

Lasers solides pompés par diode émettant des impulsions picosecondes à haute cadence dans l'ultraviolet

F. Balembois¹, S. Forget¹, D. Papadopoulos¹, F. Druon¹, P. Georges¹,
P.-J. Devilder² et L. Lefort²

¹ *Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, UMR 8501, Centre Universitaire,
Bât. 503, 91403 Orsay Cedex, France*

e-mail : francois.balembois@iota.u-psud.fr

² *JDS Uniphase, 31 chemin du Vieux Chêne, 38941 Meylan, France*

Résumé. De nombreuses applications requièrent des sources lasers impulsionsnelles ultraviolettes, présentant des durées d'impulsion et des cadences spécifiques. Grâce à l'utilisation de structures d'oscillateurs et d'amplificateurs originales il est possible de réaliser de telles sources à partir de lasers solides pompés par diodes et de profiter ainsi de la compacité, de l'efficacité et de la robustesse de ces sources. Nous présentons ici la réalisation d'un laser à verrouillage de modes et d'un microlaser déclenché permettant d'obtenir des impulsions ultraviolettes picosecondes à une cadence de quelques MHz en vue d'application à la microscopie de fluorescence résolue en temps, ainsi que la mise en œuvre pour le traitement des matériaux d'un système oscillateur-amplificateur produisant plus de 600 mW de rayonnement UV à 266 ou 355 nm avec des impulsions sub-nanosecondes.

1. INTRODUCTION

Les sources laser UV sont des composants clefs pour un grand nombre d'applications, depuis le traitement des matériaux (photo-ablation, photo-polymérisation, réparation de pistes sur des circuits intégrés) jusqu'à la biologie (comptage de cellules, analyse par fluorescence). Il faut généralement disposer d'impulsions très courtes (10^{-10} s), à cadence élevée (pour la rapidité de l'analyse ou du traitement). La gamme de cadence visée se situe selon les applications entre plusieurs dizaines de kHz (traitement des matériaux) et quelques MHz (fluorescence résolue en temps pour la biologie).

Quelque soit le domaine considéré, les exigences d'efficacité (rendement électrique-optique), de durée de vie et de compacité sont importantes. Les sources laser pompées par diodes réunissent l'ensemble de ces avantages : elles sont donc des candidates de choix pour ces applications, qui utilisent traditionnellement des lasers à gaz comme les lasers HeCd, les lasers à argon ionisé ou les lasers à excimère. Les sources laser solides développées ici sont basées sur des cristaux dopés au néodyme (Nd :YVO₄) pompés par diode à 808 nm et émettant à 1064 nm ; des étages de conversion de fréquence utilisant des cristaux non-linéaires permettent ensuite d'atteindre l'UV (355 nm et 266 nm). Le régime impulsional est obtenu soit par un régime de fonctionnement déclenché, soit par la synchronisation en phase des modes de la cavité laser : dans les deux cas, les systèmes mis en place sont entièrement passifs pour diminuer la complexité de l'ensemble.

Dans une première partie, on s'intéressera aux applications de ces sources dans le domaine de la biophotonique où on verra que les impulsions produites doivent être courtes (sub-nanosecondes) et à une cadence de quelques MHz. Pour obtenir ce fonctionnement, les cavités que nous avons développées ont des dimensions extrêmes : quelques centaines de microns dans le cas du laser déclenché et une centaine de mètres dans le cas du laser à modes synchronisés en phase. Nous nous intéresserons dans une seconde partie aux applications industrielles dans le domaine du traitement des matériaux : dans ce cadre, la cadence peut être réduite à quelques dizaines de kHz mais l'énergie des impulsions doit

être importante. Nous décrirons dans ce cadre la mise en place d'un système oscillateur-amplificateur performant permettant de répondre à ce nouveau cahier des charges.

2. SOURCES UV POUR LA BIOLOGIE

Les milieux biologiques étudiés par des technique de fluorescence sont la plupart du temps sensible dans l'UV ou le bleu, entre 250 et 450 nm. De plus, la cartographie des temps de vie de fluorescence des espèces étudiées permet de compléter très utilement les renseignements obtenus par simple imagerie de fluorescence. On assiste donc à la mise en œuvre de plus en plus fréquente de systèmes d'analyse de fluorescence résolus en temps, nécessitant des source lasers ultraviolettes et impulsionsnelles spécifiques. En effet, les temps de vie de fluorescence susceptibles d'être rencontrés sont très variés (de quelques centaines de picosecondes à plusieurs dizaines de nanosecondes), ce qui impose un fonctionnement temporel particulier au laser d'excitation. Ainsi pour être capable d'étudier des temps de vie courts, il est nécessaire de disposer d'impulsions encore plus courtes : la source laser doit donc être capable de produire des impulsions picosecondes. D'autre part, pour étudier des temps de vie longs, il faut avoir un certain délai entre deux impulsions d'excitation consécutives : ce délai doit être le plus court possible (pour augmenter la vitesse d'acquisition) tout en étant suffisamment long pour laisser le temps à l'électronique de détection de traiter les informations avant l'arrivée de l'impulsion suivante. On estime généralement que le délai entre deux impulsions doit être (en ordre de grandeur) 4 à 5 fois plus long que le temps de vie de fluorescence à étudier. Pour des temps de vie longs - plusieurs dizaines de nanosecondes - il est donc nécessaire d'avoir une période de plusieurs centaines de nanosecondes, ou encore un taux de répétition du laser de quelques MHz.

2.1 « Hectolaser »

La première méthode pour rendre un laser impulsif est le verrouillage des modes en phase. Cette technique permet d'obtenir des impulsions d'autant plus courtes que la largeur spectrale de gain du matériau laser est importante : pour des cristaux dopés par l'ion Néodyme, la durée typique des impulsions obtenues est de quelques picosecondes. Le taux de répétition est quant à lui exclusivement fixé par la longueur de la cavité : il est donné par $Tr = c/2L$ où c est la vitesse de la lumière et L la longueur de la cavité. Il apparaît dès lors clairement que pour obtenir une cadence de quelques MHz il est nécessaire de construire une cavité de l'ordre d'une centaine de mètres, d'où le nom « hectolaser ».

Ce type de cavité ultra-longue peut être réalisé par la mise en place d'un système de multipassages inséré dans la cavité permettant d'en augmenter la longueur sans trop faire varier son encombrement au sol. Cette technique est largement utilisée, en particulier pour réaliser des lignes à retard ou pour mesurer des absorptions faibles dans des cellules de gaz : le principe de cavités multipassages à deux miroirs a été exposé pour la première fois par Herriott et Kogelnik en 1965 [1]. Nous avons mis au point une version modifiée de ce système : il s'agit simplement de « replier » la cavité avec deux miroirs plans supplémentaires (voir figure 1). Cette configuration permet d'augmenter de façon arbitraire le nombre de passage en jouant sur l'orientation des miroirs plans. On peut ainsi faire varier à volonté la cadence du laser [2], ce qui est impossible avec une cavité « de type Herriott » classique.

Les impulsions produites, mesurées par autocorrélation, ont une durée de 16 ps. Le faisceau est spatialement monomode ($M^2 = 1,1$) et la puissance moyenne obtenue avoisine les 500 mW pour une cadence de 1,2 MHz. La puissance crête correspondante est donc de 26 kW, ce qui s'avère suffisant pour réaliser efficacement la conversion de fréquence dans des cristaux non-linéaires en simple passage. Nous obtenons ainsi une puissance moyenne de plusieurs dizaines de milliwatts à 355 nm. Cette source a été utilisée avec succès sur un montage de microscopie de fluorescence résolue en temps (Collaboration avec le Laboratoire de PhotoPhysique Moléculaire de l'Université Paris XI) pour analyser un marqueur de l'ADN (le bromure d'éthidium) caractérisé par un temps de fluorescence long quand il est intercalé dans le noyau des cellules (22 ns) et un temps court quand il est libre (1,8 ns).

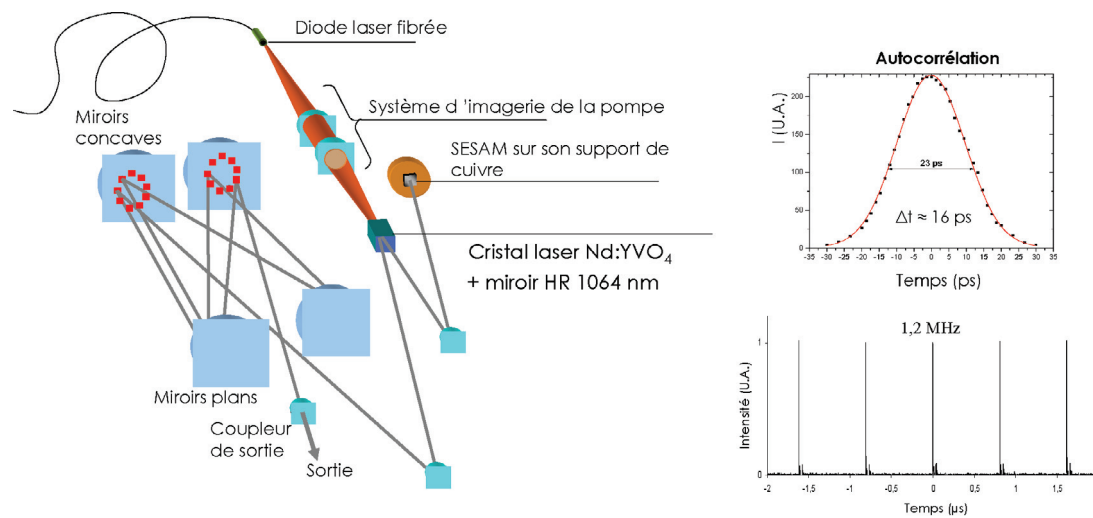


Figure 1. Schéma de l'expérience « hectolaser » (à gauche) et résultats : durée des impulsion (à droite en haut) et cadence (à droite en bas).

2.2 Microlaser

Une autre solution pour obtenir des impulsions est de travailler en régime déclenché avec un absorbant saturable passif placé dans la cavité laser : cette fois, la durée des impulsion est essentiellement régie par la longueur de la cavité et par ses pertes, tandis que la cadence est liée directement au gain du laser et au temps de vie de l'état excité. On peut montrer théoriquement [3] que pour obtenir des impulsions sub-nanosecondes il est nécessaire de réaliser un microlaser ayant une cavité longue de 200 μm environ. La solution que nous avons mis en œuvre consiste à associer un cristal de vanadate d'yttrium dopé au néodyme ($\text{Nd}:\text{YVO}_4$) à un absorbant saturable à semi-conducteur (« SESAM ») [4]. En effet le cristal de $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ présente une forte section efficace d'absorption, ce qui permet d'utiliser des cristaux fins, et une durée de vie de l'état excité relativement courte (autour de 50 μs pour un cristal dopé à 3%), ce qui le rend bien adapté à la production d'impulsions à cadence élevée. D'autre part le SESAM fait à la fois office de miroir et d'absorbant saturable, ce qui permet de réaliser une cavité très courte. Enfin, les paramètres du SESAM (notamment la quantité de pertes saturables) peuvent être choisis pour ajuster le régime de fonctionnement du laser (durée des impulsions et cadence).

Le schéma de l'expérience réalisée est présenté sur la figure 2. Les impulsions produites ont une durée de 300 ps, à une cadence continûment variable avec la puissance de pompe de 20 kHz à 1,5 MHz [5]. En raison d'effets thermiques parasites, le faisceau n'est pas limité par la diffraction et la puissance moyenne obtenue est relativement faible (autour de 50 mW pour 500 mW de pompe). Ce dernier inconvénient peut être compensé par l'utilisation d'un amplificateur tel que celui qui sera décrit dans la section 3.2. On peut alors générer facilement plusieurs dizaines de milliwatts de rayonnement ultraviolet à 355 nm ou 266 nm [5].

3. SOURCES UV POUR LE TRAITEMENT DES MATÉRIAUX

L'utilisation de sources ultraviolettes dans le domaine du traitement des matériaux se justifie de différentes manières : Tout d'abord, comme nous l'avons vu, quasiment tous les matériaux absorbent dans cette gamme de longueur d'onde. De plus, un faisceau UV au point de focalisation peut avoir un diamètre extrêmement faible (jusqu'à 400 nm environ pour un faisceau à 355 nm). Cette

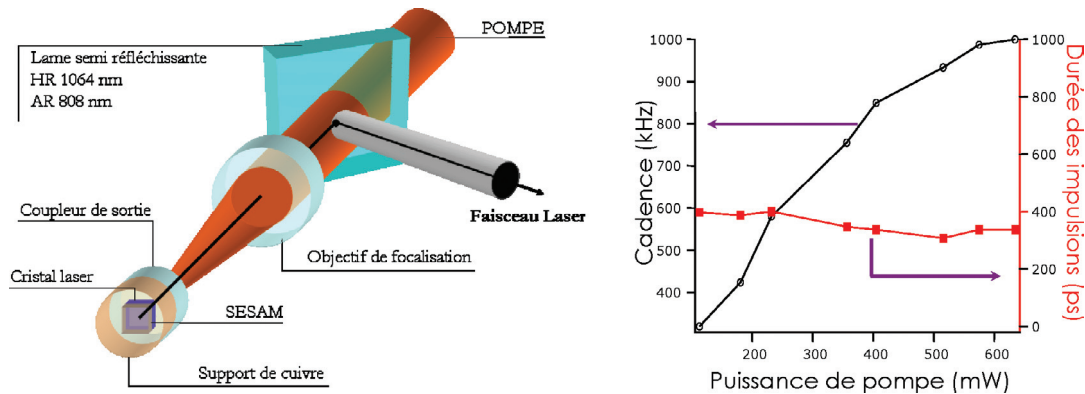


Figure 2. Schéma de l'expérience « microlaser » (à gauche) et résultats expérimentaux (à droite).

propriété est très utile pour la réparation des pistes sur les circuits électroniques par exemple. Un autre avantage concerne les actions photochimiques : photo-ablation pour faire des trous très précis dans des polymères ou photo-polymérisation pour réaliser des maquettes d'objets en trois dimensions (prototypage rapide). Dans tous les cas, il faut disposer d'impulsions très courtes (autour de la nanoseconde), à cadence élevée pour augmenter la rapidité des processus (typiquement quelques dizaines de kHz), et de forte puissance moyenne dans l'UV (plusieurs centaines de milliwatts). Enfin, les facteurs compacité et robustesse sont capitaux dans le cadre d'une utilisation industrielle.

Nous avons choisi pour toutes ces raisons de mettre en place un système de type oscillateur-amplificateur de puissance (MOPA) afin de satisfaire au cahier des charges.

3.1 Oscillateur

L'oscillateur laser a pour rôle de produire les impulsions dans le bon régime temporel : il est basé sur le même principe que celui décrit précédemment (section 2.2). Cependant, la durée des impulsions pouvant être plus longue (typiquement 700 ps) et la cadence plus faible (40 kHz), on peut se permettre d'utiliser une cavité plus longue et un couple cristal laser - absorbant saturable plus classique (Nd :YAG/Cr :YAG, voir figure 3). Les effets thermiques étant mieux gérés dans cette structure, on gagne en robustesse, en qualité de faisceau ($M^2 = 1.1$) et en puissance moyenne de sortie (environ 130 mW pour une puissance de pompe comparable à celle de la section 2.2).

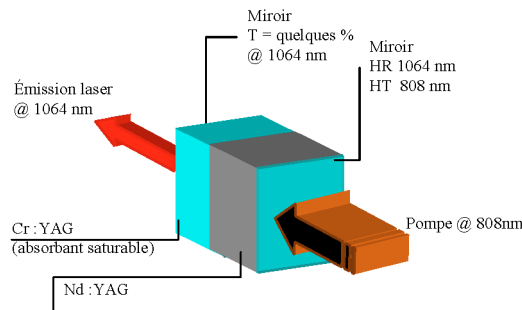


Figure 3. Microlaser Nd :YAG/Cr :YAG.

3.2 Amplificateur

L'amplificateur est le point clé : il permet d'augmenter la puissance du faisceau infrarouge jusqu'à un niveau suffisant pour permettre d'obtenir après deux étages de conversion de fréquence plusieurs centaines de milliwatts de rayonnement ultraviolet. Nous avons pour cela défini une structure originale d'amplification : grâce à une utilisation des 3 dimensions de l'espace pour faire passer le faisceau à amplifier dans le milieu à gain, on optimise le recouvrement entre la zone pompée et le trajet du faisceau à amplifier (voir figure 4) [6]. Ce module amplificateur combine à la fois un fort rendement d'extraction (supérieur à 30% par rapport à la puissance de pompe) et un gain élevé (de l'ordre de 100 pour une puissance moyenne de sortie de 6 W et supérieur à 10000 en régime petit signal). Après simple passage dans des cristaux non-linéaires massifs (LBO et BBO), nous avons obtenu une puissance moyenne supérieure à 600 mW à 355 nm et à 266 nm pour une durée de l'ordre de 500 ps (400 ps à 266 nm).

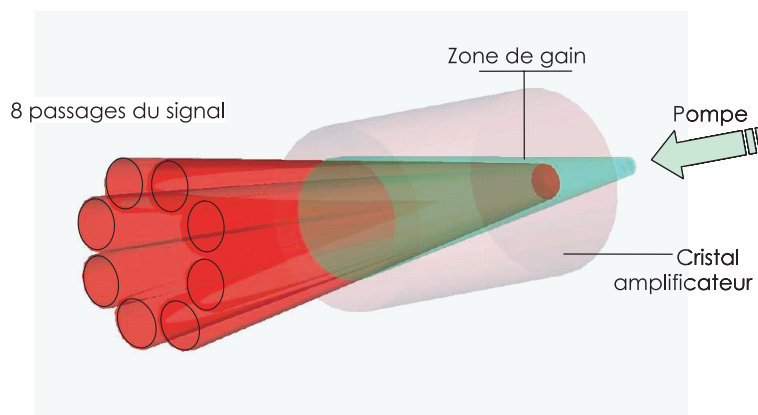


Figure 4. Schéma de principe de l'amplification tridimensionnelle.

4. CONCLUSION

Nous avons réalisé plusieurs sources ultraviolettes à 355 et 266 nm présentant des régimes de fonctionnement et des puissances adaptées à des applications de biophotonique ou de traitement des matériaux. Ainsi dans le premier cas deux sources de dimensions « extrêmes », un hectolaser et un microlaser, ont permis de produire des impulsions picosecondes à une cadence de quelques MHz afin de satisfaire aux exigences de la microscopie de fluorescence résolue en temps. Pour le traitement des matériaux, l'accent a été mis sur la puissance grâce à la mise au point d'un couple « microlaser – amplificateur 3D » performant permettant d'obtenir une puissance moyenne de plus de 600 mW rayonnement UV avec des impulsions sub-nanosecondes.

Bibliographie

- [1] D. Herriott, H. Kogelnik and R. Kompfner, in *Appl. Opt.* 3, 523 (1964).
- [2] D. Papadopoulos, S. Forget, F. Balembois, F. Druon and P. Georges, *Optics Letters* 28, pp. 1838-1840 (2003).
- [3] J.J. Zayhowski, C. Dill III, in *Opt. Lett.* 19, pp. 1427-1429 (1994).
- [4] B. Braun, F.X. Kärtner, G. Zhang, M. Moser, U. Keller in *Opt. Lett.* 22, pp. 381-383 (1997).
- [5] S. Forget, F. Balembois, G. Lucas-Leclin, F. Druon, P. Georges, in *Opt. Comm.* 220, pp. 187-192 (2003).
- [6] S. Forget, F. Balembois, P. Georges, P.-J. Devilder, in *Appl. Phys. B* 75, pp. 481-485 (2002).