中国鼎光

基于石墨烯电容器件的可调控全固态脉冲激光器研究

陈恬恬, 戴腾飞, 陈超然, 刘向**, 常建华*

南京信息工程大学电子与信息工程学院,江苏 南京 210044

摘要为了改变石墨烯可饱和吸收体恒定的光学吸收效应,通过微电子打印工艺制备了一种吸收特性可控的新型 石墨烯电容器件,并以超低电调制功率(<1 nW)实现了全固态脉冲绿光激光器输出特性的灵活调控。采用等离子 体增强化学气相沉积法制备了石墨烯薄膜,通过喷墨打印、点胶、烘干等流程制备了电压可控的圆环阵列式石墨烯 电容器件,该器件具有较好的光学吸收调控效果,通过改变栅压,可将非线性调制深度从4.0%提升至6.9%。将 石墨烯电容器件应用于 Nd:YVO4全固态激光器系统中,实现了波长为532 nm 的脉冲激光输出,保持吸收泵浦功 率为1.78 W 不变,当栅极电压从0 V 增加至60 V时,可将输出激光的脉冲宽度从1.1 µs 压缩至345 ns,对应的重 复频率从 101 kHz 提高到 312 kHz。

关键词 激光器;石墨烯;全固态;电场调控 中图分类号 TN242 文献标识码 A

1 引 言

全固态脉冲激光器具有输出稳定、脉宽窄、重复 频率高等优点,在精密加工、激光测距、卫星通信、国 防军事等领域具有十分广泛的应用^[1-3]。调Q技术 是获得窄脉宽、高重复频率脉冲激光的主要手 段[4-5],分为主动式和被动式两种。被动调Q相较 于主动调Q,不仅成本低、结构简单,而且无需在谐 振腔内添加复杂的主动调Q器件,有利于固体激光 器的小型化、产品化发展,更具吸引力。半导体可饱 和吸收镜(SESAM)作为典型的可饱和吸收体 (Saturable Absorber, SA),具有工作稳定、损耗小 等优点,在激光器中成功实现了被动调Q运转[6-8]。 但成本昂贵、制备工艺复杂、恢复时间与调制深度不 易控制以及工作波段单一[9-10]等缺点极大地限制了 SESAM 在脉冲激光领域中的应用。近年来,具有 直接带隙的二维半导体材料逐渐被挖掘[11-15],其优 异的光电性能和光学性质在探测、传感、照明以及新 一代电子信息技术等领域中引起了革命性变革,具 有巨大的应用前景。

目前,国内外科研人员利用二维材料独特的非

doi: 10.3788/CJL202249.0301003

线性饱和吸收特性,已经实现了不同波段的脉冲激 光输出。2017年, Canbaz等^[16]将石墨烯可饱和吸收 体应用于全固态激光器中,获得了脉冲宽度为 19 fs 的锁模脉冲激光输出。2019年,孔春霞等[17]采用液 相剥离法制备得到 WS₂-SA,实现了 1064 nm 处的 被动调 Q 脉冲激光输出。然而,受二维材料恒定吸 收系数的限制,激光输出脉宽很难调控,无法满足日 益增长的激光应用需求。值得注意的是,当外加栅 压时,石墨烯的载流子浓度会增加,费米能级能量提 高,其光学吸收特性也因此发生改变[18-20]。利用石 墨烯栅压可控的非线性光学吸收效应,可以实现脉 冲激光器输出性能的实时片上调控。2015年,Lee 等[21] 首次将以石墨烯为基底的晶体管作为可饱和 吸收体应用于光纤激光器中,通过加电可以较大程 度地改变该器件的光学吸收特性,实现栅极电压对 激光器的主动调控,使其在调Q和锁模状态中灵活 转变。2020 年, Kovalchuk 等^[22] 以有机玻璃 (PMMA)层作为介电层,构建了简单有效的石墨烯 电容器结构,通过施加电压调控其非线性吸收,实现 了消光比为 70.4 dB 的环形激光器的锁模状态从飞 秒脉冲到连续波范围的可逆切换。此类方案能以较

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-05-12; 录用日期: 2021-06-28

基金项目:国家自然科学基金(61875089)、江苏省高等学校大学生创新创业训练计划(202010300040)

通信作者: *jianhuachang@nuist.edu.cn; **xjlx1906@162.com

小的工作电流实现窄脉宽、高重复频率的可调控脉 冲激光输出,但此类光纤激光器的输出功率较小,实 际应用受到较大的限制。

本文将电场调控型石墨烯电容器作为被动调 Q 器件应用于全固态激光器中,以较小的调制功率实 现了激光输出特性的实时可控调节。采用等离子体 增强化学的气相沉积(PECVD)法制备了高质量石 墨烯薄膜,并进行了表征分析,利用微电子打印工艺 在石墨烯薄膜上制备了电容器。将石墨烯器件的电 极设计成独特的圆环阵列式,不仅为激光提供了精 准的入射窗口,同时保证了有效的电场耦合,增强了 器件的调制效果。对所制备的石墨烯可饱和吸收器 件进行了相应的光学和电学测试分析,并对其非线 性吸收特性进行了测量,通过改变栅极电压,将调制 深度从 4.0% 提高至 6.7%。设计并搭建了一种脉 冲宽度可调的 532 nm 全固态调 Q 激光系统,并以 超低的电调制功率(~13 pA 的电流, <1 nW 的功 率)实现了脉宽的可控调节。当吸收泵浦功率为 1.78 W时,将栅极电压从 0 V 增加至 60 V,脉冲宽 度可以从 1.1 µs 减小到 345 ns,对应的重复频率从 101 kHz 提高到 312 kHz。

2 石墨烯电容器的制备与表征

本实验使用 3D 微电子打印技术的喷墨打印和 点胶工艺制备出具有电压调控功能的垂直型电容器 件,电容器由半导体石墨烯-绝缘层氮化硅-半导体 氧化铟锡(ITO)构成。具体制备流程如图 1 所示:

第 49 卷 第 3 期/2022 年 2 月/中国激光

首先利用 PECVD 法在 SiO2 绝缘衬底上生长出少 层二维石墨烯薄膜,取长宽均为1.5 cm、厚度为 1 mm 的石英片作为生长石墨烯的衬底,并将其置 于管式炉加热中心处。在管式炉温度达到设定的反 应温度(700~900 ℃)、管路内真空度稳定到 37.24 Pa时,通入甲烷和氢气(体积比为1:9)的混 合气体。待系统稳定后打开等离子体发生器并将其 调至所需功率,开始计时,生长时间为18 min。随 后,利用微电子打印机,按照所设计的电极形状, 通过喷墨打印技术在石墨烯薄膜上打印圆环阵列 式电极结构「图 2(a)],在 150 ℃ 高温下烘干 1 h, 形成稳固的源漏电极(S/D)。接下来,将Si₃N₄和 ITO 墨水转移到点胶针筒内,控制系统压强与打 印速度,通过点胶工艺在石墨烯器件上打印绝缘 层氮化硅(Si₃N₄)和半导体 ITO 薄膜,绝缘层氮化 硅的厚度约为200 nm,既能有效避免器件发生短 路,又可以降低光学损耗。最后,在半导体层 ITO 薄膜上打印出对准电极,其与源漏电极组成圆环 阵列式电极。

如图 2(b)所示,激光垂直入射于器件表面,器件的电极由两侧引出,圆环形的电极结构可以有效增强电场调控效果,提升区域内的载流子浓度。 为了检验制备得到的石墨烯薄膜质量,利用拉曼 光谱法对其进行表征。图 2(c)为 PECVD 法所制 备的石墨烯在刻蚀后的拉曼表征结果,可以观察 到三个明显的特征峰,其中,在 1350 cm⁻¹处存在 特征峰(D峰),表明少层石墨烯薄膜引入了缺陷,



图 1 石墨烯电容器的制备流程图

Fig. 1 Flow chart of preparation of graphene capacitor



图 2 石墨烯电容器的制备与表征图。(a)制备流程;(b)器件工作原理;(c)拉曼光谱;(d)透过光谱 Fig. 2 Preparation and characterization of graphene capacitor. (a) Preparation process; (b) operation principle of device; (c) Raman spectrum; (d) transmission spectra

而增强的 D 峰表明石墨烯为 N 型掺杂^[23]。2D 峰 不再是单洛伦兹型曲线,而是出现蓝移,且石墨烯 的双声子共振二阶拉曼峰 In 和石墨烯的主要特 征峰 I_G 的比值为 0.94,表明 PECVD 法所制备的 石墨烯具有 3~7 层的少层结构^[24]。光学透过特 性是可饱和吸收器件的一个重要参数,影响着激 光器的输出性能。为了研究石墨烯电容器的光学 透过特性,使用分光光度仪测试了器件不同异质 层材料的传输特性。图 2(d)是使用分光光度仪测 出的石墨烯电容器件各分层的光学透射谱,从可 见光到近红外波段,器件整体透过性能较为均衡。 其中,在 1064 nm 处 Si₃N₄/ITO 的透射率为 93.82%,线性损失为 6.18%;石墨烯的透过率为 83.5%,线性损失为16.5%。尽管 ITO 和 Si_aN_a 具有一定的光学损耗,但它们的存在有助于调控 石墨烯的性能,同时提高载流子迁移率以及增强 电荷积累的能力。

如何通过优化电极结构来提高局部电场强度和 增强光耦合效应是研制低功耗、高效率调 Q 器件的 关键。因此,为了增强局部电场调制效果,我们对器 件电极结构进行优化,在石墨烯和 ITO 层上制备局 部圆环式电极,此时器件是类晶体管结构。ITO 作 为器件的栅极,不仅是调控石墨烯吸收特性的关键, 而且具有较高的载流子迁移率和透过率,可以大大 降低光学损耗,提高器件调控性能。此外, ITO 为 透明材料,在其薄膜上打印对准电极,一方面可以与 下面的电极结构组成圆环电极,提高圆环内局部区 域的载流子浓度及器件性能,另一方面为激光的入 射提供了窗口。图 3(a) 是所设计的圆环阵列式电 极结构的显微图,上图为第一层的源漏电极,下图为 第二层对准电极,圆环中间为激光入射区域。选取 该区域作为光电测试区域,圆环电极区域既可以为 激光提供精准的入射窗口,又可以增强电场的调制 效果。利用仿真软件 Comsol Multiphysics 的有限 元方法对装置内部的电场强度(E,V/nm)分布进行 了数值模拟研究。通过有限元仿真方法,可以快速 准确地得到石墨烯电容器件模型中的场强分布结 果。如图 3(b)所示,圆环电极中心区域的电场强度 明显高于其他区域,在垂直电场的作用下,圆环电 极中心处的电场强度增强,附近的载流子受电场 影响向圆环中心区域聚集。因此,当激光入射到 该区域时,意味着更多的载流子在激光照射下发 生辐射,此时器件的光电调制效果最佳。根据上 述仿真结果,我们最终选择圆环阵列型电极作为 器件电极结构。





3 石墨烯电容器件的光电特性研究

为了研究所制备的石墨烯电容器件的光电性能,利用光谱分析仪和半导体分析仪对器件的光电性能进行测试。利用光栅光谱仪测量了石墨烯器件在 0~60 V 栅极电压下的光学吸收特性,测量结果 如图 4(a)所示,在 400~1100 nm 波段,石墨烯器件的光学吸收特性随栅极电压的改变而增强。当电压 为 60 V 时,器件的吸收增强效果最佳。此外,特殊的能级结构和材料特性使得石墨烯具有半金属特性,故当栅极为金属材料时,石墨烯会与金属栅极形 成平行板电容,介电常数恒定,严重制约了器件的调制效果。因此传统的金属栅极并不适用于本器件,

而半导体材质的栅极结构能发挥更好的调制效果, 大大提升了器件的调控性能。如图 4(b)所示,ITO 栅极的电容特性比金属栅极更加明显,这也表明对 于本器件,半导体栅极比金属栅极的调控性能更优。

图 4(c)清晰地展示了石墨烯晶体管器件能级 调制的机制,其中 E_c 为导带, E_i 为能量能级, E_F 为 费米能级, E_V 为价带。当施加负偏压(栅极电压 $V_{gs} < 反馈电压 V_{fb}$)时,大部分空穴聚集在 ITO/ Si₃N₄界面(反转区),导带的能级会减小,由于石墨 烯吸引了部分电子,在 ITO 衬底上可以观察到能带 弯曲,石墨烯层出现 N 型掺杂。当我们继续增加 V_{gs} 时,不会出现能级下降或能带弯曲(由于石墨烯 是 N型少层结构, $V_{fb} < 0$)。当施加正偏压($V_{gs} >$



图 4 石墨烯电容器的光电性能图。(a)不同栅极电压下的光学吸收谱;(b)电容特性图;(c)负压器件能带图;(d)正压器件 能带图

Fig. 4 Photoelectric performances of graphene capacitor. (a) Optical absorption spectra under different gate voltages;(b) capacitance characteristics; (c) band diagram of negative pressure device; (d) band diagram of positive pressure device

研究论文

V_{fb})时,可以看到相应的反向变化趋势,此时石墨烯 晶体管为积累状态,越来越多的电子被诱导到 ITO/Si₃N₄,正向栅极偏压对本器件具有更好的调 制效果。

非线性传输特性是可饱和吸收体材料的重要光 学性质之一,也是实现全固态调Q脉冲激光器性能 调控的关键因素,因此研究石墨烯场效应器件随电 压变化的非线性传输特性尤为重要。本实验采用平 衡同步双探测器测量系统测量了石墨烯器件在相同 位置处的非线性传输特性随栅极电压的变化趋势。 为了保证器件的调制效果,结合载流子浓度分布的 仿真结果,测试区域选择圆环电极中心位置。测量 结果如图 5(a)所示,随着飞秒激光器光强不断增 加,石墨烯器件的吸收逐渐达到饱和状态。当外加 栅极电压为 0 V 时($V_{gs} = 0$ V),器件的调制深度 (a_s)约为 4.0%,饱和强度(I_{sat})为 8.9 MW/cm²;当

外加栅压为 60 V 时(V_{gs}=60 V),器件的调制深度 约为 6.7%, 饱和强度为 12.9 MW/cm²。为了研究 石墨烯晶体管器件非线性特性随电压的变化趋势, 探究了垂直电场对石墨烯吸收特性的调制规律,测 试了栅极电压为 0~80 V 时器件的非线性光学吸收 特性,即非线性调制深度随栅极电压的变化曲线。 测试时,保持器件位置不变,非线性光学吸收测试区 域均为圆环中心区域,同时为了减少误差,每组电压 测试结束后间隔 20 min。测量结果如图 5(b)所示, 由插图可知,测试区域位于电极中心,石墨烯器件的 调制深度随着栅压的增大而增加。当栅压超过 60 V 时,器件的调制深度不再增加,石墨烯电容器件的调 制效果达到饱和,继续增加电压不仅会带来较大的功 耗,而且会造成器件发热损坏。结果表明,在有效的 范围内(V_a<60 V),垂直电场对石墨烯场效应器件 的非线性光学吸收特性具有显著的调制及增强效果。



图 5 石墨烯器件的非线性传输特性。(a)不同栅压下器件的非线性吸收特性;(b)石墨烯器件的调制深度随栅压的变化曲线 Fig. 5 Nonlinear transmission characteristics of graphene device. (a) Nonlinear absorption characteristics of device under different gate voltages; (b) modulation depth versus gate voltage of graphene device

4 石墨烯电容器件的应用研究

4.1 谐振腔设计

实验采用结构简单、紧凑的 V 型谐振腔,如图 6 所示。整个激光器系统由光纤耦合半导体激光器、 耦合透镜组、Nd: YVO₄晶体、折叠镜 M1、石墨烯电 容器件、周期性极化铌酸锂 (PPLN)晶体以及平面 输出镜 M2 组成, S1 端面至 M1 的距离 L_1 为 70 mm,M1 至 M2 的距离 L_2 为 75 mm, L_1 与 L_2 的夹角为 45°。采用中心波长为 808 nm 的半导体 激光器作为泵浦光源,该激光器的最大输出功率为 20 W,光纤的芯径 400 μ m,数值孔径为 0.22。泵浦 光经过 1:1耦合透镜组聚焦到 Nd: YVO₄晶体上,光 斑半径为 200 μ m。Nd: YVO₄晶体的尺寸为 3 mm× 3 mm×5 mm, Nd³⁺ 掺杂浓度(原子数分数)为 0.5%,用钢箔包裹并放在紫铜水冷装置中,通过激 光恒温冷却器将 Nd:YVO4 晶体的温度控制在 25 ℃左右, Nd:YVO4 晶体的S1 端面镀有 808 nm 的增透膜(AR)和 1064 nm 的高反膜(HR)并充当 输入镜,S2 端面镀有 1064 nm 的 HR;折叠镜 M1 为 平面凹面镜(半径 R = 206 mm)镀有 1064 nm 的 HR。输出镜 M2 为透射率为 10% 的平面镜。 PPLN 晶体的长宽高为1.2 mm×1.0 mm×1.0 mm, 利用半导体制冷器(TEC)装置将 PPLN 晶体的温 度调节为 25 °C;其入光面与出光面均涂覆有 1064 nm和 532 nm 的 AR,极化周期约为 6.97 μ m。 使用光电探测器和数字示波器对激光器输出的脉冲 激光进行扫描和记录。

第49卷第3期/2022年2月/中国激光





Fig. 6 Experimental layout of passively Q-switched green laser based on graphene device

4.2 实验结果与分析

首先,研究了连续波 Nd: YVO4 激光器的工作 原理。输出功率通过与热功率探头相连的触摸屏功 率计测量得到。激光器的输出功率与吸收泵浦功率 的关系曲线图如图 7 所示。当吸收泵浦功率为 7.89 W时,连续激光器的最大平均输出功率为 793 mW。随后,将石墨烯器件插入谐振腔中,当激 光吸收泵浦功率为1.78 W时,调Q系统开始运转, 最大输出功率为486 mW。连续和脉冲激光器的输 出功率都随吸收泵浦功率的增加而增加,而脉冲激 光的输出功率低于连续光,这是因为多层结构的石 墨烯器件具有较大的光学损耗。



图 7 连续和脉冲激光器的输出功率与吸收泵浦功率 的关系曲线图

Fig. 7 Output powers of continuous and pulsed lasers versus absorbed pump power

为了研究激光器的电压调控特性,我们将吸收 泵浦功率稳定在 1.78 W 保持不变,通过改变器件 的栅极电压,调控脉冲激光的输出特性。调 Q 系统 稳定运转时所形成的激光脉冲由快速光电二极管探 测,并借助数字示波器记录波形。如图 8(a)、(b)所 示,当栅极电压为0 V 时,脉冲宽度约为 1105 ns,重 复频率约为 110 kHz;当栅极电压为 60 V时,脉冲 宽度为 345 ns,重复频率约为 315 kHz。图 8 插图 中的脉冲序列存在波动,这是由于激光器在长时间 的运转过程中,Nd:YVO4晶体内只有部分泵浦能量 转化为激光,而其他能量会转换成热能,产生热效应 现象,进而激光器谐振腔不稳定。



图 8 不同栅压下的单脉冲和脉冲序列(插图)。(a) 0 V; (b) 60 V

Fig. 8 Single pulse and pulse sequence (inset) under each gate voltage. (a) 0 V; (b) 60 V

图 9 所示是在 1.78 W 吸收泵浦功率下,脉冲 宽度和重复频率与栅极电压之间的关系,可以看出, 脉冲宽度随栅极电压的增加而减小,重复频率随栅 极电压的增加而增加。当调制电压从 0 V增加到





Fig. 9 Pulse duration and repetition rate versus gate voltage 60 V 时,器件能够以超低的电调制功率(~13 pA 的电流,<1 nW 的功率)将脉冲宽度从 1.1 μ s 压缩 到 345 ns, 对应的重复频率从 110 kHz 提高到 315 kHz。而如果仅靠增大吸收泵浦功率来实现脉 宽的压缩,获得相同激光脉冲宽度则需要高达 6.5 W 的吸收泵浦功率。因此,与通过增大激光吸 收泵浦功率来压缩脉宽的方案相比,所设计的器件 可以以超低的电调制功率实现 532 nm 波长的被动



调 Q 激光输出脉宽的压缩与调控,大幅度降低器件 功耗。导致脉冲宽度不断压缩的原因是随着电场强 度的增加,石墨烯载流子浓度提高,其光学吸收特性 和非线性调制深度得到增强。

第49卷第3期/2022年2月/中国激光

在 PPLN 晶体倍频过程中,晶体温度的变化会 对晶体自身的转化效率产生较大的影响,如 图 10(a)所示。实验中,当激光器的输出功率稳定 在 489 mW时,借助 TEC 调整晶体温度,记录不同 温度下的输出功率大小。输出功率随温度(10~ 40℃)的变化呈显著的高斯分布规律,当温度达到 25℃时,输出功率达到最大值,倍频效率达到最优; 当激光器输出功率是最大输出功率的一半时,对应 的温度范围是 6.8℃,表明整个激光器系统内部的 温度接受带宽为 6.8℃。因此,在温度可接受带宽 的范围内,PPLN 周期常数受到外界的影响最弱。 为了测试器件的稳定性,当吸收泵浦功率为 7.89 W, 栅极电压为 60 V时,用功率计记录了 120 min 内输 出功率的变化情况(图 10(b)),在 528 mW 附近变化 幅度低于 1.5%,表明该激光器的输出稳定性良好。



图 10 激光器稳定性的分析。(a) PPLN 晶体温度与输出功率的关系;(b)输出功率随时间的变化图 Fig. 10 Laser stability analysis. (a) Output power versus PPLN crystal temperature; (b) time evolution of output power 实验使用分辨率为 0.25 nm 的光纤光谱仪测 激光中心波长为 532.04 nm,半峰全宽为 1.13 nm。 量了调 Q 激光光谱,如图 11(a)所示。测量得到的 图11(a)插图是通过光束质量分析仪检测到的光斑





图,光斑质量较好。为了验证激光器调Q脉冲的稳定性,使用频谱仪测量了285kHz脉冲激光的射频谱,如图11(b)所示,可以看出,脉冲信噪比为39dB,表明调Q激光的输出较为稳定。

5 结 论

介绍了一种新型的石墨烯电容器件的制作过 程、表征和分析,这种器件可作为被动调Q系统的 有效的可饱和吸收体调制器,结合该器件的电学传 输和光谱吸收性能,研究了其光电相互作用机理。 由于费米能级能量和载流子密度的改变,石墨烯在 器件中的吸收特性可以通过改变栅极电压来调节, 而不需要改变 SA 材料性质。在超低电调制功率 (~13 pA 电流和 1 nW 功率)下,实现了全固态脉 冲激光器输出特性的灵活调控。将其应用于 Nd:YVO4全固态激光器系统中,实现了 532.04 nm 波长的稳定脉冲输出,保持激光吸收泵浦功率不变, 通过改变栅极电压,可以将调Q输出的脉冲宽度从 1.1 μs 压缩到 345 ns。此结构有望进一步促进可见 光到中红外波段可调控脉冲激光器的发展。未来基 于石墨烯器件的被动调Q/锁模装置将在红外测量、 投影显示和光学调制等领域得到广泛应用。

参考文献

- Chen Y F, Chien P Y, Lee C C, et al. Timing jitter reduction of passively *Q*-switched solid-state lasers by coupling resonance between pumping and firing rates
 [J]. Optics Letters, 2020, 45(10): 2902-2905.
- [2] Feng X, Liu J, Yang W, et al. Broadband indium tin oxide nanowire arrays as saturable absorbers for solid-state lasers[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1554-1560.
- [3] Wang S Q, Huang H T, Liu X, et al. Rhenium diselenide as the broadband saturable absorber for the nanosecond passively Q-switched thulium solid-state lasers[J]. Optical Materials, 2019, 88: 630-634.
- [4] Zhang Y J, Liu J, Cai Y W, et al. Research on vibration performance of all-polarization-maintaining erbium-doped mode-locked fiber laser based on carbon nanotube [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (9): 0901002.
 张亚静,刘杰,蔡娅雯,等.碳纳米管锁模全保偏掺 四次 医激素 机器 体压力机 体压力机 化

铒光纤激光器的振动性能的研究[J].中国激光, 2020, 47(9): 0901002.

[5] Pang Q S, Chen M, Liu Z X, et al. LD end-pumped intracavity frequency doubling SESAM passively mode-locked picosecond lasers [J]. Laser Physics, 2011, 21(6): 1031-1034.

- [6] Yang F, Li M M, Zhao S L, et al. Research progress on passively Q-switched lasers based on new saturable absorption devices [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 150002.
 杨飞,李萌萌,赵上龙,等.基于新型可饱和吸收器 件被动调 Q 激光器的研究进展[J].激光与光电子学 进展, 2020, 57(15): 150002.
- [7] Li L, Liu J, Liu M, et al. 532 nm continuous wave mode-locked Nd: GdVO₄ laser with SESAM [J].
 Laser Physics Letters, 2009, 6(2): 113-116.
- [8] Ling W J, Sun R, Chen C, et al. Passively Q-switched mode-locked Tm:LuAG laser with reflective MoS₂ saturable absorber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0808002.
 令维军,孙锐,陈晨,等.基于反射式 MoS₂ 可饱和 吸收体调 Q 锁模 Tm:LuAG 激光器[J].中国激光, 2019, 46(8): 0808002.
- [9] Wang W W, Liu J, Chen F, et al. 532-nm picosecond pulse generated in a passively mode-locked Nd: YVO₄ laser[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7 (8): 706-708.
- [10] Cai W, Peng Q Q, Hou W, et al. Picosecond passively mode-locked laser of 532 nm by reflective carbon nanotube [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58: 194-196.
- Zhao W F, Yu H, Liao M Z, et al. Large area growth of monolayer MoS₂ film on quartz and its use as a saturable absorber in laser mode-locking [J]. Semiconductor Science and Technology, 2017, 32 (2): 025013.
- [12] Sun Z P, Hasan T, Torrisi F, et al. Graphene modelocked ultrafast laser [J]. ACS Nano, 2010, 4(2): 803-810.
- [13] Castellanos-Gomez A, Barkelid M, Goossens A M, et al. Laser-thinning of MoS₂: on demand generation of a single-layer semiconductor [J]. Nano Letters, 2012, 12(6): 3187-3192.
- [14] Wang Z T, Chen Y, Zhao C J, et al. Switchable dual-wavelength synchronously Q-switched erbiumdoped fiber laser based on graphene saturable absorber[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(3): 869-876.
- [15] Zhao G, Han S, Wang A Z, et al. "Chemical weathering" exfoliation of atom-thick transition metal dichalcogenides and their ultrafast saturable absorption properties [J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(33): 5292-5299.
- [16] Canbaz F, Kakenov N, Kocabas C, et al. Generation of sub-20-fs pulses from a graphene mode-locked laser[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2834-2839.

研究论文

- [17] Kong C X, Zhang X, Dai T F, et al. Preparation, characterization of tungsten disulfide and its application in all-solid-state green pulse laser [J]. Journal of Quantum Optics, 2019, 25(4): 449-455.
 孔春霞,张雪,戴腾飞,等. 二硫化钨的制备、表征及其在全固态绿光脉冲激光器中的应用[J]. 量子光 学学报, 2019, 25(4): 449-455.
- [18] Wang F, Zhang Y B, Tian C S, et al. Gate-variable optical transitions in graphene [J]. Science, 2008, 320(5873): 206-209.
- [19] Li Z Q, Henriksen E A, Jiang Z, et al. Dirac charge dynamics in graphene by infrared spectroscopy [J]. Nature Physics, 2008, 4(7): 532-535.
- [20] Zhang Y B, Tang T T, Girit C, et al. Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene[J]. Nature, 2009, 459(7248): 820-823.

- [21] Lee E J, Choi S Y, Jeong H, et al. Active control of all-fibre graphene devices with electrical gating [J]. Nature Communication, 2015, 6: 6851-6857.
- [22] Kovalchuk O, Uddin S, Lee S, et al. Graphene capacitor-based electrical switching of mode-locking in all-fiberized femtosecond lasers [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(48): 54005-54011.
- [23] Wu H C, Chien C H. High performance InGaZnO thin film transistor with InGaZnO source and drain electrodes[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102 (6): 062103.
- [24] Zhang Z D, Wang Z S, Zhang R, et al. Improvement of graphene quality synthesized by cluster ion implantation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2013, 307: 260-264.

Controllable All-Solid-State Pulsed Laser Based on Graphene Capacitor Devices

Chen Tiantian, Dai Tengfei, Chen Chaoran, Liu Xiang, Chang Jianhua

School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract

Objective In recent years, the growth rate of China laser industry is about 18 % -22 %, which is much higher than the average growth rate of the international laser industry. However, there is a lack of independent innovation in domestic laser device industry, and the key technology is restricted, which leads to the "industrial hollowing-out" of laser industry. The research on high-performance and practical all-solid-state lasers is the key to cultivate new economic growth points and seize the commanding position of the emerging laser industry. The traditional optical-optical tunable all-solid-state pulsed laser is the mainstream of laser devices in the current market, but the bottleneck problems such as high power consumption, slow speed, and low efficiency of optically controlled all-solid-state pulsed lasers seriously restrict its industrialization. The key to solve these problems is to construct a new electro-optical transistor device structure based on two-dimensional materials. The results of this paper provides a new application prospect for all-solid-state pulse lasers: on the basis of ensuring the realization of the traditional laser product functions, the device structure is simplified and the product performance is developed along the trend of miniaturization, low energy consumption, and adjustable control, which enriches the practical application fields of all-solid-state pulse lasers and promotes the development of lasers and the related application fields.

Methods In this paper, the graphene capacitor device is fabricated on graphene substrates by micro-electronic printing, and the main fabrication processes are given (Fig. 1). In order to improve the modulation efficiency of graphene capacitor devices, a unique ring electrode structure is designed, and the carrier concentration distribution of the devices is simulated by the finite-difference time-domain method. The results show that the modulation effect in the central region of the ring is optimal. The photoelectric performance of the graphene capacitor is studied, and the capacitance characteristic of the device is tested, which shows that the device has a good modulation performance. The results show that the vertical electric field can enhance and control the optical absorption capacity of the graphene device significantly. Finally, a 532 nm all-solid-state pulsed laser system is studied and constructed by combining the solid-state graphene capacitor device with the all-solid-state laser system, and the tunable 532 nm laser based on the graphene device is realized.

Results and Discussions In the absorption spectrum of the optimized structure of the graphene capacitor, the optical absorption intensity increases with the increase of gate voltage (Fig. 4(a)), which shows that the absorption characteristics of the device are regulated and the feasibility of the experiment is verified. In order to further study the effect of gate voltage on the absorption of graphene devices, a balanced synchronous dual-detector system is used to measure the nonlinear transmission characteristics of graphene devices at the same position. In order to guarantee the modulation effect of the device, the center of the ring electrode is selected in the test area according to the simulation results of carrier concentration distributions. The absorption of the graphene device gradually reaches saturation as the intensity of the coherent femtosecond laser increases (Fig. 5(a)). When the gate voltage is 0 V, the modulation depth is about 4.0% and the saturation intensity is 8.14 MW/cm². When the gate voltage is 60 V, the modulation depth is about 6.7% and the saturation intensity is 14.9 MW/cm². These results show that in the effective range ($V_{GS} \leq 60$ V), the vertical electric field can modulate and enhance the nonlinear optical absorption characteristics of the graphene field effect devices. It is applied to Nd: YVO₄ laser system (Fig. 6), and the stable 532 nm Q-switched laser is achieved. When the gate voltage is increased from 0 V to 60 V, the pulse duration of the output laser can be compressed from 1.1 μ s to 345 ns while keeping the power of the absorption pump constant at 1.78 W, and the corresponding repetition rate is increased from 101 kHz to 312 kHz (Fig. 9). To verify the stability of the Q-switched laser pulse, the radio frequency spectrum of a 285 kHz pulsed laser is measured using a spectrometer (Fig. 11(b)). As can be seen from this figure, the pulse signal-to-noise ratio (PSNR) is 39 dB, which indicates that the Q-switched laser output is stable.

Conclusions The paper introduces the fabrication, characterization and analysis of a novel graphene capacitor, which can be used as an effective saturable absorber modulator in a passive Q-switched system. The photoelectric interaction mechanism of the device is studied based on its electrical transmission and spectral absorption properties. Due to the change of Fermi level and carrier density, the absorption properties of graphene in the device can be adjusted by gate voltage without changing the properties of SA material. The output characteristics of all-solid-state pulse laser can be adjusted flexibly under ultra-low electric modulation power (\sim 13 pA current and 1 nW power). It is applied to the Nd: YVO₄ all solid state laser system, and the stable pulse output at 532. 04 nm wavelength is achieved. The laser absorption pump power is kept constant, and the gate voltage is changed. The pulse duration of the *Q*-switched output can be compressed from 1.1 μ s to 345 ns. This structure is expected to further promote the development of tunable pulse lasers from visible light to mid-infrared band. In particular, passive *Q*-switching/modelocking devices based on graphene devices will be used in future applications such as infrared measurement, projection display, and optical modulation.

Key words lasers; graphene; all-solid-state; voltage control