

谐振型电光相位调制及光电探测功能器件的研发及应用*

田龙^{1)3)†} 郑立昂¹⁾ 张晓莉¹⁾ 武奕森¹⁾ 王庆伟¹⁾ 秦博²⁾
王雅君¹⁾³⁾ 李卫¹⁾³⁾ 史少平¹⁾³⁾ 陈力荣²⁾³⁾ 郑耀辉^{1)3)‡}

1) (山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

2) (山西大学物理工程学院, 太原 030006)

3) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2023 年 3 月 30 日收到; 2023 年 5 月 4 日收到修改稿)

针对极微弱信号提取及探测需求, 研发高调制深度、低功耗、低半波电压的谐振型电光相位调制 (RPM) 以及微瓦级、高信噪比谐振型光电探测 (RPD) 功能器件. 基于单端楔角铌酸锂晶体、低噪声光电二极管及低损高 Q 电子元件组成谐振电路, 利用谐振增强原理实现低功耗、高调制深度电光调制及高增益光电探测等; 所研发的 RPM 在最佳调制频点为 10.00 MHz 时, 带宽为 225 kHz, Q 值为 44.4, 调制深度为 1.435 时所需射频驱动电压峰值为 8 V; RPM 在最佳调制频点为 20.00 MHz 时, 带宽为 460 kHz, Q 值为 43.5, 调制深度为 1.435 时所需射频驱动电压峰值为 13 V; 将自研的 RPD 最佳探测频点调节为 20.00 MHz, 带宽为 1 MHz, Q 值为 20, 增益为 80 dB@100 μ W; 利用自研 RPM 和 RPD 组成极微弱信号提取链路, 在 500 mV 峰值电压驱动 RPM 下 (调制深度约为 0.055), 可实现直接输出误差信号信噪比为 5.088@10 μ W, 34.933@50 μ W 以及 58.7@100 μ W. 极微弱信号提取链路经过比例积分微分参数优化提升整个反馈控制环路性能及稳定性, 为制备高稳定量子光源及超稳激光等领域提供关键器件及技术途径.

关键词: 光电功能器件, 电光调制, 光电探测, 微弱信号提取

PACS: 85.60.-q, 42.30.Lr, 85.60.Gz, 07.50.Qx

DOI: 10.7498/aps.72.20230485

1 引言

光电功能器件是指具有特定的光学、电学及光电相互转换效应的器件, 是现代信息科学技术领域的支柱之一^[1]. 电光调制器及光电探测器是非常重要的光电功能器件, 是锁定反馈、光电信息转化、光通讯、光电信息调制等领域中的关键器件, 尤其在 PDH (Pound-Drever-Hall) 稳频锁定技术中发

挥不可替代的作用^[2]. PDH 技术广泛应用于大科学装置前沿研究、量子光学、光通信等领域^[3-6]; 利用电光相位调制器^[7]进行激光相位调制是实现标准 PDH 稳频锁定的首要过程, 光电探测则可将携带的微弱调制信号及谱峰信号等信息进行光电转化为电信号, 后续经过比例积分微分等电路进行反馈控制, 以便实现稳定锁定及稳频等目标.

铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体以其较高的电光系数已经在光学器件^[8]、各种电光调制器^[9,10]、脉冲激光系

* 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC2200402)、国家自然科学基金 (批准号: 62027821, 62225504, 62035015, U22A6003, 12174234, 12274275)、山西省重点研发计划 (批准号: 202102150101003) 和山西省三晋学者特聘教授项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tianlong@sxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yhzhang@sxu.edu.cn

统光谱整形^[11]、量子光学等方面应用广泛. 传统商用宽带电光调制器将驱动电压直接加载在电光晶体两端, 以实现电光相位或振幅调制等^[7], 这种调制器半波电压 (V_π) 较高, 调制深度较低且需要较高驱动电压. 在制备超稳激光以及超窄线宽激光等场合中需要将激光锁定在超稳腔上^[12–15], 由于超稳腔的精细度较高, 一般在十几万以上, 这就需要注入超稳腔的光功率极低, 一般为微瓦量级以下, 同时需要电光相位调制器具有较高调制深度以得到高信噪比 (SNR) 的误差信号用于锁定, 然而, 电光相位调制中的剩余振幅调制一直是影响超稳激光稳定性的关键因素之一. 2016 年, Li 等^[16]利用单端楔形 LiNbO_3 晶体分离不同偏振出射激光, 可以有效抑制剩余振幅调制, 提高量子光源稳定性; 同年, Tai 等^[17]利用布鲁斯特角切割的电光调制晶体抑制剩余振幅调制, 制备了超稳激光; 2019 年, Zhi 等^[18]利用声光相互作用理论解释剩余振幅调制产生机理, 并实验测试了不同形状电光晶体抑制剩余振幅调制的效果; Dooley^[19]通过在双端切角的晶体上分区域施加电压抑制电光相位调制中的剩余振幅调制; 虽然使用不同形状晶体及改变施加射频信号方式可达到抑制剩余振幅调制的目的, 但没有谐振回路时, 其 V_π 较高, 无法达到较高调制深度, 使得其在极微弱光锁定超高精细度超稳腔以及制备更低频率噪声激光等方面受限. 为解决上述问题, 德国 Qubig 公司研发了谐振型电光调制器, V_π 为 4.2 V@780 nm, Q 值为 76, 谐振频率为 20 MHz, 为超稳激光等领域提供关键器件^[20]. 然而, 双端楔角晶体需要仔细校准入射光方向以便实现较好抑制剩余振幅调制的效果. 但输入端平行且输出端楔角的晶体对激光入射角要求并不严格, 便于进行实验. 另外, 环境温漂是产生剩余振幅调制的另一个主要影响因素, 2022 年, Zheng 等^[21]发明一种温控集成的共振调制器, 但在实际实验中存在一定的结构复杂、抗环境干扰能力差、性能不稳定等因素; 在主动控制方面, Shi 等^[14]将国外商用光光调制器进行主动温控, 可获得较好的长期稳定性, 在 1000 s 的平均时间以内, 剩余幅度调制的影响小于 1×10^{-15} . 所以, 研发高调制深度、低功耗、低 V_π 的电光相位调制器, 并进行全面评估可为制备超稳激光光源、超低噪声激光、量子光源等提供关键器件, 推动相关产业性能提升.

此外, 光电探测器可将光信号转化为电信号,

广泛应用于各种光电信息科学中, 不同的科学应用场景对探测器的需求不同, 在地基引力波探测中, 可承受高功率的多光电管阵列探测器可以为光电反馈降噪提供更低散粒噪声基准及更高反馈增益^[22,23]; 在制备连续变量量子光源方面, 需要高增益高共模抑制比的平衡零拍探测器^[24–26]; 在离散变量量子光源制备及应用中需要单光子探测器进行光子数符合计数来评估光源指标性能^[27,28]; 在制备超稳激光等领域, 光电探测器是 PDH 稳频锁定中提取微弱相位调制信号的首要器件, 需要其在较低输入功率下有较高响应增益^[29], 其作为第一级信号采集器件, 其噪声及增益性能直接影响后续光电反馈的最终效果. 在 PDH 技术中只需要探测特定相位调制频率的信号, 然而, 传统商用探测器都具有一定带宽, 受集成芯片增益带宽积的影响, 探测器的探测带宽和高增益是互相限制的两个因素, 高增益往往带来电子学噪声的抬高, 恶化误差信号噪底, 对进行高精度反馈锁定具有一定不利因素; 谐振型探测器只针对特定频率有较高探测增益, 同时抑制其他频段噪声影响, 为高信噪比高增益反馈控制提供解决方案^[30,31]. 2007 年, Grote^[32]针对地基引力波探测, 利用电感电容谐振原理, 研制出对特定频段有较高探测增益且能抑制其他频段噪声的谐振型探测器; 2016 年, Chen 等^[33]利用光电二极管和可调电感组成谐振电路, 实现探测频率 58.6 MHz, Q 值为 90 的谐振型探测器; 之后该课题组^[34]利用变压器结构的电感和光电二极管组成谐振电路, 实现多频点、低噪声、高 Q 值的谐振型探测器, 其等效电子学噪声 (NEP) 为 4.7 pA/Hz^{1/2}@34.5 MHz, 其频谱增益为 12 dB@1.35 mW; 2019 年, Bowden 等^[31]实现了探测频率为 90 MHz, 等效电子学噪声为 3.5 pW/Hz^{1/2}、增益为 11.9 dB@200 μ W 的谐振型探测器. 上述谐振探测器都位于相对高频段进行相关设计, 可应用于锁定线宽在兆赫兹以上的光学参量腔、模式清洁腔以及光场相对位相等方面; 针对超稳激光等领域, 仍需发展微功率高增益低频段谐振型光电探测技术.

本文针对 PDH 锁定反馈回路中高调制深度电光相位调制及极微弱光电信号探测需求, 基于单端楔角 LiNbO_3 晶体及低损高 Q 电子元件组成谐振电路, 利用谐振增强原理放大加载在晶体两端射频信号幅值, 实现低功耗及高调制深度; 基于主动温控增加调制器稳定性, 研发高调制深度、低功耗、

低 V_π 及低剩余振幅调制的谐振型电光相位调制功能器件; 进一步, 针对特定调制频率, 基于可微调电感及光电二极管组成谐振电路, 通过精细电路布局消除原电路中内部混频电路部分带来的杂散寄生电容等因素的影响, 进一步降低电子学噪声, 研究不同 Q 值电感器件、不同暗电流光电二极管噪声对谐振型光电探测的电子学噪声及增益的影响关系, 并利用网络分析仪、误差信号峰峰值及信噪比对谐振型光电探测进行多维评估; 实现了从谐振型电光调制及谐振型光电探测两方面对 PDH 锁定反馈回路性能优化, 为制备高稳定量子光源及超稳激光提供关键器件及技术途径.

2 谐振型光电功能器件的原理及设计

电感 (L) 电容 (C) 串联谐振增强电路利用电容电感之间能量传递可以实现选频网络, 典型串联谐振回路如图 1 所示, 其中 R_0 通常指的是电感线圈以及电容的总损耗.

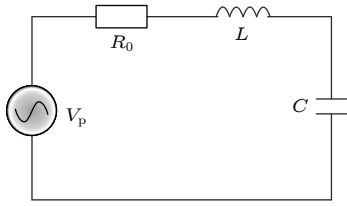


图 1 典型串联谐振回路

Fig. 1. Typical series resonant circuit.

串联谐振回路的谐振频率 ω 和 Q 值分别可表示为^[35]

$$\omega = (LC)^{-1/2}, \quad (1a)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (1b)$$

此外, Q 值也正比于谐振回路存储能量与每周消耗能量比值^[35], 所以降低回路中器件损耗可以提高 Q 值.

对于给定器件, 温度会引起电感值和电容值的变化, 变化率分别为 $\Delta L/^\circ\text{C}$ 和 $\Delta C/^\circ\text{C}$, 则对于 ω 的温度特性可由变分方法得到:

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \frac{-\Delta L \cdot C - L \cdot \Delta C}{2\sqrt{L \cdot C}} \\ &= \omega \cdot \left(\frac{-\Delta L \cdot C - L \cdot \Delta C}{2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

所以对于 Q 值较高的谐振回路需要进行主动控温以实现较高稳定性.

然而实验上受器件不稳定性、不同谐振环路类型、谐振回路后续放大电路等影响, 一般还可以根据测量传输函数进行 Q 值测量^[35], 可表示为

$$Q = \frac{\omega}{\text{BW}_{3\text{ dB}}}, \quad (3)$$

其中 $\text{BW}_{3\text{ dB}}$ 为谐振峰值降低 3 dB 的带宽.

电光调制晶体在外加电场调制时, 其晶体内部束缚电荷受电场作用后可重新分布, 引起晶体介电常数变化, 使得晶体折射率随电场调制发生变化; 当激光通过调制晶体时, 激光光场相位特性会受到晶体折射率变化的影响, 最终实现对激光的相位调制; 利用两块光轴呈 90° 夹角的电光调制晶体, 可实现激光的振幅调制.

以相位调制为例, 激光频率为 ν_0 , 电场调制频率为 ω_0 , 激光经过相位调制后输出光场可表达为

$$\begin{aligned} E_{\omega_0}^{\nu_0} &\approx E_0 [J_0(\beta) e^{i\nu_0 t} + J_1(\beta) e^{i(\nu_0 + \omega_0)t} \\ &\quad - J_1(\beta) e^{i(\nu_0 - \omega_0)t} + J_2(\beta) e^{i(\nu_0 + 2\omega_0)t} \\ &\quad + J_2(\beta) e^{i(\nu_0 - 2\omega_0)t} + \dots], \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $J_n(\beta)$ 由贝塞尔函数决定, β 为调制深度. 由 (4) 式可知, 经过相位调制后输出光场的频谱是由频率为 ν_0 的载波频率成分和它两边对称分布频率为 $\nu_0 \pm n\omega_0$ 的无穷多对边带频率成分共同组成, 各相邻边带频率成分之间的频率间隔是 ω_0 , 各边带频率成分幅度的相对比例由 $J_n(\beta)$ 决定, 光强比例由 $|J_n(\beta)|^2$ 决定, $|J_n(\beta)|^2$ 随着调制深度 β 的关系如图 2 所示, 当主峰 $|J_0|^2$ 降低到 50% 时, 对应调制深度 1.126; 当主峰 $|J_1|^2$, $|J_{-1}|^2$ 和 $|J_2|^2$ 相等时, 对应调制深度 1.435.

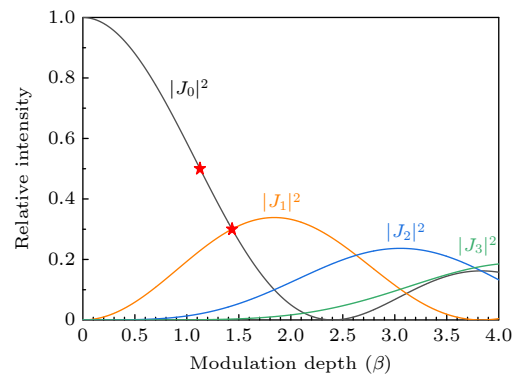


图 2 贝塞尔函数随调制深度变化关系图

Fig. 2. Diagram of Bessel function with modulation depth.

当加载到电光晶体两端的电压增大到足以使输出激光产生 $\lambda/2$ 的光程差时, 对应的位相差为 π , 此时驱动电压峰值称之为 V_π , 对应相位调制的调制深度为 2.4; 对于传统宽带调制器, 调制电压直接加载在晶体两端, V_π 可表达为

$$V_\pi = \lambda d / (\gamma_{33} n_e^3 l), \quad (5)$$

其中, λ 为激光波长, γ_{33} 为电光晶体的电光系数, d 为电光晶体的厚度, l 为电光晶体的长度; 对于 LiNbO_3 晶体, 未施加电场时, 寻常光 o 光和非寻常光 e 光的折射率分别为 $n_o = 2.232@1064 \text{ nm}$ 和 $n_e = 2.156@1064 \text{ nm}$, 当晶体长度为 40 mm 时, 经计算可得 V_π 为 258 V^[31], 对于同样的电光调制器, 激光波长越大对应的半波电压越大.

当电光调制晶体两端加载电压时, 晶体相当于一个电容, 当匹配合适阻抗电路时可实现高效率加载调制信号^[36]. 以简单的 LC 谐振回路计算, 加载到电容两端的电压可表示为

$$\bar{V}_T = Q \cdot V_S. \quad (6)$$

所以, 通过谐振阻抗电路可以增强加载到晶体两端的电压幅值, 等效降低 V_π .

此外, 对于电光相位调制, 抑制其中的剩余振幅调制 (RAM) 是实现稳定反馈控制的重要因素, RAM 的大小与电光晶体中自然双折射效应引起的相位差 $\Delta\phi$ 有重要关系^[36], 对于 LiNbO_3 晶体, 其 o 光和 e 光折射率会随着环境温度变化, 具体表达式为

$$\begin{aligned} n_o^2 &= 4.9130 - 2.78 \times 10^{-2} \lambda^2 \\ &+ \frac{0.1173 + 1.65 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.212 + 2.7 \times 10^{-8} T^2)^2}, \\ n_e^2 &= 4.5567 - 2.24 \times 10^{-2} \lambda^2 + 2.605 \times 10^{-7} T^2 \\ &+ \frac{0.097 + 2.7 \times 10^{-8} T^2}{\lambda^2 - (0.201 + 5.4 \times 10^{-8} T^2)^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, T 为晶体温度, λ 为激光波长. 由 (7) 式可知, 当环境温度变化时, 电光晶体引起的相位差 $\Delta\phi$ 会随之变化, 最终引起反馈控制误差信号零基线的漂移, 产生 RAM; 对于谐振型电光调制器, 温度影响尤其严重, 需要对其进行主动温控以保证最佳调制频率点以及降低 RAM.

对于谐振型光电探测, 基于光电二极管固有结电容, 结合可调低损电感器件, 形成 LC 谐振电路, 增强对特定调制频率极微弱光电调制信号的高增

益探测, 进一步通过变压器型谐振电路可降低探测器电子学噪声并增大探测增益. 针对超稳激光、高稳定时频传输等高精尖领域, 研究不同光敏面的光电管、不同 Q 值电感对谐振型光电探测的 Q 值、探测效率、信噪比、电子学噪声的影响, 并利用网络分析仪、频谱分析仪以及误差信号信噪比可对谐振型光电探测进行多维评估.

3 实验装置、过程及结果分析

利用模式清洁腔 (MC) 的误差信号及反馈锁定环路, 可对谐振型电光相位调制器 (resonant electro-optic phase modulator, RPM) 及谐振型光电探测器进行全链路评估, 实验装置如图 3 所示.

根据谐振原理以及 (1a) 式可知, 当形成谐振回路后有最佳谐振调制频率点以及最佳光电探测频率点. 首先对 RPM 的最佳调制频率进行测量, 通过测量 RPM 对所加载高频射频信号的反射率可知实际加载到 RPM 的射频信号大小, 即测量其阻抗匹配特性. 当 RPM 达到较好阻抗匹配时, 射频信号均能传递至 RPM 负载上, 则射频信号的反射率较低; 当调制器阻抗匹配较差时, 射频信号传递至 RPM 负载上的效率较低, 则反射率较大. 利用矢量网络分析仪 (Agilent 4395A), 及其阻抗匹配配件 (Agilent 43961A) 可进行阻抗匹配测量.

选用电光系数较高的 LiNbO_3 作为电光调制晶体, 其尺寸为 40 mm×4 mm×3 mm, 通过选择合适电感, 可使得最佳谐振频率点从几兆赫兹到几十兆赫兹变化. 选择两个频率点 10.00 MHz 以及 20.00 MHz 为例进行相关测试, 将 RPM 的输入调制端口接到矢量网络分析仪, 设置阻抗分析相关参数, 测量相关阻抗特性数据.

由于谐振电路特性可知, 当射频信号频率远离最佳频率时, 能量转化效率逐步变差, 表现在阻抗分析结果中则为反射率变大, 当反射率增大到 -3 dB 时的频率宽度为带宽, 也就是非对数坐标系中的半高全宽带宽. 最终阻抗分析测试结果如图 4 所示. 图 4 中射频反射点在 10.00 MHz/20.00 MHz 处达到最低, 表明调制器对射频信号的反射率最低, 为 -47.8 dB/-45.1 dB, 表明达到较好阻抗匹配, 射频信号加载效率高, 也就是说最佳谐振频率即为 10.00 MHz/20.00 MHz, 此时能量转化效率达到最佳.

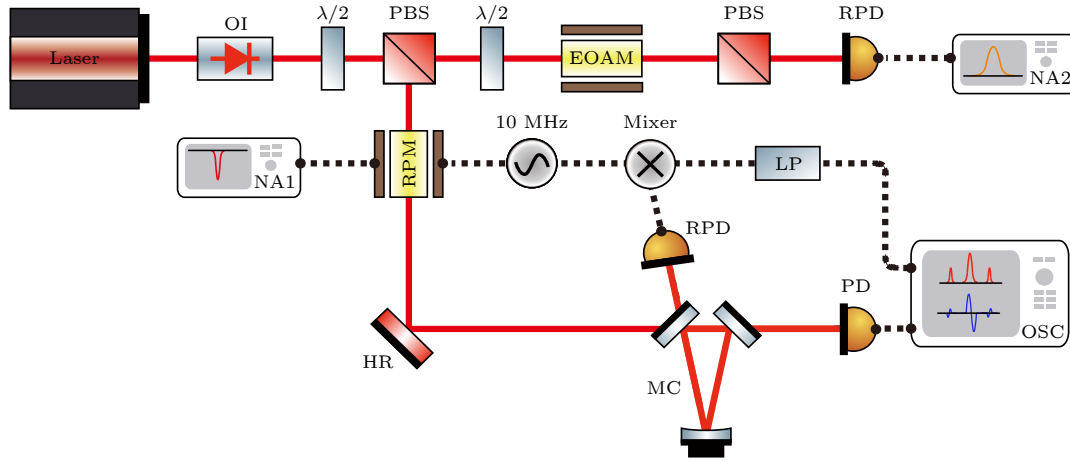


图 3 谐振光电器件测试实验装置图 (Laser 为全固态激光器; OI 为光隔离器; $\lambda/2$ 为半波片; PBS 为偏振分束器; RPM 为电光相位调制器; HR 为高反镜; OSC 为示波器; MC 为模式清洁剂; RPD 为共振探测器; PD 为光电探测器; NA 为网络分析仪)

Fig. 3. Experimental setup for testing resonant photoelectric devices (Laser, solid-state laser; OI, optical isolator; $\lambda/2$, half-wave plate; PBS, polarization beam splitter; RPM, resonant electro-optic phase modulator; HR, high reflective mirror; OSC, oscilloscope; MC, mode cleaner; RPD, resonant photodetector; PD, normal photodetector; NA, network analyzer).

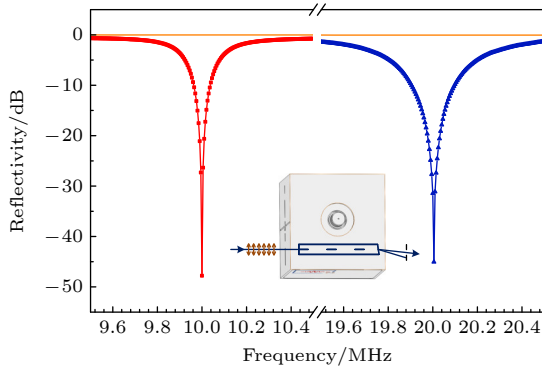


图 4 自研谐振型电光相位调制器的阻抗分析测试结果图

Fig. 4. Input return loss test results of RPM.

当调节 RPM 到最佳调制频点为 20.00 MHz 时, 3 dB 带宽为 460 kHz, 根据 (3) 式可知, Q 值为 43.5; 之后改变 RPM 最佳调制频点到 10.00 MHz, 此时带宽为 225 kHz, Q 值为 44.4. 图 4 中插图为 RPM 实物图、内部晶体放置方式以及所需激光偏振示意图. 当驱动接口朝上放置时, 入射激光偏振应为 P 偏振, 出射激光往楔角方向偏移. 作为对比, 测量索雷博商用宽带相位调制器 (型号 EO-PM-NR-C2) 的阻抗测试结果, 如图 4 中橙线, 反射率为 -0.046 dB, 其阻抗匹配效率相对较低. 进一步根据 (7) 式, 高 Q 值调制器中电光晶体的折射率等因素随环境温度变化, 使得谐振回路器件参数变化, 最终导致 RPM 最佳调制频率点随温度变化. 对所设计电光调制器进行主动温控设计, 首先将 RPM 集成在金属屏蔽壳内, 之后对外壳整体温控, 隔离

TEC 等器件对电光调制的影响, 并自研温度控制模块, 温控精度为 0.005 $^{\circ}\text{C}$.

在测量了最佳调制频点后, 利用 MC 腔对调制深度和 V_{π} 进行测量. MC 腔的线宽为 2.2 MHz, 自由光谱区为 688 MHz. 波长为 852 nm 的激光通过调制器后匹配到 MC, 通过普通探测器 (PD) 对 MC 腔的透射峰进行测量, 将信号源 (Keysight 33521A) 输出调制射频信号加载到 RPM 上, 测量 MC 的透射峰信号随射频信号幅值变化关系. 根据 (4) 式和图 2 可知, 当调制深度增大时, MC 透射峰的主载波峰逐步降低, 而二阶及以上边带峰逐步增加. 当增大加载射频信号幅值使得 MC 透射峰的主载波峰高度与正负一级边带峰高度一致时, 对应调制深度为 1.435; 实测自研 RPM 的调制深度随射频信号幅值关系结果如图 5 所示; 从实验结果可知, 自研 RPM 谐振频率为 10.00 MHz 的 RPM 在峰值为 8 V 射频信号驱动下调制深度为 1.435, 即主峰高度和边带高度一致, 对应 V_{π} 为 13.38 V@852 nm@10 MHz; 对于谐振频率为 20.00 MHz 时, RPM 在峰值为 13 V 射频信号驱动下调制深度为 1.435. 进一步根据 (5) 式可知调制器的 V_{π} 和激光波长成正比, 对于 10 MHz 最佳调制频点时, 如果激光波长分别为 671, 795, 1064 nm 时, 达到 1.435 调制深度时所需驱动电压峰值分别为 6.34, 7.5, 10.4 V, 分别对应于图 5 中蓝线、紫线和红线. 所以对于 V_{π} 的测量需要指出其适用激光的波长, 波长越大则 V_{π} 越大.

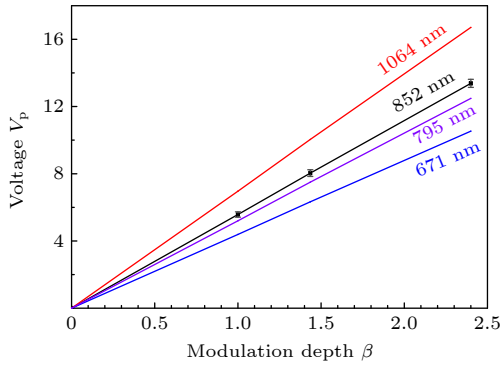


图5 调制器调制深度随驱动电压变化测试结果图

Fig. 5. The test results of modulator debugging depth as a function of driving voltage.

其次, 同样利用网络分析仪对谐振型光电探测器进行测试. 入射激光经过振幅调制器 (EOAM) 后入射到 RPD 上, 矢量网络分析仪 4395A 产生的内部参考信号经过功分后, 一路加载到 EOAM 上, 另一路作为网分的参考信号, 设定 4395A 扫频范围为 0—50 MHz. RPD 将振幅调制后的激光光信号转换为电信号, 接入到 4395A 的信号输入端 (A 端), 可得到谐振型光电探测器的传输函数, 详细过程可参见参考文献 [19—23].

选用 JDSU 公司光电二极管 (ETX500)^[34,37], 在匹配合适电感值后, RPD 的最佳增益点为 20.00 MHz, 其传输函数随入射光功率的变化曲线如图 6 所示. 同样作为对比, 测试了 Thorlabs 公司型号为 FPD510 探测器的传输函数; 实验结果表明, 在 100 μ W 激光入射时, 自研 RPD 的增益为 80 dB, FPD510 的增益为 60 dB.

通过对 RPM 及 RPD 的单独测试, 可对各自性能进行全面评估, 进一步, 通过 MC 腔误差信号的信噪比和峰峰值对 RPM 及 RPD 组成的极微弱信号提取链路进行测试.

模式清洁腔的反射光入射到 RPD 中, 经过同频射频信号解调后生成的误差信号, 改变射频信号相位使得误差信号对称, 利用示波器记录优化好的误差信号, 在一个周期内误差信号的最大值和最小值之间差值定义为误差信号峰峰值. 误差信号的信噪比定义为误差信号峰峰值和零基线值的比值. 对自研 RPD 和全商用两种情况进行对比测试: 自研 RPM 及 RPD 组成的链路测试与 Thorlabs 宽带调制器和 FPD510 组成的链路测试. 自研谐振器件链路中固定 RPM 的调制驱动信号幅值为 0.5 V, 调制深度为 0.055; 全商用链路中固定 RPM 的调制

驱动信号幅值为 8 V, 调制深度约为 0.055. 误差信号混频中解调正弦信号的电压幅值为 2—3 V, 以峰峰值达到最大为止, 混频后低通截止频率都为 100 kHz.

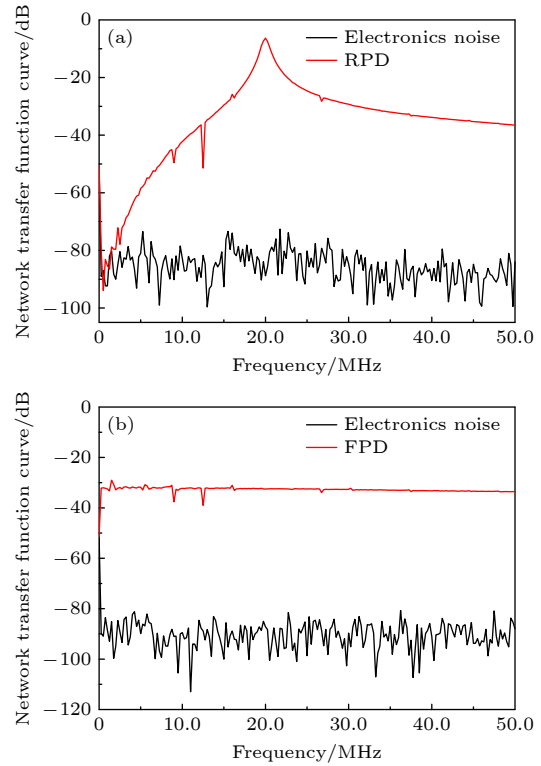


图6 自研谐振型光电功能器件 (a) 与商用探测器 (b) 的传输信号测试图

Fig. 6. The test result of transmission signal of self-innovate resonant photoelectric devices (a) and commercial detector (b).

实测 MC 腔的直接解调误差信号信噪比和峰峰值测试结果如图 7 所示. 实验结果表明, 当入射探测器激光为 10 μ W 时, FPD510 的误差信号峰峰值为 1.051 mV, 信噪比为 1.612, 自研 RPD 的误差信号峰峰值为 6.299 mV, 信噪比为 5.088; 当入射探测器激光为 50 μ W 时, FPD510 的误差信号峰峰值为 16.97 mV, 信噪比为 24.59, 自研 RPD 的误差信号峰峰值为 39.58 mV, 信噪比为 34.933; 当入射探测器激光为 100 μ W 时, FPD510 的误差信号峰峰值为 25.06 mV, 信噪比为 34.8, 自研 RPD 的误差信号峰峰值为 76.07, 信噪比为 58.7.

上述实验结果表明: 在性能方面, 自研谐振型光电功能器件在探测微弱调制信号及解调出高信噪比误差信号方面有优势; 在所需材料及产业链方面, 自研谐振型光电调制器所需元件均为国产,

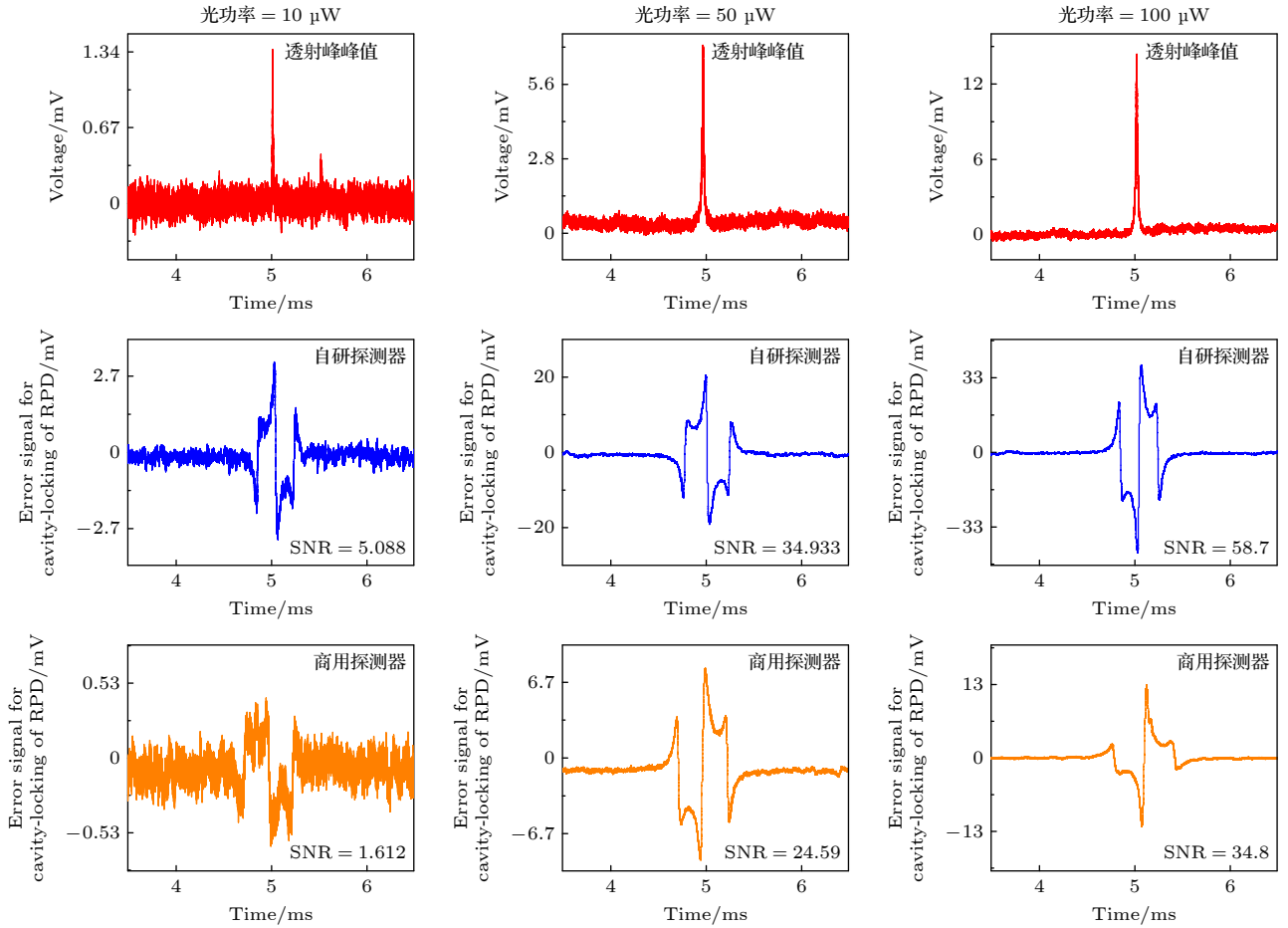


图 7 MC腔误差信号的信噪比和峰峰值测试结果图

Fig. 7. The test results of signal to noise ratio and peak-to-peak of MC cavity error signal.

产业链自主可控且成本相对国外相关产品较低, 填补国内相关领域空白; 在结构设计方面, 具有小型化、定制集成化及模块化等优势, 可集成到诸如量子光源、稳频模块、光电反馈等场景中. 需要指出的是, 误差信号的峰值大小及信噪比还和调制深度、激光光强以及腔线宽等因素有关, 所以固定其他因素后才进行相关对比实验, 另外在实际锁定及稳频中需将探测器解调低通后的误差信号进一步输入到比例积分微分器中进行进一步优化, 之后用于锁定.

4 结论与展望

针对极微弱信号提取及探测需求, 研发高调制深度、低功耗、低 V_{π} 的谐振型光电相位调制功能器件以及微瓦级、高信噪比谐振型光电探测功能器件. 基于方便调节的单端楔角 LiNbO_3 晶体、低噪声光电二极管及低损高 Q 电子元件组成谐振电路,

利用谐振增强原理实现低功耗、高调制深度及高增益光电探测等; 所研发的 RPM 在最佳调制频点为 10.00 MHz 时, 带宽为 225 kHz, Q 值为 44.4, 调制深度为 1.435 时所需射频驱动电压峰值为 8 V; RPM 在最佳调制频点为 20.00 MHz 时, 带宽为 460 kHz, Q 值为 43.5, 调制深度为 1.435 时所需射频驱动电压峰值为 13 V; 自研的 RPD 最佳探测频点为 20.00 MHz, 带宽为 1 MHz, Q 值为 20, 增益为 80 dB @100 μW .

进一步, 利用自研 RPM 和 RPD 组成极微弱信号提取链路: 微弱激光首先经过 RPM 将相位调制射频信号加载到激光上, 带有相位调制的激光经过 MC 腔后, 其反射激光携带腔长有关信息, 将反射光入射 RPD 进行微弱调制信号探测, 通过同频射频信号解调出误差信号, 实现极微弱信号提取, 将调制深度设置为 0.055, 自研链路误差信号信噪比为 5.088@10 μW , 34.933@50 μW 及 58.7@100 μW , 商用链路的信噪比为 1.612@10 μW , 24.59@50 μW

及 34.8@100 μW , 自研链路在微弱信号调制及提取等方面有优势。

此极微弱信号提取链路经过比例积分微分参数优化提升整个反馈控制环路性能及稳定性, 为制备高稳定量子光源及超稳激光等领域提供关键器件及技术途径; 此外, 低损谐振回路也可应用在声光调制器及电光振幅调制器中, 实现低驱动功耗、高增益光电功能器件, 推动光电调制、光电探测、光电反馈及量子精密测量等多领域发展, 并带动光电材料等上下游相关技术产品性能提升。

参考文献

- [1] Zhou Z X 2017 *Optoelectronic Functional Materials and Devices* (Beijing: Higher Education Press) p20 (in Chinese) [周忠祥 2017 光电功能材料与器件 (北京: 高等教育出版社) 第20页]
- [2] Drever R W, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [3] Abramovici A, Althouse W E, Drever R W, Gürsel Y, Kawamura S, Raab F J 1992 *Science* **256** 325
- [4] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, Schnabel R 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 110801
- [5] Yang W H, Shi S P, Wang Y J, Ma W G, Zheng Y H, Peng K C 2017 *Opt. Lett.* **42** 4553
- [6] Shi S P, Wang Y J, Yang W H, Zheng Y H, Peng K C 2018 *Opt. Lett.* **43** 5411
- [7] Thorlabs, https://www.thorlabschina.cn/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2729 [2023-04-25]
- [8] Li G L, Jia Y C, Chen F 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 157801 (in Chinese) [李庚霖, 贾曰辰, 陈峰 2020 物理学报 **69** 157801]
- [9] Shang C L, Tao S Q, Sun H C, Pan A, Zeng C, Xia J S 2022 *Semicond. Optoelectron.* **43** 95 (in Chinese) [尚成林, 陶诗琪, 孙昊骋, 潘安, 曾成, 夏金松 2022 半导体光电 **43** 95]
- [10] Liu Z X, Zeng C, Xia J S 2022 *Chin. J. Lasers* **49** 1206001 (in Chinese) [刘子溪, 曾成, 夏金松 2022 中国激光 **49** 1206001]
- [11] Zhang T, Li D W, Wang T, Cui Y, Zhang T X, Wang L, Zhang J, Xu G 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 084202 (in Chinese) [张腾, 李大为, 王韬, 崔勇, 张天雄, 王丽, 张杰, 徐光 2021 物理学报 **70** 084202]
- [12] Matei D G, Legero T, Häfner S, Grebing C, Weyrich R, Zhang W, Sterr U 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 263202
- [13] Tai C Y 2018 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [邰朝阳 2018 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [14] Shi X H, Zhang J, Zeng X Y, Lü X L, Liu K, Xi J, Ye Y X, Lu Z H 2018 *Appl. Phys. B* **124** 153
- [15] Li L F, Wang J, Bi J, Zhang T, Peng J K, Zhi Y L, Chen L S 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 043001
- [16] Li Z H, Ma W G, Yang W H, Wang Y J, Zheng Y H 2016 *Opt. Lett.* **41** 3331
- [17] Tai Z Y, Yan L L, Zhang Y Y, Zhang X F, Guo W G, Zhang S G, Jiang H F 2016 *Opt. Lett.* **41** 5584
- [18] Zhi Y L, Chen L S, Li L F 2022 *Opt. Express* **30** 17936
- [19] Dooley K L 2011 *Design and Performance of High Laser Power Interferometers for Gravitational-Wave Detection* (Florida: University of Florida) p128
- [20] Qubig, <https://www.qubig.com/products/electro-optic-modulators-230/phase-modulators.html> [2023-4-25]
- [21] Zheng Y H, Jiao N J, Li R X, Tian L, Wang Y J 2022 *China Patent* CN112649975 B(in Chinese) [郑耀辉 焦南婧 李瑞鑫 田龙 王雅君 2022 中国专利 CN112649975B]
- [22] Kwee P, Willke B, Danzmann K 2009 *Opt. Lett.* **34** 2912
- [23] Junker J, Oppermann P, Willke B 2017 *Opt. Lett.* **42** 755
- [24] Jin X L, Su J, Zheng Y H 2016 *J. Quantum Opt.* **22** 108 (in Chinese) [靳晓丽, 苏静, 郑耀辉 2016 量子光学学报 **22** 108]
- [25] Wang W J, Li F, Li J B, Ju M J, Zheng L A, Tian Y H, Zheng Y H 2022 *Infrared Laser Engineer.* **51** 111 (in Chinese) [王伟杰, 李番, 李健博, 鞠明健, 郑立昂, 田宇航, 郑耀辉 2022 红外与激光工程 **51** 111]
- [26] Pan G X, Liu H, Zhai Z H, Liu J L 2021 *J. Quantum Opt.* **2** 109 (in Chinese) [潘国鑫, 刘惠, 翟泽辉, 刘建丽 2021 量子光学学报 **2** 109]
- [27] Hu X M, Huang C X, Sheng Y B, Zhou L, Liu B H, Guo Y, Guo G C 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 010503
- [28] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, Chen M C, Peng L C, Luo Y H, Pan J W 2020 *Science* **370** 1460
- [29] Zhou H J, Wang W Z, Zheng Y H 2013 *Opt. Precis. Engineer.* **21** 2737 (in Chinese) [周海军, 王文哲, 郑耀辉 2013 光学精密工程 **21** 2737]
- [30] Chen C Y, Shi S P, Zheng Y H 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 103101
- [31] Bowden W, Vianello A, Hobson R 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 106106
- [32] Grote H 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 54704
- [33] Chen C Y, Li Z X, Jin X L, Zheng Y H 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 103114
- [34] Chen C Y 2018 *M. S. Thesis* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [陈朝勇 2018 硕士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [35] Zhang P L 2018 *High Freq. Circuits* (Beijing: China Machine Press) p9 (in Chinese) [张培玲 2018 高频电子线路 (北京: 机械工业出版社) 第9页]
- [36] Li Z X 2019 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [李志秀 2019 博士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [37] Zhang H Y, Wang J R, Li Q H, Ji Y J, He Z Y, Yang R C, Tian L 2019 *J. Quantum Opt.* **4** 456 (in Chinese) [张宏宇, 王锦荣, 李庆回, 吉宇杰, 贺子洋, 杨荣草, 田龙 2019 量子光学学报 **4** 456]

Resonant electro-optic phase modulator and photodetector for stabilizing laser frequency and quantum optics*

Tian Long^{1)3)†} Zheng Li-Ang¹⁾ Zhang Xiao-Li¹⁾ Wu Yi-Miao¹⁾
 Wang Qing-Wei¹⁾ Qin Bo²⁾ Wang Ya-Jun¹⁾³⁾ Li Wei¹⁾³⁾
 Shi Shao-Ping¹⁾³⁾ Chen Li-Rong²⁾³⁾ Zheng Yao-Hui^{1)3)‡}

1) (*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

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

3) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 30 March 2023; revised manuscript received 4 May 2023)

Abstract

Photoelectric functional device with specific optical, electrical and photoelectric conversion effects is one of the most important resources of modern information science and technology. Electro-optic modulator and photodetector are very important photoelectric functional devices, which are key devices in the fields of frequency locking, feedback control, photoelectric information conversion, optical communication, photoelectric information modulation, etc., and play an irreplaceable role in frequency stabilization locking technology of PDH (Pound-Drever-Hall, simply referred to as PDH). The PDH technology is widely used in researches of large scientific devices, quantum optics, optical communication and other fields. Using electro-optical phase modulator to carry out laser phase modulation is the primary process to realize frequency stabilization locking of standard PDH. Photoelectric detection can implement the photoelectric conversion of the carried weak modulation signal and spectral peak signal into electrical signal, and then feedback control through proportional integral and differential circuits, so as to achieve stable locking and frequency stabilization. The resonant electro-optical phase modulation (RPM) with high modulation depth, low power consumption and low half-wave voltage and microwatt resonant photoelectric detection (RPD) functional device with high signal-to-noise (SNR) ratio are invented to meet the demand for extraction and detection of extremely weak signals. The resonant circuit is composed of the single-end wedge-angle lithium niobate crystal, low noise photodiode and low-loss and high-Q electronic components. Low power consumption, high modulation depth electro-optic modulation, and high gain photoelectric detection are realized by the principle of resonant enhancement. When the optimal modulation frequency point is 10 MHz, the bandwidth of RPM is 225 kHz with Q of 44.4, when the modulation depth is 1.435, the RPM requires RF drive voltage of RPM to be 4 V. When the optimal modulation frequency point is 20 MHz, the bandwidth of RPM is 460 kHz with Q of 43.5, the required RF drive voltage of RPM is 6.5 V when the modulation depth is 1.435. The optimal detection frequency point of the self-invent RPD is 20.00 MHz, with a bandwidth of 1 MHz, Q of 20, the gain of 80 dB at 100 μ W. With the home-made RPM and RPD in the extraction loop for extremely weak signal, the SNR of error signal is as high as 5.088 at 10 μ W, 34.933 at 50 μ W and 58.7 at 100 μ W. Such a loop improves the performance and stability of the entire feedback control loop by optimizing parameters of proportional integral differential, which provides key devices and technological approaches for preparing a highly stable quantum light source and ultra-stable laser.

Keywords: photoelectric functional device, electro-optical modulation, photoelectric detection, weak signal extraction

PACS: 85.60.-q, 42.30.Lr, 85.60.Gz, 07.50.Qx

DOI: 10.7498/aps.72.20230485

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFC2200402), the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 62027821, 62225504, 62035015, U22A6003, 12174234, 12274275), the Key R&D Program of Shanxi, China (Grant No. 202102150101003), and the Program for Sanjin Scholar of Shanxi Province, China.

† Corresponding author. E-mail: tianlong@sxu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yhzheng@sxu.edu.cn



谐振型电光相位调制及光电探测功能器件的研发及应用

田龙 郑立昂 张晓莉 武奕淼 王庆伟 秦博 王雅君 李卫 史少平 陈力荣 郑耀辉

Resonant electro-optic phase modulator and photodetector for stabilizing laser frequency and quantum optics

Tian Long Zheng Li-Ang Zhang Xiao-Li Wu Yi-Miao Wang Qing-Wei Qin Bo Wang Ya-Jun Li Wei Shi Shao-Ping Chen Li-Rong Zheng Yao-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 148502 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230485

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230485>

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

光栅局域调控二维光电探测器

Photogating effect in two-dimensional photodetectors

物理学报. 2021, 70(2): 027801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201325>

一种基于电光调制光频梳光谱干涉的绝对测距方法

Method of measuring absolute distance based on spectral interferometry using an electro-optic comb

物理学报. 2020, 69(9): 090601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200081>

基于电光晶体平板部分相位调制动态产生涡旋光束

Dynamic generation of vortex beam based on partial phase modulation of electro-optical crystal plate

物理学报. 2022, 71(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220835>

掺Er光纤飞秒激光器中电光晶体对激光器参数的影响

Influence of electro-optic modulator on Er-doped fiber femtosecond laser

物理学报. 2021, 70(7): 074203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201564>

光电探测噪声对单模光纤自适应耦合装置的闭环性能影响研究

Influence of photoelectric conversion noise on closed-loop performance of adaptive SMF coupling device

物理学报. 2021, 70(22): 224212 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210615>

超薄介质插层调制的氧化铟锡/锗肖特基光电探测器

Indium tin oxid/germanium Schottky photodetectors modulated by ultra-thin dielectric intercalation

物理学报. 2021, 70(17): 178506 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210138>