

高非线性光子晶体光纤中优化产生宽带紫外三次谐波

滕欢 柴路 王清月 胡明列

Optimization of broadband third-harmonic UV generation in highly nonlinear photonic crystal fiber

Teng Huan Chai Lu Wang Qing-Yue Hu Ming-Lie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 044205 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.044205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.044205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

像散正弦-高斯光束的分数傅里叶变换与椭圆空心光束产生

Fractional Fourier transform of astigmatic sine-Gaussian beams and generation of dark hollow light beams with elliptic geometry

物理学报.2016, 65(20): 204204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204204>

像散飞秒贝塞尔光在石英玻璃中刻写双芯光波导的研究

Double-core optical waveguides fabricated by astigmatic femtosecond Bessel beam in silica glass

物理学报.2016, 65(19): 194210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194210>

四瓣高斯光束的 Gyrator 变换性质和矩形空心光束的产生

Gyrator transform of four-petal Gaussian beam and generation of rectangular hollow beam

物理学报.2016, 65(12): 124204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124204>

熔石英损伤修复坑下游光场调制的数值模拟与实验研究

Study of downstream light intensity modulation induced by mitigated damage pits of fused silica using numerical simulation and experimental measurements

物理学报.2016, 65(2): 024205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024205>

利用 Kagome 光纤实现多芯光子晶体光纤的输出合束

The beam combination of multi-core photonic crystal fiber by using the Kagome fiber

物理学报.2016, 65(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024206>

高非线性光子晶体光纤中优化产生宽带 紫外三次谐波*

滕欢 柴路 王清月 胡明列†

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2016年8月23日收到; 2016年11月28日收到修改稿)

通过非线性光学频率转换技术产生不同频率的脉冲辐射是实现具有短波波长的激光光源的有效手段. 近年来, 光子晶体光纤技术的发展为解决传统的基于非线性晶体的频率转换系统面临的难以维护、转换效率低、不易推广等问题带来了新的解决思路. 在频率转换研究领域, 紫外光波段的脉冲辐射产生一直以来都受到学者的广泛关注. 国外已报道过利用超短脉冲抽运光子晶体光纤实现三次谐波产生, 从而输出具有高灵敏度和高分辨率的窄带紫外脉冲辐射, 但其紫外光转换效率较低, 且光谱的可调谐能力有限, 而这些缺陷恰恰可以由宽带紫外脉冲辐射的获得来改善. 宽带紫外脉冲辐射的有效获得不仅意味着紫外光转换效率可大幅提高, 并且若加以合适的滤波手段, 还可获得内任意波长下的窄带宽的脉冲辐射, 从而增加窄带紫外脉冲辐射的可调谐度, 但目前相关报道较为有限. 本文将中心波长为 1035 nm, 脉冲重复频率为 50 MHz 的飞秒激光耦合至一定长度的高非线性光子晶体光纤中, 将其产生的拉曼自频移孤子作为三次谐波产生的抽运源, 通过相位匹配作用, 在深紫外波段产生高阶模式传导下的三次谐波. 随后让超短脉冲以偏离光纤轴心一定角度入射, 可进一步激发出具有更短波长的超高阶紫外光模式. 通过激发多个邻近的超高阶紫外光模式, 在一定连续范围内实现相位匹配, 获得超高阶紫外光模式传输下紫外光转换效率为 3.6% 的宽带 (32—360 nm) 深紫外脉冲激光. 实验结果与理论模拟结果相一致.

关键词: 高非线性光子晶体光纤, 三次谐波, 相位匹配, 高阶模式

PACS: 42.60.Jf, 42.81.Qb, 42.55.Tv

DOI: 10.7498/aps.66.044205

1 引言

紫外 (ultra violet, UV) 激光光源可用于高分辨率生物显微技术、选择性光子激发生物分子 (如 DNA) 技术, 或作为活细胞中无创性荧光标记的多色荧光蛋白激发光源^[1], 甚至用于消毒、空气净化、蛋白质分析^[2], DNA 测序 R459627182^[3], 药物检测、光刻等, 在材料科学、生物、化学、生物医学^[4-6], 等离子物理等^[7,8] 领域有重要的应用价值, 近年来受到广泛关注.

基于非线性晶体和高次谐波技术产生 UV 激光已有较长的研究历史. 2015 年, 中国科学院物理

研究所在发表的快讯中详述了利用单块啁啾超晶格非线性晶体与中红外飞秒脉冲产生超宽带的飞秒脉冲激光的研究结果, 获得了较为理想的 UV 波段 (350—485 nm) 高次谐波转化效率 (1.2%)^[9], 但所涉及的空间光路调整元件对使用者有较高的要求, 且转换效率较低. 而光纤型的非线性光源具有很好的紧凑性且易于推广. 三次谐波产生 (third-harmonic generation, THG)^[10] 这一非线性光学频率转换途径, 不像二次谐波产生会受到石英光纤中 SiO₂ 的反演对称性限制, 为人们获得光纤型的 UV 激光光源提供了更为有力的手段. 但普通光纤中利用非线性光纤过程实现 THG 的效率较低. 近年来, 通过基于光子晶体光纤 (photonic crystal fiber,

* 国家自然科学基金 (批准号: 61535009, 61675150) 和教育部长江学者创新团队 (批准号: IRT13033) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

PCF)^[11]的THG来获得UV波段的脉冲辐射引起了国内外学者的广泛关注. PCF不仅具有极强的非线性,可为非线性作用提供较长的相干距离,而且其传导模式色散可控且结构设计灵活^[12,13],是实现THG更为理想的介质.相关研究结果为超显微技术、微加工、微成像、表面及界面技术带来了新的发展前景^[14,15].2005年,Evgenii等^[16,17]也研究并证明了超短脉冲在PCF中传输引起拉曼孤子频移的过程有利于产生高阶模式传输下的三次谐波激光脉冲.2010年,Liu等^[18]利用飞秒激光抽运PCF,获得了高阶模式传输下的三次谐波,研究了脉宽短至0.5 nm,抽运光转换效率仅为0.4%的窄带宽的UV波段的三次谐波.但窄带宽的UV脉冲,其波长选择较为受限,且平均功率较低,UV转换效率并不理想.本文基于超短脉冲耦合进高非线性PCF而实现相位匹配产生三次谐波的方法,使入射脉冲以偏离纤芯轴心一定角度的方向入射,激发相邻或连续的超高阶模式,获得宽频谱的UV脉冲辐射,提高了UV光的转换效率.若加以合适的滤波手段,还可获得一定波段内任意波长下的窄带UV脉冲辐射,从而增加窄带UV脉冲辐射的可调度和灵敏度.可以预见,高质量的宽带UV脉冲辐射的实现,将会对众多科研领域起到重要的推动作用.然而如何获得稳定的宽带UV脉冲辐射仍处于探索阶段.

本文将中心波长为1035 nm,脉冲重复频率为50 MHz,可支持200 fs输出的超短脉冲激光耦合至纤芯直径约2.39 μm ,长度约为80 cm的高非线性PCF中.当脉冲平均功率为40 mW时,330, 430 nm附近便可探测到三次谐波信号,PCF输出端清晰可见输出三次谐波的高阶模式HE₁₃,其几何结构、光场强度分布与模拟结果符合.进一步通过控制具有复杂几何结构及更短波长的超高阶紫外光模式(very high order UV modes, HOUVMs)的激发,获得具有更短波长、更宽频谱、更高转换效率的UV脉冲辐射.

2 光子晶体光纤中高阶模式下的相位匹配条件

为了在实验中获得最佳的基于THG的UV脉冲辐射,我们首先通过理论分析抽运激光的

自频移孤子通过相位匹配获得高阶模式传导下的三次谐波的过程,以便获取最优化条件.超短脉冲在PCF零色散波长或附近的反常色散区传播时容易产生孤子,孤子在传输的过程中受拉曼效应的影响,不断红移^[19],使得更短波长、更宽频谱范围内相位匹配产生高阶模式传输的三次谐波.孤子传播常数 $\beta_{\text{sol}}(\omega)$ 的表达式为 $\beta_{\text{sol}}(\omega) = \beta_n(\omega_s) + q - (\omega_s - \omega)/v_g$.第 m 阶模式传导下的三次谐波的传播常数记为 $\beta_{\text{TH}}(3\omega) = \beta_m(3\omega)$,其有效模式折射率为 $n_m(3\omega) = \beta_m(3\omega)c/(3\omega)$.因此,由孤子源激发产生三次谐波的相位匹配条件为

$$n_{\text{TH}}(3\omega) = n_{\text{sol}}(\omega), \quad (1)$$

其中 $n_{\text{sol}}(\omega)$ 是孤子源对应的传导模式有效模式折射率(考虑波导色散和材料色散), $n_{\text{TH}}(3\omega)$ 是三次谐波的传导模式所对应的有效模式折射率,其中 $n_{\text{sol}}(\omega) = \beta_{\text{sol}}(\omega)/\kappa$, $\kappa = 2\pi/\lambda$, λ 是三次谐波所对应的波长.在超短脉冲抽运高非线性PCF的情况下,只要孤子源和三次谐波所对应的传导模式之间满足(1)式的相位匹配条件,THG则很容易实现.

根据上述高阶模式之间的相位匹配条件,针对实验所用光纤进行了数值模拟.采用的高非线性PCF端面结构及纤芯区域局部的扫描电镜显微图如图1(a)和图1(b)所示,其纤芯直径为2.39 $\mu\text{m} \pm 0.02 \mu\text{m}$.该PCF零色散波长在1000 nm附近.将中心波长为1035 nm的超短脉冲激光以较低的平均功率耦合进PCF,大部分抽运功率耦合为基模并以孤子形式传输,当抽运脉冲进入PCF传输一段距离后,拉曼频移效应导致拉曼孤子与主抽运脉冲分离,孤子红移至1290 nm左右,如图2(a)所示.1290 nm处拉曼孤子峰对应的三次谐波位于430 nm附近.因此下面模拟基于以1290 nm为中心波长的孤子源.用COMSOL建立PCF端面的数值模拟模型如图1(c),根据模拟结果预计与基模在430 nm处满足相位匹配条件的高阶模式为HE₁₃模式.由于PCF纤芯直径 d 对其非线性效应影响极大,为了进一步构建与实际PCF结构更为相近的理论模型,模拟了基模、HE₁₃模式的有效模式折射率与PCF纤芯直径的关系,结果如图2(b)所示.两者相交于纤芯直径 $d = 2.37 \mu\text{m}$ 处.即是说基于 $d = 2.37 \mu\text{m}$ 的PCF端面结构,其模拟结果更接近实际情况.

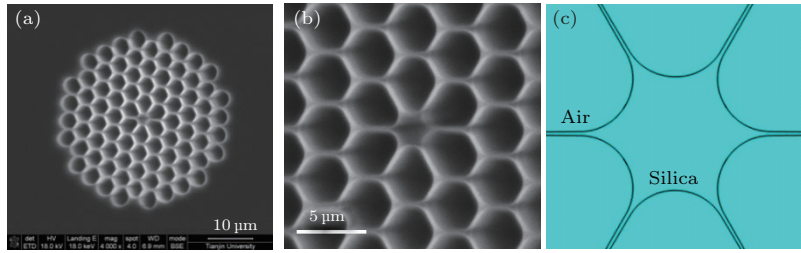


图1 (网刊彩色) (a), (b) PCF 端面结构的扫描电镜显微镜; (c) 纤芯直径 $d = 2.37 \mu\text{m}$ 的 PCF 端面的数值模拟模型
 Fig. 1. (color online) (a), (b) SEM micrograph of the PCF cross-section; (c) numerical cross-section modeling for the PCF with the core diameter of $d = 2.37 \mu\text{m}$.

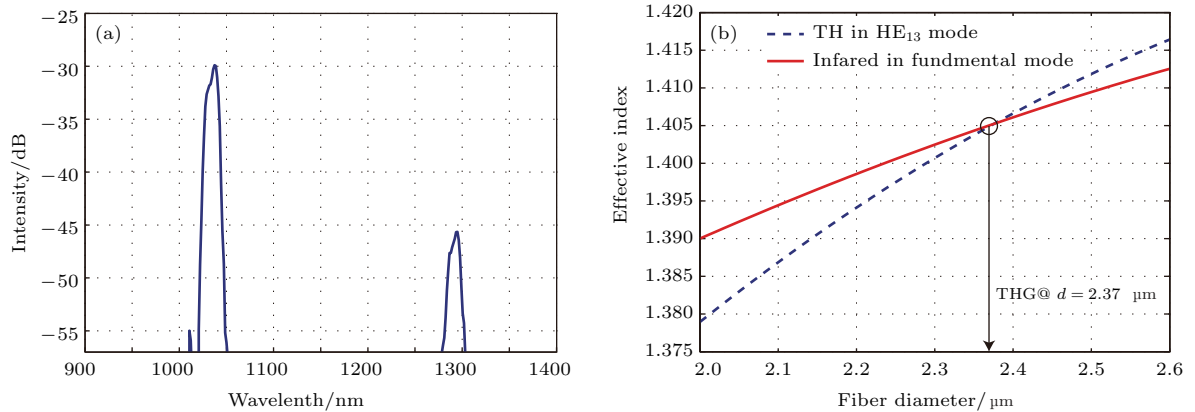


图2 (网刊彩色) (a) 中心波长为 1035 nm 的超短脉冲以较低平均功率耦合进 PCF 后红外波段的输出光谱, 拉曼孤子与主抽运脉冲分离并红移至 1290 nm; (b) PCF 中传输的基模和 HE_{13} 模式的有效模式折射率与 PCF 纤芯直径 d 的函数关系, 两者在 $d = 2.37 \mu\text{m}$ 处相交, 即在此处可实现相位匹配产生三次谐波
 Fig. 2. (color online) (a) Output spectrum of the infrared wavelength with the pulse at the central wavelength of 1035 nm and low average power inputting to the PCF, Raman soliton separated from the pump pulse and shift to 1290 nm; (b) the effective mode refractive index of the HE_{13} mode and fundamental mode as functions of the diameter (d) of the PCF core, note the two modes crossing at $d = 2.37 \mu\text{m}$, where the HE_{13} mode and the fundamental mode have the same value of effective mode refractive index, accordingly, phase matching and THG is achieved here.

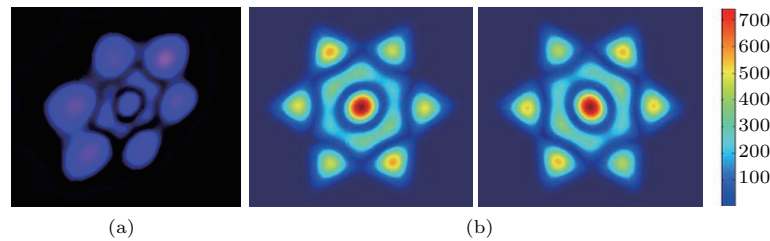


图3 (网刊彩色) (a) 在 PCF 输出端观察到的高阶模式 HE_{13} 的远场图; (b) HE_{13} 的两个简并模式 HE_{131} 和 HE_{132} , 其光场分布略有不同
 Fig. 3. (color online) (a) Far field HE_{13} mode profiles detected at the output of PCF; (b) simulated field intensity profiles of two doublet states: HE_{131} and HE_{132} .

实验观察到输出三次谐波的高阶模式其远场图样如图 3(a) 所示, 该模式为典型的 HE_{13} 模, 其几何结构和光场强度分布与图 3(b) 中的模拟结果一致. 因为实际的 PCF 结构不是完全对称的, 由双折射效应可知, 每个模式具有两个不同的正交偏振分量^[20]. 根据抽运脉冲是沿快轴或者慢轴方向偏振, HE_{13} 有两个简并模式 HE_{131} , HE_{132} , 其光场分布略有不同, 如图 3(b) 所示.

通过模拟该 PCF 中基模和 HE_{13} 等阶模式的有效模式折射率与波长的关系, 研究了基模传输下的孤子源通过相位匹配产生以 HE_{13} 等阶模式传输三次谐波这一过程, 结果如图 4 所示, 中心波长为 1035 nm 的超短脉冲以 300 mW 平均功率耦合进长度为 80 cm 的 PCF, 其输出光谱由图 4 中实心圆标记的虚线所示. 430 nm 附近三次谐波的光谱可见清晰的窄带峰, 其带宽窄至 2 nm. 图 4 中插图

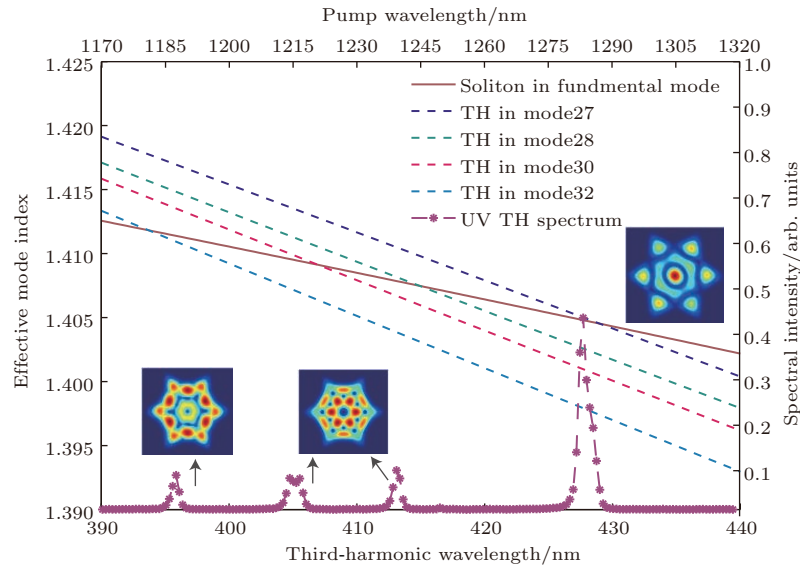


图4 (网刊彩色) 中心波长为 1035 nm 的超短脉冲以 300 mW 平均功率耦合进长度为 80 cm 的 PCF 后输出的三次谐波光谱 (实心圆标记的虚线) 和传输孤子的基模与传输三次谐波的特定高阶模式之间的相位匹配曲线 虚线代表 HE₁₃ 等阶模式 (其模拟图如小图所示) 的有效模式折射率与三次谐波对应波长 (下横轴) 在 430 nm 附近区域的函数关系, 黑色实线代表基模的有效模式折射率与孤子波长 (上横轴) 的函数关系, 在交点对应的波长处实现相位匹配产生三次谐波

Fig. 4. (color online) Spectrum of the third harmonic (filled circles connected by a solid curve) generated in a 80 cm-length PCF by coupling short pulse with a central wavelength of 1035 nm at the average power of 300 mW and the phase-matched curves between fundamental mode of the soliton pump and high-order modes of third harmonic. The dashed curves show the effective mode index of high-order modes such as HE₁₃ (simulated field intensity profiles of these modes are shown in the insets) as functions of third harmonic wavelength (the lower abscissa axis) nearby 430 nm. The solid curve shows the effective mode index of the soliton pump in the fundamental mode as a function of the pump wavelength (the upper abscissa axis). Phase matching is achieved at the wavelengths of the crossing point.

为传输三次谐波的高阶模式的模拟图. HE₁₃ 为该 PCF 所支持的第 27 个模式 (mode27), 邻近的模式 (mode28, mode30, mode32) 也在附近波段发生相位匹配. mode28 和 mode30 互为简并模式, 几何结构和光场强度分布很相似, 但各自对应的有效模式折射率有较为明显的差别, 因此在光谱中相邻的两处窄带峰所对应的波长处发生相位匹配. 图 4 中虚线代表 HE₁₃ 等阶模式的有效模式折射率 $n_m(\lambda/3)$ 与三次谐波波长 (下横轴) 的函数关系, 黑色实线代表基模的有效模式折射率 $n_{sol}(\lambda)$ 与孤子波长 (上横轴) 的函数关系, 在交点处对应的 λ 波长处相交, 实现相位匹配产生三次谐波. 模拟的相位匹配曲线交点与实验获得的光谱所产生的窄带峰位置几乎一致, 即产生的三次谐波对应的波长与预期模式之间相位匹配所对应的波长值基本符合.

3 宽带 UV 脉冲辐射的产生

模拟也发现, 该 PCF 中, 以更高阶模式传导的三次谐波具有更短波长. 且 UV 脉冲辐射的带宽和

效率也很大程度上受到光纤长度的影响. 因此, 利用合适长度的 PCF, 通过改变抽运激发角度, 使得多个连续或相邻的更高阶的传输模式被激发, 获得具有更短波长的三次谐波, 进一步优化了 UV 光转换效率并获取了更宽频谱的 UV 脉冲辐射.

3.1 超高阶紫外模式的激发对 UV 脉冲辐射产生的影响

Efimov 等^[21] 在 2003 年的研究表明, 在 PCF 中, 当抽运光以低阶模式 (非基模) 传输时, HOUVMs 可有效被激发. 本文采用短焦距耦合透镜将聚焦的光斑尺寸控制在与纤芯尺寸相近或者更小的范围, 增加入射脉冲与光纤端面角度调节的灵敏度, 从而使得入射脉冲能量很容易以一定比例耦合到高阶模式, 激发出 HOUVMs.

HOUVMs 对应的光谱位于 320—360 nm 范围内, 所传输的三次谐波具有比上述 HE₁₃ 更短的波长, 获得了带宽为 25 nm 的宽谱 UV 脉冲辐射. 本文对 HOUVMs 产生的机理进行了分析. 实验发现, 当抽运脉冲从 40 mW 增加至 400 mW 时,

320—360 nm波段的光谱特征几乎没有改变, 与上文提到的430 nm附近的三次谐波辐射波段对入射功率的响应特征相似: 光谱的谱峰几乎不受入射脉冲平均功率的影响; 随着入射功率增加, 超连续谱产生受到抑制, 而红外区域对抽运功率的变化十分敏感. 通过这一现象可知, 该非线性产生机理明显区别于与超连续谱产生相关的一系列非线性机理, 而与THG有关.

实验中采用焦距为6 mm的透镜将入射脉冲聚焦为具有与该PCF纤芯直径为同量级的光斑, 从三个维度微调透镜, 以微米量级的精度改变入射脉冲光斑入射到PCF端面的位置以及与纤芯的方

位角. 入射脉冲的入射功率大小通过调节光纤入射端面前方带有刻度的 $\lambda/2$ 半波片的偏转角来控制, 另一个带有刻度的 $\lambda/2$ 则用以控制入射脉冲的偏振方向, 决定了入射的线偏振光和该PCF端面结构的方位关系. 改变入射脉冲偏振态, 在PCF输出端可清晰地观察到结构显然不同的HOUVMs与 HE_{13} 模式叠加的远场图样, 如图5(a)所示. 调节入射脉冲至合适的偏振态, 使得三次谐波在某一叠加模式状态(多个HOUVMs与 HE_{13} 模式叠加)下稳定传输, 此时, 入射的抽运光为350 mW, 输出端探测到的UV脉冲辐射功率为12.6 mW, 即抽运光转换为UV脉冲辐射的效率可优化至最佳(3.6%).

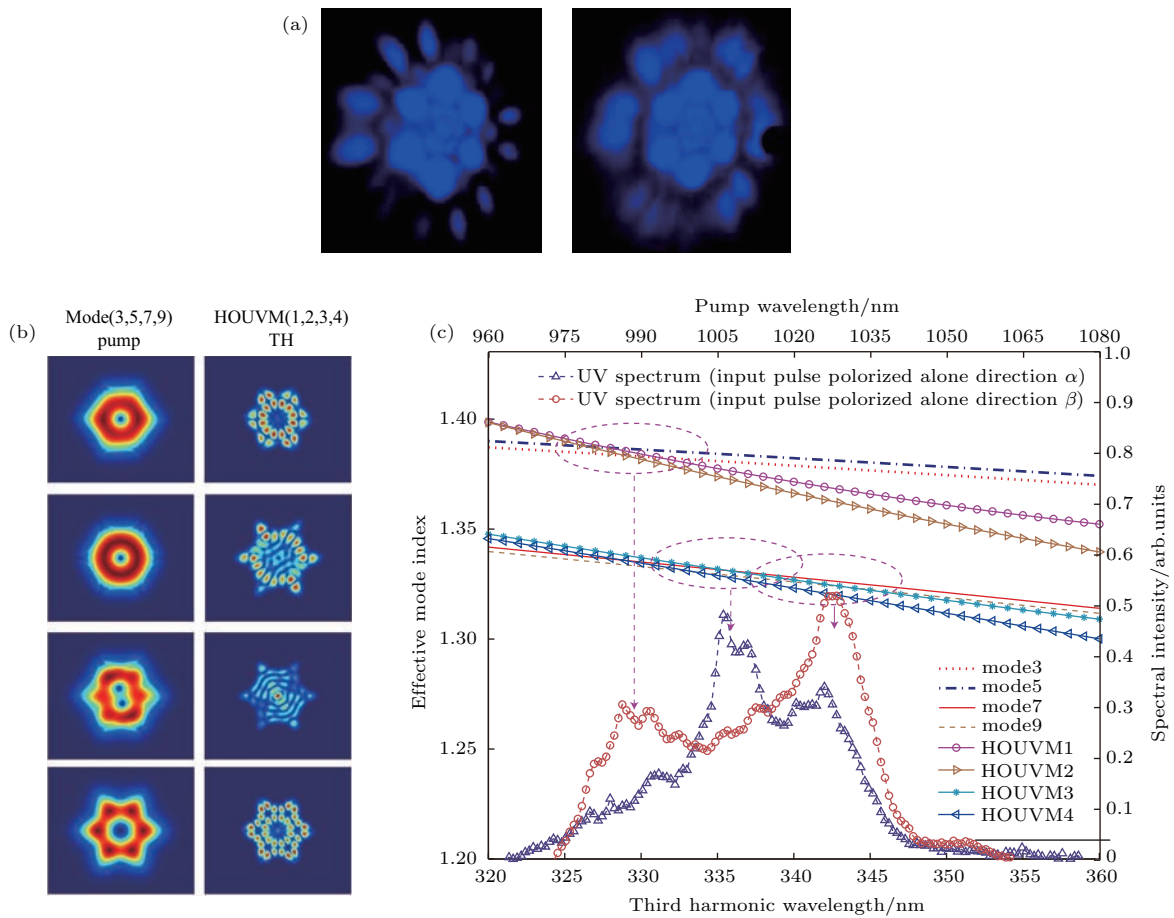


图5 (网刊彩色)(a)入射脉冲以不同偏振态耦合入PCF时实验观察到的 HE_{13} 与HOUVMs叠加的远场图; (b)右小图为改变入射脉冲偏振态该PCF输出端可观察到的4个HOUVMs的模拟结果; 左小图为不同偏振态入射脉冲耦合进PCF所产生的低阶模式(mode3, mode5, mode7, mode9)的模拟图; (c)在入射脉冲以不同偏振态耦合入PCF的情况下测得的光谱以及传输入射脉冲传输的低阶模式与传输三次谐波的HOUVM1, HOUVM2, HOUVM3, HOUVM4在320—360 nm波段的相位匹配曲线, 其相位匹配的位置和光谱谱峰之间的对应关系已由箭头标识

Fig. 5. (color online) (a) Far field profiles of HE_{13} and HOUVMs with different-polarization input pulse coupled into the high nonlinear PCF; (b) right, numerical modeling results of 4 HOUVMs observed at the output of PCF when change the polarization of input pulse; left, numerical modeling results of 4 lower order modes (mode3, mode5, mode7, mode9) produced when different-polarized input pulse coupled into PCF; (c) the measured spectrum with different-polarization input pulse coupled into PCF and the phase-matched curves between lower order modes transmitting input pulse and HOUVMs (HOUVM1, HOUVM2, HOUVM3, HOUVM4) transmitting third harmonic within broadband 320–360 nm.

对传输孤子源的低阶模式以及该PCF支持的4种与实验中观察到的光斑几何结构和光场强度分布大致符合的HOUVMs进行了模拟,如图5(b)所示.入射脉冲可能以不同比例按图5(b)左侧一系列小图中的高阶模式(mode3, mode5, mode7, mode9)耦合入PCF,与上述HOUVMs相位匹配于320—360 nm波段,输出三次谐波.

实验中,让入射脉冲分别以与光纤的快轴和慢轴一致的两个典型偏振方向 α 和 β (互为垂直关系)入射,两个偏振态的入射脉冲耦合到PCF后输出的HOUVMs对应的UV脉冲辐射光谱如图5(c)所示.模式间的相位匹配曲线模拟结果如图所示,模拟的三次谐波的波长范围与实验中实测光谱的谱峰及覆盖范围几乎一致,进一步验证了HOUVMs的产生与THG有关.以其余偏振态下入射的脉冲输出的HOUVMs具有不同结构,产生的UV脉冲辐射光谱宽度和强度渐变于 α 和 β 分别对应的光谱覆盖范围之间.

显然,带宽极限和限制带宽的因素由实现相位匹配产生的HOUVMs和三次谐波的波长决定.越多邻近的HOUVMs被激发,越有利于更多模式间实现相位匹配,从而获得更短波长、更宽频带、更高转换效率的UV脉冲辐射.

3.2 PCF长度对UV脉冲辐射产生的影响

由于光纤色散作用,低阶模式中传输的抽运源与相对高阶的模式中传输的三次谐波之间只能在一定带宽内实现相位匹配^[22].三次谐波在高非线性PCF中传输可被看成是一个简单的慢变包络模型,可实现相位匹配的带宽为 $\delta\omega \propto |u_p^{-1} - u_h^{-1}|^{-1} l^{-1}$, l 为传输距离, u_p 和 u_h 分别为抽运源与三次谐波的群速度.因此,一个具有 $\Delta\omega_p$ 带宽的抽运源,在初始传输过程中,当传输距离小于 $\delta\omega \propto |u_p^{-1} - u_h^{-1}|^{-1} l^{-1} \Delta\omega_p^{-1}$ 时,才能激发出与其等带宽的三次谐波.当超过 $\delta\omega \propto |u_p^{-1} - u_h^{-1}|^{-1} l^{-1} \Delta\omega_p^{-1}$ 这个传输距离,THG只能在小于孤子脉冲带宽的很小范围内实现,并且该范围会随着传输距离 l 的增加而递减.与80 cm长的PCF实验对比,后期实验采用的120 cm长的PCF产生的UV脉冲辐射,其输出UV脉冲谱峰虽然更加丰富,但脉宽更窄,且UV转换效率也大幅降低.显然,在尽可能满足较大非线性作用距离的同时,限制PCF长度,可降低光纤损耗对产生UV

脉冲辐射能量带来的影响,有利于更宽谱、更短波长的UV脉冲辐射的产生.

4 结 论

UV脉冲辐射的有效产生,可通过在高非线性PCF中传输的红移孤子的低阶模式与传输三次谐波的高阶模式之间发生相位匹配而实现;调节抽运光偏振态可使得三次谐波以某一偏振态的HE₁₃稳定输出,从而优化UV脉冲辐射的效率;选择合适的PCF长度,改变脉冲入射条件激发HOUVMs,使得邻近多个传输三次谐波的HOUVMs与传输红移孤子的低阶模式发生相位匹配,进一步通过控制具有复杂几何结构及更短波长的HOUVMs的激发,可将抽运光转换为UV脉冲辐射的效率优化至3.6%,并获得带宽为325—350 nm且连续的宽带UV脉冲辐射.若采用更高峰值功率的飞秒脉冲激光抽运该PCF的话,非线性效应更强,谐波的转化效率也将会大幅提高^[23].HOUVMs的激发对入射脉冲的耦合状态十分敏感,对于耦合条件要求较为精确.实验中对入射脉冲的入射角度和偏振态的调节精度与PCF纤芯直径保持同一数量级,但暂不能量化.后续,调节装置的可控性和可视性有待进一步改善,对HOUVMs进行选模的手段也可获得进一步提高.综上,此方法可用于获得稳定的宽带UV谐波脉冲辐射,相关研究结果可为进一步发展基于PCF的宽带UV脉冲辐射源系统提供一定的参考,为高质量的宽带UV脉冲辐射在各领域的发展带来更大的发展空间.

参考文献

- [1] Chalfie M 1994 *Trends Genet.* **10** 151
- [2] Madsen J A, Boutz D R, Brodbelt J S 2010 *J. Proteome Res.* **9** 4205
- [3] Margulies M, Egholm M, Altman W E, et al. 2005 *Nature* **437** 376
- [4] Squier J, Muller M, Brakenhoff G, Wilson K R 1998 *Opt. Express* **3** 315
- [5] Doronina L V, Voronin A A, Ivashkina O I, et al. 2009 *Opt. Lett.* **34** 3373
- [6] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 796
- [7] Yang H 2004 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Physics CAS) (in Chinese) [杨辉 2004 博士学位论文 (北京:中国科学院物理研究所)]

- [8] Peng N L, Li W H, Jiang S E, Yuan X D, Tang J, Liu Y G 2002 *High Power Laser Part. Beams* **14** 254 (in Chinese) [彭能岭, 李文洪, 江少恩, 袁晓东, 唐军, 刘永刚 2002 强激光与粒子束 **14** 254]
- [9] Li Z Y, Chen B Q 2016 *Physics* **45** 188 (in Chinese) [李志远, 陈宝琴 2016 物理 **45** 188]
- [10] Bloembergen N 1965 *Nonlinear Optics* (New York: Benjamin) p8
- [11] Knight J C 2003 *Nature* **424** 847
- [12] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
- [13] Russell P S J 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4729
- [14] Yelin D, Silberberg Y 1999 *Opt. Express* **5** 169
- [15] Akimov D A, Ivanov A A, Alfimov M V, Grabchak E P, Shtykova A A, Petrov A N, Podshivalov A A, Zheltikov A M 2003 *J. Raman Spectrosc.* **34** 1007
- [16] Serebryannikov E E, Fedotov A B, Zheltikov A M, Ivanov A, Alfimov M V, Knight J C 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 1975
- [17] Konorov S O, Fedotov A B, Serebryannikov E E, Mitrokhin V P, Sidorovbiryukov D A, Zheltikov A M 2005 *J. Raman Spectrosc.* **36** 129
- [18] Liu B W, Hu M L, Wang S J, Chai L, Wang Q Y, Dai N L, Li J Y, Zheltikov A M 2010 *Opt. Lett.* **35** 3958
- [19] Fedotov A B, Voronin A A, Serebryannikov E E, Fedotov I V, Mitrofanov A V, Ivanov A A, Sidorovbiryukov D A, Zheltikov A M 2007 *Phys. Rev. E* **75** 16614
- [20] Efimov A, Taylor A J, Omenetto F G, Knight J C, Wadsworth W J, Russell P S J 2003 *Opt. Lett.* **11** 2567
- [21] Efimov A, Taylor A J, Omenetto F G, Knight J C, Wadsworth W J, Russell P S J 2003 *Opt. Lett.* **11** 910
- [22] Zheltikov A M 2005 *Phys. Rev. A* **72** 43812
- [23] Zhang H Q, Wang P, Liu W J 2016 *Chin. Phys. B* **25** 024209

Optimization of broadband third-harmonic UV generation in highly nonlinear photonic crystal fiber*

Teng Huan Chai Lu Wang Qing-Yue Hu Ming-Lie[†]

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 23 August 2016; revised manuscript received 28 November 2016)

Abstract

The generation of pulse radiation with different frequency based on nonlinear optical frequency conversion technology is an effective method to produce lasers with the wavelength in the visible light or ultraviolet (UV) light range. In recent years, the developments of photonic crystal fiber (PCF) technology and ultra-short pulse technology have brought new solutions to the problems that the system needs great maintenance work, has low frequency conversion rate and much difficulty in popularizing, which the traditional frequency conversion system based on nonlinear crystal is confronting. Research on UV pulse radiation has been consistently attracting much attention of many academics. Particularly, narrowband and broadband UV pulse radiation sources are complementary, each having its own characteristics and scope of applications. The generation of narrowband UV pulse radiation of high sensitivity and high resolution through third harmonic generation (THG) in PCF has already been reported. However, the frequency conversion rate of narrowband UV pulse radiation is relatively low and the tunable ability of the spectrum is limited. These imperfections can be exactly completed by broadband UV pulse radiation. Broadband UV pulse radiation based on THG in PCF can be realized efficiently in PCF. This means that the conversion of UV light increases substantially, and simultaneously, the narrowband UV radiation of any wavelength in a certain range can be acquired more easily and the tunable ability of narrowband UV pulse radiation can be enhanced further. In this paper, the femtosecond pulse with a central wavelength of 1035 nm at a pulse repetition rate of 50 MHz is coupled into a highly nonlinear photonic crystal fiber with an appropriate length. The Raman self-frequency shift soliton produced from the ultra-short input pulse acts as a pump resource of third harmonic, transmitting through fundamental mode in PCF. Phase-matching between the fundamental mode and the high order modes is achieved and the third harmonic transmitted by specific high order modes (such as HE_{13}) at deep UV wavelength is acquired effectively. Besides, the very high order UV mode (HOUVM) transmitting third harmonic with shorter wavelength is stimulated when intentionally inputting the ultra-short pulse into the PCF in the direction of a certain angle deviating from the axis of fiber core. Broadband deep UV (320–360 nm) pulse radiation with a UV light conversion rate of 3.6% can be acquired effectively in nonlinear PCF by stimulating a number of adjacent HOUVMs and achieving phase matching between the modes. Good agreement between theoretical results and experimental results is achieved.

Keywords: highly nonlinear photonic crystal fiber, third harmonic, phase matching, high order mode

PACS: 42.60.Jf, 42.81.Qb, 42.55.Tv

DOI: 10.7498/aps.66.044205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61535009, 61675150) and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in Universities, China (Grant No. IRT13033).

[†] Corresponding author. E-mail: huminglie@tju.edu.cn