



·惯性约束聚变物理与技术·

幅度调制器对宽带低相干光时频特性的影响*

王 桔^{1,2}, 饶大幸², 贺瑞敬², 高妍琦², 崔 勇²,
赵晓晖², 史海涛², 隋 展², 黄昌清¹

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018; 2. 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘 要: 通过改变马赫-曾德干涉型幅度调制器的射频系数和偏置电压, 调制光脉冲的强度。研究了幅度调制器对宽带低相干光时频特性影响的规律, 分析调制后的光脉冲时域波形分布、光谱和复相干度模值曲线, 结果表明, 射频系数对光脉冲的光谱成分和时间相干性无明显的调制, 射频系数存在最佳工作区间使得输出光脉冲的波形保真度最佳。当偏置电压处于半波电压时, 光脉冲的时域波形保真度最好, 时间相干性最低, 但光谱成分会缺失。理论仿真了调制器的臂长差、偏置电压对宽带低相干光频域特性的影响, 与由实测光谱计算出调制器的臂长差, 实验结果进行了对比, 结果基本符合。由于实际的电光重叠积分因子随加载电压值变化, 因而模拟与实测结果存在误差, 但研究得出的规律将为低相干脉冲精密整形系统提供更为明确的方向。

关键词: 宽带低相干光; 脉冲整形; 铌酸锂幅度调制器; 时-频特性; 时间相干性

中图分类号: O436.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220153

Influence of amplitude modulator on time-frequency characteristics of broadband low coherence light

Wang Ju^{1,2}, Rao Daxing², He Ruijing², Gao Yanqi², Cui Yong²,
Zhao Xiaohui², Shi Haitao², Sui Zhan², Huang Changqing¹

(1. College of Optics and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, Shanghai 201800, China)

Abstract: Low-coherent light pulses with precise time-shaping capability have the potential to suppress the instability of laser-plasma interactions in laser inertial confinement fusion, but related research is currently lacking. In this paper, the law of the influence of the amplitude modulator on the time-frequency characteristics of broadband low-coherent light was studied, and the intensity of the light pulse was modulated by changing the RF coefficient and bias voltage of the Mach-Zehnder interferometric amplitude modulator. The time domain waveform distribution, spectrum and complex coherence modulus curve of the modulated light pulse were analyzed. The research shows that the RF coefficient has no obvious modulation on the spectral composition and temporal coherence of the light pulse, and the RF coefficient has an optimal working range, which makes the waveform fidelity of the output light pulse the best. When the bias voltage is at half-wave voltage, the time domain waveform fidelity of the optical pulse is the best, and the temporal coherence is the lowest, but the spectral components are missing. The arm length difference of the modulator is calculated from the measured spectrum, and the influence of the arm length difference and bias voltage on the frequency domain characteristics of the broadband low-coherent light is simulated theoretically, the results are in good agreement with the experimental results. As the actual electro-optic overlap integration factor changes with the voltage, there is an error between the simulation and the actual measurement results. However, the laws obtained from the research will provide a more clear direction for low coherent pulse precision shaping system development.

Key words: broadband low-coherent light, pulse shaping, lithium niobate amplitude modulator, time-frequency characteristics, temporal coherence

* 收稿日期: 2022-05-13; 修订日期: 2022-11-25

联系方式: 王 桔, 1719017882@qq.com。

通信作者: 饶大幸, rdx5202008@163.com。

激光惯性约束聚变 (ICF) 是利用激光作为驱动源压缩氘氚燃料靶丸, 在高密度燃料等离子体的惯性约束时间内实现热核反应的聚变方式^[1], 是产生清洁能源的重要途径, 有望解决人类能源问题^[2]。在聚变过程中遇到的核心问题之一就是激光等离子体相互作用的不稳定性 (LPI)。随着研究的发展, 研究人员提出: 使用带宽更大、时空相干性更低的低相干光脉冲具有更好的平滑效果和更大的抑制 LPI 的潜力^[3-6]。因此, 采用低相干光做为驱动器种子源成为研究热点之一^[7-8]。此外, 对于高功率激光驱动器而言, 高对比度的精密时间整形能力是实现低熵压缩、降低驱动器能量需求、降低规模和成本的关键前提, 而所需的低相干和精密控制能力主要取决于前端种子源^[9-10]。

1990 年代, Gekko XII 采用了两种技术路线来降低种子源的相干性: 一种方案是使用 ASE 宽带振荡器作为主光源, 用普克尔盒进行脉冲整形^[11-13]; 另一种方案是采用锁模振荡器作为种子光源, 多模光纤降低空间相干性^[14]。这两种方法依然具有很高的时间相干性和相对较高的空间相干性。新型高功率激光器前端系统采用全光纤光导的方法, 例如美国国家点火装置 (NIF) 和我国 SG 系列都使用单纵模分布式反馈光纤激光器 (DFB) 作为种子光源, 双级相位调制器进行光谱展宽^[15-16], 然而这种方法仍然具有较高的相干性。2019 年 5 月, 罗切斯特大学在宽带激光抑制受激拉曼散射 (SRS) 和双等离子体衰变 (TPD) 方面的模拟结果指出相干时间可以作为抑制激光等离子体相互作用不稳定性良好指标^[17]。2019 年, 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所使用宽带低时间相干性的超辐射发光二极管 (SLD) 作为低相干驱动器前端系统种子光源, 铌酸锂幅度调制器进行脉冲整形, 获得了光谱宽度大于 20 nm, 相干长度小于 37 μm 的低相干激光光源, 并实现了精确时间整形^[18]。但在现有的研究中, 缺乏幅度调制器对低相干脉冲的时域、频域特性的影响分析, 亟待开展该方向的研究, 以便为低相干光脉冲整形方案提供研究基础。本文从满足精密脉冲整形的具体需求出发, 研究基于马赫-曾德 (M-Z) 干涉仪型铌酸锂幅度调制器对宽带低相干光的调制规律。采用中心波长为 1040 nm, 带宽 50 nm 的 SLD 作为种子光源。固定调制器的偏置电压, 找到使输出光脉冲时域波形保真度较好的射频系数范围。固定调制器的射频系数, 研究调制器的偏置电压对宽带低相干光的时频特性以及时间相干性的影响, 确定脉冲整形系统中最合适的偏置电压工作点。

1 铌酸锂幅度调制器的工作原理

铌酸锂幅度调制器 (AM) 的工作原理是通过给波导臂上的电极加载电压, 外加电场的变化使铌酸锂晶体产生电光效应, 从而达到改变波导内光的相位导致合束光干涉形成强度调制的目的^[19]。AM 结构如图 1 所示, 入射光经过第 1 个 Y 波导分支处被分成 2 个分量, 向其中一条干涉臂上外加电压。两束光在第 2 个 Y 波导处干涉叠加, 合束输出。

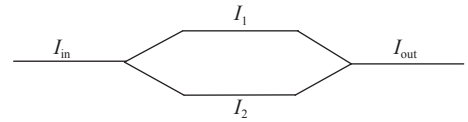


Fig. 1 Schematic diagram of M-Z lithium niobate amplitude modulator

图 1 M-Z 型铌酸锂幅度调制器示意图

设输入光波导电场为 E_{in} , 输入光脉冲强度为 I_{in} 。分支波导电场分别为 E_1 和 E_2 , 对应光强分别为 I_1 和 I_2 。加载在电极上的电压 $V = V_{DC} + A_m \sin(\omega_m t)$, 其中 V_{DC} 为直流偏置电压, A_m 为射频系数, ω_m 为调制信号角频率。射频系数为外加调制电压的放大系数, 使调制信号放大至合适的幅度, 确保幅度调制器正常工作。输出的合束光相位差 $\Delta\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$, $\Phi_1 = \frac{2\pi n S}{\lambda}$ 为调制器干涉臂长度差引起的相位差, $\Phi_2 = \frac{\pi n^3 r_{33} \gamma L V}{\lambda D}$ 为电压引起的相位差。其中: S 为两条干涉臂长度差, n 为铌酸锂 (LN) 衬底的折射率; λ 为波长; r_{33} 为 LN 晶体的电光系数; L 和 D 分别为电极的长度和间距; $\gamma = \frac{D}{V} \iint E|E'|^2 dA$, 为电光重叠积分因子, E 代表电场分布函数, E' 代表归一化电场分布函数, A 代表电光相互作用面积。干涉叠加后输出光脉冲强度可表示为

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{in} [1 + \cos(\Delta\Phi)] \quad (1)$$

对于给定的幅度调制器, 衬底折射率、电极长度和间距以及干涉臂长度差均为常数, 因此输出光脉冲光强变化主要取决于加在电极上的电压 V 和输入光脉冲波长 λ 。当 $\Delta\Phi = \pi + 2k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) 时, 两分支光波合束会产生干涉相消效应, 导致输出光脉冲光强为 0。将调制器此时对应的电压称为半波电压, 记为 $V_{\pi} = \frac{2nSD - (1 + 2k)\lambda D}{n^3 r_{33} \gamma L}$; 当 $\Delta\Phi = 0 + 2k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) 时, 两分支光波合束会产生干涉相长效应, 此时输出光脉冲光强最大, 对应的电压记为 $V_{2\pi}$ 。公式 (1) 可转化为

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} \left[1 + \cos\left(\pi \frac{V}{V_{\pi}}\right) \right] \quad (2)$$

在宽带低相干光的研究中,相干性是衡量光场特性的重要参数,通常可以基于迈克尔逊干涉原理采用复相干度来描述光场相干性。从迈克尔逊干涉仪输出的光强度与光场的关系可以表示为

$$I(t) = \langle U(t) \cdot U^*(t) \rangle \quad (3)$$

输出光场 $U(t)$ 为两个干涉臂光场 $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$ 干涉的结果。因为两束光之间具有一定的光程差,所以传播过程中会产生时间差。用 τ 表示两光场之间的时间差,则

$$U(t) = U_1(t) + U_2(t + \tau) \quad (4)$$

将公式(4)带入公式(3)可得合束光强与分支光强及光场的关系为

$$I(t) = I_1 + I_2 + \langle U_1(t) \cdot U_2^*(t + \tau) \rangle + \langle U_1^*(t) \cdot U_2(t + \tau) \rangle \quad (5)$$

根据互相关函数 $\Gamma(\tau)$ 的定义^[20]

$$\Gamma(\tau) = \langle U_1(t) \cdot U_2^*(t + \tau) \rangle \propto \int \langle U_1(t) \cdot U_2^*(t + \tau) \rangle d\tau \quad (6)$$

将 $\Gamma(\tau)$ 归一化得到复相干度 $y(\tau)$

$$y(\tau) = \frac{\langle U_1(t) \cdot U_2^*(t + \tau) \rangle}{\sqrt{I_1 I_2}} \quad (7)$$

将公式(7)带入公式(5)化简可得光强与复相干度的关系为

$$I(t) = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 \cdot I_2} [y(\tau) + y^*(\tau)] \quad (8)$$

根据 Wiener-Kintchin 定理可知复相干度 $y(\tau)$ 与归一化的互功率谱密度 $G(\omega)$ 构成傅里叶变换关系,其中 ω 表示角频率,则

$$y(\tau) = \int G(\omega) e^{-i\omega\tau} d\omega \quad (9)$$

复相干度的模表示了光振动的相干程度。当 $\tau = 0$ 时, $|y(\tau)|$ 为最大值 1,代表光是完全相干的。当 τ 逐渐增大到 τ_c 时, $|y(\tau)|$ 趋近于 0,代表光是非相干的。当 $0 \leq \tau \leq \tau_c$ 时, $|y(\tau)|$ 的值介于两者之间,代表光是部分相干的。为了更直观方便地表征光场的时间相干性,引入相干时间 τ_c ,相干时间 τ_c 与 $|y(\tau)|$ 的关系式为

$$\tau_c = \int_{-\infty}^{\infty} |y(\tau)|^2 d\tau \quad (10)$$

因此,可以通过对幅度调制器输出光的光谱进行傅里叶逆变换得到复相干度模值曲线,由式(10)可计算出相干时间。

2 实 验

基于 M-Z 干涉型幅度调制器的宽带低相干光实验装置如图 2 所示,图 2(a)为时域测量装置,图 2(b)为频域测量装置。下述所有实验均采用 Thorlabs 公司的超发光二极管(SLD)作为种子源,光谱如图 3 所示,中心波长为 1040 nm,带宽 50 nm。种子源输出的光经过单模保偏光纤耦合到任意波形发生器(AWG)驱动的波导幅度调制器中。所用 AWG 采样率为 5 Gs/s,编辑重复频率为 1 kHz、脉宽为 4.5 ns、电压幅值为 375 mV 的方波电脉冲,将电脉冲加载到基于马赫曾德干涉仪(M-Z)的铌酸锂幅度调制器(AM)上。我们用光电转换器和示波器(KEYSIGHT-

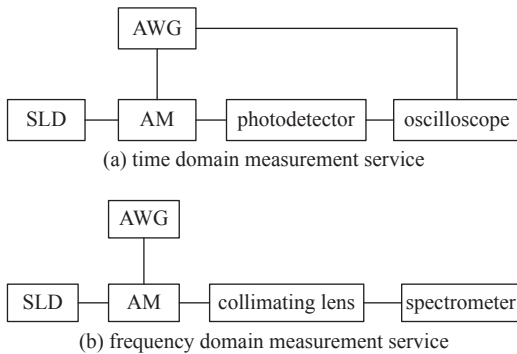


Fig. 2 Broadband low-coherent light experimental service
图 2 宽带低相干光实验装置

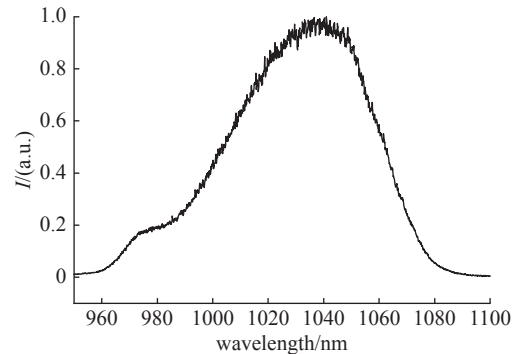


Fig. 3 SLD light source spectrum
图 3 SLD 光源光谱

DSOS404A)测量 AM 输出光的时域特性,用准直透镜和光纤光谱仪(复享公司-PG 2000)测量 AM 输出光的频域信息。

2.1 射频系数对输出光脉冲时频特性的影响

为了时域观测处于最佳状态,固定 AM 可设置的最小偏置电压值为 2.475 V, 改变 AM 的射频系数在 0.1~0.5 间变化, AM 射频系数取值上限由此器件工作性能决定。加载在幅度调制器上的电脉冲波形和幅度调制器输出光脉冲波形对比如图 4 所示,图 4(a)为加载在幅度调制器上的电脉冲波形,图 4(b)为射频系数分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 时的输出光脉冲波形,图 4(c)为射频系数分别为 0.43、0.44、0.45、0.46、0.47、0.48 时的输出光脉冲波形。如图 4(b)所示,在输入信号光功率相同的情况下,射频系数过低时,加载在铌酸锂晶体上的调制电压偏低,则调制器响应低。当射频系数分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 时,幅度调制器输出光脉冲幅度与射频系数正相关,射频系数越大,输出光脉冲的幅度越大并在射频系数达 0.4 时获得最大值,同时脉冲前沿获得的响应高于脉冲后沿,脉冲存在一定的波形畸变且射频系数越小波形畸变越大。当射频系数为 0.5 时,调制器达到饱和,输出脉冲幅度不再增长,而脉冲前沿获得的响应低于脉冲后沿。如图 4(c)所示,当射频系数在 0.43~0.48 间变化时,输出光脉冲波形与加载的电脉冲波形保持一致,均方根误差值分别为 9.91%、7.22%、8.77%、7.59%、8.36%、5.58%,输出波形保真度都较好,因此可以将最佳射频系数确定为 0.46。在不同射频系数时调制输出光谱如图 5 所示,当射频系数不同的光谱成分基本相同,并且射频系数的变化并没有引入对光谱强度的明显调制。射频系数只是调节对原始调制信号的放大倍数,使得信号足够强使电光晶体内部发生电光效应,从而实现电光调制的目的。射频系数的选择需根据输入调制信号的幅度进行设置,射频系数过低,则幅度调制器响应低,射频系数过大,调制器可能饱和,使得调制器的响应失真,但射频系数并不会对电光调制的过程产生影响,也就是说射频系数不会改变光脉冲的光谱成分。

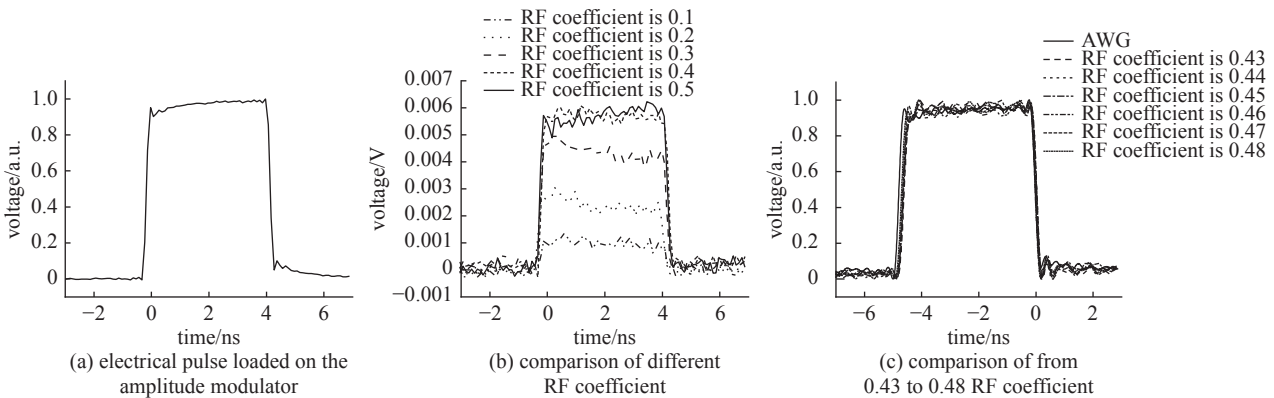


Fig. 4 The electrical pulse loaded on the amplitude modulator is compared with the output light pulse of the amplitude modulator

图 4 加载在幅度调制器上的电脉冲波形和幅度调制器输出光脉冲波形对比

2.2 偏置电压对输出光脉冲时频特性的影响

控制 AM 的射频系数为 0.46, 设置 AM 的偏置电压由 2.475 V 起始, 间隔 25 mV 增加, 达到 4.702 V 时结束。输出光功率随偏置电压的变化如图 6 所示, 由光强最小时对应的电压值即为半波电压可知该调制器的一级半波电压为 2.475 V, 二级半波电压为 4.405 V, 变化周期为 1.93 V。幅度调制器不同偏置电压时输出光脉冲波形如图 7 所

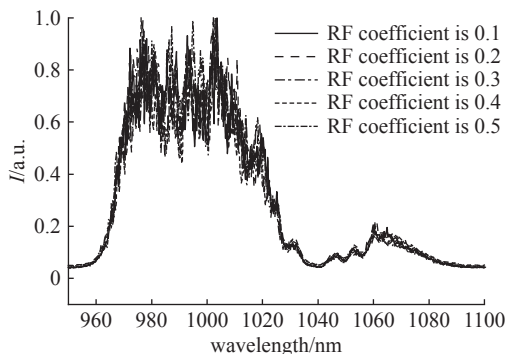


Fig. 5 Modulator output light spectra

图 5 AM 输出光脉冲光谱

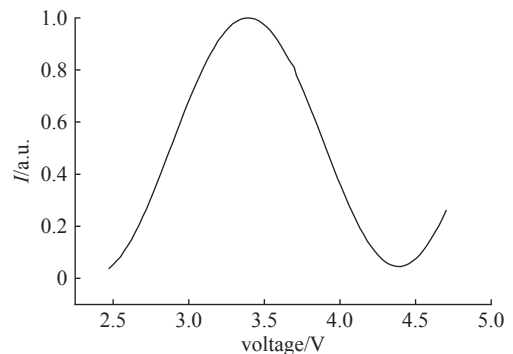


Fig. 6 Relationship between bias voltage and output light power

图 6 偏置电压与输出光功率的关系

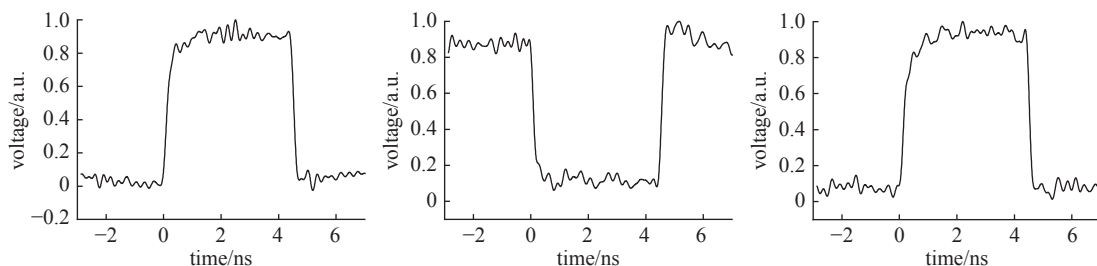


Fig. 7 Relationship between modulator bias voltage and output electrical pulse

图 7 调制器偏置电压和输出电脉冲波形的关系

示,图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)的偏置电压分别为 2.475、3.712、4.405 V。当偏置电压处于半波电压时,输出光脉冲与加载的电脉冲波形保持一致,振幅最大,输出波形保真度最佳。偏置电压从 2.475 V 逐渐增加到 3.712 V 时,输出光脉冲幅值逐渐变小,直至与输入脉冲波形方向相反的趋势,当偏置电压为 3.712 V 时,输出脉冲会达到最大幅值。随着偏置电压在 3.712 V 和二级半波电压之间变化时,输出光脉冲幅值逐渐变大,直至与输入脉冲波形方向相同的趋势,当偏置电压为二级半波电压时,输出脉冲会达到最大幅值。因此,为了更直观地观测脉冲整形系统调试结果,应当将偏置电压测量位置设置在半波电压附近,才能得到与输入脉冲方向一致、且不会幅度失真的脉冲。

由于材料的均匀性、制造工艺等原因,实际使用的调制器波导干涉臂分光比和长度不是完全一样的,且会有耦合损耗和传输损耗等因素的影响,导致分支波导中的光脉冲强度和相位不等。因此,通过模拟对比理想型调制器和有臂长差的调制器调制情况。本论文所用参数取值为: $n=2.2$, $r_{33}=30.9 \times 10^{-12}$ m/V。由于调制器的 L 和 D 属于未知量,因此 γ 取 0.5 进行模拟计算。未加载电压时,波长值为 1060 nm 的光处于波谷,对应相位为 $(2j+1)\pi$, 其中 j 表示相位周期,由公式 $S=(2j+1)\lambda/2n$, 当 j 取值为 7 时,可得臂长差 S 为 3613.6 nm。偏置电压为 2.475 V, V_m 为 0.1698 V 时,波长值为 1040 nm 的光处于波谷,对应相位为 $(2k+1)\pi$, 代入公式 $L/D=2nS-(2k+1)\lambda/(2.475+V_m) \times n^3 r_{33} \gamma$, 可得电极长度和间距比值为 5470。

变调制器偏置电压对波长为 1040 nm 的光强度的影响如图 8 所示,实线曲线代表理想型调制器,点划线曲线代表有臂长差的调制器。理想型调制器半波电压对应的直流偏置电压为 3.2973 V,实际调制器半波电压对应的直流偏置电压为 2.475 V,臂长差引入的相位差导致半波电压的值偏移了 0.8223 V。实际使用的幅度调制器分别加载不同电压时,输出光脉冲的光谱如图 9 所示,实线曲线代表仿真结果,点划线曲线代表实测结果。图 9(a)为未加载电压时,幅度调制器的输出光谱,图 9(b)、图 9(c)和图 9(d)是偏置电压分别为 2.475、3.712、4.405 V 的光谱。如图 9(b)所示,当偏置电压为 2.475 V 时,波长为 1040 nm 处的光脉冲强度最小,此波长对应输入光源的中心波长。将此时的电压记为该波长的一级半波电压,与理论计算的半波电压值相同。由于输入光光谱带宽很大,不同波长的光在该电压下的响应不同,光谱上会同时存在波峰和波谷。实测结果显示两级波峰的波长分别为 1006 nm 和 1065.93 nm,间隔约为 59.93 nm。如图 9(c)所示,当偏置电压为 3.712 V 时,加载的偏置电压刚好使中心波长光相位处于 2π ,产生干涉相长效应,光强有最大值,因此输出为波峰,输出光谱保真度最佳。如图 9(d)实线曲线所示,当偏置电压为 4.405 V 时,波长为 1040 nm 处的光脉冲强度最小,此电压即为该波长的二级半波电压。由于模拟所用的 γ 为定值,当电压值越大时,与实际值误差也越大,因此造成模拟与实测结果约 25 nm 的误差。综上所述,脉冲整形方案中应当设置偏置电压在 3.712 V 附近,才能得到与输入光光谱成分一致,保真度最佳的光谱。

2.3 偏置电压和射频系数对输出光脉冲时间相干性的影响

本文研究的脉冲整形装置作为宽带低相干驱动器的重要组成部分,对于相干性的研究具有重要意义。因此需要分析 AM 的偏置电压和射频系数对宽带低相干光时间相干性的影响。由公式(9)和公式(10),可以根据输出功率谱得到光脉冲的复相干度曲线,从而得出光脉冲的相干时间。AM 射频系数为 0.46 时,不同偏置电压下,输出

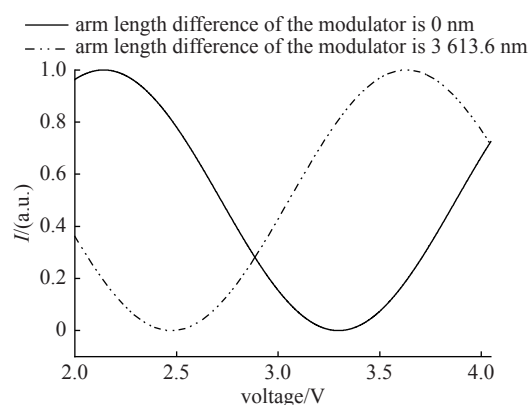


Fig. 8 Effect of modulator bias voltage on light intensity

图 8 AM 偏置电压对光强的影响

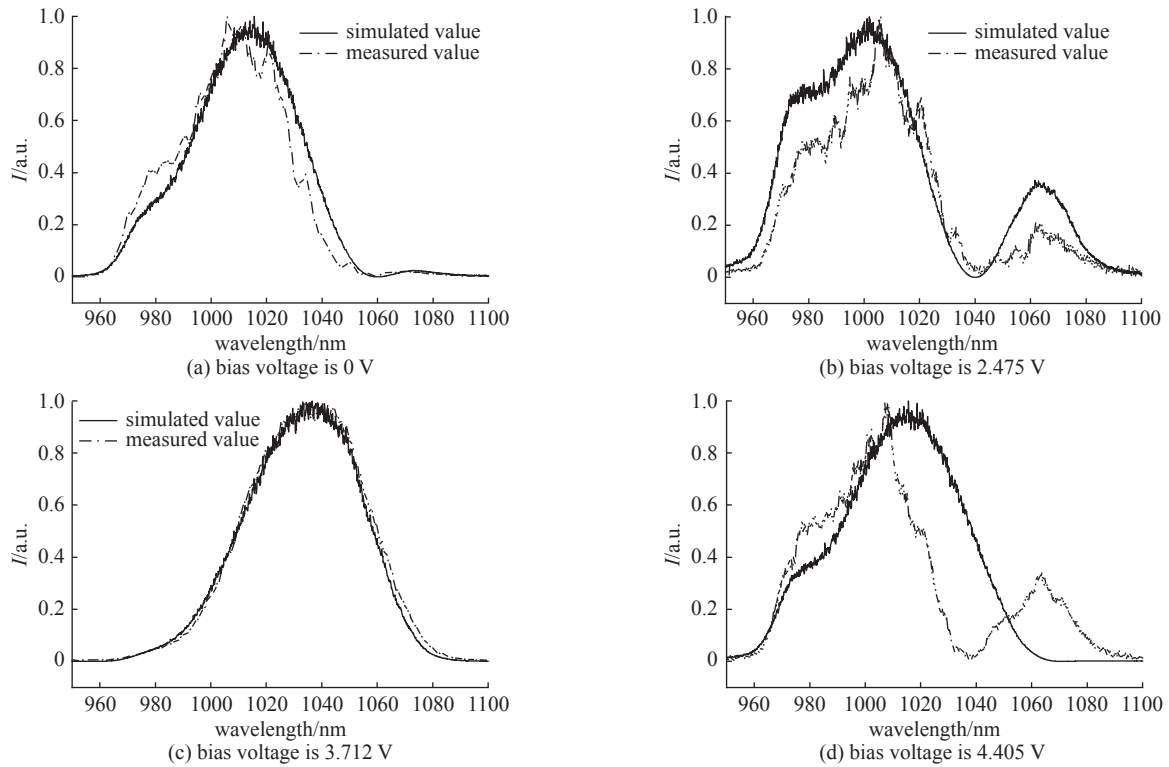


Fig. 9 Spectra of output light with different modulator bias voltages

图 9 不同偏置电压时的调制器输出光谱

光脉冲的复相干度曲线如图 10 所示。分别计算得出不同调制状态下的相干时间, 调制前的相干时间为 37.3 fs。当偏置电压 V_{DC} 为 2.475、2.796、3.118、3.390、3.712、4.405、4.702 V 时, 相干时间分别为 24.2、38.2、40.5、41.2、42.6、26、40 fs。AM 射频系数为 0.46 时, AM 偏置电压对光脉冲时间相干性的影响如图 11 所示, 可以看出当偏置电压处于半波电压时, 光处于相干相消的状态, 相干时间最小。随着偏置电压的增大, 相干性也在变高, 当相位差达到 2π 时, 光处于相干相长的状态, 相干时间最大。AM 偏置电压为 2.475 V 时, 不同射频系数下, 输出光脉冲的复相干度曲线如图 12 所示。射频系数分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 时对应的相干时间为 40.3、39.8、39.9、40.5、39.7 fs, 可见射频系

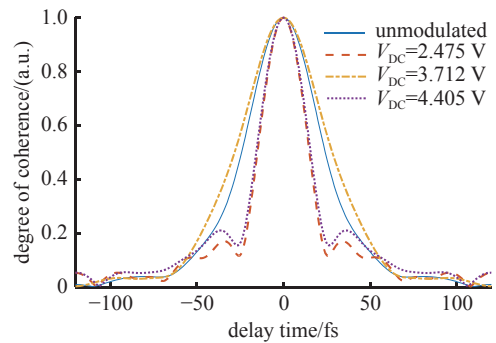


Fig. 10 Complex coherence curves of output optical pulses under different bias voltages when the RF coefficient of the modulator is 0.46

图 10 调制器射频系数为 0.46 时, 不同偏置电压下输出光脉冲的复相干度曲线

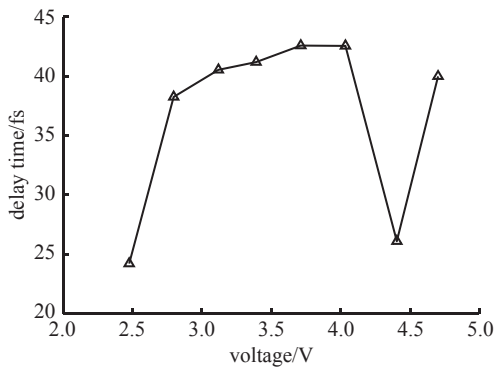


Fig. 11 Influence of AM bias voltage on the temporal coherence when the RF coefficient of the modulator is 0.46

图 11 调制器射频系数为 0.46 时, AM 偏置电压对光脉冲时间相干性的影响

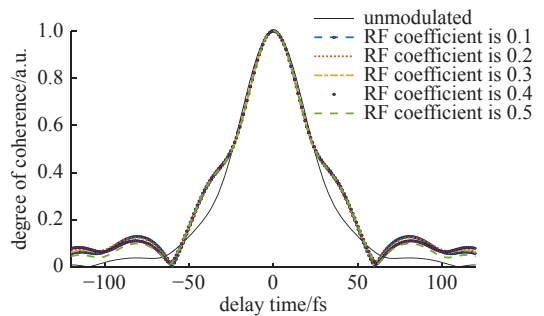


Fig. 12 Complex coherence curves of output optical pulses with different RF coefficients when the bias voltage is 2.475 V

图 12 调制器偏置电压为 2.475 V 时, 不同射频系数下输出光脉冲的复相干度曲线

数增大对时间相干性影响并不大。

3 结 论

本文根据 M-Z 干涉仪结构的铌酸锂波导幅度调制器的工作原理,对调制器的输出光时域分布和光谱进行了研究分析。确定了所使用的调制器应用于最佳的射频系数为 0.43~0.48。根据不同偏置电压下的输出光功率,确定了调制器的一级半波电压值为 2.475 V,二级半波电压值为 4.405 V。将调制器的偏置电压设置在半波电压附近时,调制后的光脉冲时域分布畸变较小。根据不同偏置电压下的光谱计算出调制器的臂长差为 3613.6 nm,电极长度和间距比值为 5470。模拟了偏置电压对光谱的调制情况,与实测结果基本符合。通过对调制器不同偏置电压时的输出光光谱进行傅里叶逆变换,计算出偏置电压为一级半波电压时的输出光相干时间是 24.2 fs,时间相干性最低。由于实际工艺差异导致调制器的结构参数略有不同,半波电压值也会有差异。在实际应用中需具体测试调制器的半波电压值以及臂长差和电极参数,根据输入信号的幅度来选择合适的射频系数和偏置电压工作点。

参考文献:

- [1] 康洞国, 郑无敌, 王敏, 等. 激光聚变冲击波点火的热斑形成机制[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 032005. (Kang Dongguo, Zheng Wudi, Wang Min, et al. Forming mechanism of hot spot in shock ignition scheme to laser fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 032005)
- [2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited][J]. *Journal of the optical society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [3] Glenzer S H, Froula D H, Divol L, et al. Experiments and multiscale simulations of laser propagation through ignition-scale plasmas[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(10): 716-719.
- [4] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435-448.
- [5] Dorrer C, Hill E M, Zuegel J D. High-energy parametric amplification of spectrally incoherent broadband pulses[J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 451-471.
- [6] Dorrer C, Spilatro M, Herman S, et al. Broadband sum-frequency generation of spectrally incoherent pulses[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 16135-16152.
- [7] Gao Yanqi, Cui Yong, Ji Lailin, et al. Development of low-coherence high-power laser drivers for inertial confinement fusion[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2020, 5: 065201.
- [8] 高妍琦, 季来林, 崔勇, 等. kJ级宽带低相干激光驱动装置[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 011004. (Gao Yanqi, Ji Lailin, Cui Yong, et al. kJ low-coherence broadband Nd: glass laser driver facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011004)
- [9] 郑万国, 李平, 张锐, 等. 高功率激光装置光束精密调控性能研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 011003. (Zheng Wanguo, Li Ping, Zhang Rui, et al. Progress on laser precise control for high power laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011003)
- [10] 宗兆玉, 赵军普, 李森, 等. 高稳定激光脉冲波形精密调控技术研究与应用[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 031011. (Zong Zhaoyu, Zhao Junpu, Li Sen, et al. Precise laser pulse shaping technology and application with high energy stability[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 031011)
- [11] Nakatsuka M, Miyanaga N, Kanabe T, et al. Partially coherent light sources for ICF experiment[C]//Proceedings of SPIE 1870, Laser Coherence Control: Technology and Applications. 1993: 151-162.
- [12] Nakano H, Kanabe T, Yagi K, et al. Amplification and propagation of partially coherent amplified spontaneous emission from Nd: glass[J]. *Optics Communications*, 1990, 78(2): 123-127.
- [13] Nakano H, Tsubakimoto K, Miyanaga N, et al. Spectrally dispersed amplified spontaneous emission for improving irradiation uniformity into high power Nd: glass laser system[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(5): 2122-2131.
- [14] Nakano H, Miyanaga N, Yagi K, et al. Partially coherent light generated by using single and multimode optical fibers in a high-power Nd: glass laser system[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 63(5): 580-582.
- [15] Wisoff P J, Bowers M W, Erbert G V, et al. NIF injection laser system[C]//Proceedings of SPIE 5341, Optical Engineering at the Lawrence Livermore National Laboratory II: The National Ignition Facility. 2004: 146-155.
- [16] Peng Hansheng, Zhang Xiaomin, Wei X F, et al. Design of 60-kJ SG-III laser facility and related technology development[C]//Proceedings of SPIE 4424, ECLIM 2000: 26th European Conference on Laser Interaction with Matter. 2001: 98-103.
- [17] Follett R K, Shaw J G, Myatt J F, et al. Thresholds of absolute instabilities driven by a broadband laser[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 062111.
- [18] Rao Daxing, Gao Yanqi, Cui Yong, et al. 1 μ J nanosecond low-coherent laser source with precise temporal shaping and spectral control[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 122: 105850.
- [19] 黄小东. ICF激光驱动器前端系统关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2010. (Huang Xiaodong. Research on key technology in ICF laser driver frontend system[D]. Ji'nan: Shandong University, 2010)
- [20] Wolf E. 光的相干与偏振理论导论[M]. 蒲继雄, 译. 北京: 北京大学出版社, 2014. (Wolf E. Introduction to the theory of coherence and polarization of light[M]. Pu Jixiong, trans. Beijing: Peking University Press, 2014)