

Trends in Ultrashort Pulse Laser Source Technology Improvements (STO-MP-SET-308)

Executive Summary

INTRODUCTION

Ultrashort pulse lasers offer the ability to access a wider range of physics through nonlinear actions on time scales of 10 picoseconds or less. The critical technological breakthrough that enabled ultrashort pulse lasers (USPLs) is chirped pulse amplification (CPA) developed by Mourou and Strickland, who were awarded the Nobel prize in Physics in 2019. By managing the spectral features of ultrashort pulses, CPA allows for the relatively efficient means of amplifying pulses to achieve peak power levels of gigawatts (109 W) to even petawatts (10¹⁵ W). Until the mid-2010s, the dominant USPL technology utilized titanium:sapphire (Ti:Sa) for the amplification gain media which provided for very capable laser in experimental laboratories but proved challenging to implement in a transportable system. However, increasing interest in femtosecond laser machining (FLM) has seen industrial applications driving new USPL source technologies appropriate for a factory floor. This has been highlighted by the rapid development of more powerful systems based on ytterbium (Yb) gain materials that typically sacrifice Ti:Sa's ability to generate sub-100 fs pulses for much higher repetition rates beyond 1 kHz. These USPLs are compact, sealed, push-button systems that are more resilient against thermal, humidity, and vibration instabilities. The translation of FLM-ready USPLs for defense applications is one of the main thrust of the NATO SET-303 RTG. To that end, the SET-308 workshop was constructed and hosted in early 2022 to gather information from industrial partners to understand the near term (5 year) expectations for improved USPLs and to understand what hurdles are perceived that NATO members could address to propel the state-of-the-art.

BACKGROUND

USPLs offer the ability to access unique nonlinear interactions with matter that could change the way directed energy is viewed for defense purposes. Of note, nonlinear propagation has generated broad scientific interest in filamentation. Filamentation is the effect where a USPL with sufficient peak power (typically GWs or greater) propagating through a medium like the atmosphere experiences a self-focusing effect known as the Kerr effect. As the pulse is focused to greater intensities, it is able to ionize air molecules creating a localized plasma. Plasma also has a nonlinear interaction with the laser pulse wherein it acts as a negative lens and defocuses. Under the right conditions, the self-focusing can balance the de-focusing—accounting for losses—and generate a filament that can extend for 10s to 100s of meters in air. Excellent reviews of filamentation in air are available [1-3].

Until recently, adapting USPL technology for a defense purpose was hampered by the narrow tolerances of the dominant laser gain material, Ti:Sa. A typical lab-based Ti:Sa USPL would require stringent control of temperature (± 1 °C), humidity, and vibration with most of the elements and optical path being in free space. As well, Ti:Sa lends itself to very short pulse durations with modest pulse energies (< 1 J) but the trade-off is typically limited pulse repetition rate. Case in point, Coherent's Astrella series of USPLs pushed Ti:Sa technology towards a more compartmentalized, sealed system offering up to 9 W average power at 1 kHz repetition rate and sub-30 fs pulse durations using water-based cooling. Pushing Ti:Sa technology beyond 10 W average power would require much more cumbersome and power-hungry cryogenic cooling.

Nevertheless, there are examples of Ti:Sa technology being implemented in transportable systems. Notably, the European Teramobile [4] program successfully built a 3.5 W average power system in a transportable container that performed outdoor propagation experiments across Europe and the United States.

Recently, improvements in solid state USPLs using novel gain materials has seen exponential growth in terms of average power and repetition rate. The main driver has been advancements in Yb-based gain media that allow for accessing average powers beyond 10 W with repetition rates up to 100 kHz. The drawbacks are modest pulse energies (typically less than 10 J) and pulse durations on the order of 0.2 to 10 ps. Nevertheless, this technological advancement has resulted in commercial available USPLs with average powers over 1 kW [5]. The main laser architectures enabling this advancement are coherent beam combination (CBC) of fiber lasers and thin disk formats. The former readily allows for scaling to higher power levels though the cooling requirements become cumbersome. The latter has proven to be flexible and also seen novel implementation of cooling techniques to allow for increasing power output. In addition, recent reports detail the demonstration of over 10 kW average power out from a CBC system [6]. As well, longer wavelength sources have also seen growth in average power, most notably thulium (Tm) based systems operating in the 1.8-2 μm range. Commercial Tm-based fiber system using CBC are available with average power outputs of up to 1kW [7].

Arguably, the main driver for the development of this new generation of USPLs has been the Extreme Light Infrastructure (ELI) program sponsored by the European Union [8]. ELI's goal is to build world-leading laser facilities in Romania, Czechia, and Hungary by pulling together academia and industry from across the EU. The almost €900 million investment has enabled the development of these high energy USPLs. Though ELI is building "big science" capabilities, the very nature of these new USPL architectures has resulted in lower size, weight, and power (SWaP) metrics compared to Ti:Sa systems. While the SWaP metrics have improved 2-3 orders of magnitude, further improvements are needed to be comparable to current HEL systems.

Another key driver of the technology is FLM which harnesses USPLs for ablation with precise clean cuts of materials that induce very little heat-associated effects overall on the bulk target. The general requirements of FLM are mainly to have sufficient pulse energy at high repetition rates to allow for quick cutting of material in an industrial setting. FLMs utilize a new level of industrial grade USPLs that are far more compact and ruggedized than what was practical with Ti:Sa systems. While these requirements have pushed USPLs in the right direction for defense applications, they do not necessarily offer the higher peak powers that would be needed for filamentation, for example. Nevertheless, FLM has proven the versatility of these next generation USPLs to provide turn-key solutions for usage in a wide variety of environments.

WORKSHOP DEVELOPMENT

In order to have a better understanding of what further developments in USPLs can be expected and how the NATO members can influence that growth, a workshop was proposed to engage with Industry. Due to the SARS-CoV-2 pandemic, scheduling an in-person workshop proved to be challenging. The original intent was to host the workshop as part of a larger optics/photonics conference, particularly in Europe given the advancement in USPLs originating from there. However, the need to host the workshop in time to provide a deliverable to SET-303 narrowed down the options and eventually SPIE's Photonics West conference was selected. Photonics West [9], hosted in San Francisco, CA, is an excellent venue that, in pre-pandemic times, would draw a global audience showcasing the latest developments in photonics and included an immense vendor showcase. However, due to travel limitations, the attendance at Photonics West 2022 was much reduced and notably had minimal participation from East Asian countries.

In developing the workshop, a call was sent out to industry and academic partners. A total of 6 responses were received and reviewed by the workshop committee, all were in alignment with the goals of the workshop and invited to participate. SPIE provided a room and support to host a 4-hour long workshop with

briefs from the 6 participants followed by a panel discussion and question and answer participation with the audience. However, due to last minute travel and pandemic concerns, 2 of the participants were not able to attend. Following this summary, the slides from the 4 participants are included plus the brief delivered at the SET-303 annual meeting held in SEP 2022. In total, the audience at the workshop included approximately 40 participants from the wider Photonics West attendees.

KEY TAKEAWAYS

From the presentations and discussions, a number of key takeaways were identified of relevance to the SET-303 mission. As noted above, new laser gain material and architectures have resulted in higher power USPLs, however, efficient pulse compression to sub 50 fs remains a significant challenge with these materials. A number of technical pain points were highlighted that could prove challenging in the next few years. These include the availability of fiber components that can handle both high average powers and peak powers, development of large core area fibers, improving damage threshold of optics and optical coatings, and optimizing the complexity of CBC architectures. Further, larger scale challenges include manufacturing larger optics and a broader industrial base, enable and drive communication and collaboration across Industry, and understanding the limits of pulse compression with an outlook for any new techniques. In addition, the discussion included what the next generation of USPL could look like for defense applications and systems. Generally, the notion of a compact and modular design would be advantageous and be a significant departure from laboratory based systems. In addition, improving the durability of USPLs for operation in a wide variety of environments will be a key challenge and include stress testing of components and sub-systems. The capability to perform this type of testing is not commonplace across industry.

The discussion then shifted to where NATO members could make strategic investments to support and accelerate the USPL industrial base. Developing high damage threshold fibers that can accommodate sufficient bandwidth for ultrashort pulses will be key for harnessing even higher powers from CBC lasers. Using targeted investment in Academia can provide critical, novel techniques and technologies for future USPLs while also growing the next generation of scientist and engineers. Artificial intelligence and machine learning can prove useful for augmenting current capabilities by analyzing and synthesizing data towards more capable USPLs and higher performing gain material. Finally, in general, improving and optimizing optical components will be needed to scale up production of USPLs for large-scale implementation of USPLs in defense missions.

CONCLUSION

The recent advancements in high average power USPLs lends itself to renewed evaluation of the technology for defense applications. The new generation of USPL gain materials and architectures enabled the production of commercial systems offering over 1 kW of power while also improving SWaP metrics. Coupled with the other efforts in SET-303, the RTG panel will be able to offer the NATO participants an updated viewpoint of USPLs for defense applications. As the RTG panel develops concepts for new, follow-on activities, the information gathered for the SET-308 workshop provides key areas for future collaboration between the Nations and critical technologies to pursue in collaboration with Academia and Industry. The future for USPLs remains bright and the prospect for significant positive impacts on NATO's defense mission continue to grow but require concerted efforts to advance the technology.

REFERENCES

1. A. Couairon, A. Mysyrowicz, *Phys. Rep.* 441, p. 47–189, 2007.
2. V. P. Kandidov, et al. *Quant. Electron.* 39, p. 205—228, 2009.
3. L. Bergé, et al. *Rep. Prog. Phys.* 70, p. 1633–1713, 2007.
4. H. Wille, et al. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 20, p. 183–190, 2002.
5. <https://www.afs-jena.de/products/high-power-ultrafast-ytterbium/>
6. M. Müller, et al., *Opt. Lett.*, 45, p. 3083—3086, 2020.
7. <https://www.afs-jena.de/products/ultrafast-thulium/>
8. <https://eli-laser.eu/>
9. <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west>

Tendances des améliorations de la technologie des sources laser à impulsions ultracourtes

(STO-MP-SET-308)

Synthèse

INTRODUCTION

Les lasers à impulsions ultracourtes offrent la possibilité d'accéder à un éventail plus large de la physique grâce à des actions non linéaires sur des échelles de temps inférieures ou égales à 10 picosecondes. La percée technologique qui a permis l'apparition des lasers à impulsions ultracourtes (USPL) est l'amplification à dérive de fréquence (CPA) développée par Mourou et Strickland, qui ont reçu le prix Nobel de physique en 2019. Puisqu'elle gère les caractéristiques spectrales des impulsions ultracourtes, la CPA permet d'amplifier les impulsions de manière relativement efficace, pour atteindre des niveaux de puissance de crête mesurés en gigawatts (109 W) voire en pétawatts (1015 W). Jusqu'au milieu des années 2010, la technologie USPL dominante utilisait des milieux amplificateurs en titane-saphir (Ti:Sa), qui fournissaient un laser très performant dans les laboratoires expérimentaux, mais s'est révélée difficile à mettre en œuvre dans un système transportable. Cependant, en raison de l'intérêt croissant pour l'usinage par laser femtoseconde (FLM), les applications industrielles sont devenues un moteur de nouvelles technologies de source USPL adaptées aux ateliers. Cela a été mis en évidence par le développement rapide de systèmes plus puissants utilisant des matériaux à gain à base d'ytterbium (Yb), qui sacrifient généralement la capacité du Ti:Sa à générer des impulsions de moins de 100 fs, au profit de fréquences de répétition beaucoup plus élevées, dépassant 1 kHz. Ces USPL sont des systèmes compacts, scellés et à bouton-poussoir, plus résistants aux variations de vibrations, de température et d'humidité. La traduction des USPL compatibles avec le FLM en applications de défense est l'un des principaux motifs de la création du RTG SET-303 de l'OTAN. Dans ce but, le séminaire SET-308 a été mis sur pied et animé début 2022 pour rassembler des informations émanant de partenaires industriels afin de comprendre les attentes à court terme (5 ans) en matière d'amélioration des USPL et ce qui bloque la progression de l'état de la technique selon les membres de l'OTAN.

CONTEXTE

Les USPL offrent la possibilité d'accéder à des interactions non linéaires uniques avec la matière, interactions susceptibles de changer la manière dont l'énergie dirigée est considérée à des fins de défense. Il convient de noter que la propagation non linéaire a suscité un grand intérêt scientifique pour la filamentation. La filamentation est le fait pour un USPL ayant une puissance de crête suffisante (généralement mesurée en GW ou supérieure) de se propager dans un milieu comme l'atmosphère en subissant un effet d'autofocalisation appelé effet Kerr. Comme l'impulsion est concentrée à des intensités plus élevées, elle est capable d'ioniser les molécules d'air en créant un plasma localisé. Le plasma a également une interaction non linéaire avec l'impulsion laser, dans laquelle il agit comme une lentille divergente et défocalise le laser. Dans les bonnes conditions, l'autofocalisation peut équilibrer la défocalisation, en tenant compte des pertes, et produire un filament d'une longueur allant de quelques dixièmes à quelques centièmes de mètres dans l'air. D'excellentes études sur la filamentation dans l'air sont disponibles [1-3].

Jusqu'à récemment, l'adaptation de la technologie USPL à des fins de défense était entravée par les tolérances étroites du matériau à gain laser dominant, le Ti:Sa. Un USPL Ti:Sa typique de laboratoire nécessite un contrôle strict de la température (± 1 °C), de l'humidité et des vibrations, la plupart des éléments

et du trajet optique se trouvant dans l'espace libre. Le Ti:Sa se prête également à des durées d'impulsion très courtes avec des énergies d'impulsion modérées (< 1 J), mais en contrepartie, la fréquence de répétition d'impulsion est généralement limitée. Dans le cas présent, la série Astrella d'USPL de Coherent a poussé la technologie Ti:Sa vers un système scellé plus compartimenté, offrant une puissance moyenne allant jusqu'à 9 W, avec une fréquence de répétition de 1 kHz et des durées d'impulsion inférieures à 30 fs grâce à un refroidissement à l'eau. Pousser la technologie Ti:Sa au-delà d'une puissance moyenne de 10 W nécessiterait un refroidissement cryogénique beaucoup plus encombrant et gourmand en énergie. Néanmoins, il existe des technologies Ti:Sa mises en œuvre dans des systèmes transportables. Le programme européen Teramobile [4] a notamment construit avec succès un système d'une puissance moyenne de 3,5 W dans un conteneur transportable, qui a réalisé des expériences de propagation en environnement extérieur en Europe et aux États-Unis.

Récemment, les USPL à semi-conducteurs utilisant de nouveaux matériaux à gain ont connu une croissance exponentielle de leur puissance moyenne et de leur fréquence de répétition. Cela est principalement dû aux progrès des milieux à gain à base d'Yb, qui permettent d'accéder à des puissances moyennes dépassant 10 W, avec des fréquences de répétition jusqu'à 100 kHz. Les inconvénients sont une énergie d'impulsion modérée (généralement inférieure à 10 J) et une durée d'impulsion de l'ordre de 0,2 à 10 ps. Néanmoins, cette avancée technologique a abouti à la mise sur le marché d'USPL d'une puissance moyenne supérieure à 1 kW [5]. Les principales architectures laser permettant cette avancée sont la combinaison de faisceaux cohérents (CBC) des lasers à fibre et les formats à disques minces. La CBC permet de passer facilement à des niveaux de puissance plus élevés, même si les exigences de refroidissement deviennent complexes. Les formats à disques minces se sont révélés flexibles et ont également bénéficié d'une mise en œuvre inédite des techniques de refroidissement, qui permet d'augmenter la puissance de sortie. En outre, la production d'une puissance moyenne supérieure à 10 kW a récemment été démontrée à partir d'un système CBC [6]. La puissance moyenne des sources de longueur d'onde supérieure a également augmenté, en particulier celle des systèmes à base de thulium (Tm) fonctionnant dans la plage 1,8-2 μm . Les systèmes de fibre à base de Tm utilisant la CBC et disponibles dans le commerce ont une puissance moyenne allant jusqu'à 1 kW [7].

Le principal moteur du développement de cette nouvelle génération d'USPL a sans doute été le programme Extreme Light Infrastructure (ELI) parrainé par l'Union européenne [8]. L'objectif d'ELI est de construire des installations laser de pointe en Roumanie, en Tchéquie et en Hongrie, en réunissant des universités et des industriels de toute l'UE. Un investissement de près de 900 millions d'euros a permis le développement de ces USPL à haute énergie. Bien qu'ELI développe des capacités de « mégascience », la nature même de ces nouvelles architectures USPL a abouti à des mesures de taille, de poids et de consommation (SWaP) inférieures à celles des systèmes Ti:Sa. Bien que les mesures SWaP se soient améliorées de 2 ou 3 ordres de grandeur, d'autres améliorations sont nécessaires pour que les systèmes deviennent comparables aux systèmes HEL actuels.

Un autre moteur clé de la technologie est le FLM, qui exploite les USPL pour l'ablation et produit des coupes nettes et précises de matériaux induisant dans l'ensemble très peu d'effets associés à la chaleur sur la cible pleine. Les exigences générales du FLM consistent principalement à disposer d'une énergie d'impulsion suffisante à une fréquence de répétition élevée pour permettre une découpe rapide du matériau dans un environnement industriel. Les FLM utilisent des USPL de qualité industrielle d'un niveau inédit, qui sont beaucoup plus compacts et renforcés que les systèmes Ti:Sa courants. Bien que ces exigences aient poussé les USPL dans la bonne direction pour les applications de défense, elles n'offrent pas nécessairement les puissances de pointe élevées nécessaires à la filamentation, par exemple. Néanmoins, le FLM a prouvé la polyvalence de ces USPL de nouvelle génération, qui sont des solutions clés en main dans une grande variété d'environnements.

ÉLABORATION DU SÉMINAIRE

Afin de mieux comprendre l'évolution future des USPL et la manière dont les membres de l'OTAN peuvent influencer cette évolution, un séminaire a été proposé pour engager la discussion avec le monde industriel. En raison de la pandémie de SARS-CoV-2, la planification d'un séminaire en présentiel s'est avérée difficile. L'objectif initial était d'organiser le séminaire dans le cadre d'une plus large conférence sur l'optique/photonique, en particulier en Europe, compte tenu de l'avancée des USPL dans cette région. Cependant, la nécessité d'accueillir le séminaire à temps pour fournir des éléments livrables au SET-303 a réduit les options et la conférence Photonics West de SPIE a finalement été sélectionnée. Photonics West [9], hébergé à San Francisco, en Californie, est un excellent événement qui, avant la pandémie, attirait un public mondial en présentant les derniers développements de la photonique et constituait une immense vitrine pour les fournisseurs. Cependant, en raison des restrictions de déplacement, la participation à Photonics West 2022 a été nettement réduite et a notamment enregistré une participation minimale des pays d'Asie de l'Est.

Lors de l'élaboration du séminaire, un appel a été envoyé aux partenaires de l'industrie et du monde universitaire. Au total, 6 réponses ont été reçues et examinées par le comité du séminaire ; toutes étant conformes aux objectifs du séminaire, elles ont été invitées à participer. SPIE a fourni une salle et un soutien pour animer un séminaire de 4 heures incluant des présentations des 6 participants, puis une discussion de groupe et une séance de questions et réponses avec le public. Néanmoins, des problèmes de dernière minute liés aux déplacements et à la pandémie ont empêché 2 des participants de se rendre au séminaire. À la suite du présent résumé, les diapositives des 4 participants sont incluses, ainsi que les informations délivrées lors de la réunion annuelle du SET-303 qui s'est tenue en septembre 2022. Au total, le public du séminaire comprenait environ 40 participants issus du public de Photonics West dans son ensemble.

POINTS CLÉS À RETENIR

Un certain nombre de points clés des présentations et des discussions ont été jugés importants pour la mission du SET-303. Comme indiqué ci-dessus, les nouveaux matériaux à gain et les nouvelles architectures laser ont produit des USPL de plus grande puissance, mais une compression d'impulsion efficace à moins de 50 fs reste un défi important avec ces matériaux. Un certain nombre de problèmes techniques qui pourraient s'avérer délicats au cours des prochaines années ont été mis en évidence. Il s'agit notamment a) de la disponibilité de composants de fibre capables de supporter à la fois des puissances moyennes élevées et des puissances de crête, b) du développement de fibres ayant une âme de grand diamètre, c) de l'amélioration du seuil d'endommagement du dispositif optique et des revêtements optiques et d) de l'optimisation de la complexité des architectures CBC. Par ailleurs, les défis à plus grande échelle incluent la fabrication de plus grands dispositifs optiques et une base industrielle plus large, la mise en place et le pilotage de la communication et de la collaboration dans toute l'industrie, ainsi que la compréhension des limites de la compression d'impulsion dans la perspective de nouvelles techniques. En outre, la discussion a évoqué ce à quoi pourrait ressembler la prochaine génération d'USPL pour les applications et systèmes de défense. De façon générale, la notion de conception compacte et modulaire serait avantageuse et se démarquerait sensiblement des systèmes de laboratoire. Qui plus est, l'amélioration de la durabilité des USPL pour qu'ils fonctionnent dans une grande diversité d'environnements constituera un défi essentiel et inclura des essais sous contrainte des composants et des sous-systèmes. La capacité à effectuer ce type d'essais n'est pas répandue dans l'industrie.

La discussion a ensuite porté sur les domaines dans lesquels les membres de l'OTAN pourraient réaliser des investissements stratégiques pour soutenir et accélérer la base industrielle de l'USPL. Il sera essentiel de mettre au point des fibres à seuil d'endommagement élevé, capables de prendre en charge une bande passante suffisante pour les impulsions ultracourtes, si l'on veut exploiter les puissances encore plus élevées des lasers CBC. L'utilisation d'investissements ciblés dans le monde universitaire peut fournir des techniques et technologies novatrices et cruciales pour les futurs USPL, tout en permettant l'essor de la prochaine génération de scientifiques et d'ingénieurs. L'intelligence artificielle et l'apprentissage

automatique peuvent s'avérer utiles à l'augmentation des capacités actuelles, en analysant et en synthétisant les données pour produire des USPL et des matériaux à gain plus performants. Enfin, en général, il faudra améliorer et optimiser les composants optiques pour augmenter la production d'USPL afin de mettre en œuvre les USPL à grande échelle dans des missions de défense.

CONCLUSION

Les récents progrès des USPL ayant une puissance moyenne élevée invitent à réévaluer la technologie pour les applications de défense. La nouvelle génération de matériaux à gain et d'architectures d'USPL a permis la production de systèmes commerciaux offrant plus de 1 kW de puissance, tout en améliorant les mesures SWaP. En tenant compte des autres travaux du SET-303, le RTG sera en mesure d'offrir aux participants de l'OTAN un point de vue actualisé sur les USPL pour les applications de défense. Alors que le RTG élabore des concepts en vue de nouvelles activités de suivi, les informations recueillies pour le séminaire SET-308 indiquent les domaines clés de la future collaboration entre les pays et les technologies critiques à suivre en collaboration avec le monde universitaire et l'industrie. L'avenir des USPL reste radieux et la perspective d'effets positifs et sensibles sur la mission de défense de l'OTAN continue de s'élargir, mais nécessite des efforts concertés pour faire progresser la technologie.

RÉFÉRENCES

1. A. Couairon, A. Mysyrowicz, *Phys. Rep.* 441, p. 47–189, 2007.
2. V. P. Kandidov, et al. *Quant. Electron.* 39, p. 205—228, 2009.
3. L. Bergé, et al. *Rep. Prog. Phys.* 70, p. 1633–1713, 2007.
4. H. Wille, et al. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 20, p. 183–190, 2002.
5. <https://www.afs-jena.de/products/high-power-ultrafast-ytterbium/>
6. M. Müller, et al., *Opt. Lett.*, 45, p. 3083—3086, 2020.
7. <https://www.afs-jena.de/products/ultrafast-thulium/>
8. <https://eli-laser.eu/>
9. <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photronics-west>