

ARTICLE DE BLOGUE

Défis de conception des lasers femtosecondes industriels – Partie 3 : Amplification

Auteur: René Dionne, Gestionnaire de Gamme de Produits - Composants Laser, TeraXion

Dans cette série d'articles, j'exprime quelques-unes de mes réflexions sur les contraintes qui influencent la conception des lasers industriels femtosecondes et les paramètres qui, selon moi, doivent être pris en compte avant même de commencer le processus de conception. Je tiens à préciser que je ne suis pas un expert en conception laser ; j'ai passé les 15 dernières années à développer et commercialiser des composants pour les lasers de haute puissance et à impulsions brèves. Les observations que j'écris proviennent de ma propre expérience et des discussions que j'ai eues avec différentes parties prenantes au cours des dernières années. J'espère qu'elles mèneront à des discussions intéressantes et qu'elles aideront quelques-uns d'entre vous dans la conception de vos lasers.

La chaîne d'amplification constitue le cœur d'un laser femtoseconde industriel. La conception de la chaîne d'amplification n'est pas une tâche aisée et doit être bien planifiée, car les choix effectués à ce stade ont un impact majeur sur les autres parties du laser. Comme nous l'avons vu dans le deuxième article de la série, commencer le processus de conception à partir des exigences de l'impulsion de sortie, puis procéder à reculs aide à simplifier la conception et à éviter des itérations ultérieures. Dans cet article, j'aborde les technologies d'amplification les plus fréquemment utilisées et comment l'énergie et la puissance de crête des impulsions influencent leur utilisation dans la chaîne d'amplification.

Amplificateurs à fibre

Les fibres sont reconnues comme une solution d'amplification robuste et économique. Elles permettent une conception monolithique, réduisant les travaux de maintenance et d'alignement, comparativement aux approches employant des composants discrets avec des faisceaux en propagation libre. Les amplificateurs à fibre peuvent offrir un gain élevé par étage, généralement dans la plage de 20 à 30 dB. Cependant, leur long chemin optique et leur gain confiné limitent leur tenue en puissance de crête et l'énergie disponible par impulsion. Des effets non linéaires tels que l'automodulation de phase peuvent créer des distorsions de l'impulsion, qui dégradent la qualité de l'impulsion recomprimée. Ces caractéristiques font de la fibre un choix logique pour les premiers étages de la chaîne d'amplification, où l'énergie par impulsion demeure encore relativement faible.

Pour atténuer cette contrainte de gestion de la puissance de crête, des fibres ayant de grands diamètres de mode (MFD) et une absorption de pompe accrue ont été développées. Par contre, il peut être difficile de maintenir un fonctionnement monomode avec de grands MFDs, ce qui est essentiel pour les lasers à impulsions brèves. Si l'opération monomode n'est pas maintenue, une dégradation temporelle des impulsions peut se produire en raison de la dispersion modale. Ce phénomène génère de multiples impulsions impossibles à filtrer en sortie, car le couplage croisé entre les modes réinjecte certaines impulsions retardées dans le mode fondamental. D'autre part, l'augmentation de l'absorption de la pompe entraînera une augmentation de la charge thermique sur la fibre, de sorte que les phénomènes thermiques, tels que l'instabilité du mode transverse (TMI), doivent être pris en compte.

En règle générale, des fibres ayant des MFDs modérés (dans la plage de 10 à 25 μm) sont utilisées dans les deuxième et troisième étages de la chaîne d'amplification.

Pour augmenter davantage la tenue en puissance de crête, on peut recourir à des géométries plus avancées, comme les fibres actives coniques (*taper*), les fibres à cristal photonique (PCF) et les tiges amplificatrices (*fiber rods*).

Cependant, il y a un inconvénient évident à cette amélioration des performances : plus la fibre est complexe, plus elle devient coûteuse. Au-delà d'un certain prix, les autres options deviennent compétitives.

Amplificateurs à état solide

À très haute énergie, les amplificateurs à état solide tels que les *slabs* et les disques peuvent devenir plus abordables que les géométries de fibre avancées. Par conséquent, les amplificateurs à état solide ne doivent pas être rejetés.

Même si choisir des configurations hybrides signifie renoncer à une conception monolithique, les amplificateurs à état solide peuvent gérer beaucoup plus d'énergie que les amplificateurs à fibre avant l'apparition des effets non linéaires. Parce qu'ils peuvent gérer beaucoup plus de puissance de crête, ils réduisent le besoin d'étireurs et de compresseurs à long délais. Une paire étireur-compresseur plus compacte et plus économique suffit en général.

L'une des limitations des amplificateurs à état solide est leur chemin optique relativement court par rapport aux fibres, ce qui conduit à un gain limité. Ils peuvent être utilisés comme amplificateur à passage unique (gain de 3 à 6 dB) ou dans un arrangement multipasse. Cependant, les configurations multipasses à gain élevé nécessitent davantage de composants, ce qui entraîne des coûts plus élevés.

Dans le tableau ci-dessous, vous trouverez une comparaison des différentes technologies d'amplification et certains de leurs avantages et inconvénients.

Technologie	Plage de MFD typique	Longueur typique	Coût	Propriétés	Gestion de la puissance crête
LMA	10-25 μm	1-5 m	\$	Gain élevé, Très bonne gestion de la puissance moyenne, Gestion de l'énergie limitée	+
Gain conique	25-50 μm	1-4 m	\$\$	Gain élevé, Très bonne gestion de la puissance moyenne, Bonne gestion de l'énergie	++
PCF/Tige	30-70 μm	< 1 m	\$\$\$	Gain moyen, Bonne gestion de la puissance moyenne, Très bonne gestion de l'énergie	+++
État solide	Échelle millimétrique	100 μm à quelques cm	\$\$\$	Gain faible, Très bonne gestion de la puissance moyenne, Très bonne gestion de l'énergie	++++

Les deux exemples suivants récapitulent comment choisir les étages d'amplification en fonction des besoins de l'impulsion finale. Afin de simplifier les calculs, nous avons supposé une perte de puissance négligeable dans l'étage de compression.

Exemple 1 - Laser femtoseconde industriel d'entrée de gamme typique

Un laser femtoseconde industriel d'entrée de gamme typique avec des impulsions de 20 μJ et 250 fs fournit une puissance de crête de l'ordre de 80 MW.

Pour réduire la puissance de crête dans la chaîne d'amplification, la paire étireur/compresseur étirera typiquement l'impulsion à 500 ps.

La puissance de crête dans l'amplificateur de puissance atteindra 40 kW [$80 \text{ MW} * 250 \text{ fs} / 500 \text{ ps} = 40 \text{ kW}$].

Dans ce cas, tous les étages pourraient vraisemblablement utiliser la fibre. Il s'agirait de la chaîne d'amplification la plus économique pour ce laser.

Exemple 2 – Laser femtoseconde industriel haut de gamme

Un laser femtoseconde industriel haut de gamme avec des impulsions de 100 μJ et 200 fs fournit une puissance de crête de l'ordre de 500 MW.

En tenant compte de la paire étireur/compresseur, qui étire typiquement l'impulsion à 500 ps, la puissance crête dans l'amplificateur de puissance atteindra 200 kW. À ce niveau de puissance, différentes combinaisons d'amplificateurs pourraient convenir.

Compte tenu du niveau de puissance de crête qui passera par l'amplificateur de puissance, l'utilisation d'un amplificateur à état solide permettrait l'utilisation d'une paire étireur/compresseur plus compacte, car un délai de 200-300 ps serait suffisant.

Comparativement, avec un amplificateur à fibre des géométries de fibre avancées seraient nécessaires et la durée d'étirement devrait être augmentée à $\sim 1 \text{ ns}$. Pour atteindre ce délai, il faudrait une paire étireur/compresseur haut de gamme et moins compacte.

Étant donné que plus d'une technologie pourrait être utilisée, d'autres paramètres tels que l'encombrement du laser, le coût de l'amplificateur et la durée d'impulsion peuvent influencer le choix final.

Dans le prochain article, je discuterai de l'impact de la durée d'impulsion sur l'architecture laser. En attendant, je serais intéressé à lire vos propres réflexions sur l'amplification. Comment choisissez-vous les technologies à utiliser dans votre chaîne d'amplification ?

© 2022 TeraXion Inc. Tous droits réservés.

TeraXion Inc. se réserve le droit d'ajouter, de modifier, d'améliorer, de retirer et/ou de changer ses gammes de produits et/ou ses caractéristiques à tout moment et sans préavis. Bien que tous les efforts soient faits pour assurer l'exactitude des informations fournies sur cette fiche d'information, TeraXion Inc. ne garantit pas leur exactitude et ne peut être tenu responsable des inexactitudes ou des omissions.

TeraXion

Une compagnie de indie Semiconductor

teraxion.com

2716 rue Einstein

Québec, Québec, CANADA G1P 4S8

+1 (877) 658-8372 / ultrafast@teraxion.com