

文章编号: 1001-3806(2016)02-0259-05

石墨烯被动调Q掺Nd³⁺激光器研究进展

林洪沂^{1,2}, 黄晓桦^{1,2}, 许英朝^{1,2}, 孟宪国^{1,2}, 程再军^{1,2}, 孙栋^{1,2}

(1. 厦门理工学院 光电与通信工程学院, 厦门 361024; 2. 福建省高校光电技术重点实验室, 厦门 361024)

摘要: 石墨烯是一种具有独特光学特性的2维碳纳米材料, 利用其饱和吸收特性制成的被动调Q开关具有稳定性好、响应波长宽(可见光到中红外)、恢复时间短(约100fs)、非饱和吸收损耗少、制作方法简单、价格便宜等优点, 广泛地应用于被动调Q脉冲激光领域。重点对石墨烯被动调Q掺Nd³⁺激光器研究进展进行了总结, 分析了发展趋势, 并指出性能优良的石墨烯饱和吸收体是其发展的关键。

关键词: 激光器; 石墨烯; 被动调Q; 饱和吸收体

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2016. 02. 023

Research progress of graphene passively Q-switched Nd³⁺-doped lasers

LIN Hongyi^{1,2}, HUANG Xiaohua^{1,2}, XU Yingchao^{1,2}, MENG Xianguo^{1,2}, CHENG Zaijun^{1,2}, SUN Dong^{1,2}

(1. School of Optoelectronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Fujian Province University, Xiamen 361024, China)

Abstract: Graphene is a 2-D carbon nano material with very excellent optical properties. Passive Q switches, by using its saturated absorption characteristics, have such advantages as stability, wide responding wavelength from the visible to mid-infrared wavelength region, low nonsaturable loss, ultrafast recovery time (about 100fs), easy fabrication and low cost and have been used in passive Q-switched pulse laser widely. The research progress of graphene passively Q-switched Nd³⁺-doped lasers was reviewed and the future development of this filed was discussed. The excellent graphene saturable absorber is the key to its development.

Key words: lasers; graphene; passively Q-switched; saturable absorber

引言

调Q技术是产生高能量脉冲激光的一个基本的技术, 与锁模技术不同, 调Q技术有一个相对较长的脉冲宽度和较低的重复频率(通常在kHz范围内)^[1]。调Q激光器能够产生更高的脉冲能量, 具有更高的运行效率, 被广泛应用于医学、环境遥感、测距、材料处理、激光显示等各个领域。调Q分为被动和主动两种, 被动调Q技术是利用某些材料的饱和吸收特性来实现调Q, 不需要额外控制电路, 结构非常简单紧凑^[2-6]。

掺过渡金属离子的晶体(如Cr:YAG, Cr:ZnSe, Co:MALO)、半导体饱和吸收镜(semiconductor satur-

ble absorber mirror, SESAM)和碳纳米管具有非常好的饱和吸收特性。然而, Cr:YAG 仅仅在0.9 μm~1.2 μm波段有效; SESAM 制造封装工艺比较复杂, 而且工作波长范围较窄; 碳纳米管是一个相对简单和便宜的材料, 不幸的是, 它的工作波长跟其直径和手性有关^[7-9]。与 SESAM 和碳纳米管相比, 石墨烯具有完美的光学特性, 如成本低、制作容易、恢复时间超快、损伤阈值更高、工作波段更宽(可见光到中红外), 因此已被广泛用来代替 SESAM 和碳纳米管^[10-14]。

1 石墨烯饱和吸收体

1.1 石墨烯饱和吸收特性

石墨烯是一种由单层碳原子堆积而成的2维蜂窝状结构的纳米材料, 具有优良的线性和非线性光学特性^[15-24]。石墨烯的能带为特殊的双锥形, 导带和价带相交于狄拉克点(dirac point), 使其具有零带隙特点(见图1, 图中E为石墨烯所吸收的单光子能量; E/2为导带的电势能; -E/2为价带的电势能)^[25]。此特点决定了其吸收特性与单光子能量无关, 因此石墨烯可以吸收可见光、红外、甚至太赫兹波段的电磁波。当

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11304259);福建省自然科学基金资助项目(2013J05104);福建省教育厅A类科技项目资助项目(JA12248;JA13231;JA12255)

作者简介:林洪沂(1982-),男,博士,副教授,主要从事全固态激光与非线性频率变换技术的研究。

E-mail: linyi0714@163.com

收稿日期:2015-01-19;收到修改稿日期:2015-02-05

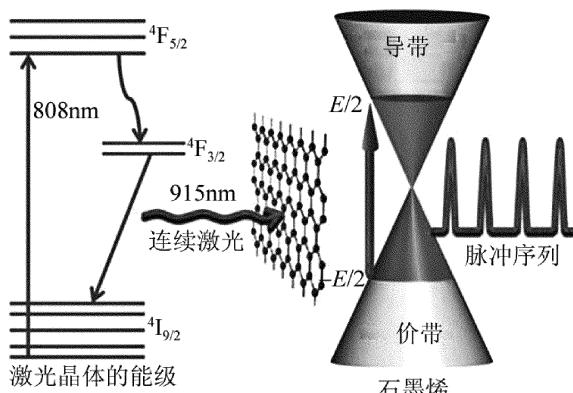


图 1 石墨烯的能级结构及饱和吸收特性

入射光比较弱时,价带的电子吸收能量,跃迁到导带,石墨烯表现出很强的吸收特性;当入射光足够强时,导带将被新产生的电子填满。由于电子满足 Pauli 不相容原理,阻碍了石墨烯吸收更多光子,因此吸收系数减少,发生漂白。

1.2 石墨烯饱和吸收体的制作

石墨烯具有良好的饱和吸收特性,可以采用不同方法来制备调 Q 开关。

1.2.1 饱和吸收溶液 把石墨烯或氧化石墨烯加入到溶剂中,并进行超声波处理,得到石墨烯或氧化石墨烯分散液。并将该分散液倒入两面镀膜的玻璃容器或四面通光的石英比色皿中,即可得到饱和吸收溶液。如氧化石墨烯重水 D_2O 分散液,具有良好的透过率,可以用于 1064nm 被动调 Q 激光系统中^[9,16]。

1.2.2 透射式饱和吸收体 首先制备石墨烯有机溶液,然后采用旋涂法或者垂直蒸发技术,使石墨烯附着于石英薄片或者镀增透膜的透镜上,即可构成透射式饱和吸收体。也可将采用化学气相沉积法(chemical vapor deposition, CVD)制备的单层石墨烯转移到石英薄片上,或采用外延生长制备的 SiC 基石墨烯薄片作为透射式饱和吸收体。如 SiC 基石墨烯,SiC 导热系数为 $318.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,石墨烯吸收的热量可以迅速地传到 SiC 上,有利于散热^[4,12]。

1.2.3 饱和吸收镜 采用旋涂法或者垂直蒸发技术制备石墨烯有机溶液,使石墨烯附着于输出镜或者输入镜上,即可得到饱和吸收镜^[6,18]。此法简单可靠,可以有效地减少插入损耗和法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)标准具的干涉效应,提高系统的紧凑性和稳定性。

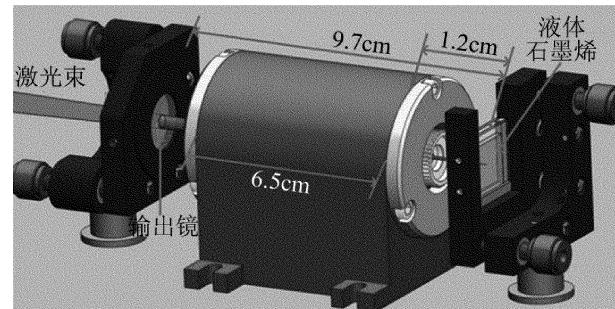
2 石墨烯调 Q 掺 Nd³⁺ 激光器研究进展

Nd³⁺ 是最早应用于激光系统的 3 价稀土离子。目前实用的掺 Nd³⁺ 激光介质多达数十种。输出波长一般为 $0.9\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$ 。

2.1 Nd:YAG 晶体

1064nm Nd:YAG 激光器是目前最常用的一类固体激光器,常用的饱和吸收体有 Cr:YAG, SESAM, GaAs 等。此波段也是石墨烯被动调 Q 最早研究和研究最多的波段。

早在 2010 年,山东大学 YU 等人采用外延生长 SiC 基石墨烯同时作为饱和吸收体与输出镜,实现了脉冲激光输出,重复频率 660kHz 、平均输出功率 105mW 、最短脉冲宽度 161ns ^[4]。2011 年,西北大学 JIANG 等人将聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)旋涂制作的透射式饱和吸收体插入谐振腔中,实现了脉冲激光输出,脉冲宽度 640ns 、重复频率 125kHz 、平均功率 0.9W ^[5];同年,该作者采用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)石墨烯饱和吸收体,获得了脉冲宽度 260ns 、单脉冲能量 $8.32\mu\text{J}$ 、重复频率 167kHz 的脉冲激光输出,平均输出功率达到了 1.39W ^[6]。2012 年,JIANG 等人采用垂直蒸发技术制备的饱和吸收体,获得了脉冲宽度 584ns 、单脉冲能量 $21.98\mu\text{J}$ 、重复频率 455kHz 的脉冲激光^[7]。2012 年,北京工业大学的 CAO 等人采用镍基生长的石墨烯作为饱和吸收体,获得了微片 Nd:YAG 激光器,最小脉冲宽度 75ns 、输出功率 38.4mW 、最大单脉冲能量 54.7nJ ^[8]。2014 年,西安光学精密机械研究所 WEN 等人采用重水氧化石墨烯分散液(如图 2 所示),获得了脉冲宽度 523ns 、重复频率 92.9kHz 、峰值功率 6.6W 脉冲激光,重水氧化石墨烯分散液具有良好的透过率、高散热性和未接触损伤的优点^[9]。

图 2 氧化石墨烯重水分散液被动调 Q Nd:YAG 激光器^[9]

$1.12\mu\text{m}, 1.31\mu\text{m}$ 甚至 $1.44\mu\text{m}$ 也是 Nd:YAG 可以实现的波段。此波段 Cr:YAG 不具有饱和吸收特性,常用的饱和吸收晶体有 V:YAG, 以及制作工艺复杂的 SESAM。

2013 年,山东大学 MEN 等人采用外延生长 SiC 基石墨烯作为饱和吸收体,Nd:YAG 陶瓷材料作为激光工作物质,获得 1123nm 脉冲激光输出,平均输出功率 332mW 、脉冲宽度 875.7ns 、重复频率 46.8kHz ^[10]。实验中采用 L 型谐振腔,避免了抽运光对石墨烯饱和

吸收的影响。同年,山东大学ZHANG等人采用垂直蒸镀的氧化石墨烯饱和吸收体获得1319nm脉冲激光输出,平均功率820mW、脉冲宽度2μs、重复频率35kHz^[11]。2014年,山东大学ZHANG等人首次采用外延生长SiC基石墨烯获得了1.44μm人眼安全激光,平均功率411mW、脉冲宽度560ns、重复频率85kHz^[12]。

2.2 Nd:YVO₄ 晶体

与Nd:YAG相比,Nd:YVO₄具有更短的荧光寿命,在808nm附近存在很宽的吸收带、更大的发射界面(是Nd:YAG的5倍),可以实现1064nm,1342nm和914nm激光输出。

2012年,山东大学LI等人采用氧化石墨烯旋涂的氧化铟锡玻璃(indium-tin oxide)饱和吸收体,获得了平均功率165.4mW、重复频率333kHz、脉冲宽度113ns的1064nm脉冲激光输出^[13]。2013年,华侨大学CHEN等人采用石墨烯N-甲基-2-吡咯烷酮(N-methyl-2-pyrrolidone,NMP)分散液,获得了1064nm与1342nm的脉冲激光输出^[14],其中1064nm的平均输出功率0.62W、脉宽仅6.06ns、重复频率138kHz;1342nm

的平均输出功率0.52W、脉宽仅有7.7ns、重复频率105kHz。2014年,华侨大学LIANG等人采用同样的石墨烯分散液实现了1064nm与1342nm双波长输出^[15],当1064nm支腔透射率T=20%,获得脉宽10.8ns、平均功率0.43W的1064nm脉冲,脉宽12.5ns、平均功率0.51W的1342nm脉冲;当1064nm支腔透射率T=25%时,获得脉宽11.3ns、平均功率0.28W的1064nm脉冲,脉宽14.2ns、平均功率0.36W的1342nm脉冲。2014年,山东大学FENG等人采用氧化石墨烯重水分散液,获得了1.06μm脉冲激光^[16],最窄脉冲宽度344ns、重复频率550kHz、单脉冲能量0.16μJ。

2.3 Nd:GdVO₄ 晶体

2011年,山东大学LI等人直接采用旋涂在激光输出镜BK7玻璃上的石墨烯作为饱和吸收体(如图3所示,图中R为曲率半径),获得了1063nm脉冲激光,平均功率2.3W、脉冲宽度105ns、重复频率达到704kHz^[17]。2012年,山东大学XU等人采用旋涂在BK7全反镜上的石墨烯作为饱和吸收体,获得了最窄脉冲宽度450ns、重复频率43kHz、平均功率260mW、单脉冲能量2.5μJ的1.34μm脉冲激光^[18]。

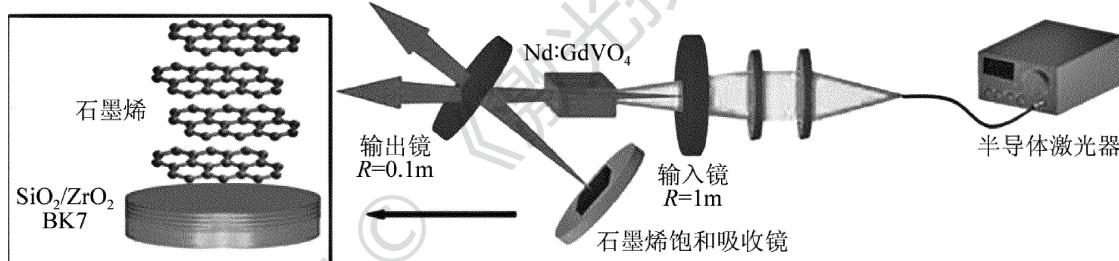


图3 石墨烯被动调Q 1.34 μm Nd:GdVO₄ 激光器^[18]

2011年,中国台湾WANG等人采用氧化石墨烯PVA水溶液垂直蒸发技术,将氧化石墨烯镀在石英片上,并与输出镜一起构成了三明治结构,实现了1063nm脉冲激光输出,其平均输出功率1.22W、重复频率600kHz、脉冲宽度104ns^[19]。

2.4 其它掺Nd³⁺激光工作介质

除了以上3种最常见掺Nd³⁺激光晶体,Nd:YLF,Nd:LuVO₄,Nd:Klu(WO₄)₂,Nd:La_{0.11}Y_{0.89}VO₄,Nd:LYSO和Nd,Mg:LiTaO₃晶体也具有良好的激光特性。

2013年,西班牙马德里康普顿斯大学MATÍA-HERNANDO将CVD生长的单层石墨烯直接转移到谐振腔镜上,构成了饱和吸收镜,获得了1047nm Nd:YLF脉冲激光输出^[20],其平均功率472mW、脉冲宽度2.5μs、重复频率90kHz。

Nd:LuVO₄与Nd:GdVO₄、Nd:YVO₄相比,最大的优点是:具有更大的吸收和发射截面、更宽的吸收光谱宽度,通常采用880nm与808nm半导体激光器抽运。

2011年,山东大学YU等人采用外延生长的SiC基石墨烯作为饱和吸收体和输出镜,获得了Nd:LuVO₄脉冲激光器^[21]。平均功率474mW、重复频率795kHz、最窄脉冲宽度56.2ns。2014年,中国科学院半导体所YAN等人采用垂直蒸镀的氧化石墨烯透射式饱和吸收体,获得了1064nm脉冲激光(如图4所示),平均功率1.353W、重复频率336.7kHz、脉冲宽度186ns^[22]。

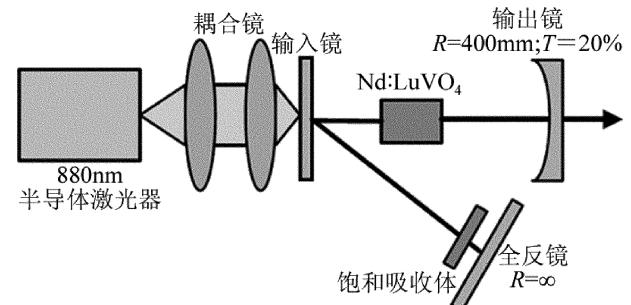


图4 氧化石墨烯被动调Q Nd:LuVO₄ 激光器^[22]

Nd:Klu(WO₄)₂激光材料于2005年首次应用于半

导体激光抽运系统,与其它 Nd:YAG, Nd:GdVO₄, Nd:GGG 相比,可以掺杂更高浓度的 Nd³⁺,具有更宽的吸收光谱。2012 年,山东大学 SHEN 等人采用外延生长的 SiC 基饱和吸收体,获得了 1355nm Nd:Klu(WO₄)₂ 脉冲激光器^[23],其平均功率 890mW、重复频率 135kHz、脉冲宽度 466ns。2014 年,ZHANG 等人采用同样的饱和吸收体,获得了 1425nm 脉冲激光,平均功率 170mW、脉冲宽度 153ns、重复频率 97kHz^[24]。

在 0.9 μm 处,Nd:La_{0.11}Y_{0.89}VO₄ 与 Nd:YVO₄ 相比,具有更小的发散截面,更适合被动调 Q 输出。2014 年,山东大学的 HAN 等人采用 K9 衬底的石墨烯饱和吸收体获得了 914.8nm 的脉冲 Nd:La_{0.11}Y_{0.89}VO₄ 激光器^[25],其平均输出功率 0.62W、脉冲宽度 84ns、重

复频率 246kHz。

Nd:LYSO 是一种比较新颖的激光晶体,在 2011 年实现了被动调 Q 激光输出。2013 年,ZHAO 采用 K9 衬底的石墨烯饱和吸收体,获得了 1076nm 和 1079.7nm 双波长同步输出 Nd:LYSO 脉冲激光器(如图 5 所示)^[26],平均输出功率 1.8W、脉冲宽度 96ns、重复频率 159kHz,此双波长激光器可以通过差频技术产生 0.9THz 光^[26-27]。Nd,Mg:LiTaO₃ 激光晶体具有较宽的吸收光谱和发射光谱、较长的荧光寿命。2015 年,CHU 等人将 CVD 法制作的单层石墨烯转移到石英薄片上,作为透射式饱和吸收体,获得 1082nm 和 1092nm 双波长 Nd,Mg:LiTaO₃ 脉冲激光器,输出功率 365mW、重复频率 133kHz、脉冲宽度 176ns^[28]。

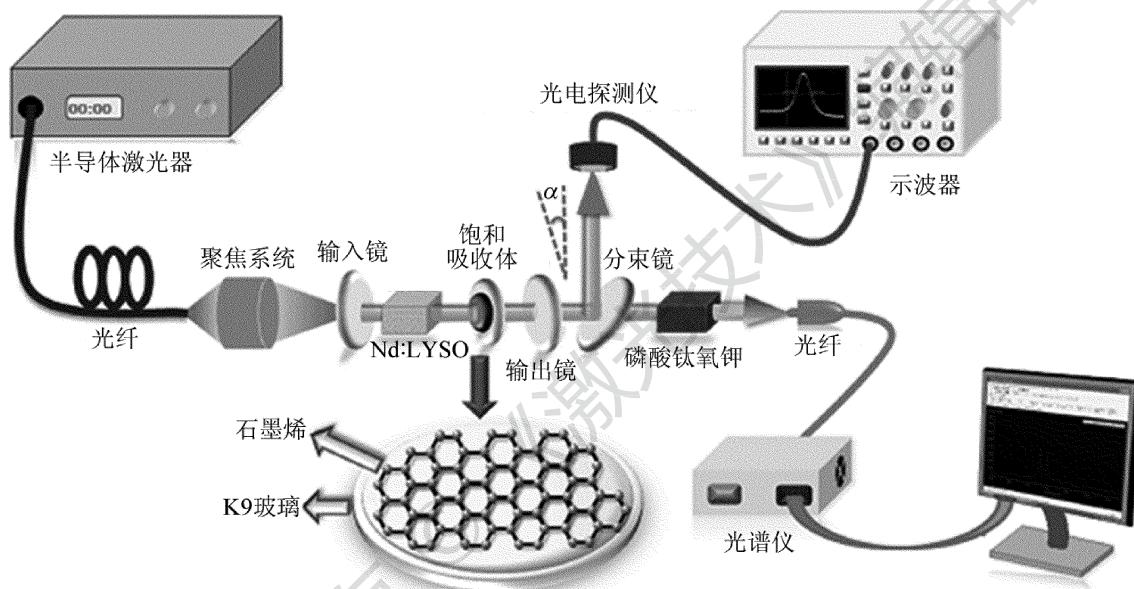


图 5 双波长石墨烯被动调 Q Nd:LYSO 激光器^[26]

3 石墨烯调 Q 固态激光器的发展趋势

3.1 性能优良饱和吸收体的制作

被动调 Q 激光器需要插入损耗小、性能稳定、损伤阈值高的石墨烯饱和吸收体。这需要在石墨烯制作的过程中,尽量减少缺陷和杂质。制作饱和吸收体时,石墨烯应具有很好均匀性,而衬底应具有很好的透过率,需要镀有相应的增透膜。很显然,性能优良的石墨烯饱和吸收体是被动调 Q 激光器发展的关键。如采用超声波转移法替代 PMMA 转移法制作的单层石墨烯石英片,“褶皱”和缺陷更少,相应的散射损耗和吸收损耗更少。

3.2 调 Q 激光器性能指标进一步提高

近年来,石墨烯技术飞速发展,相应激光器的输出功率和单脉冲能量进一步提高,脉冲宽度进一步减小,覆盖的波长范围更宽,可以实现可调谐与双波长及多

波长同时输出^[26,28]。

3.3 与非线性频率变换技术相结合

石墨烯被动调 Q 技术与倍频技术结合,可以实现红绿蓝三基色激光输出;与受激喇曼散射技术结合,实现人眼安全激光输出;也可以与光学参变振荡技术结合,实现中红外激光输出;甚至和差频技术结合,获得 THz 场^[27]。

3.4 产品研究与开发

目前石墨烯被动锁模光纤激光器已经商品化,但石墨烯被动调 Q 的激光器产品还鲜见报道。

4 结束语

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从激光材料到系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,我国在石墨烯被动调 Q 的研究一直走在世界的前列。本文中回顾了目前石墨烯被动调 Q 掺 Nd³⁺激光

器的研究进展，并分析了其发展趋势，指出性能优良的石墨烯饱和吸收体是其发展的关键。

参 考 文 献

- [1] ZHONG G Sh, MAO X J, BI G J, et al. Lasers with narrow pulse width and high beam quality [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6) : 766-768 (in Chinese).
- [2] LIN H Y, LI L Q, XU Y Ch. Influence of output mirror transmissivity on the output characteristics of Cr:YAG passively Q-switched laser [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(1) : 37-40 (in Chinese).
- [3] SUN R Y, LIU J, TAN F Zh, et al. All-fiber amplification and application of 100ps laser pulse [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4) : 417-420 (in Chinese).
- [4] YU H H, CHEN X F, ZHANG H J, et al. Large energy pulse generation modulated by graphene epitaxially grown on silicon carbide [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(12) : 7582-7586.
- [5] JIANG M, REN Zh Y, ZHANG Y P, et al. Passive Q-switching with graphene saturable absorber in Nd:YAG operating at 1064nm [J]. *Materials Science Forum*, 2011, 694(9) : 700-703.
- [6] JIANG M, REN Zh Y, ZHANG Y P, et al. Graphene-based passively Q-switched diode-side-pumped Nd:YAG solid laser [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(22) : 5353-5356.
- [7] JIANG M, REN Zh Y, LU B L, et al. Low-repetition-rate high-energy passively Q-switched Nd:YAG solid laser based on graphene saturable absorber operating at 1064nm [J]. *Current Nanoscience*, 2012, 8(1) : 60-63.
- [8] CAO Y, LIU J, LIU J, et al. Passively Q-switched Nd:YAG microchip laser based on graphene [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2) : 0202009 (in Chinese).
- [9] WEN Q, ZHANG X J, WANG Y G, et al. Passively Q-switched Nd:YAG laser with graphene oxide in heavy water [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(2) : 1500706.
- [10] MEN Sh J, LIU Zh J, ZHANG X Y, et al. A graphene passively Q-switched Nd:YAG ceramic laser at 1123nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(3) : 035803.
- [11] ZHANG L, YU H J, YAN Sh L, et al. A 1319nm diode-side-pumped Nd:YAG laser Q-switched with graphene oxide [J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(15) : 1287-1289.
- [12] ZHANG H N, LI M, CHEN X H, et al. Graphene based passively Q-switched Nd:YAG eye-safe laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(7) : 074201.
- [13] LI X, LIA G Q, ZHAO S Z, et al. Diode-pumped Nd:YVO₄ laser passively Q-switched with graphene oxide spin coated on ITO substrate [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(4) : 673-677.
- [14] CHEN Sh, LIN Zh H, LIANG L, et al. Passively Q-switched Nd:YVO₄ laser at 1064nm and 1342nm using graphene as saturable absorber [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2013, 19(4) : 367-372 (in Chinese).
- [15] LIANG L, LIN Zh H, CHEN Sh, et al. Graphene passively Q-switching for dual-wavelength lasers at 1064nm and 1342nm in Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4) : 0402009 (in Chinese).
- [16] FENG T L, ZHAO Sh Zh, YANG K J, et al. Passively Q-switched lasers at 1.06μm with graphene oxide and carbon nanotubes D₂O dispersion [J]. *Optical Materials*, 2014, 36(7) : 1270-1273.
- [17] LI X L, XU J L, WU Y Zh, et al. Large energy laser pulses with high repetition rate by graphene Q-switched solid-state laser [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10) : 9950-9955.
- [18] XU J L, LI X L, HE J L, et al. Efficient graphene Q switching and mode locking of 1.34μm neodymium lasers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13) : 2652-2654.
- [19] WANG Y G, CHEN H R, WEN X M, et al. A highly efficient graphene oxide absorber for Q-switched Nd:GdVO₄ lasers [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(45) : 455203.
- [20] MATÍA-HERNANDO P, GUERRA J M, WEIGAND R. An Nd:YLF laser Q-switched by a monolayer-graphene saturable-absorber mirror [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(2) : 025003.
- [21] YU H H, CHEN X F, HU X B, et al. Graphene as a Q-switcher for Neodymium-doped lutetium vanadate laser [J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(2) : 022704.
- [22] YAN Sh L, ZHANGA L, YU H J, et al. Watt-level Q-switched Nd:LuVO₄ laser based on a graphene oxide saturable absorber [J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(3) : 234-238.
- [23] SHEN H B, WANG Q P, ZHANG X Y, et al. Passively Q-switched Nd:KL_u(WO₄)₂ laser at 1355nm with graphene on SiC as saturable absorber [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(9) : 092703.
- [24] ZHANG H N, CHEN X H, WANG Q P, et al. Graphene-based passively Q-switched Nd:KL_u(WO₄)₂ eye-safe laser operating at 1.425nm [J]. *Applied Physics*, 2014, B114(3) : 313-317.
- [25] HAN Sh, LI X L, XU H H, et al. Graphene Q-switched 0.9μm Nd:La_{0.11}Y_{0.89}VO₄ laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(1) : 011401.
- [26] ZHAO Y G, LI X L, XU M M, et al. Dual-wavelength synchronously Q-switched solid-state laser with multi-layered graphene as saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3) : 3516-3522.
- [27] LIN H Y, MENG X G, HUANG X H, et al. Realization of quasi-phase-matched tunable singlefrequency optical parametric oscillator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6) : 060005 (in Chinese).
- [28] CHU H W, ZHAO Sh Zh, LI T, et al. Dual-wavelength passively Q-switched Nd,Mg:LiTaO₃ laser with a monolayer graphene as saturable absorber [J]. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics*, 2015, 21(1) : 1600705.