arXiv:2304.02116v1 [physics.optics] 4 Apr 2023

利用高能量纳秒脉冲激光器快速光漂白伽马射线辐照的掺镱光纤

Esra Kendir Tekg¨ul[1*]和 B¨ulend Orta¸c[1]

[1*]比尔肯特大学 UNAM国家纳米技术研究中心材料科学与纳米技术研究所，邮编06800，安卡拉，土耳其。

*通讯作者。电子邮箱：fiz.esrakendir@gmail.com；其他作者：ortac@unam.bilkent.edu.tr ；

摘要

研究展示了一种快速、高效的光漂白过程，利用高能量纳秒脉冲恢复 10千戈瑞伽马射线辐照掺镱光纤中已有和/或新显现的色心。实验使用基于光学参量放大器系统的多毫焦耳脉冲激光器，其波长为 532 纳米、680 纳米和 793 纳米。研究考察了脉冲光源的波长和能量对光漂白性能的影响。结果发现，随着脉冲激光照射时间和光子能量的增加，掺镱光纤的光漂白程度也随之提高。结果表明，与使用连续激光的研究相比，使用脉冲激光能在更短时间内使掺镱光纤中色心的恢复水平达到 96%。

关键词：掺镱光纤、光漂白、伽马辐射、脉冲激光器

1 引言

稀土掺杂光纤的透射特性会受到辐射诱导衰减（RIA）和光致暗化（PD）过程的影响，从而导致光纤性能下降。此处，RIA 是指在包含辐射的环境中使用的光纤因辐射诱导缺陷而导致输出信号衰减 [1, 2]。PD 则是在高功率镱掺杂光纤激光器和放大器中，因辐射暴露而在高强度激发和激光产生过程中出现的一种损耗机制。该机制会直接影响光纤的性能。PD 会限制光纤激光器和放大器中的激发强度，并影响系统的长期可靠性 [3–5]。RIA 和 PD 与光纤中色心的形成直接相关。在光纤结构中，当电子和空穴由非辐射激发产生，并被二氧化硅基质中的缺陷俘获时，就会形成色心。光在光纤中传输时，特定波长处的吸收会导致信号损耗。RIA 和 PD 的发生与掺杂元素的数量（铝、磷等）、镱$^{+3}$ 离子与 [4], 基质中元素（铝、磷和 SiO_2）及镱$^{+3}$的比例、泵浦功率、信号波长 [3] 和温度 [6]有关。尤其是镱$^{+3}$离子和其他掺杂元素可能会增加传输损耗。这是光纤激光器高功率系统亟待解决的问题。文献中已提出多种防止 RIA 和 PD 的方法。其中之一是光漂白（PB） [7] 方法，通常通过光纤与波长为 355 [8], 405 [9], 532[10], 543 [11], 633 [12] 和 793 纳米 [13] 的连续波光相互作用来实现。其他方法包括 H_2, 或 O_2 加载法 [14], 、热退火[15], ，以及调整铝、铈、磷等掺杂离子的比例 [16]。与其他方法相比，PB 更为实用，因为它无需改变光纤的结构。将不同波长和不同功率的光传入光纤 [17], ，可改变观测到的色心吸收带（位于特定波长处）的透射特性，从而修复缺陷。这种修复机制取决于光源的波长和功率，以及光源的类型；光源由光子构成，可激发氧缺陷和/或过量氧以及键

结构中的未配对电子和光纤基质中的空穴缺陷。这意味着光子会将能量传递到缺陷区域。因此，可通过恢复缺陷键结构或补足缺失离子来实现修复 [18, 19]。

在光纤生产前后防止或修复此类缺陷的形成，对于制造高效且经久耐用的系统至关重要。为了提高掺镱光纤的耐受性，需要确定掺镱光纤基质中各元素在受到伽马辐射或光致暗化时的行为。文献中关于掺镱光纤的研究较少，而众所周知，充分成熟的研究能够全面揭示问题并明确解决方案。已有研究采用可在特定的少数波长下产生连续激光的低功率激光光源进行光漂白 [20]。该研究中，连续激光照射掺镱光纤 18.3 小时；在施加总剂量为 1.45 kGy 的辐射后，650纳米和 1064 nm 波长下的光强透射率分别恢复了 34% 和 8%。 [20]。一项类似研究发现，使用连续激光 118 小时后，掺镱光纤的恢复率为 11% [21]。这些研究表明，单位时间内的光子数量会直接影响恢复过程的持续时间和程度 [10, 13]。

因此，随着光子数增加，恢复水平也随之提高，而光子增强是文献中采用的一种重要方法 [10, 13]。

本研究对经 10千戈瑞伽马辐射后的掺镱光纤进行了光漂白研究，以改善已有和/或新显现的色心。光漂白过程采用配备光学参量放大器（OPA）系统的脉冲激光器。脉冲激光处理后，结果显示，掺镱光纤中色心的恢复水平达到 30 %-96 %。在该光纤中，波长为 532 纳米的脉冲激光产生了最大的光漂白效果。同时，随着施加能量增加，波长为 532 纳米和 680 纳米的脉冲激光所产生的光漂白效果也发生了变化。

2 实验步骤

在知名的 Nufern 商用光纤（LMA-YDF-20/400-M）上研究了光漂白过程。Nufern 光纤的纤芯直径为 $20\ \mu$m，包层直径为 $400\ \mu$m。光纤纤芯分别含有 0.18 mol%、1.31mol% 和 1.42 mol% 的镱、铝和磷元素。光纤长度为 2 m [22, 23]。

为测量光漂白（PB），搭建了两套不同的实验系统（离线和在线），相关系统已在先前的研究及参考文献中展示。[22] 以及图1a 所示。分别在辐照前、接受10千戈瑞辐照后以及经脉冲激光照射后，测量光纤光强的变化。使用氙灯（Newport Oriel LCS-100）作为光源，并通过准直光学器件和光谱仪（Ocean Optics-Flame-S-XR1）测量光谱随波长的变化。为获取辐照前后的光谱，制定了测量流程：先测量未辐照光纤（例如未辐照的Fiber1），再测量辐照后的光纤（例如辐照后的Fiber1），以便在相同条件下进行比较。每根光纤均按此流程测量。图1a 所示系统用于以脉冲激光器发出的不同波长和能量的光照射经10千戈瑞辐照的光纤。脉冲激光器的工作波长范围为660–2400 nm，能量范围为120–10毫焦耳，频率为10 Hz（5 ns）。激光能量被降至3毫焦和5毫焦两档，因为光纤只能承载这两个能量档位。通过采用半透镜和偏振立方体构成的光学装置，降低进入光纤的激光能量。激光经由由透镜组成的光学透镜系统准直后，耦合进入光纤。光强在光纤另一端测量。

采用脉冲激光系统和氙光源，对经10千戈瑞伽马辐射照射的光纤进行光漂白测量。首先，使用氙灯光测量未受辐射和受辐射光纤在400–1000 纳米范围内的光谱。随后，将受辐射光纤置于脉冲激光器下照射1小时，并测量其光谱。在光纤中获得恢复光谱。上述测量重复进行3次。每次恢复过程开始前，均检查光纤的光谱。光纤的光漂白测量分别在532 纳米、680 纳米和793 纳米三个波长下进行，能量值为3毫焦和5毫焦。

光纤分别在各个波长下接受脉冲激光照射，总时长为3小时。对于每个波长，均记录光强随波长变化的光谱。分析时，从获得的光谱中选取了四个不同的波长（420纳米、490纳米、575纳米和650纳米）。计算了这些波长对应的辐射诱导衰减值 Ref[22]。

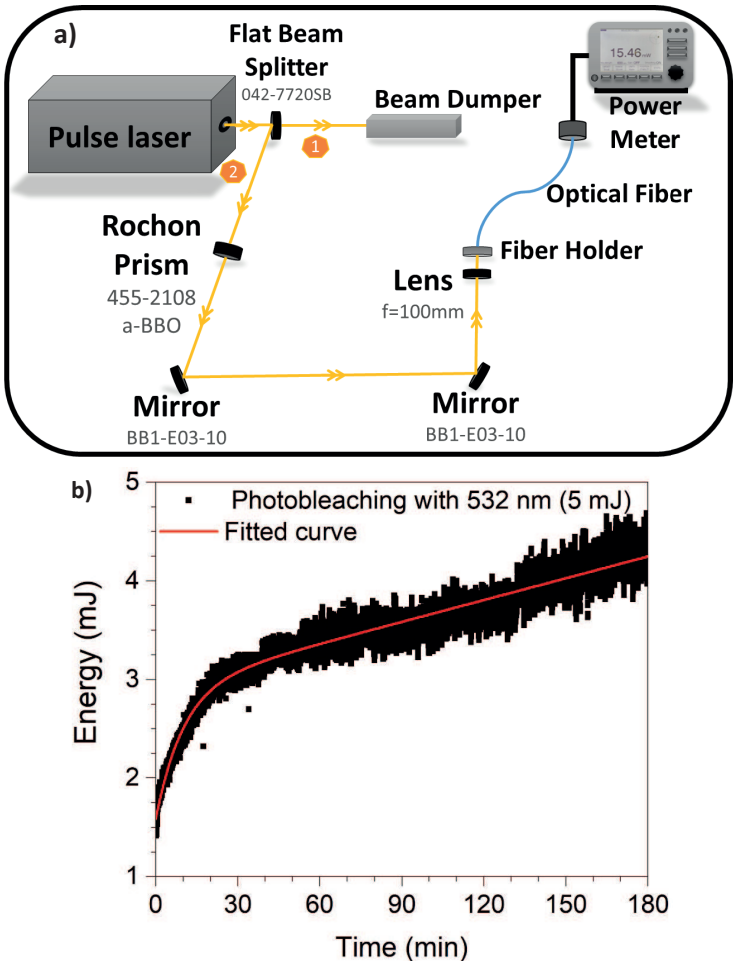


图1 实验装置：a）在532 纳米、680 纳米和793 纳米波长下，使用脉冲激光照射掺镱光纤的系统。b）光纤输出能量随时间的变化（在线测量）。经10千戈瑞总剂量辐照的光纤接受了532纳米脉冲激光（输入能量为5毫焦）的照射，以进行光漂白过程。

3 结果与讨论

结果表明，光纤在受到辐射后，透射特性损失了94%。辐射诱导吸收光谱显示，光纤中存在缺陷中心，这些缺陷属于特定的色心，会吸收光，使光纤内部的光强大幅衰减。文献中已对这些色心进行了研究，而且大多数研究均指出了其波长和半高全宽值 [24, 25]。因此，我们对辐射诱导吸收光谱中的预期色心和已知色心进行了拟合。光纤的辐射诱导吸收光谱由本征色心非桥氧空穴中心，以及外源色心铝氧空穴中心和磷氧空穴中心构成。光纤中磷氧空穴中心、铝氧空穴中心和非桥氧空穴中心色心的光吸收带分别出现在400纳米、466纳米、536纳米和664纳米处 [22]。

图1.b 显示了光纤输出能量变化随脉冲激光辐照时间的在线测量结果。受辐照的掺镱光纤接受了 532纳米脉冲激光照射，以进行光漂白过程。输出能量迅速开始增加至 3毫焦，随后缓慢增加并超过 5毫焦。能量变化表明，掺镱光纤随时间推移得以恢复。这项在线测量证明，可以实现快速且高效的光漂白。

表1 掺镱光纤经10千戈瑞辐照后，在使用532 纳米、680 纳米（能量值为3毫焦和5毫焦）及793 纳米（3毫焦）的脉冲激光进行光漂白过程后（1小时、2小时和3小时）的百分比恢复值。所选光漂白波长为420纳米、490纳米、575纳米和650纳米。（恢复值的变化以百分比表示）

选定波长	420纳米			490纳米			575纳米			650纳米		
辐照波长	1小时	2小时	3小时	1小时	2小时	3小时	1小时	2小时	3小时	1小时	2小时	3小时
532 纳米（3毫焦）	19.6	22.1	33.6	25.4	35.6	57.8	24.2	40.6	62.2	42.7	62.7	77.0
532 纳米（5毫焦）	53.5	71.0	84.4	72.9	87.6	95.5	69.5	85.0	95.5	75.7	90.2	**96.9**
680 纳米（3毫焦）	12.3	18.8	33.2	21.3	32.1	49.7	30.0	45.2	59.1	46.2	61.5	74.4
680 纳米（5毫焦）	13.2	24.5	48.9	25.2	43.4	72.1	34.8	52.8	76.0	49.1	65.0	81.5
793 纳米（3毫焦）	6.7	11.8	12.4	9.1	16.8	19.4	11.9	22.0	28.4	23.4	40.5	**51.0**

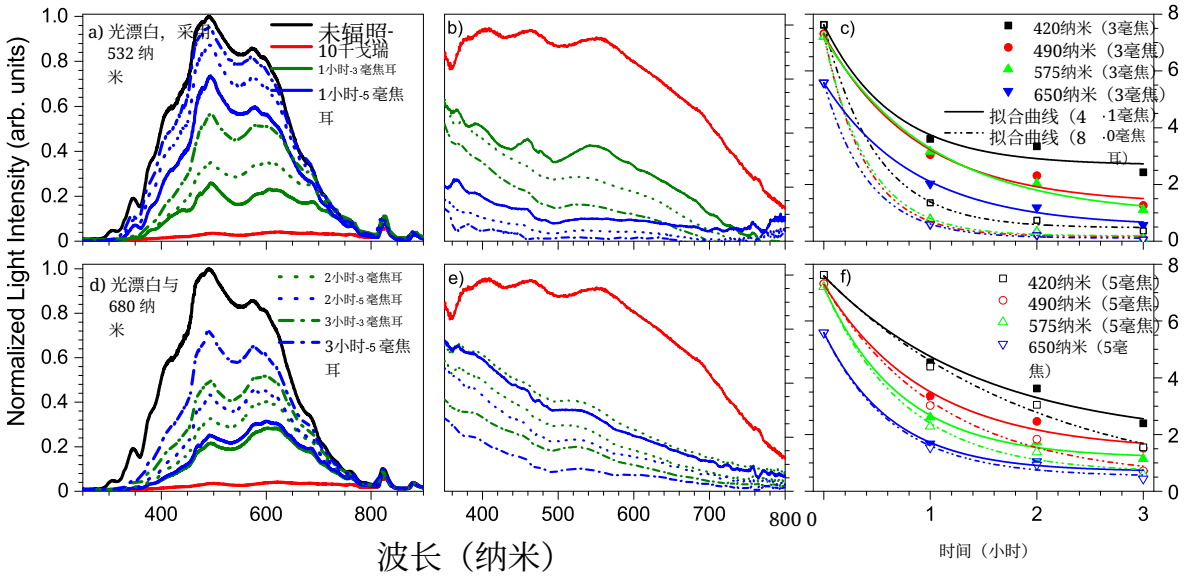


图2 非辐照和经10千戈瑞辐照的掺镱光纤在532 纳米（a）和680 纳米（d）脉冲激光照射1小时、2小时和3小时后的归一化光强变化。光纤的辐射诱导衰减变化（b）和（e）。经532 纳米（c）和680 纳米（f）脉冲激光修复后，所选光漂白波长（420纳米、490纳米、575纳米和650纳米）处辐射诱导衰减随时间的变化。

将三种不同波长的脉冲激光器耦合入经辐射照射的光纤中。532 nm 和 680 nm 脉冲激光器的能量分别为 3毫焦 和 5毫焦。793 nm 脉冲激光器的能量仅为 3毫焦。对于每个波长，光漂白过程均使用了不同的样品。图2.a 和 d 分别显示了使用 532 nm 和 680 nm 波长进行光漂白时，从未照射（黑线）和经照射（红线）的光纤中获得的光谱。绿色和蓝色曲线分别表示光漂白 1、2 和 3小时的结果。辐射诱导衰减的变化如图 2.b 和 e 所示。在恢复过程之后，在图 2.c 和 f 所示的选定波长下，辐射诱导衰减的变化随着曝光时间和脉冲激光器能量的增加而减小。结果表明，低波长的脉冲激光器（对于 532 nm）具有较高能量。因此，辐射产生的缺陷可以通过光漂白过程在一定程度上轻易恢复（恢复水平见表 1）。电子相关色心在镱$^{2+}$中形成，同时还会形成空穴相关色心，例如铝氧空穴中心和非桥氧空穴中心。光漂白是这些过程的逆过程，可以消除色心。因此，镱$^{2+}$ 离子通过光漂白与周围配体释放的空穴重新结合（将镱$^{2+}$ 离子转化为镱$^{3+}$ 离子），同时消除铝氧空穴中心和非桥氧空穴中心等空穴相关色心 [10, 11]。这意味着，在光纤修复过程中，脉冲激光器光的能量会重新排列镱离子与其相邻配体之间的化学键。光纤辐射诱导衰减值的降低可能与局域电荷的重新排列有关，其定义为镱$^{+2}$ →镱$^{+3}$ [12]。

对于长波长（793 纳米），观察到光纤经脉冲激光照射3小时后，光透射率恢复至6.7 %-51.0 %（见表 1）。与光纤短波长处的光漂白相比，793纳米处的光漂白程度较低。光漂白程度较低的原因是：a）由于色心形成机制不同，某些色心缺陷在红外光子（793纳米）照射下无法漂白，这导致色心的特性和能级各不相同；b）所用793纳米波长的光子能量可能较低 [12]。

因此，短波长对色心的作用更有效，短波长下的光漂白过程也优于长波长下的过程 [18, 26–28]。此外，研究发现，随着脉冲激光能量的增加，光漂白效果也随之增强。正如我们的结果所示，与其他波长相比，532纳米脉冲激光能传递更高的能量，因此效果更好。

3.1 文献与光漂白机制的比较

掺镱光纤已用于高功率激光应用，其性能受辐射和高功率等环境因素的影响。在这些应用中，光纤需要使用许多小时。因此，光纤的效率会随时间推移而下降。我们知道，这些系统成本高昂，并且由于环境因素的影响，必须定期更换。文献中已研究了一些修复受损光纤的技术，例如使用连续激光照射 [20, 21]。当总剂量为 1.45 kGy 时，经过 118 小时，恢复水平为 8 %- 11 % [20, 21]。在 Henschel 和 K¨ohn [18], 的研究中，掺锗光纤在接受 10千戈瑞辐射后，辐射诱导衰减达到 300dB/km；他们采用了退火过程（28 小时）和波长为 830 nm 的连续激光。最终，光纤的辐射诱导衰减降至 50 dB/km。尽管连续激光是一种有效的方法，但恢复

过程可能需要很长时间，而且所需时间会随着所受辐射剂量的增加而延长。本研究发现，由新型激光技术——光学参量放大器（OPA）系统驱动、具有宽光谱的激光系统，与连续激光相比，能够在单位时间内产生高得多的光子，从而缩短恢复时间，同时提高恢复水平。在本研究中，由新型激光技术——光学参量放大器（OPA）系统驱动、具有宽光谱的脉冲激光系统，与连续激光相比，能够在单位时间内产生高得多的光子，从而缩短恢复时间，同时提高恢复水平（恢复水平达到 30%-96%）。

4 结论

掺镱光纤广泛应用于高功率光纤激光系统等领域，并面临严苛的辐射环境。我们使用商用 Nufern 光纤分析了辐射效应（10千戈瑞）和光漂白过程。光纤经 10千戈瑞辐射照射后，使用由光学参量放大器（OPA）系统驱动、具有宽光谱的脉冲激光系统进行恢复。研究中使用脉冲激光恢复色心，同时缩短恢复时间并提高恢复水平。根据波长和照射时间，分别使用波长为 532 纳米、680 纳米和 793 纳米的脉冲激光进行测量。结果表明，掺镱光纤受脉冲激光照射的时间越长，改善效果越显著。掺镱光纤中色心的恢复水平达到 30 %-96 %。在该光纤中，波长为 532 纳米的脉冲激光产生了最大的光漂白效应。此外，结果还表明，随着脉冲激光该波长下施加能量的增加，光纤中的光漂白效应也随之增强。

致谢 本工作得到了土耳其科学技术研究委员会 TÜBİTAK 的资助（编号：120F281）。我们衷心感谢 Atakan Tekg¨ul 博士提出的建设性意见，并感谢 Ali Karatutlu 博士和 Elif Yapar Yıldırım 使用波长色散X射线谱仪测量掺镱光纤的掺杂浓度。

参考文献

[1] Friebele, E., Askins, C., Gingerich, M., Long, K.：辐射环境中的光纤波导，II。核仪器与方法物理研究B辑：束流与材料和原子相互作用 1(2-3), 355–369（1984年）https://doi.org/10.1117/12.7972434

[2] Girard, S., Kuhnhenn, J., Gusarov, A., Brichard, B., Van Uffelen, M., Ouerdane, Y., Boukenter, A., Marcandella,C.：二氧化硅基光纤的辐射效应：最新进展与未来挑战。《IEEE核科学汇刊》60(3), 2015–2036（2013年）https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2235464

[3] Koponen, J., S¨oderlund, M., Hoffman, H.J., Kliner, D., Koplow, J.：大模场面积光纤中的光致暗化测量。载于：Harter, D.J., T¨unnermann, A., Broeng,J., III, C.H. (编)《光纤激光器 IV：技术、系统与应用》，第 6453 卷，第 337–347 页。SPIE，???（2007年）。https://doi.org/10.1117/12.712545。国际光学与光子学会

[4] Koponen, J.J., S¨oderlund, M.J., Hoffman, H.J., Tammela, S.K.T.：单模掺镱石英光纤光致暗化的测量。Opt. Express 14(24), 11539–11544（2006年）https://doi.org/10.1364/OE.14.011539

[5] Morasse, B., Chatigny, S., Gagnon, Hovington, C., Martin, J.-P., Sandro, J.-P.：低光致暗化单包层掺镱光纤放大器。载于：Harter, D.J., T¨unnermann, A., Broeng,J., III, C.H.（编）《光纤激光器 IV：技术、系统与应用》，第 6453 卷，第 107–115 页。SPIE，???（2007年）。https://doi.org/10.1117/12.700529。国际光学与光子学会

[6] S¨oderlund, M.J., Ponsoda, J.J.M., Koplow, J.P., Honkanen, S.：热循环过程中光致暗化掺镱光纤的热致暗化与光谱展宽。Opt. Express 17(12), 9940–9946 (2009)https://doi.org/10.1364/OE.17.009940

[7] Piccoli,R., Robin, T., M´echin, D., Brand, T., Klotzbach, U., Taccheo, S.: 基于铝硅酸盐的掺镱激光器中采用紫外/可见光有效抑制光致暗化。载于：Ramachandran, S.（编）《光纤激光器 XI：技术、系统与应用》，第 8961 卷，第 391–396 页。SPIE，???（2014年）。https://doi.org/10.1117/12.2039013。国际光学与光子学会

[8] Manek-H¨onninger, I., Boullet, J., Cardinal, T., Guillen, F., Ermeneux, S., Podgorski, M., Doua, R.B., Salin, F.: 掺镱石英双包层大模场光纤的光致暗化与光漂白。《Opt. Express》15(4)，1606–1611（2007年）https://doi.org/10.1364/OE.15.001606[9] Piccoli, R., Gebavi, H., Lablonde, L., Cadier, B., Robin, T., Monteville, A., Le Goffic, O., Landais, D., M´echin, D., Milanese, D., Brand, T., Taccheo, S.: 采用低功率405 nm辐射抑制掺镱光纤激光器光致暗化的证据。《IEEE Photonics Technology Letters》26(1)，50–53（2014年）https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2288994[10] Cao, R., Lin, X., Chen, Y., Cheng, Y., Wang, Y., Xing, Y., Li, H., Yang, L., Chen, G., Li, J.: 532 nm泵浦在高功率掺镱光纤放大器中诱导的光致暗化抑制与光漂白。《Optics express》27(19)，26523–26531（2019年）[11] Guzman Chavez, A.D., Kir'Yanov, A.V., Barmenkov, Y.O., Il'Ichev, N.: 掺镱石英光纤在纤芯内接受977 nm和543 nm辐照时发生的可逆光致暗化与共振光漂白。《Laser Physics Letters》4(10)，734–739（2007年）https://doi.org/10.1002/lapl.200710053[12] Gebavi, H., Taccheo, S., Tregoat, D., Monteville, A., Robin, T.: 633 nm辐照对掺镱铝硅酸盐光纤光致暗化的光漂白。《光学材料快报》2(9)，1286–1291（2012年）[13] Zhao, N., Xing, Y., Li, J., Liao, L., Wang, Y., Peng, J., Yang, L., Dai, N., Li, H., Li, J.: 793 nm泵浦诱导光致暗化的掺镱 3+光纤发生光漂白。《Optics express》23(19)，25272–25278（2015年）[14] Yoo, S., Basu, C., Boyland, A.J., Sones, C., Nilsson, J., Sahu, J.K., Payne, D.: 488 nm辐照诱导掺镱铝硅酸盐光纤中的光致暗化。《Opt. Lett.》32(12)，1626–1628（2007年）https://doi.org/10.1364/OL.32.001626[15] Kuhnhenn, J., Henschel, H., K¨ohn, O., Weinand, U.: 辐射剂量测定光纤的热退火。RADECS 2004论文集，39–42（2004年）[16] Engholm, M., Jelger, P., Laurell, F., Norin, L.: 通过铈共掺杂提高掺镱光纤激光器的抗光致暗化能力。《Opt. Lett.》34(8)，1285–1287（2009年）https://doi.org/10.1364/OL.34. 001285[17] Firstov, S., Alyshev, S., Khopin, V., Melkumov, M., Guryanov, A., Dianov, E.: 掺铋锗硅酸盐光纤中的光漂白效应。《Opt. Express》23(15)，19226–19233（2015年）https://doi.org/10. 1364/OE.23.019226[18] Henschel, H., Kohn, O.: 辐照光纤能否通过光漂白再生？载于：1999年第五届欧洲辐射及其对元器件与系统影响会议。RADECS 99（目录号99TH8471），第502–507页（1999年）。https://doi.org/10.1109/RADECS.1999.858632[19] Ghahrizjani, R.T., Ameri, M., Jahanbakhsh, H., Sadeghi, H., Mohajerani, E.: 通过激光漂白快速恢复光纤传感器中的色心实现超高精度辐射剂量测定。《IEEE Sensors Journal》20(11)，5935–5942（2020年）https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2974778[20] Borman, O.M.: 中子辐射与伽马辐射对掺镱光纤的影响。技术报告，空军理工学院，赖特-帕特森空军基地，俄亥俄州，赖特-帕特森（2016年）[21] Poulin, A.: 辐射对掺镱有源光纤激光器的影响。硕士论文，空军理工学院，空军大学（2016年3月）[22] Kendir Tekg¨ul, E., Midilli, Y., C¸ami¸ci, H.C., Yapar Yıldırım, E., Karatutlu, A., Orta¸c, B.: 伽马辐射对掺镱铝磷硅酸盐光纤的影响。《Applied Physics B》128(9)，170（2022年）https://doi.org/10.1007/s00340-022-07891-y[23] Akchurin, N., Kendir, E., Yaltkaya, Damgov, J., Guio, F.D., Kunori, S.: 掺铈熔融石英光纤的抗辐射性能研究。《Journal of Instrumentation》14(03)，03020（2019年）https://doi.org/ 10.1088/1748-0221/14/03/P03020

[24] Girard , S., Alessi , A., Richard , N., Martin-Samos , L., De Michele , V., Giacomazzi , L., Agnello , S.,

Francesca, D.D., Morana, A., Winkler, B., Reghioua, I., Paillet, P., Cannas, M., Robin, T., Boukenter, A., Ouerdane, Y.: 二氧化硅基光纤中辐射诱导点缺陷综述。《物理评论》**4**, 100032 (2019年) https://doi.org/10.1016/j.revip.2019.100032[25] Giacomazzi, L., Martin-Samos, L., Alessi, A., Valant, M., Gunturu, K.C., Boukenter, A., Ouerdane, Y., Girard, S., Richard, N.: 玻璃态二氧化硅中p缺陷的光吸收光谱。《光学材料快报》**8**(2), 385–400 (2018年) https://doi.org/10.1364/OME.8.000385[26] Peng, T.-S., Huang, Y.-W., Wang, L.A., Liu, R.-Y., Chou, F.-I.: 532纳米和976纳米激光器对掺铒光纤及其光源中伽马辐射诱导衰减的光退火效应。《IEEE核科学汇刊》**57**(4), 2327–2331 (2010年) https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2049372[27] Peng, T.-S., Liu, R.-Y., Lin, Y.-C., Mao, M.-H., Wang, L.A.: 使用最优光退火光源对商用现成掺铒光纤进行抗辐射加固。载于：国际空间光学会议—ICSO 2016, 卷10562，页386–390 (2017年)。https://doi.org/10.1117/12.2296061. SPIE[28] Firstov, S.V., Alyshev, S.V., Firstova, E.G., Melkumov, M.A., Khegay, A.M., Khopin, V.F., Guryanov, A.N., Dianov, E.M.: 掺铋锗硅酸盐光纤中光漂白对激光辐射波长的依赖性。《发光学杂志》**182**, 87–90 (2017年) https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.10.027