbf{k} \approx 0$ 时, $\text{sinc}(0)$ 函数值为 1, FWM 效率最高. 实验上在两红外泵浦光束近似共线、同向传播的基础上, 微调两束光之间的夹角使得所产生的 CBL 最强, 达到一个相位匹配较好的目的. 从 (3) 式可知, 所产生的 CBL 强度 I_{456} 正比于 FWM 中其他 3 束光场的强度. 将产生的部分 CBL 作为种子光反馈回原 FWM 过程, 同理有助于增强 I_{4200} 光场的强度, 进而又提升了 CBL 的输出功率 [28,29]. 因此, 将用于 FWM 实验的原子气室置于光学谐振腔中, 让部分 CBL 作为种子光在腔内多次循环、持续参与 FWM 过程并相干叠加, 最终实现了腔增强 CBL (cavity-enhanced CBL) 的目的, 显著提升频率转换效率.

图 2 为腔增强 FWM 过程产生 CBL 的实验装置示意图. 两红外泵浦光均由光栅外腔反馈半导体激光器 (external cavity diode laser, ECDL) 提供,

典型线宽均 < 800 kHz. 852 nm 泵浦光通过半波片 HWP 和立方偏振分光棱镜 PBS 组合分出一部分光, 用于饱和吸收光谱 SAS 实验, 在探测器 PD1 处获得相应信号. 利用 SAS 可将 852 nm 激光的频率锁于铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}$ 的某一超精细跃迁线上, 从而将原子由基态 $6S_{1/2}$ 布居到中间激发态 $6P_{3/2}$. 部分 795 nm 激光与 852 nm 激光经二向色镜 DM1 (反射 852 nm、透射 795 nm 激光) 在铯原子气室 Cs cell 1 重叠, 在探测器 PD2 处获得激发态 $6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2}$ 跃迁的光学双共振吸收 (optical-optical double resonance, OODR) 光谱 [37], 作为实验中的频率标尺, 便于调谐 795 nm 泵浦光频率对准原子相应的跃迁线, 将中间态 $6P_{3/2}$ 上的原子进一步布居到激发态 $8S_{1/2}$.

为获得空间模式更优的 CBL 光束, 让用于 FWM 实验的 852 nm 和 795 nm 两红外泵浦光束均通过单模保偏光纤 (图 2 中未画出) 传输, 从而保证其具有基横模 TEM_{00} 的空间特征. 在二向色镜 DM2 (反射 852 nm、透射 795 nm 激光) 之前, 通过 HWP 或 QWP 波片分别控制两泵浦光的偏振状态, 以便在优化的偏振组合下增强 CBL 的输出功率. 两束泵浦光通过二向色镜 DM2 合为一束, 之后经另一长波通二向色镜 DM3 (透射 852 nm 和 795 nm 泵浦光; 在 456 nm 蓝光处反射率达 96.0%) 进入四镜环形腔, 见图 2 矩形框内的光路部分. 腔内铯原子气室 Cs cell 2 长 15 mm、直径 25 mm, 内无缓冲气体, 置于两个共焦的消色差透镜 L1/L2 (焦距 75 mm) 的焦点位置, 其温度通过陶瓷加热片及控温模块控制, 控温精度优于 1°C . 在焦点处, 两红外泵浦光的光斑直径 $\sim 41 \mu\text{m}$. 两泵

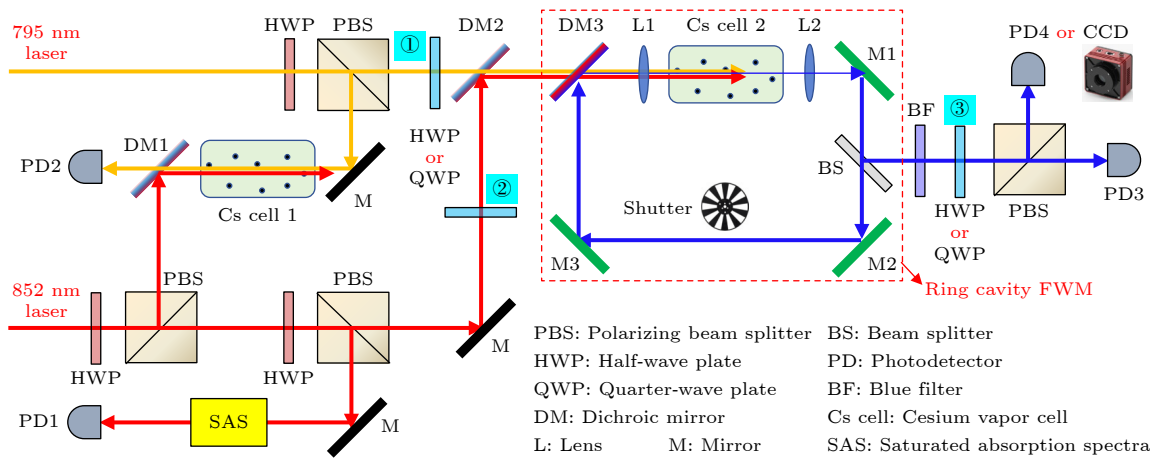


图 2 腔增强 FWM 过程产生 CBL 实验装置示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup for generating CBL via cavity-enhanced FWM process.

浦光束单次 (single-pass) 通过控温的原子气室 Cs cell 2, 产生的 CBL 经分束板 BS 反射 12.0% 作为输出, 进入探测系统, 经滤色片 BF 过滤掉残余的泵浦光, 之后经波片和 PBS 分为两束, 分别进入探测器 PD3 (Thorlabs PDA25K2 150—550 nm) 和 PD4 (Thorlabs PDA10A-EC 200—1100 nm) 或相机 CCD 记录 CBL 信号. 经 BS 透射的 87.0% CBL 耦合进入由反射镜 M1-M3 (对 456 nm 蓝光的反射率为 99.4%) 和 DM3 组成的四镜环形腔. M3 镜子背面粘贴有压电陶瓷 (图 2 中未画出), 用于调谐腔长, 使其与 FWM 所产生的蓝光频率匹配, 最大限度地实现腔增强 CBL 的输出. 对于光学腔, 其中一个关键参数是腔长 L , 决定了腔自由光谱区 (free spectral range, FSR) 的大小 $\text{FSR} = c/L$, 其中 c 为光在真空中的速度. 根据两红外泵浦光单次通过原子气室时, 泵浦光频率在原子共振线附近处, 约在 GHz 范围均可产生 CBL 的实验结果及 (1) 式可知, 蓝光的频率调谐范围也约在 GHz 量级, 为了便于实验上可观察到 CBL 的多个腔模信号, 设置环形腔的腔长 $L = 126$ cm, 对应 $\text{FSR} = 238$ MHz. 腔的另一个关键参数是损耗 L_{tot} , 决定了其精细度 F 及腔增强 CBL 的光谱信号 I_{456} :

$$F = \frac{\pi^4 g^2 (1 - L_{\text{tot}})}{1 - g\sqrt{1 - L_{\text{tot}}}}, \quad (5)$$

$$I_{456} \propto \frac{(1 - g\sqrt{1 - L_{\text{tot}}})^{-2}}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{\omega L}{2c}\right)}, \quad (6)$$

式中, g 为单程增益系数. 当 CBL 的角频率 $\omega_n = 2n\pi c/L$ (n 为整数) 时, 即蓝光在腔内循环一周的位相变化为 2π , I_{456} 达最大值, 对应于腔模信号. 实验中环形腔的各个光学元件的损耗如表 1 所示, 其中 Cs cell 2 窗口 4 个通光界面处未镀增透膜, 每个界面存在 4.0% 反射, 蓝光单次通过气室时的损耗为 15.1%; BS 输出耦合率为 12.0% (自身损耗 1.0%). 最终 CBL 循环一周, 不考虑蓝光被原子介质的吸收及增益, 总损耗 $L_{\text{tot}} = 36\%$, 相应精细度 $F \approx 14$. 图 2 中位置①, ②, ③处, 主要通过

表 1 环形光学谐振腔各个元件的光损耗

Table 1. Optical loss of individual components in the ring cavity.

Optics	DM3	L1-L2	M1-M3	BS	Cs cell 2
Loss/%	4.0	4.5	0.6	13.0	15.1

PBS 和波片组合, 来改变泵浦光的偏振组合, 以及测量产生的 CBL 的偏振状态, 研究偏振对 CBL 实验的影响.

3 实验结果及讨论

典型的腔增强 CBL 实验结果如图 3 所示. 在铯原子气室 Cs cell 2 前, 测量用于 FWM 实验 852 nm 泵浦光的功率为 70 mW, 795 nm 泵浦光的功率为 30 mW, Cs cell 2 气室温度为 165 °C. 让 852 nm 泵浦光在铯 $6S_{1/2}(F = 4) \rightarrow 6P_{3/2}$ 跃迁线处频率扫描; 同时, 在激发态 $6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2}$ 跃迁线附近, 调谐 795 nm 泵浦光频率直到腔增强 CBL 信号最强, 如图 3(a) 所示. 图 3(a) 中 SAS 为饱和吸收光谱, 其作为频率标尺. 通过图 2 中的光闸 Shutter 遮挡 CBL, 实现单次、腔增强 FWM 过程的快速切换. 插图是用相机 CCD 记录的单次、腔增强 FWM 过程所产生的 CBL 的光斑, 可以看出环形谐振腔显著提升了 CBL 的输出, 软件分析其横向强度分布接近一个高斯曲线形状, 呈现出 TEM_{00} 基模的空间特征, 表明泵浦光的基模空间特性在频率转换过程中得以较好保持. 图 3(a) 中底部红色点线为在探测器 PD3 处, 记录的单次 FWM 产生的 Single-pass CBL 信号 (便于比较, 将其放大 8 倍), 蓝实线为腔增强 FWM 过程产生的 CBL 信号, 二者比较, 腔增强 CBL 输出强度增加了近一个数量级. 用 SAS 测量腔增强 CBL 信号的平均自由光谱区 FSR 约为 218 MHz. 图 3(b) 为将 852 nm 泵浦光频率锁定在 $6S_{1/2}(F = 4) \rightarrow 6P_{3/2}(F' = 5)$ 跃迁线, 扫描 795 nm 泵浦光频率获得的 CBL 典型信号. 此时, 用激发态 $6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2}$ 跃迁的 OODR 光谱作为频率标尺 [37], 当 795 nm 泵浦光频率相对于 $6P_{3/2}(F' = 5) \rightarrow 8S_{1/2}(F'' = 4)$ 失谐 2200 MHz 时, 获得相对较强的 CBL 输出. 图 3(c) 为将两泵浦激光频率调谐到腔 FWM 所产生的 CBL 最强时, 用一个三角波信号驱动 M3 镜子后面的压电陶瓷, 扫描环形腔获得的腔增强 CBL 信号. 在两泵浦光频率、腔均不扫描的条件下, 用功率计 (Thorlabs PM100D) 在滤色片 BF 后测量腔增强 CBL 的输出功率, 可达 240 μW . 在相同泵浦光功率, 优化其他实验条件下, 单次 FWM 过程产生的 CBL 强度通常在十几 μW 量级, 可见这种将种子 FWM 过程与光学谐振腔融合的实验方案, 显然

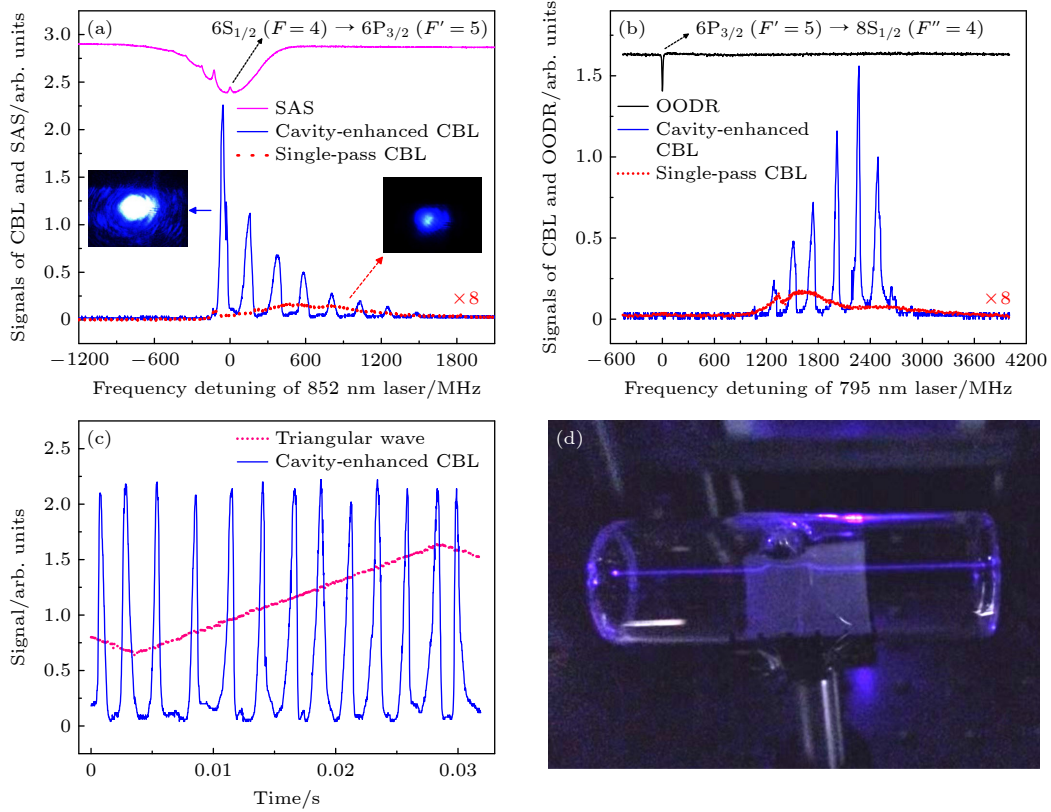


图3 腔增强 FWM 过程产生的 CBL 的典型信号 (a) 扫描 852 nm 泵浦光频率; (b) 扫描 795 nm 泵浦光频率; (c) 扫描环形腔; (d) CBL 在铯原子气室中激发的荧光亮线

Fig. 3. Typical signals for the generated CBL via cavity-enhanced FWM: (a) Scanning the frequency of the 852 nm pump light; (b) scanning the frequency of the 795 nm pump light; (c) scanning the ring cavity length; (d) fluorescent bright line excited by CBL in another Cs atomic vapor cell.

非常有效地提升了 FWM 频率转换的效率. 图 3(d) 为产生的 CBL, 在室温下的铯原子气室中激发的荧光亮线, 说明其频率处于铯原子 $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$ 跃迁线附近, 从图 3(a), (b) 可知其频率可调谐的范围达 GHz 量级.

3.1 泵浦光偏振组合对腔增强 CBL 强度的影响

光的偏振对光与原子相互作用的影响, 体现在原子吸收或发射光子时所遵循的选择定则, 从而决定了相互作用的强弱甚至能否发生. 实验上比较了不同泵浦光偏振组合下, 对腔增强 FWM 过程产生 CBL 强度的影响. 如图 4(a) 所示, 在铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}(F=4)$ 菱形 FWM 系统, 当 852 nm 和 795 nm 两泵浦光为平行的线偏振组合 (par. $\pi+\pi$) 时, 产生的腔增强 CBL 最强. 当泵浦光为一个左圆和一个右圆偏振组合 (orth. $\sigma^++\sigma^-$) 时, 产生的 CBL 相对较强; 当两泵浦光为同方向旋转的圆偏振组合 (par. $\sigma^++\sigma^+$

σ^-) 时, 所产生的 CBL 非常微弱. 而在之前的一些实验中报道 (无光学腔), 如基于铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5) \rightarrow 6D_{5/2}(F''=6) \rightarrow 7P_{3/2}(F'=5) \rightarrow 6S_{1/2}(F=4)$ ^[10] 和铷原子 $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=4) \rightarrow 5D_{5/2}(F''=5) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=4) \rightarrow 5S_{1/2}(F=3)$ ^[11] 的 FWM 系统, 两泵浦光为同向的圆偏振组合 (par. $\sigma^++\sigma^+$, 或 $\sigma^-+\sigma^-$) 时产生的 CBL 最强. 上述差异, 究其原因在于原子 FWM 能级系统的选择: 文献 [10,11] 中所选择的能级系统, 是一个循环跃迁系统, 同向的圆偏振泵浦光, 按照跃迁选择定则 $\Delta m_F = +1$ 或 $\Delta m_F = -1$, 倾向于将原子光抽运布居到参与 FWM 四个超精细能级的磁量子数最大的磁子能级 $|m_F|_{\max} = F$ 上, 它们之间跃迁的强度最强, 故导致产生的 CBL 最强, 这也是目前大多数基于铷、铯原子 FWM 过程产生 CBL 的研究工作, 优先选择这类系统的原因所在 [10,11,14-17]. 作为比较, 本实验选择了非循环跃迁的 FWM 系统, 见图 1. 如实验上 852 nm 泵浦光为 σ^+ 偏振光且频率共振于 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$ 时, 其

倾向于将原子光抽运布居到 $6S_{1/2}(F=4, m_F=+4)$ 和 $6P_{3/2}(F'=5, m_F=+5)$ 磁子能级, 这两磁子能级之间的跃迁强度是相对较强的. 然而, 若 795 nm 泵浦光也为 σ^+ 偏振光且其频率处于 $6P_{3/2}(F'=5) \rightarrow 8S_{1/2}$ 跃迁线附近时, 由于激发态 $8S_{1/2}$ 所能提供的最大磁量子数为 $m_F=+4$, 显然这一偏振不利于将原子进一步布居到 $8S_{1/2}$, 从而制约了 CBL 的产生, 见图 1(b); 反观, 泵浦光为 $\sigma^+ + \sigma^-$ 偏振组合, 是一个相对较好的选择, 因此该偏振组合下产生的 CBL 明显强于泵浦光为 $\sigma^- + \sigma^- (\sigma^+ + \sigma^+)$ 偏振组合的情形, 与实验结果相符, 见图 4(a). 线偏振 (π) 光可以看作等量的左旋和右旋圆偏振光的叠加, 可驱动较多的磁子能级之间的跃迁, 本实验中平行的线偏振泵浦光组合 (par. $\pi + \pi$), CBL 最强. 改变两线偏振方向之间的夹角 α , 在从 0° (两泵浦光偏振方向平行) 到 60° 的范围内均可观测

到腔增强 CBL 的产生, 如图 4(b) 所示. 从图 4 可知, 在很多泵浦光偏振组合下, 均可实现腔增强 CBL 的产生, 但不同的 FWM 原子能级系统, 由于跃迁选择定则的限制, 优化的泵浦光偏振组合是不同的.

3.2 腔增强 CBL 的偏振特性测量

基于原子介质通过 FWM 过程产生相干光场, 更多的研究工作聚焦于优化实验参数来增强 CBL 的强度. 作为一相干光场, 对其偏振特性的测量与研究, 为深入理清 CBL 产生机理提供重要的实验支撑. 当 852 nm, 795 nm 泵浦光均为水平线偏振, 腔增强 FWM 产生的 CBL 经滤色片 BF 过滤后, 用 HWP (QWP), PBS 和功率计 (置于探测器 PD3 之前, 见图 2) 组合测量 CBL 的偏振状态, 实验结果如图 5 所示. 无论旋转 HWP, 还是 QWP 的角度 θ , 功率计测量的 CBL 强度几乎不变, 归一

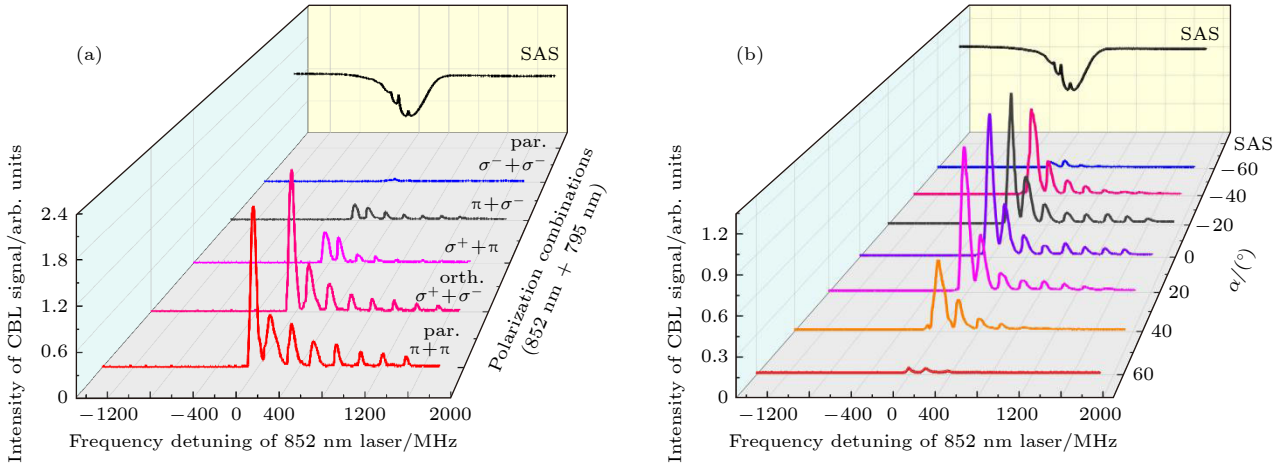


图 4 泵浦光偏振组合对腔增强 CBL 强度的影响 (a) 两泵浦光不同的偏振组合; (b) 改变两线偏振泵浦光偏振方向之间的夹角 α
 Fig. 4. Effect of pump light polarization on the intensity of cavity-enhanced CBL: (a) Different polarization combinations of the two pump lights; (b) angle α between the polarization directions of the two linearly polarized pump lights.

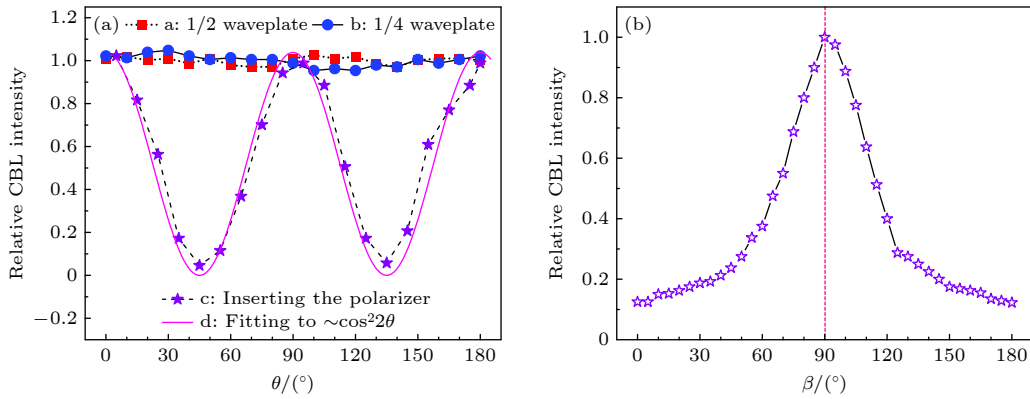


图 5 腔增强 CBL 相对强度随 (a) 波片角度 θ 和 (b) 环形腔中起偏器角度 β 的变化

Fig. 5. Variation of the relative intensity of CBL with (a) the angle θ of the HWP/QWP and (b) the angle β of the polarizer in the ring cavity.

化的相对蓝光强度在“1”附近略有起伏, 见图 5(a) 中曲线 a, b. 基于这样一种测量方式和实验结果, 推测此时腔增强 FWM 产生的 CBL 可能是非偏振光, 在单次 FWM 过程产生 CBL 的实验中也报道了类似的实验结果^[34-36]. 事实上, 腔增强 FWM 产生蓝光将泵浦光单次通过原子气室时, FWM 产生的部分 CBL 作为种子光循环注入原子气室, 来增强 CBL 的强度. 因此, 单次 FWM 产生的 CBL 的偏振在一定程度上决定了腔增强 CBL 的偏振状态. 进一步, 将一个起偏器 (取代 Shutter, 见图 2) 插入环形腔中, 测量得到归一化的腔增强 CBL 相对强度随起偏器旋转角度 β 的变化如图 5(b) 所示. 当 $\beta = 90^\circ$ 时, 起偏器的透振方向与两线偏振泵浦光的偏振方向平行, 此时腔增强产生的 CBL 最强, 且腔内循环的 CBL 为水平线偏振. 这时旋转 HWP 波片 (图 2 位置③), 再次测量输出腔增强 CBL 的偏振状态, 实验结果见图 5(a) 曲线 c, 出现消光现象, 即此时所产生的 CBL 为线偏振光, 曲线 d 为 $\sim \cos^2 2\theta$ 的拟合曲线, 与期望一致.

用探测器 PD3 和 PD4 取代功率计, 进一步实验 (环形腔中无起偏器), 深化了我们对 FWM 所产生的 CBL 偏振特性的认识. 与泵浦光单次通过原子气室的 FWM 实验相比, 腔增强 FWM 所产生 CBL 光谱信号携带着腔模的特征. 当用探测器 PD3 和 PD4 在 PBS 的两个输出端对 CBL 的强度同时测量, 旋转 HWP 波片, 实验结果如图 6 所示. 当 HWP 角度为 0° 时, 在两个探测器上各自获得一套腔增强 CBL 光谱信号: 谱线 a 源于 PD3 探测器, 谱线 b 源于 PD4 探测器; 当 HWP 角度转过 22.5° 时, 每个探测器均可观察到两套谱线 a/b; 当 HWP 角度为 45° 时, 此时两探测器上获得的光谱信号互换, 即谱线 b 在 PD3 探测器, 谱线 a 在 PD4 探测器, 上述过程说明两套谱线均为线偏振光. PD3, PD4 为两个不同型号的探测器, 对蓝光响应不一样, 通过图 6(a), (c) 比较看出, 谱线 a 在探测器 PD3, PD4 的峰值强度与谱线 b 相近, 说明两套谱线的强度也基本相等. 综上讨论, 本实验系统所产生的 CBL 为两等幅、相互垂直的独立线偏振光. 理论可以证明, 这样混合偏振的 CBL, 经 HWP 或 QWP 波片后, 再透射过 PBS, 旋转波片时 PBS 后光强保持恒定, 与图 5(a) 的实验结果也自洽, 见曲线 a 和 b. 综上, 在腔增强 CBL 偏振特性的测量中, 借助两套 CBL 光谱的腔模特征, 致

使在旋转 HWP 的过程中, 动态地展示了两套光谱在每个探测器中此消彼长的现象, 刻画了 CBL 的偏振特性. 至于这两套 CBL 光谱产生的机理, 还需要进一步探究.

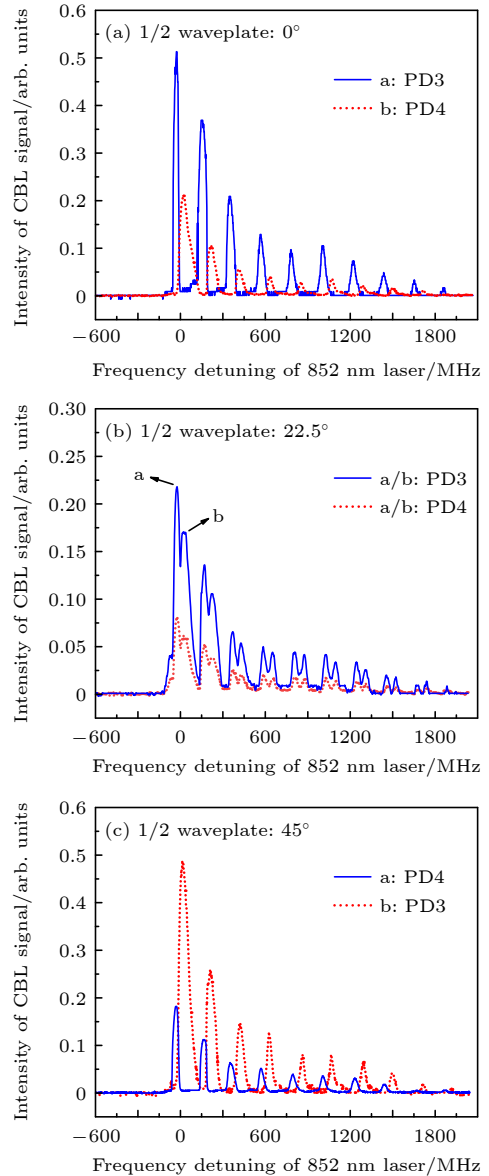


图 6 腔增强 CBL 光谱信号随半波片角度 θ 变化
Fig. 6. Variation of the cavity-enhanced CBL spectral signals with the angle θ of the HWP.

3.3 原子气室温度、泵浦光功率对腔增强 CBL 强度的影响

固定 852 nm 泵浦光功率为 60 mW, 其频率在铯原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}$ 跃迁线处扫描; 795 nm 泵浦光功率为 30 mW, 在激发态 $6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2}$ 跃迁线附近, 调谐其频率使 CBL 最强, 用 PD3 探测器记录如图 3(a) 所示的 CBL 信号. 通过光闸

Shutter 遮挡腔内蓝光, 实现单次 FWM 与腔增强 FWM 过程的切换, 比较了 Single-pass CBL 与腔增强 CBL 的强度随原子气室 Cs cell 2 温度的变化, 实验结果如图 7(a). 用探测器 PD3 记录的 Single-pass CBL 的强度, 仅是经分束板 BS 反射的 12% (见实验装置图 2), 故将其强度放大 1/(12%)~8 倍, 便于与腔增强 FWM 产生的 CBL 强度直接比较. 从图 7(a) 可知, 对于单次 FWM 过程产生 CBL, 优化的 Cs cell 2 温度为 145 °C (相应原子数密度 $1.73 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$); 腔增强 FWM 过程, 优化的 Cs cell 2 温度为 165 °C (相应原子数密度 $4.36 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). 鉴于腔 FWM 过程中, 部分相干蓝光 CBL 作为种子光在环形腔内循环并再次参与相互作用, 从而对泵浦光功率利用率有所提升, 故最优气室工作温度较 single-pass 构型略高. 实验中, 由于泵浦光频率和功率的微小波动、以及环形腔内空气流扰动的影响, 导致产生的 CBL 强度存在约 5% 的起伏, 该不确定性通过误差棒的形式在腔增强 CBL 的实验数据点上加以表征.

在各自优化的原子气室温度处, 固定其中一个泵浦光功率 (55 mW@852 nm, 30 mW@795 nm) 变化另一泵浦光功率, 测量了 Single-pass CBL 与腔增强 CBL 强度随两泵浦光功率的变化, 结果如图 7(b), (c). 与单次 FWM 相比 (产生 CBL~20 μW), 环形腔尽管由于各种损耗导致其精细度不高 (根据图 3 中 CBL 光谱, 估计其精细度为~5), 仍非常有效地提升了 CBL 的输出功率: 在优化的实验条件下, 852 nm 泵浦光功率 55 mW, 795 nm 泵浦光功率 20 mW 时, 功率计实测输出的 CBL 功率达~240 μW , 对应的光-光转换效率约为 $0.24/(55+20) = 0.32\%$. 作为对比, 前文提到的文献 [31], 基于铷原子介质, 采用单一波长泵浦光共振于腔的 FWM 过程, 其在 1400 mW 泵浦光功率下产生了 1.9 mW 的 CBL, 光-光转换效率 $1.9/1400 = 0.14\%$. 实验结果表明, 将产生的部分 CBL 作为种子光循环注入环形腔, 也能非常有效地提升 CBL 的输出功率, 同时在相对较低的泵浦功率下, 实现了较高的光-光转换效率.

此外对上述变化原子气室温度、泵浦光功率等参数时记录的腔增强 CBL 光谱信号逐一进行多峰洛伦兹拟合, 峰的半高全宽为 40—45 MHz, 其主要来源于低精细度环形腔本身的线宽. 统计数据表明, 原子气室温度、泵浦光功率的增大, 并没有明

显使产生的 CBL 线宽增大, 正如文献 [30] 中报道, 腔在增强 CBL 的同时, 还具有压窄 CBL 线宽的功能; 而在单次 FWM 过程产生的 CBL, 随着 CBL 强度的增大, 其线宽明显增大. 至于本实验中, 腔增强 CBL 本身的线宽, 需要通过其他方法去进一步评估, 如拍频法.

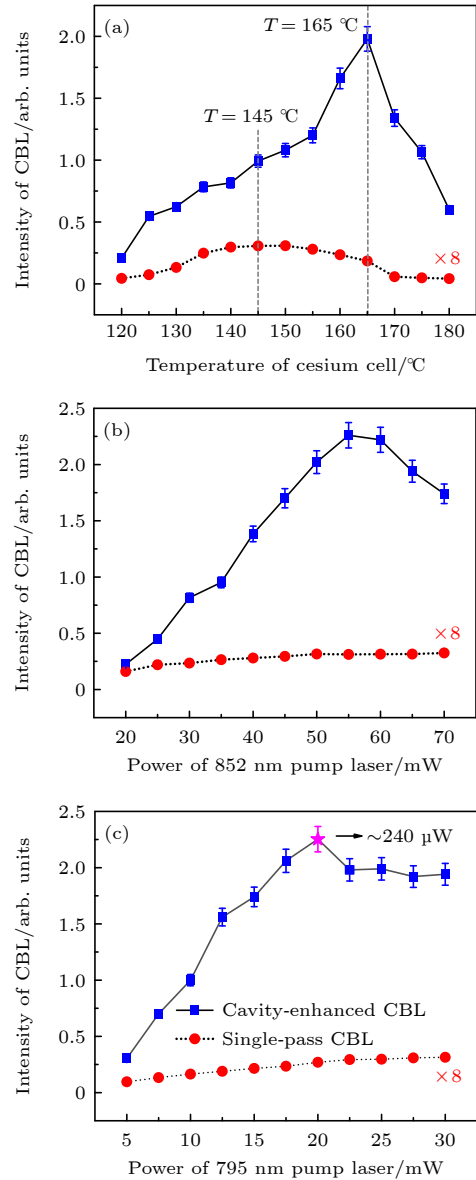


图 7 腔增强 CBL 强度随 (a) 铯原子气室温度、(b) 852 nm 泵浦光功率、(c) 795 nm 泵浦光功率的变化

Fig. 7. Variation of cavity-enhanced CBL intensity with (a) cesium vapor cell temperature, (b) 852 nm pump light power, and (c) 795 nm pump light power.

4 结 论

基于铯原子 $6S_{1/2}(F = 4) \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2} \rightarrow$

$7P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2} (F=4)$ 菱形能级构型, 将产生的部分相干蓝光 CBL 作为种子光循环注入四镜环形腔内, 利用腔增强 FWM 过程显著提升了 CBL 的输出功率. 实验上系统测量了原子气室温度、泵浦光功率及偏振组合对腔增强 CBL 强度的影响, 在优化的实验参数下, 蓝光输出功率达百 μW 量级, 频率调谐范围达 GHz 量级. 尤其是, 采用两套腔增强 CBL 光谱对 CBL 偏振的测量, 相比已有工作, 进一步揭示了 CBL 的偏振特性^[34-36]; 通过调控腔内种子蓝光 CBL 偏振状态, 实现了对输出 CBL 偏振的有效操控. 这些工作为深入理解 CBL 产生的物理机制提供了重要的实验依据. 后续研究可采用镀有增透膜的原子气室、凹面镜等搭建环形腔, 进一步降低环形腔损耗、提升精细度及频率转换效率, 持续深化对腔内 FWM 的研究.

数据可用性说明

本篇论文的关联数据可在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00187> 中访问获取.

参考文献

- [1] Scully M O, Fleischhauer M 1994 *Science* **263** 337
- [2] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 113003
- [3] Zibrov A S, Lukin M D, Hollberg L, Scully M O 2002 *Phys. Rev. A* **65** 051801(R)
- [4] de Almeida A A C, da Motta M R L, Vianna S S 2023 *Phys. Rev. A* **107** 023515
- [5] Mendoza-López L A, Acosta-Montes J G, Ángeles-Aguillón I F, Sierra-Costa D, Torres Y M, Jáuregui R, Sahagún-Sánchez D 2021 *Phys. Rev. Res.* **3** 033170
- [6] Wu J Z, Xu Y H, Dong R G, Zhang J X 2021 *Opt. Lett.* **46** 3119
- [7] Yuan J P, Liu H, Wang L R, Xiao L T, Jia S T 2021 *Opt. Express* **29** 4858
- [8] Hassanin K, Federsel P, Karlewski F, Zimmermann C 2023 *Phys. Rev. A* **107** 043104
- [9] Meijer T, White J D, Smeets B, Jeppesen M, Scholten R E 2006 *Opt. Lett.* **31** 1002
- [10] Schultz J T, Abend S, Döring D, Debs J E, Altin P A, White J D, Robins N P, Close J D 2009 *Opt. Lett.* **34** 2321
- [11] Akulshin A M, McLean R J, Sidorov A I, Hannaford P 2009 *Opt. Express* **17** 22861
- [12] Lam M, Pal S B, Vogt T, Gross C, Kiffner M, Li W H 2019 *Opt. Lett.* **44** 2931
- [13] Gai B D, Hu S, Chu J Z, Wang P Y, Cai X L, Guo J W 2021 *OSA Contin.* **4** 2410
- [14] Kienlen M B, Holte N T, Dassonville H A, Dawes A M C, Iversen K D, McLaughlin R M, Mayer S K 2013 *Am. J. Phys.* **81** 442
- [15] Brekke E, Swan N 2019 *J. Opt. Soc. Am. B* **36** 421
- [16] Cao R, Gai B D, Yang J, Liu T, Liu J B, Hu S, Guo J W, Tan Y N, He S, Liu W F, Cai H X, Zhang X H 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 121903
- [17] Prajapati N, Akulshin A M, Novikova I 2018 *J. Opt. Soc. Am. B* **35** 1133
- [18] Akulshin A M, Budker D, McLean R J 2014 *Opt. Lett.* **39** 845
- [19] Akulshin A M, Bustos F P, Budker D 2018 *Opt. Lett.* **43** 5279
- [20] Sebbag Y, Barash Y, Levy U 2019 *Opt. Lett.* **44** 971
- [21] Lam M, Pal S B, Vogt T, Kiffner M, Li W H 2021 *Opt. Lett.* **46** 1017
- [22] Gai B D, Liu J B, Wang P Y, Chen Y, Hu S, Guo J W 2021 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **258** 107351
- [23] Craddock A N, Wang Y, Giraldo F, Sekelsky R, Flament M, Namazi M 2024 *Phys. Rev. Appl.* **21** 034012
- [24] Niu Z Q, Wen J M, Zhang C W, Du S W, Novikova I 2025 *Opt. Quantum* **3** 72
- [25] Ba N, Jiang M Q, Fei J Y, Wang D, Jiang H L, Wang L, Wang H H 2024 *Chin. Phys. B* **33** 044202
- [26] Akulshin A M, Orel A A, McLean R J 2012 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **45** 015401
- [27] Huang W Y, Yang B D, Fan J, Wang J M, Zhou H T 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 187801 (in Chinese) [黄文艺, 杨保东, 樊健, 王军民, 周海涛 2022 物理学报 **71** 187801]
- [28] Akulshin A M, Budker D, McLean R J 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** 1016
- [29] Zhang Y Y, Wu J Z, He Y Y, Zhang Y, Hu Y D, Zhang J X, Zhu S Y 2020 *Opt. Express* **28** 17723
- [30] Offer R F, Conway J W C, Riis E, Franke-Arnold S, Arnold A S 2016 *Opt. Lett.* **41** 2177
- [31] Brekke E, Potier S 2017 *Appl. Opt.* **56** 46
- [32] Akulshin A M, Perrella C, Truong G W, McLean R J, Luiten A 2012 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **45** 245503
- [33] Brekke E, Herman E 2015 *Opt. Lett.* **40** 5674
- [34] Vianna S S, Nussenzveig P, Magno W C, Tabosa J W R 1998 *Phys. Rev. A* **58** 3000
- [35] Magno W C, Prandini R B, Nussenzveig P, Vianna S S 2001 *Phys. Rev. A* **63** 063406
- [36] Zhu C J, Senin A A, Lu Z H, Gao J, Xiao Y, Eden J G 2005 *Phys. Rev. A* **72** 023811
- [37] Yang B D, Gou Z Y, Wang J M, Zhou H T 2022 *Appl. Phys. B* **128** 212

Generation of coherent blue light via cavity-enhanced four-wave mixing in atomic vapor*

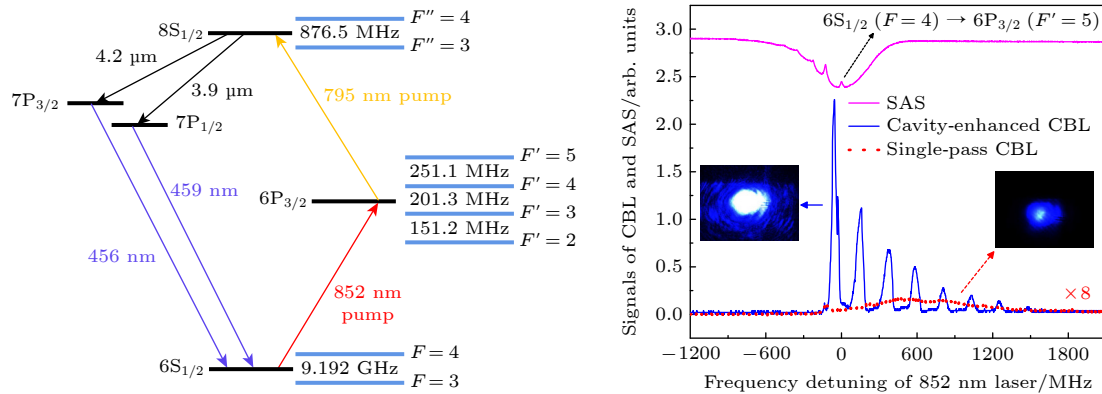
BAI Junli CUI Jing YUE Linkun WANG Yubo
 ZHOU Haitao YANG Baodong[†]

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 9 January 2026; revised manuscript received 3 February 2026)

Abstract

Based on the cesium $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}(F=4)$ diamond-type energy level system, coherent and collimated blue light (CBL) at 456 nm ($7P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$) is generated via a four-wave mixing (FWM) process, driven by stepwise excitation with two pump beams at 852 nm ($6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$) and 795 nm ($6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2}$). In the experiment, when the two pump beams propagate through hot cesium vapor in a near-collinear, co-propagating single-pass configuration, a portion of the generated CBL is used as seed light and injected into a four-mirror ring optical cavity, successfully achieving cavity-enhanced CBL output. Compared with the single-pass configuration without a cavity, the output power of the cavity-enhanced CBL is increased by nearly one order of magnitude. In particular, the polarization measurements of the CBL using two sets of cavity-enhanced CBL spectra have further revealed the polarization characteristics of CBL, offering new insights beyond previous studies. Moreover, by controlling the polarization of the intracavity seed blue light, effective manipulation of the output CBL polarization has been achieved. These findings provide important experimental evidence for a deeper understanding of the physical mechanisms underlying CBL generation. Additionally, the use of an optical cavity helps to narrow the linewidth of the CBL. Such narrow-linewidth and frequency-tunable CBL has potential applications in some quantum optics experiments and underwater free-space optical communications, among other fields.



Keywords: four-wave mixing, nonlinear optics, frequency conversion

DOI: 10.7498/aps.75.20260040

CSTR: 32037.14.aps.75.20260040

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61975102).

[†] Corresponding author. E-mail: ybd@sxu.edu.cn

原子蒸气中腔增强四波混频过程产生相干蓝光

白君利 崔晶 岳琳坤 王昱博 周海涛 杨保东

Generation of coherent blue light via cavity-enhanced four-wave mixing in atomic vapor

BAI Junli CUI Jing YUE Linkun WANG Yubo ZHOU Haitao YANG Baodong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100304 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260040

CSTR: 32037.14.aps.75.20260040

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260040>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于铯原子气室反抽运光增强相干蓝光

Coherent blue light enhancement via repumping laser in cesium vapor

物理学报. 2022, 71(18): 187801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220480>

基于室温里德伯原子四波混频的微波-光波转换特性

Microwave-to-optics conversion characteristics based on four-wave mixing of Rydberg atoms at room temperature

物理学报. 2025, 74(16): 164209 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250706>

Λ 型四波混频中光学涡旋的相干转换及其相位演化

Coherent transfer and phase evolution of optical vortices in a Λ -type four-wave mixing system

物理学报. 2026, 75(7): 164209 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251575>

基于级联四波混频过程产生四模簇态

Generation of four-mode cluster states based on cascade four-wave mixing process

物理学报. 2022, 71(16): 160304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220433>

基于四波混频的调频连续波测距振动抑制方法

Vibration suppression method for frequency-modulated continuous wave ranging based on four wave mixing

物理学报. 2026, 75(5): 160304 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251416>

双层石墨烯薄膜体系中的四波混频特性

Four-wave mixing properties in bilayer graphene nanosystem

物理学报. 2023, 72(12): 126801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230012>