

新型激光技术研究进展

蔡志平*, 叶陈春, 董俊, 许惠英

(厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 重点介绍了过去 10 年来厦门大学光电子技术研究所高 Q 值玻璃球微腔光子学、光纤激光器、平面波导的交错复用器设计和固体激光器研究中所取得的进展情况. 特别重点讨论了在光纤激光器领域所开展的研究内容以及取得最新进展: 如利用掺 Yb 双包层光纤激光器泵浦的 2 级 P₂O₅ 拉曼级联获得了瓦级 1 480 nm 输出的拉曼光纤激光器; 实现了 O 波段多波长磷硅拉曼光纤激光器; 提出并利用双泵浦光纤参量放大器作为激光增益介质, 在国际上率先实现了光通信波段(1 550 nm) 多波长、窄线宽光纤参量振荡器; 采用光纤激光器腔内参量泵浦技术, 获得了 C+ L 波段的高性能光纤参量放大器. 同时对球微腔激光器也进行了较为详尽的讨论.

关键词: 光纤激光器; 高 Q 值玻璃球微腔; 平面波导; 交错复用器; 固体激光器

中图分类号: TN 248

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2011)02-0245-08

1864 年麦克斯韦理论上预示电磁波存在, 并且在 1887 年赫兹在实验室里验证了电磁波存在与传播, 接着马可尼于 1895 年利用电磁波进行了横跨大西洋的通信实验, 开创了现代电子科学技术发展的新纪元. 可以说, 电子科学与技术的内涵是对电子信号产生、传输、接收和处理的学科, 从最初的语音电话、到后来的图文电视、直到现在的多媒体数字信号, 信息量越来越大, 而传输电子信号的带宽与作为信号载波的电磁波频率成正比, 所以电子学的发展是围绕着电磁波频率从低到高的过程, 即从 20 世纪初的 10 kHz 射频波段到 20 世纪 40—50 年代的 1 GHz 微波波段, 但是, 由于 50 年代毫米波长微波的“极限”, 而导致了从微波波段到 100 THz 的光波波段, 即 1960 年的激光诞生, 导致 1975 年出现的光纤通信, 直至现在的全球高速光纤互联网.

1 在光纤激光器领域的研究进展

光纤激光器的研究可以追溯至激光器发明之初, 世界上第一台光纤激光器采用掺铒光纤作为增益介质于 1961 年诞生^[1]. 经过近 50 年的发展, 光纤激光器已获得了突飞猛进的进展, 已经历了从起始萌芽阶段、热点探索性研究阶段至初步商业化阶段. 在此期间, 许多具有划时代意义的、具有历史奠基性的研究工作不断

涌现, 为目前光纤激光器实现商业化进程铺平了道路. 这些工作主要包括: 1966 年英籍华裔科学家高锟博士(2009 年诺贝尔物理学奖得主)及其合作者提出低损耗玻璃纤维; 1970 年 Corning 公司成功研制出损耗为 20 dB/km 的石英玻璃光纤; 20 世纪 70 年代, 超低损耗单模光纤及可用于泵浦光纤的半导体激光器相继研制成功; 1985 年, 稀土掺杂光纤在英国南安普敦大学研制成功^[2], 随后光纤激光器和掺铒光纤放大器取得突破性发展并迅速实现商业化, 导致了 1994 年全光纤高速通信网——英特尔网的建立, 为互联网这一信息化平台提供硬件技术; 1988 年 Snitzer 首次提出包层泵浦光纤激光器的概念; 1991 年 Russell 提出光子晶体光纤的概念, 并随后被 Knight 拉制成功. 相比最广泛使用的固体激光器, 光纤激光器因具备结构紧凑、光束质量好、高效率、高功率、高可靠性等优点被认为是最具潜力的激光源, 已逐渐呈现出替代固体激光器的趋势. 据统计, 2010 年光纤激光器(主要包括 IPG、SPI 公司)已约占据整个激光器市场的 25%, 年销售额近 7 亿美元. 面对如此庞大的市场需求, 光纤激光器的研究已成目前激光器领域的研究热点.

1.1 高功率光纤激光器

本研究所两项福建科技重大专项的资助下, 紧跟国际前沿, 自 2003 年开始在高功率固体激光器泵浦拉曼光纤激光器及高功率可调谐掺铒双包层光纤激光器等方面开展研究工作. 基于拉曼光纤激光器耦合波动方程组, 利用 Lambert-W 函数方法推导了双波长输出拉曼光纤激光器的显式解析解^[37], 进而优化

收稿日期: 2010-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(60277026, 69878023, 50802080, 90206039)

* 通信作者: zpc@xmu.edu.cn

设计高功率磷硅光纤拉曼激光器. 使用 1 064 nm Nd:YV O₄ 固体激光器作为拉曼泵浦源, 经过 2 级 P₂O₅ 拉曼级联获得了瓦级 1 480 nm 输出的拉曼光纤激光器, 激光斜效率达 42. 8%^[8-9]. 此实验结果目前仍保持国际先进水平. 同时, 我们也采用掺 Yb 双包层光纤激光器作为泵浦源(如图 1), 在掺磷光纤中获得了输出功率达 3. 6 W/1 484 nm 的拉曼激光输出^[10-12](如图 2).

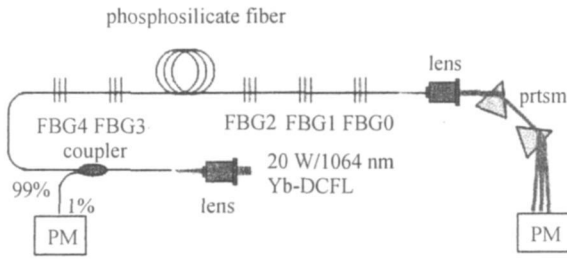


图 1 掺镱双包层激光器泵浦拉曼激光光源实验结构图
Fig. 1 Experimental set-up for a Raman fiber laser pumped by an Yb-doped double cladd fiber laser

1.2 多波长光纤激光器

在多波长光纤激光器方面, 我们也开展了众多具有特色的研究工作^[13-16]. 主要包括: 1) 提出了掺磷光纤中 P₂O₅ 和 SiO₂ 的混合级联拉曼增益实现多波长激射的技术, 在掺镱双包层光纤激光器作为拉曼泵浦源情况下, 实现了 O 波段(约 1 320 nm)多波长磷硅拉曼光纤激光器; 2) 提出并利用双泵浦光纤参量放大器作为激光增益介质, 在国际上率先实现了光通信波段(1 550 nm)多波长、窄线宽光纤参量振荡器; 3) 理论上深入研究了波导型马赫-曾德尔干涉仪单通、直接双通和隔离器辅助双通 3 种结构的梳状滤波特性, 进而

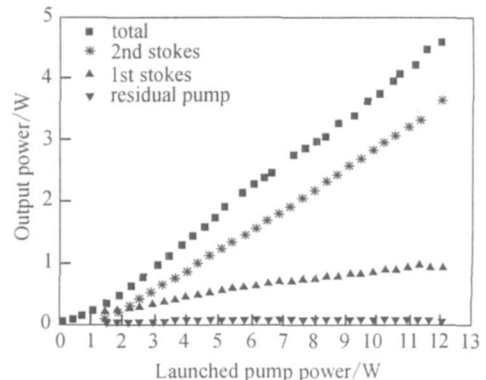
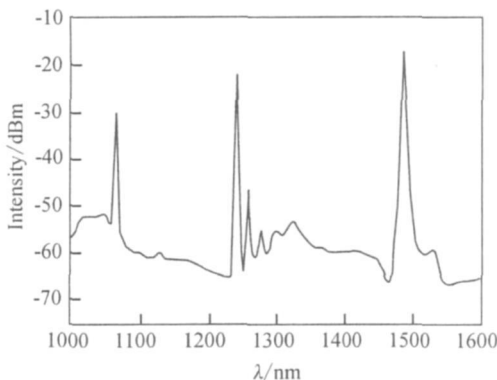
将其插入以半导体光放大器(SOA)作为增益介质的光纤激光腔内, 实现了 C 波段高性能 104 个波长同时激射、L 波段 115 个波长同时激射; 4) 采用光纤激光器腔内参量泵浦技术, 获得了 C+L 波段的高性能光纤参量放大器, 以及低阈值 C 波段连续可调谐的光纤参量振荡器(如图 3); 5) 最近, 我们利用石墨烯的超高非线性光学特性抑制掺铒光纤激光器实现了窄线宽的 11 个波长稳定输出. 另外, 利用以上获得的多波长光纤激光器作为波分复用无源光的模式竞争, 网络(WDM-PON)的中心化光源注入锁定 RSOA, 我们也实现了上/下行 1.25 Gb/s WDM-PON 传输.

1.3 腔内泵浦光纤参量放大器及振荡器研究

由于光纤参量放大过程属于均匀展宽机制, 较强的增益竞争使得多长激射难于实现, 我们采用零色散波长附近强烈的四波混频来抑制增益竞争, 在国际上率先实现了 C 波段、窄线宽多波长光纤参量振荡输出. 相关研究成果已发表在光电子国际顶级期刊 IEEE Photonics Technology Letters^[14]. 图 4 和图 5 分别为我们提出的多波长光纤参量振荡器的实验装置图和典型的多波长激射光谱图.

1.4 石墨烯调 Q 光纤激光器

石墨烯自 2004 年发现至 2010 年被授予诺贝尔物理学奖, 短短 6 年间便成为国际研究的热点并得到学术界的广泛认可, 源于其独特的二维原子晶格结构表现出许多奇异的物理特性, 将可能成为微纳电子学、电化学、磁学、光学等众多学科的新基石. 近 2 年来, 石墨烯具备超高性能的饱和吸收特性已在产生超短脉冲方面展现新契机^[17]. 本研究所紧跟最新国际前沿, 已



光纤长度: 1 km; 散点: 实验值; 直线: 理论模拟

图 2 激光器输出光谱和功率输入输出图

Fig. 2 The laser spectrum and the input-output power curves for a Raman fiber laser

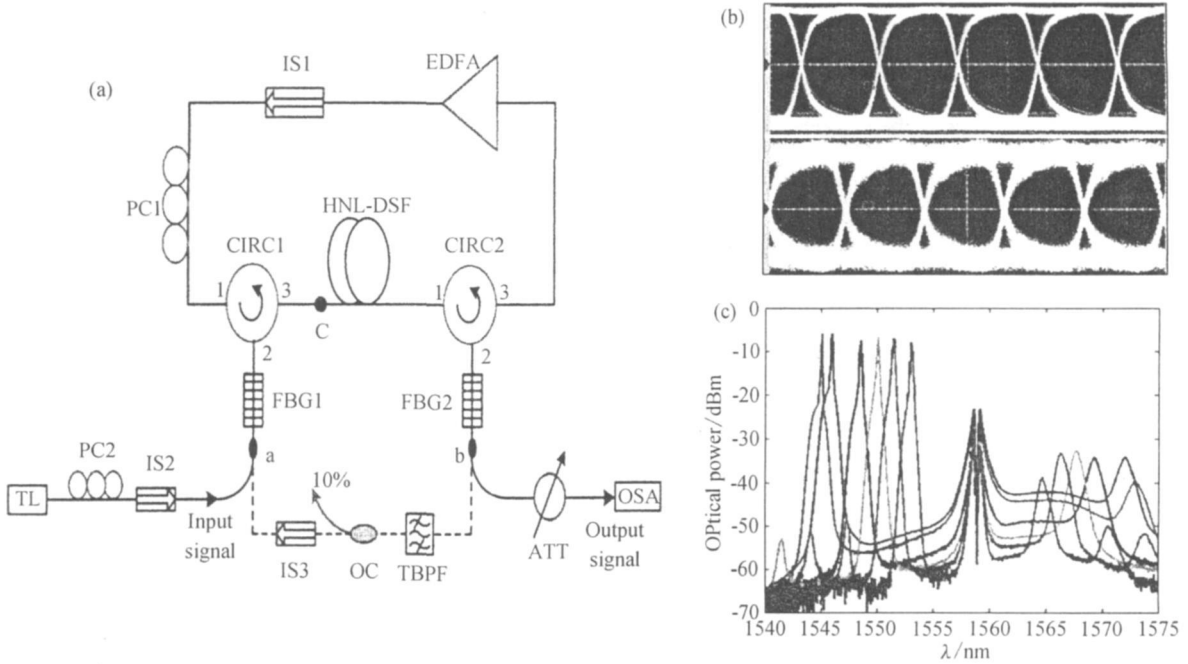


图 3 (a) 腔内参量泵浦光纤参量放大器及振荡器实验结构; (b) 10 Gb/s 的 PRSB 信号参量放大前和放大后的眼图; (c) C 波段连续可调谐光纤参量振荡输出光谱

Fig. 3 (a) Experimental set-up for an intracavity parametrically pumped fiber parametrical amplifier and oscillator; (b) Eye diagrams of a 10 Gb/s PRSB signal before and after parametrical amplification; (c) Continuously tunable output spectra of a G-band fiber parametrical oscillator

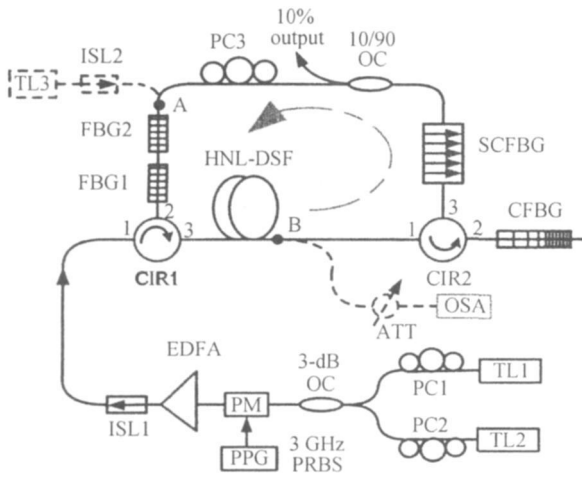


图 4 多波长光纤参量振荡器实验

Fig. 4 Experimental setup for a multi-wavelength fiber parametrical oscillator

于 2010 年初开始开展了石墨烯相关的研究. 通过激光沉积化学液相石墨烯在光纤端面, 我们在国际上率先报道了全光纤石墨烯调 Q 掺铒光纤激光器^[18]. 最近, 经过继续深入研究, 选用易于操作的石墨烯聚合物纳米复合物薄膜, 同时利用其高性能的饱和吸收特性和超高的非线性三阶光学特性, 在偏单模掺铒光纤中实现了多波长同时调 Q 的脉冲激光输出.

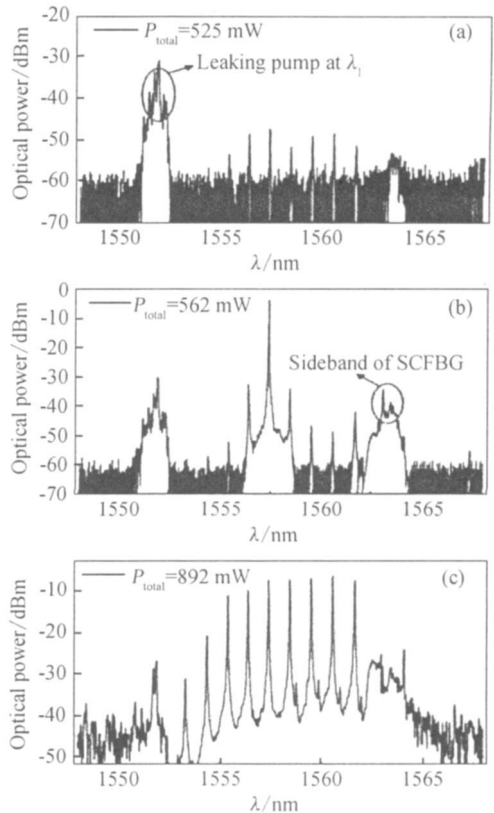


图 5 多波长光纤参量振荡激光光谱

Fig. 5 Stimulated spectra of a multi-wavelength fiber parametrical oscillator

2 微腔激光器研究进展

2.1 高 Q 值玻璃球微腔光子学

1946 年 Purcell 提出原子与真空场组成的系统时,原子的自发辐射衰减会因电磁环境的变化而改变^[19],如果将原子或物质置于一个至少在一个方向的尺寸与波长同数量级的腔—微腔内,由于真空场受到腔体的调制,腔内物质的自发发射性质会发生改变,受到腔的控制.

1996 年法国巴黎高师 Haroche 教授课题组率先报道了高 Q 掺钕石英玻璃微球,实现超低阈值 200 nW 的回廊模球微腔激光器^[20],并在理论上预示如果激发 1 个回廊模激光,则阈值可降低为 2 nW,开创了球微腔光子学新领域.介质光学微球腔由于其极高的品质因数,极小的模式体积和很低的非线性效应的阈值条件^[21],在要求极细线宽、极高能量密度和亮度或极细微探测能力的场合中(如 CQED,光子学等)得到重要应用.

近年来,本所在高 Q 介质光学微球腔中开展了如下工作:

2.1.1 CO₂ 激光加热熔融拉制微米光纤波导与球微腔

我们用自制 CO₂ 激光熔融拉锥系统可以得到直径介于 20~ 60 μm 之间,长度介于 50~ 100 cm 的钕丝(就所拉光纤的长度而言,比文献[22]中报道的 40~ 50 cm 要长至少 1 倍以上).利用拉制成型的钕丝,垂直置于聚焦后的 CO₂ 激光下,熔制成球,得到直径介于 50~ 200 μm 的钕玻璃球微腔,表面均匀,球形度好(如图 6~ 10).

2.1.2 稀土掺杂氟化物玻璃高 Q 微球光微波源

回廊模(whispering gallery mode, WGM)谐振腔,由于其高品质因子(高 Q 值)、微米尺寸等特性使其在基础物理研究、高分辨光谱、窄线宽激光器、光电振荡器以及传感器等不同的研究领域具有广阔的应用前景.法国巴黎高师,雷恩一大法国国家应用科学与技术高等学院(ENSSAT),美国加州理工大学和厦门大学等国内外实验室在微球的基础研究和应用技术方面展开了一系列的研究.

我们和法国 ENSSAT 合作,在国际上率先使用稀土掺杂氟化物玻璃材料(Er:ZBLAN)制备微球,并用光纤光锥耦合调出 1.56 μm 波长的微球激光器^[23].随后研制出性能更为优越的掺钕氟化物玻璃

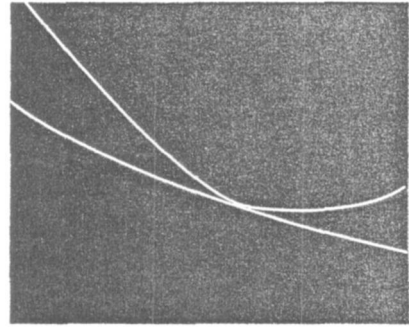


图 6 钕丝实物的局部照片

Fig. 6 Local photo of Nd-doped fibers

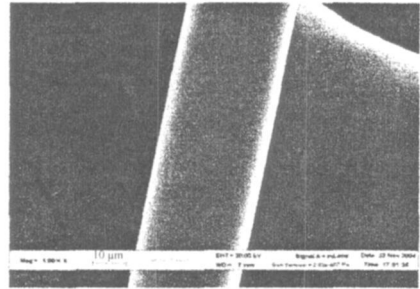


图 7 钕玻璃光纤实物的电镜扫描

Fig. 7 TEM of Nd-doped fibers

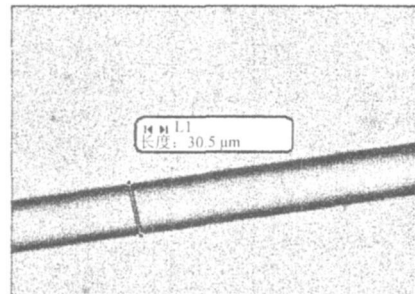


图 8 钕玻璃光纤实物的显微照片

Fig. 8 Amplified photo of Nd-doped fiber

材料(Er:ZBLAN) [24],利用此新型材料,使用微波等离子体熔融技术研制出小球,产生光通信波段 1530~ 1560 nm 波长等间隔激光激励^[25-26],激光线宽仅 100 kHz,可用于未来高速密集波分复用(DWDM)光通信系统.此外,利用微腔 WGM 模特性,我们在国际率先发展了 10 μm 级的点传感器^[27-28].最近和法国巴黎高师 LKB 实验室合作并发展了一种有效而便捷的手段用来观测石英微腔(微球和微环)里的回廊模电磁场的分布,用此方法可以很精确地改变耦合器件相对于微腔赤道平面具体位置,从而优化耦合的最大模式同时抑制其他模式^[29].

此外,与法国 ENSSAT 合作,利用腰径均为 2.8 μm 的两根光纤半光锥去耦合直径为 160 μm 的 Er:

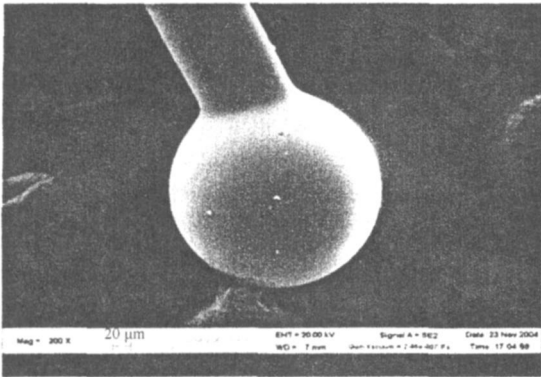


图 9 钕玻璃球微腔电镜扫描照片

Fig. 9 TEM of a Nd-doped microsphere

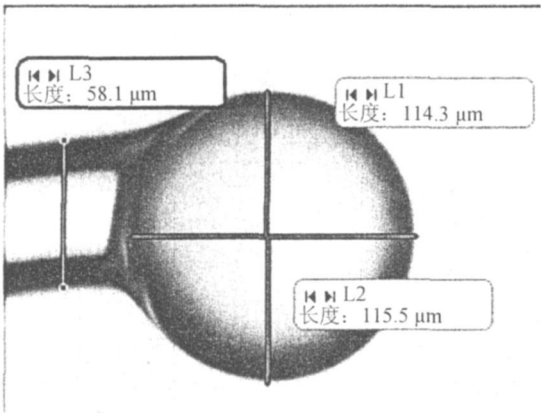


图 10 钕玻璃球微腔的显微照片

Fig. 10 Amplified photo of a Nd-doped microsphere

ZBLALiP 球, 在国际上首次使用微球在自由运行状态下获得线宽仅为 22 kHz、频率为 10.86 GHz 的光微波源, 微波信号频移控制在 300 kHz 以内且微波信号强度的波动在 1 dB 左右^[30]. 这一实验结果为微波源的小型化甚至集成化提供一种新的思路.

我们在微腔理论模拟方面也进行研究^[31-33]; 此外, 在其他相关光纤有源器件, 如超辐射荧光光源等进行了系统的研究, 并取得系列成果^[34-41].

2.2 基于平面波导的交错复用器

光学交错复用器(interleaver)是 DWDM 通信系统、光学信号处理以及光传感领域中的核心元件之一. 理想的交错复用器应具有类似矩形的频谱、平顶的通带、高阻带消光比、大的通带和阻带带宽. 近年发展了实现性能优良的交错复用器的多种技术和方案, 比如薄膜、双折射、级联马曾干涉仪(mach-zehnder interferometer, MZI)、GT 谐振腔(gire-tournois etalon, GTE)以及环形腔(ring resonator, RR)等方案. 可以通过增加级联 MZI 的个数、单个 GTE 的子腔数以及单个 RR 的子腔数来改善交错复用器的频谱性能. 通

常, 单子腔 GTE 或单子腔 RR 就可以让 MGTI 或 MZRRI 具有良好的频谱性能. 从这点上说, MGTI 或 MZRRI 优于格形滤波器. 而从实现工艺来说, MZRRI 基于 PLC 技术, 其优于 MGTI. 针对基于 PLC 技术的器件具有体积光学元件、光纤技术等所不能比拟的高度集成的优点.

研究小组紧跟国际上在 interleaver 上的研究主流方案, 开展了多项有创新性的研究工作, 提出采用基于平面波导的多子腔型 RR 作为色散补偿器, 对 mB-MGTI 通带内的色散进行补偿, 相比较文献中的色散补偿方案, 我们的色散补偿仅需要 1 个色散补偿器就能补偿 MGTI 的两信道, 因此具有显著的优点, 研究成果已经发表在国际光电子或光学领域的顶级期刊上, 如文献[42-44].

3 高性能激光器件的研究

有关 LD 泵浦连续高功率全固体激光器研发及应用, 我们进行 10 瓦级 LD 泵浦 1080/1064 nm CW 激光器和瓦级 LD 泵浦 473 nm CW 蓝光激光器的研发; 在激光陶瓷的研制及有关激光陶瓷微片激光器的研究中具有国际领先的研究的科研知识, 对于将要进行的透明激光陶瓷的研究工作有非常坚实的基础. 相关的 Yb: YAG 激光陶瓷性能研究、复合 Yb: YAG/ Cr: YAG 激光陶瓷以及微片调 Q 固体激光器的研究成果分别发表在光学领域的国际学术杂志上^[45-60].

4 总结与展望

虽然本研究所已在光纤、微腔和固体激光器的多个方面开展了前沿的、具有特色的研究工作, 在一定程度上已获得了国内外同行的认可. 然而, 在激光器全面走向商业化的进程中, 我们相较国内外一些著名的科研单位仍存在较大差距. 在新型激光器的学术探讨上也存在许多关键问题亟需解决, 如: 1) 如何降低噪声以适用于光通信光源; 2) 如何拓展其激射波长至更宽范围(包括中远红外及赫兹兹波段); 3) 如何改进电光效率使其更绿色环保.

在未来的 10 年中, 继续深化激光技术的学术与技术内涵的同时, 积极开展激光在科学研究、信息技术、工业加工等领域的应用. 重点开展以下方向的科研工作: 1) 激光及投影显示研究; 2) 低温沉积低应力 ITO 薄膜; 3) 激光的工业应用研究.

参考文献:

- [1] Snitzer E. Proposed fiber cavities for optical masers[J]. *J Appl Phys*, 1961, 32: 36-39.
- [2] Poole S B, Payne D N, Fermann M E. Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions[J]. *Electron Lett*, 1985, 21(17): 737-738.
- [3] Huang C H, Cai Z P, Ye C C, et al. Explicit solution for Raman fiber laser using Lambert W function[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4671-4676.
- [4] Huang C H, Cai Z P, Ye C C, et al. Analytic modeling of the P-doped cascaded Raman fiber lasers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, 13(1): 22-26.
- [5] Huang C H, Cai Z P, Ye C C, et al. Optimization of dual-wavelength cascaded Raman fiber lasers using an analytic approach[J]. *Optics Communications*, 2007, 272(2): 414-419.
- [6] Sun G Y, Chung Y J, Luo Z Q, et al. Optimization of the multiwavelength erbium-doped fiber laser in a unidirectional cavity without isolator[J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, 13(3): 198-201.
- [7] Sun G Y, Cai Z P, Ye C C. Dual-order Raman fiber laser with suppressed low-frequency pump-to-stokes RIN transfer[J]. *Optics Communications*, 2006, 260(2): 645-648.
- [8] Luo Z Q, Huang C H, Sun G Y, et al. 800 mW/1484 nm highly efficient two-cascaded phosphosilicate Raman fiber laser pumped by Nd:YVO₄ solid-state laser[J]. *Optics Communications*, 2006, 265(2): 616-619.
- [9] Huang C H, Cai Z P, Luo Z Q, et al. Highly efficient cascaded P-doped Raman fiber laser pumped by Nd:YVO₄ solid-state laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(1): 41-43.
- [10] Liao X Y, Huang C H. Optimization of Yb³⁺-doped double-clad fiber lasers using a new approximate analytical solution[J]. *Optics and Laser Technology*, 2011, 43(1): 55-61.
- [11] Luo Z Q, Ye C C, Cai Z P, et al. Numerical analysis and optimization of optical spectral characteristics of fiber Bragg gratings modulated by a transverse acoustic wave[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(28): 6959-6965.
- [12] Luo Z Q, Ye C C, Sun G Y, et al. Simplified analytic solutions and a novel fast algorithm for Yb³⁺-doped double-clad fiber lasers[J]. *Optics Communications*, 2007, 277(1): 118-124.
- [13] Luo Z Q, Cai Z P, Huang J F, et al. Stable and spacing-adjustable multiwavelength Raman fiber laser based on mixed-cascaded phosphosilicate fiber Raman linear cavity[J]. *Optics Letters*, 2008, 33: 1602-1604.
- [14] Luo Z Q, Zhong W D, Cai Z P, et al. Multiwavelength fiber optical parametric oscillator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21: 1609-1611.
- [15] Luo Z Q, Cai Z P, Zhong W D, et al. A novel fiber-optic parametric amplifier and oscillator based on intracavity parametric pump technique[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(2): 214-216.
- [16] Luo Z Q, Zhong W D, Cai Z P, et al. High performance SOA-based multiwavelength fiber lasers incorporating a novel double-pass waveguide-based MZI[J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2009, 96: 29-38.
- [17] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nat Photon*, 2010, 4: 611-622.
- [18] Luo Z Q, Weng J, Huang G M, et al. Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3709-3711.
- [19] Purcell E M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies[J]. *Phys Rev*, 1946, 69(12): 681.
- [20] Sandoghdar V, Treussart F, Hare J, et al. Very low threshold whispering-gallery-mode microsphere laser[J]. *Phys Rev A*, 1996, 54: 1996-1999.
- [21] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity[J]. *Nature*, 2002, 415(7): 621-623.
- [22] Weber J K R, Felten J J, Cho B, et al. Glass fibres of pure and erbium or neodymium-doped yttria-alumina compositions[J]. *Nature*, 1998, 393: 769-771.
- [23] Lissillour F, Messenger D, Stphan G, et al. Whispering-gallery-mode laser at 1.56 μm excited by a fiber taper[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(14): 1051-1053.
- [24] Mortier M, Goldner P, Feron P, et al. New fluoride glasses for laser applications[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2003, 326: 505-509.
- [25] Cai Z P, Xu H Y, Stephan G M, et al. Red-shift in Er:ZBLALiP whispering gallery mode laser[J]. *Optics Communications*, 2004, 229(1-6): 311-315.
- [26] Xu H, Cai Z, Stephan G, et al. Laser effects in a Galerie microresonator made from erbium-doped ZBLALiP glass[J]. *J Phys*, 2002, 12: 269-270.
- [27] Cai Z P, Xiao L, Xu H Y, et al. Point temperature sensor based on green decay in an Er:ZBLALiP microsphere[J]. *Journal of Luminescence*, 2009, 129: 1994-1996.
- [28] Cai Z P, Xu H Y. Point temperature sensor based on green upconversion emission in an Er:ZBLALiP microsphere[J]. *Sensor Actuat A-Phys*, 2003, 108(1/2/3): 187-192.

- [29] Lin G P, Qian B, Orucevic F, et al. Excitation mapping of whispering gallery modes in silica microcavities[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(4): 583-585.
- [30] Xiao L, Trebaol S, Dumeige Y, et al. Miniaturized optical microwave source using a dual wavelength whispering gallery mode laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(8): 559-561.
- [31] Wang M Q, Huang Y Z, Chen Q, et al. Analysis of mode quality factors and mode reflectivities for nanowire cavity by FDTD technique[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(1/2): 146-151.
- [32] Su Z F, Sun S G, Wu C X, et al. Study of anomalous infrared properties of nanomaterials through effective medium theory [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2008, 129: 044707.
- [33] Wang M Q, Cai Z P, Huang Y Z. Analysis of modes in the nanowire cavity by FDTD simulation[J]. *Solid State Phenomena*, 2007, 121/123: 1125-1128.
- [34] Wang X L, Huang W C, Xu H Y, et al. Ultra-high efficiency L-band erbium-doped superfluorescent fiber source with broadening linewidth[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(8): 085003.
- [35] Huang W C, Wang X L, Ye C C, et al. Stable L-band superfluorescent fiber source using one pump[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(7): 075002.
- [36] Wang X L, Huang W C, Xu H Y, et al. Characteristics of stable L-band SFS using dual-forward synchronous pumping technique[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(7): 568-571.
- [37] Huang W C, Zheng B R, Wang X Z, et al. Low-ripple and high-efficiency C+ L-band erbium-doped fiber amplified spontaneous-emission sources using a dual forward pumping configuration[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(3): 035003.
- [38] Huang W C, Wang X L, Zheng B R, et al. Stable and wideband L-band erbium superfluorescent fiber source using improved bidirectional pumping configuration[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9778-9783.
- [39] Huang W, Wang X, Cai Z, et al. A pump power insensitive high stability L-band erbium-doped superfluorescent fibre source[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2005, 7: 179-182.
- [40] Huang W C, Hai M, Cai Z P, et al. A selective C and L-band amplified spontaneous emission source using a 1x2 optical switch[J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, 22(4): 887-888.
- [41] Chehura E, Skordos A A, Ye C C, et al. Strain development in curing epoxy resin and glass fibre/epoxy composites monitored by fibre Bragg grating sensors in birefringent optical fibre[J]. *Smart Mater Struct*, 2005, 14: 354.
- [42] Zhang Y, Huang W C, Wang X Z, et al. High-extinction-ratio multipassband filter with flat-top and low-dispersion[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(6): 860-870.
- [43] Zhang Y, Huang W C, Wang X L, et al. A novel super-high extinction ratio comb-filter based on cascaded Mach-Zehnder Gires-Tournois interferometers with dispersion compensation [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13685-13699.
- [44] Zhang Y, Huang W C, Wang X L, et al. Design of flat-top interleaver and tunable dispersion compensator using cascaded Sagnac loop mirrors and ring resonators [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6213-6222.
- [45] Dong J, Ueda K, Yagi H, et al. Effect of polarization states on the laser performance of passively Q-switched Yb: YAG/Cr, Ca: YAG microchip lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(1): 50-56.
- [46] Dong J, Ueda K, Kaminskii A A. Laser-diode pumped efficient Yb: LuAG microchip lasers oscillating at 1030 and 1047 nm[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(10): 726-733.
- [47] Chen L J, Zhou Q, Li S S, et al. Zirconium-doped hybrid films patterned by soft lithography for distributed-feedback lasers[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2010, 101: 207-211.
- [48] Cai G X, Zhou M, Liu Z, et al. Spectroscopic analysis of $Pr^{3+} : Gd_3Ga_5O_{12}$ crystal as visible laser material[J]. *Optical Materials*, 2010, 33: 191-195.
- [49] Mosley P J, Huang W C, Welch M G, et al. Ultrashort pulse compression and delivery in a hollow-core photonic crystal fiber at 540 nm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3589-3591.
- [50] Bu Y K, Liu Z, Chen L J, et al. High rate and low loss Ta_2O_5 thin films deposited by novel remote plasma reactive sputtering[J]. *Optoelectronics and Advanced Materials*, 2010, 4(8): 1154-1157.
- [51] Huang S L, Chen N, Liu Z, et al. A novel triple-band high reflector design in sum-frequency-mixing yellow laser [J]. *Optoelectronics and Advanced Materials*, 2010, 4(10): 1448-1452.
- [52] Jia F Q. High power continuous wave laser diode array end pumped Nd: YAG/LBO red lasers operated at 669 nm and 659 nm[J]. *Laser Physics*, 20(7): 1559-1563.
- [53] Dong J, Ueda K, Yagi H, et al. Comparative study the effect of Yb concentrations on laser characteristics of

- Yb: YAG ceramics and crystals [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(4): 282-289.
- [54] Dong J, Ueda K, Yagi H, et al. Effect of polarization states on the laser performance of passively Q-switched Yb: YAG/Cr, Ca: YAG microchip lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 2010, 46(1): 50-56.
- [55] Dong J, Ueda K, Yang P Z. Multi-pulse oscillation and instabilities in microchip self Q-switched transverse-mode laser [J]. Optics Express, 2009, 17(19): 16980-16993.
- [56] Kaminskii A A, Dong J, Eichler H J, et al. Laser and nonlinear-laser properties of undoped and Nd³⁺-doped orthorhombic Ca(NbO₃)₂ single crystals: new stimulated-emission performance and high-order picosecond stimulated Raman scattering covering more than two octave Stokes and anti-Stokes wavelengths [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(11): 821-832.
- [57] Kaminskii A A, Dong J, Ueda K, et al. Q-switched nanosecond Nd³⁺:Ca(NbO₃)₂ crystalline self-Raman laser with single-step cascade SE ($\lambda_{SE} = 1.0615 \mu\text{m}$ of $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ channel) \rightarrow SRS ($\lambda_{SRS} = 1.1741 \mu\text{m}$ of $\omega_{SRS} \approx 904 \text{ cm}^{-1}$ promotion vibration mode) wavelength conversion [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(11): 782-787.
- [58] Kaminskii A A, Bagaev S N, Ueda K, et al. Stimulated-emission spectroscopy of fine-grained “ garnet ” ceramics Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ in a wide temperature range between 77 and 650 K [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(9): 682-687.
- [59] Kaminskii A A, Bettinelli M, Dong J, et al. Nanosecond Nd³⁺:LuVO₄ self-Raman laser [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(5): 374-379.
- [60] Jia F Q. Laser diode end-pumped V:YAG passively Q-switched UV lasers at 335 nm [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(12): 850-855.

Progress on the Novel Laser Technologies

CAI Zhi-ping^{*}, YE Chen-chun, DONG Jun, XU Hu-ying

(School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In this paper, we would like to present an overview on the research work and progress on laser technologies in Department of Electronic Engineering of Xiamen University since last decade: including high-Q microspherical cavity, fiber laser, design of novel planar interleaver as well as new advanced solid-state lasers. The special attention is focused on the discussion of the undergone research topics and their advanced progress in the fiber lasers. Such as the high performance 2-order P₂O₅ Raman fiber laser with several watts output at 1480 nm pumped by Yb-doped double cladd fiber laser; the first realization of multi-wavelength O-band fiber laser based on phosphosilicate fiber; the first fiber parameterical oscillation with multi-wavelength narrow linewidth in conventional telecommunication band(1550 nm); as well as the first high performance C+ L-band fiber parameterical amplifiers under intracavity pumping configuration in a fiber laser. Finally, the microspherical laser is also discussed in detail.

Key words: fiber lasers; high-Q microspherical cavity; planar waveguide; interleaver; solid-state lasers