

γ 射线辐照增益光纤影响激光器功率特性实验

湛鸿伟*, 陶蒙蒙, 赵海川, 赵柳, 沈炎龙, 黄珂, 冯国斌

西北核技术研究院激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 采用离线和在线两种方式对光纤激光器的增益光纤进行 γ 射线辐照, 实验研究了 γ 射线辐照对激光器功率特性的影响。通过离线辐照实验发现, 经过一定剂量的射线辐照, 当泵浦功率大于某一值之后, 光纤激光器的斜率效率基本保持不变。通过总辐射剂量为 2580 Gy 的在线辐照实验发现, 激光器的输出功率在辐照初期呈指数衰减, 降到最低值之后, 会出现小幅的回升, 然后趋于稳定。通过计算光纤激光器在两种辐照方式下的功率退化率随辐射剂量的变化规律后发现, 在辐照的初期, 在线辐照激光器的功率退化率较大, 但是随着辐射剂量的增加, 两种辐照方式下激光器的功率退化率逐渐趋于一致。采用光纤辐照致损耗的色心理论对实验结果进行了初步解释。

关键词 激光器; 辐射效应; 辐照致损耗; 色心; 功率退化

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1201005

Experimental Investigations on Laser Power Characteristics Influenced by Gamma-Ray Irradiated Gain Fiber

Chen Hongwei*, Tao Mengmeng, Zhao Haichuan, Zhao Liu, Shen Yanlong,
Huang Ke, Feng Guobin

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract Herein, the influence of gamma-ray radiation on laser power characteristics is investigated experimentally by irradiating the gain fiber of a fiber laser with gamma rays in off- and on-line modes. In the off-line irradiation experiments, it is found that the slope efficiency of the fiber laser remains unchanged when the pump power is larger than a certain value. In the on-line irradiation experiments, with a total radiation dose of 2580 Gy, it is found that the laser output power decreases exponentially during the initial stages of irradiation until it reaches the lowest value, then increases slightly, and thereafter tends to be stable. The variations of power degradation rates with radiation dose under two different irradiation modes are compared, and the power degradation rate of the on-line irradiation laser is found to be higher during the initial stages of irradiation. With the accumulation of radiation dose, the power degradation rates of fiber lasers irradiated in both on-line and off-line modes tend to be consistent. These preliminarily experimental results are explained using color center theory of fiber radiation-induced loss.

Key words lasers; radiation effect; radiation-induced loss; color center; power degradation

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3580; 140.5560; 140.5680

1 引 言

随着光纤激光技术的发展, 光纤激光器的应用领域不断拓展^[1-2]。当在辐射环境中应用光纤激光器时, 光纤激光器受到辐射作用, 导致激光器系统性能退化^[3]。因此, 很有必要对光纤激光器的辐射效应开展相关研究。国外研究者深入研究了辐射作用

对普通传输光纤以及掺稀土离子光纤性能的影响^[4-8]。在国内, 北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等单位就普通传输光纤及低功率的掺铒光纤激光器的辐射效应开展了深入研究^[9-12]。近年来, 华中科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、北京航天控制仪器研究所等单位还开展了掺铈和掺钐双包层光纤激光器的地面辐照实验研究, 观察到随

收稿日期: 2019-07-08; 修回日期: 2019-08-22; 录用日期: 2019-08-29

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1801Z)

* E-mail: chenhongwei@nint.ac.cn

着辐射剂量的增加,激光器输出功率出现了明显的退化,有的研究单位还进行了光照退火实验^[13-17]。

相关研究表明,增益光纤是光纤激光器中辐射响应最为敏感的器件。辐射作用会改变增益光纤的性能,从而对激光器的输出特性,特别是输出功率特性造成较大的影响。然而,在已报道的辐照实验研究中,有文献采用了在线辐照方式(激光器在辐照时一直处于开机状态),也有文献采用了离线辐照方式(激光器在辐照时处于关闭状态,当辐射剂量累积到设定值时,停止辐照,激光器开机)。同时,已报道的辐照实验主要是针对低轨卫星平台的空应用,辐照实验中使用的总辐射剂量并不高,绝大多数尚未超过 1000 Gy^[8-11]。然而,在执行深空任务或者在有关核设施的焊接和破拆作业时,光纤激光器可能遭遇更高剂量的辐射,需要开展相应的高辐射剂量辐照实验研究。

本文采用在线和离线两种辐照方式对掺镱光纤激光器开展了稳态 γ 射线辐照实验,辐射累积剂量最高达到 2580 Gy,详细研究了 γ 射线辐照增益光纤对激光器输出功率特性的影响,并对比了两种辐照方式下光纤激光器的功率退化率。

2 光纤辐致损耗的色心理论

辐致损耗被认为是辐射导致光纤性能下降的最主要的表现,通常采用能带理论来分析光纤的辐射效应机理^[8]。石英基光纤的主要成分为 SiO_2 ,理想 SiO_2 晶体的能级结构由价带和导带表示,价带与导带之间为禁带,不允许电子存在。然而,光纤是由非晶态 SiO_2 组成,导致在导带和价带之间存在缺陷能级。同时,掺杂和辐照等也会在禁带内引入缺陷能级。 γ 射线与光纤材料相互作用时,会在光纤材料内引起物质电离,产生大量的自由电子-空穴对。缺陷捕获电子形成色心,色心对光纤中的传导光有强烈的吸收作用,导致光纤衰减显著增加,即产生了光

纤辐致损耗。但光纤中的色心并不完全稳定,可能会发生热致退火和光致退火等退化,因此,色心的产生率和退火率共同决定了光纤的辐致损耗^[10]。

光纤缺陷的初始浓度与瞬时浓度之间有如下关系^[15]:

$$\frac{dn}{dt} = -k_1 \cdot n + k_2(n_0 - n), \quad (1)$$

式中, t 为时间, n_0 和 n 分别为光纤缺陷的初始浓度和瞬时浓度, k_1 和 k_2 分别为色心产生率和退火率, $k_1 \cdot n$ 为初始缺陷转变为色心导致的初始缺陷浓度的下降。根据(1)式可得光纤中色心浓度 n_c ^[15]:

$$n_c = \frac{k_1 \cdot n_0}{k_1 + k_2} \{1 - \exp[-(k_1 + k_2)t]\}. \quad (2)$$

随着辐照时间(辐照总剂量)的逐渐增加,当光纤材料中所有阳空位都转变为色心时,色心达到饱和。尽管光纤产生辐致损耗的具体机理尚不完全清楚,但是有研究表明,色心的产生率与辐射种类、辐射剂量和剂量率等因素相关,色心的光致退火率与漂白光的波长、功率等因素相关^[7,10]。

3 实验装置

使用西北核技术研究院⁶⁰CO 源作为稳态 γ 射线源,将掺镱双包层光纤激光器中的增益光纤部分放入到辐照区,对激光器的其他部位采取辐射屏蔽措施,采用在线和离线两种方式辐照,实验测量激光器输出功率随辐射剂量的变化规律。实验装置结构如图 1 所示,实验用光纤激光器为线型腔振荡器结构,采用中心波长在 1080 nm 附近的光纤光栅(FBG)对构成谐振腔,高反光纤光栅(HR FBG)的反射率为 99.72%,输出光纤光栅(OC FBG)的反射率为 4.29%;采用 10/125 双包层掺镱光纤(YDF)作为增益介质,增益光纤长度为 6 m;激光器采用前向泵浦方式,976 nm 半导体激光器(LD)作为泵浦源。

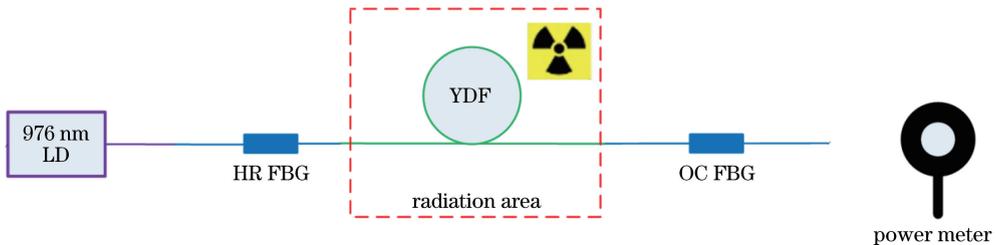


图 1 实验装置结构图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

在开展离线辐照实验时,激光器在辐照中处于关闭状态,当辐射总剂量累积至 300 Gy 时暂停辐照,激光器开机,将泵浦功率调节至设定值 7.40 W,期间测量输出功率随泵浦功率的变化。测量完成后关闭激光器继续进行辐照,当辐射总剂量分别累积至 600 Gy、900 Gy 时,重复上述测量。在开展在线辐照实验时,固定光纤激光器的泵浦功率为 7.40 W,然后开始辐照,采用功率计对光纤激光器的输出功率进行了实时测量。在辐射剂量累积至 1800 Gy 之前,每 300 Gy 测一个点,在辐射剂量累积至 1800 Gy 之后,每 60 Gy 测一个点,当辐射剂量累积至 2580 Gy 时,停止辐照。实际操作时,首先开展了光纤激光器离线辐照实验,在实验结束后,用新的增益光纤替换受过辐照的增益光纤,然后开展光纤激光器在线辐照实验。由于熔接损耗等因素,当泵浦功率为 7.40 W 时,离线和在线测量实验用光纤激光器的输出功率分别为 5.76 W 和 5.37 W。

4 实验结果与讨论

4.1 离线辐照实验

结合图 2 和图 3,对辐射剂量为 300 Gy 情形下激光器的输出功率特性进行初步的解释。由于采用离线辐照方式,增益光纤在经过辐射剂量为 300 Gy 射线辐照后,增益光纤内形成大量的色心,产生了辐致损耗,光纤激光器开机后,其输出功率出现明显的退化。比如在 0.8 W 的泵浦功率下,激光器的光光转换效率从未辐照时的 50% 下降至 8%。然而,泵浦光会对增益光纤内部分不稳定的色心产生光致退火效应,并且泵浦光功率越高,发生光致退火的色心也越多,导致辐照后光纤激光器的光光转换效率也出现显著的提升。当泵浦功率大于 2.5 W 之后,辐照后光纤激光器的光光转换效率与未经辐照的光纤

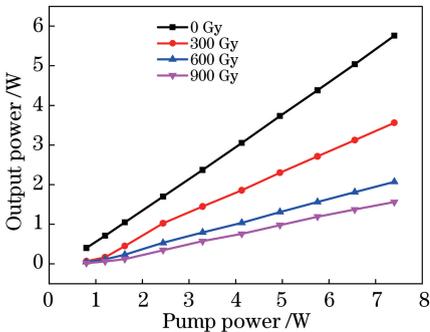


图 2 不同辐射剂量下,激光器输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 2 Output power as a function of pump power under different radiation doses

激光器一样只是呈现出缓慢的增加,并且激光器输出功率曲线呈现出比较好的线性度。我们认为,这是因为此时增益光纤内可以被光致退火的不稳定色心已经基本被消耗,也就是在增益光纤内形成了一个相对稳定的辐致损耗,并且不随泵浦功率的提升而变化,导致输出功率的斜率效率也不再随泵浦功率的增加而变化。在辐射剂量为 600 Gy 和 900 Gy 的情形中,同样可以观察到类似的规律,只是随着辐射剂量的增加,由于增益光纤内形成的稳定色心越来越多,能够被光漂白的不稳定色心占比也逐渐减小,完成光致退火所需的泵浦光功率值也逐渐降低,在 600 Gy 和 900 Gy 情形中对应的泵浦功率值大约为 1.6 W。

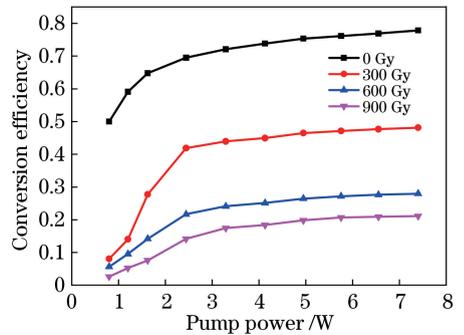


图 3 不同辐射剂量下,激光器光光转换效率随泵浦功率的变化

Fig. 3 Optical-to-optical conversion efficiency as a function of pump power under different radiation doses

同时,还对激光器在固定泵浦功率下的输出特性随辐射剂量的变化进行了分析,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,随着辐射剂量的增加,不同泵浦功率下激光器的输出特性均随着辐射剂量的增加呈指数衰减,并且泵浦功率较低时,激光器的功率退化率相对较高。当辐射剂量累积至 900 Gy 时,不同泵浦功率下激光器的功率退化率达到 70% 以上,验证了增益光纤受到 γ 射线作用会对激光器功率特性产生较大的影响。

4.2 在线辐照实验

接下来开展了光纤激光器在线辐照实验,获得的光纤激光器输出功率随辐射剂量的变化曲线如图 5 所示。与离线测量结果所示的规律类似,可以看出,随着辐射剂量的增加,激光器的输出功率随辐射剂量的增加而显示出指数衰减规律。然而,随着辐射剂量累积至 1980 Gy 附近时,激光器功率退化至最低值;其后激光器功率随着辐射剂量的增加开始出现缓慢回升,然后趋于稳定。

我们认为,采用在线辐照方式时,增益光纤内色

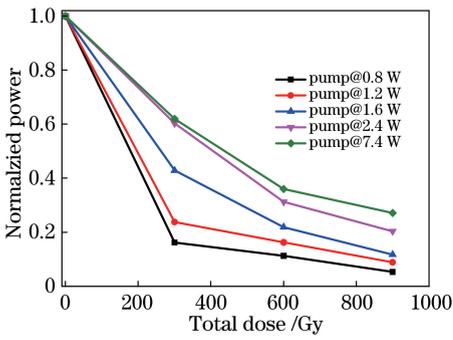


图 4 不同泵浦功率下,激光器输出功率随辐射剂量的变化

Fig. 4 Laser output power as a function of radiation dose under different pump powers

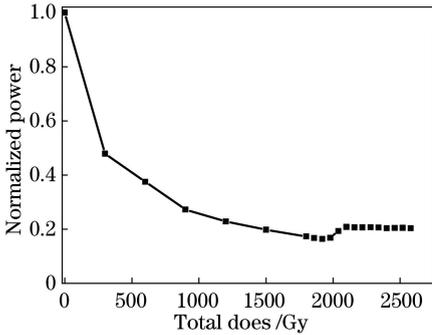


图 5 激光器输出功率随辐射剂量的变化

Fig. 5 Laser output power as a function of radiation dose

心的产生与光致退火是同时存在的。在辐照的初期,增益光纤内稳定色心的产生率远远大于不稳定色心的光致退火率,此时增益光纤内的辐致损耗也随着辐射剂量的累积而一直在增加,故激光器的输出功率一直在减小。当光纤材料中所有阳空位都转变为色心时,色心的产生达到饱和,故激光器输出功率在辐射剂量累积至 1980 Gy 附近时出现了极低值。此时,泵浦光在增益光纤内的沉积也是最多的,对增益光纤中色心的光致退火作用也是最强的,部分不稳定的色心被漂白。光致漂白的色心退火率大于色心产生率会导致增益光纤辐射损耗的下降,激光器的输出功率开始逐渐回升,直至增益光纤内色心的产生与复合达到平衡,激光器的输出也达到一个相对稳定的状态。

4.3 激光器功率退化率对比

尽管在离线辐照和在线辐照实验中采用了同样的结构和器件,但是由于熔接损耗的不同,在相同泵浦条件下,激光器的输出功率略有差别。计算了相同泵浦条件下(7.4 W),激光器功率退化率(辐照前后激光器的功率差值与激光器初始功率值之比)随辐射剂量的变化规律,如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着辐射剂量的增加,激光器功率退化率逐渐增

加,但是在辐照初期,离线辐照激光器的功率退化率要比在线辐照的低,然而,随着辐射剂量的累积增加,两种辐照方式下激光器的功率退化率逐渐趋于一致。

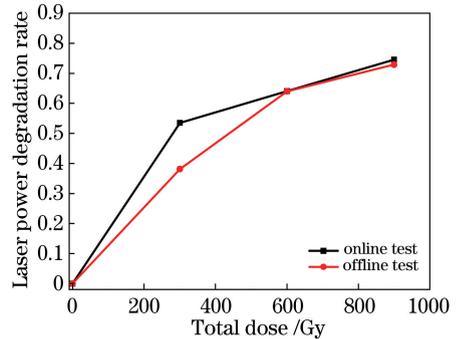


图 6 激光器功率退化率随辐射剂量的变化

Fig. 6 Laser power degradation rate as a function of radiation dose

值得注意的是,对比实验中采用的泵浦功率远大于完成光致退火所需的泵浦光功率值。对于在线辐照方式,976 nm 的泵浦光一直存在,在辐照导致增益光纤产生色心的同时,泵浦光对增益光纤内不稳定色心的光致退火作用也一直存在,故在该情形中主要是增益光纤内形成的稳定色心对激光器的输出功率产生影响。但是,对于离线辐照方式,在辐照达到一定剂量后,激光器开机工作,此时的 976 nm 泵浦光会对增益光纤内不稳定的色心产生光致退火。在辐照剂量较小时,光致退火作用导致增益光纤内形成的稳定色心远远少于在线辐照方式,此时离线辐照方式下光纤激光器的功率退化率相对要小。但是,随着辐射剂量的增加,辐射与光纤材料作用导致增益光纤内形成了大量的稳定色心,能够被光致退火的不稳定色心占比也逐渐减小,故两种方式下激光器的功率退化率逐渐趋于一致。

5 结 论

实验研究了 γ 射线辐照增益光纤对光纤激光器功率特性的影响。无论采用离线辐照还是在线辐照方式,增益光纤经过辐照后产生了辐致损耗,导致激光器输出功率均出现了明显的减小。对于离线辐照方式,在经过一定剂量的射线辐照之后,当激光器的泵浦功率大于完成光致退火所需的功率值时,会在增益光纤内形成一个相对稳定的辐致损耗,并且不随泵浦功率的提升而变化,从而导致激光器的斜率效率基本保持不变。对于在线辐照方式,在辐照的初期,增益光纤内的稳定色心的产生率远远大于不

稳定色心的光致退火率,激光器的输出功率呈现出指数衰减,当光纤材料中所有阳空位都转变为色心时,色心的产生达到饱和,激光器的输出功率也达到最低值,此时,泵浦光对增益光纤中色心的光致退火作用也是最强的。光致漂白的色心退火率大于色心产生率会造成增益光纤的辐射损耗下降,激光器的输出功率开始逐渐回升,直至增益光纤内色心的产生与复合达到平衡,激光器的输出也达到一个相对稳定的状态。通过计算光纤激光器在两种辐照方式下的功率退化率随辐射剂量的变化规律发现,在辐照的初期,由于离线辐照方式中光致退火作用导致增益光纤内形成的稳定色心远远少于在线辐照方式,采用在线辐照方式的激光器功率退化率比较大,但是随着辐射剂量的增加,辐射与光纤材料作用导致增益光纤内形成了大量的稳定色心,能够被光致退火的不稳定色心占比也逐渐减小,两种辐照方式下激光器功率退化率逐渐趋于一致。

参 考 文 献

- [1] Chen X L, Lou F G, He Y, *et al.* Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0336001.
陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化 10 kW 光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0336001.
- [2] Wang X L, Zhou P, Su R T, *et al.* Current situation, tendency and challenge of coherent combining of high power fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201001.
王小林, 周朴, 粟荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201001.
- [3] Chen W, Yang H L, Guo X Q, *et al.* The research status and challenge of space radiation physics and application [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(10): 978-989.
陈伟, 杨海亮, 郭晓强, 等. 空间辐射物理及应用研究现状与挑战[J]. *科学通报*, 2017, 62(10): 978-989.
- [4] Fox B P, Simmons-Potter K, Thomes W J, *et al.* Gamma-radiation-induced photodarkening in unpumped optical fibers doped with rare-earth constituents [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57(3): 1618-1625.
- [5] Fox B P, Schneider Z V, Simmons-Potter K, *et al.* Spectrally resolved transmission loss in gamma irradiated Yb-doped optical fibers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(6): 581-586.
- [6] Alam M, Abramczyk J, Farroni J, *et al.* Passive and active optical fibers for space and terrestrial applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6308: 630808.
- [7] Girard S, Kuhnenn J, Gusarov A, *et al.* Radiation effects on silica-based optical fibers: recent advances and future challenges [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(3): 2015-2036.
- [8] Lezius M, Predehl K, Stower W, *et al.* Radiation induced absorption in rare earth doped optical fibers [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2012, 59(2): 425-433.
- [9] Wang X Q, Zhang C X, Jin J, *et al.* Radiation-induced attenuation effect on special optical fibers applied in space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2516-2520.
王学勤, 张春熹, 金靖, 等. 空间用特种光纤的辐射致衰减效应 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2516-2520.
- [10] Song J M, Guo J H, Wang X Q, *et al.* Radiation induced attenuation effect for optical fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080008.
宋镜明, 郭建华, 王学勤, 等. 光纤辐射致衰减效应 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080008.
- [11] Li M, Ma J, Tan L Y, *et al.* Space radiation effect on the characters of fiber amplifiers for space optical communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(s2): 42-45.
李密, 马晶, 谭立英, 等. 空间光通信中空间辐射对光纤放大器性能的影响 [J]. *中国激光*, 2008, 35(s2): 42-45.
- [12] Ma J, Li M, Tan L Y, *et al.* Experimental investigation of radiation effect on erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier for space optical communication in low-dose radiation environment [J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15571-15577.
- [13] Huang H Q, Zhao N, Chen G, *et al.* Effects of γ -radiation on Yb-doped fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(20): 200201.
黄宏琪, 赵楠, 陈瑰, 等. γ 射线辐照对掺 Yb 光纤材料性能的影响 [J]. *物理学报*, 2014, 63(20): 200201.
- [14] Xing Y B, Huang H Q, Zhao N, *et al.* Pump bleaching of Tm-doped fiber with 793 nm pump source [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(5): 681-684.
- [15] Chi J J, Jiang S Q, Zhang L, *et al.* Experimental study on radiation performance of fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061406.
池俊杰, 姜诗琦, 张琳, 等. 光纤激光器辐照性能实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061406.

[16] Wu W D, Yu T, Tao M M, *et al.* Experimental investigation of gamma-ray irradiation effect on Tm-doped fibers[J]. Chinese Optics, 2018, 11(4): 610-614.
吴闻迪, 余婷, 陶蒙蒙, 等. 掺铥光纤 γ 射线辐照效应实验研究[J]. 中国光学, 2018, 11(4): 610-614.

[17] Chen Y S, Xu H Z, Xing Y B, *et al.* Impact of gamma-ray radiation-induced photodarkening on mode instability degradation of an ytterbium-doped fiber amplifier[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20430-20441.