



5

10 La présente invention concerne un générateur et un procédé pour la génération d'impulsions optiques courtes à très haut contraste temporel.

Ce dispositif concerne une architecture de source de lumière pulsée.

15 D'une façon générale, on sait que les sources laser pulsées sont caractérisées par un confinement temporel de l'émission lumineuse. Pour les sources laser ultra-brèves de durées d'impulsion typiquement inférieure à  $10^{-12}$  s, ce confinement n'est que partiel car différents mécanismes physiques contribuent à former une émission de fond dont la durée peut atteindre quelques  $10^{-9}$  s.

20 Parmi ces mécanismes figurent :

- l'émission spontanée et l'émission spontanée amplifiée, présente dans tous les amplificateurs laser,
- la fluorescence paramétrique, présente dans tous les amplificateurs paramétriques optiques,
- 25 - les répliques de l'impulsion principale causées par les réflexions sur les surfaces optiques des milieux transparents traversés,
- les impulsions parasites ou résiduelles lorsque l'impulsion principale est prélevée sur un train d'impulsion,
- certains défauts d'amplitude ou de phase spectrale induits par le
- 30 système d'amplification, le système de transport de faisceau, les traitements diélectriques (couches minces réfléchives ou antireflets), ou

encore par les défauts de surface des optiques utilisées dans les systèmes spectralement dispersifs (étireur par exemple),

- les effets non linéaires qui couplent et aggravent les mécanismes précités.

5

La notion de contraste temporel désigne le rapport d'intensité entre le maximum de l'éclairement lumineux en un point (exprimé en  $W$  ou  $W/cm^2$ ) et l'éclairement parasite en ce même point mais à des instants différents. Le contraste se caractérise par différentes valeurs à différents délais par rapport à l'impulsion principale. Par exemple :  $10^4$  à -3 ps et  $10^{14}$  à -100 ps.

Le contraste est une caractéristique fondamentale des impulsions courtes ultra-lorsque le faisceau optique est focalisé, à interagir et à modifier de manière substantielle les caractéristiques de la matière. Un faible contraste au temps négatifs (c'est-à-dire avant l'impulsion) est ainsi particulièrement dommageable pour les expériences d'interaction lumière-matière car l'état de la matière est modifié avant même que l'impulsion principale n'interagisse avec celle-ci.

20 Le but de l'invention est de proposer un amplificateur paramétrique optique à dérive de fréquence synchronisé optiquement, incluant un étage de différence de fréquence, un étage de conversion, un étage de mise en forme, un étage d'amplification paramétrique et un étage final de génération de seconde harmonique.

25

L'architecture proposée combine la technique d'amplification paramétrique optique à dérive de fréquence, une différence de fréquence et une génération de seconde harmonique finale.

30 On sait que l'amplification paramétrique optique permet, dans certaines conditions, d'accroître l'énergie d'impulsions optiques dont le spectre est

particulièrement large (typiquement plusieurs centaines de  $\text{cm}^{-1}$ ). Le mécanisme d'amplification repose sur un transfert d'énergie entre une onde auxiliaire énergétique (habituellement appelée onde de pompe, de pulsation optique  $\omega_p$ ) et l'impulsion que l'on souhaite amplifier (habituellement appelée

5 onde signal, de pulsation  $\omega_s < \omega_p$ ). Cette amplification s'accompagne de la génération d'une onde complémentaire dont la fréquence optique est égale à la différence entre les fréquences des deux ondes précédentes (pulsation optique  $\omega_c = \omega_p - \omega_s$ ). A l'inverse des milieux laser, l'amplification paramétrique optique est un phénomène instantané et le gain paramétrique n'est présent que

10 lorsque l'éclairement optique de l'impulsion auxiliaire est suffisamment élevé. Lorsque l'onde de pompe est une impulsion, l'amplification paramétrique et la génération complémentaire sont confinées au voisinage de l'onde de pompe. Lorsque la technique d'amplification paramétrique est appliquée à des impulsions à dérive de fréquence, il est possible d'accroître de plusieurs ordres

15 de grandeur, typiquement plus de cinq ordres de grandeur, l'énergie d'impulsions courtes.

L'application principale de cette architecture est la génération d'impulsions optiques de durée inférieure à 50 femto-secondes à très haut contraste

20 temporel.

L'invention a pour objet un générateur d'impulsions optiques courtes à très haut contraste temporel, comprenant :

- un premier dispositif pour délivrer une ou plusieurs impulsions courtes à

25 une longueur d'onde  $\lambda_1$ , lesquelles sont amplifiées puis séparées et réparties suivant un premier bras et un deuxième bras,

- ledit premier bras contenant un premier disperseur (système optique dispersif), lequel introduit un retard optique et un allongement de la durée desdites impulsions optiques courtes,

30 - ledit deuxième bras contenant un deuxième dispositif pour décaler la longueur d'onde initiale à une longueur d'onde  $\lambda_2$ , puis un troisième

- dispositif pour amplifier et contrôler l'énergie, la durée et l'instant d'arrivée d'une des impulsions issues dudit deuxième dispositif,
- un premier non-linéariseur (dispositif optique non linéaire) placé en aval dudit premier disperseur pour combiner l'une des impulsions issues dudit premier bras avec une fraction de l'impulsion issue dudit deuxième bras, lequel premier non-linéariseur génère une impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_3$ , par génération de différence de fréquence, l'impulsion aux longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  étant bloquée par ledit premier non-linéariseur,
  - un deuxième disperseur placé en aval dudit premier non-linéariseur pour amener à sa durée minimale la durée de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_3$ ,
  - un deuxième non-linéariseur placé en aval dudit deuxième disperseur, pour générer une impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$ , l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_3$  étant bloquée par le deuxième non-linéariseur,
  - un troisième disperseur placé en aval du deuxième non-linéariseur, pour recevoir l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$  et pour contrôler le spectre, la phase spectrale et la phase absolue de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$ ,
  - un troisième non-linéariseur pour recombinaison l'impulsion issue dudit troisième disperseur à la longueur d'onde  $\lambda_4$  avec le résiduel de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_2$ , qui, par amplification paramétrique optique, accroît l'énergie de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$ ,
  - un quatrième disperseur pour amener à sa durée minimale la durée de l'impulsion issue dudit troisième non-linéariseur, à la longueur d'onde  $\lambda_4$ ,
  - un quatrième non-linéariseur pour convertir l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$  en une impulsion de longueur d'onde  $\lambda_5$ .

Avantageusement, ledit troisième dispositif permet également de bloquer périodiquement l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_2$  afin de réduire la cadence dudit premier bras.

- 5 Avantageusement, ledit troisième non-linéariseur comprend une génération de seconde harmonique.

Avantageusement, ledit troisième disperseur comprend un filtre dispersif acousto-optique programmable.

10

Avantageusement, les longueurs d'onde autres que  $\lambda_4$  sont bloquées par ledit troisième non-linéariseur. Préférentiellement, ledit troisième non-linéariseur comprend plusieurs sous-étages d'amplification paramétrique.

- 15 Avantageusement, ledit quatrième non-linéariseur est un générateur de seconde harmonique.

Avantageusement, l'invention permettra de garantir un contraste élevé voire absolu car il n'y aura aucune émission à  $\lambda_3$  et  $\lambda_4$  après le second dispositif non linéaire en l'absence d'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_2$  (pas de DFG sans pompe). Plus précisément, si la durée de l'impulsion (durée à mi-hauteur) à la longueur d'onde  $\lambda_2$  sera notée  $\tau$ , les premier et deuxième non-linéariseurs agiront comme une porte temporelle de la forme  $[-3\tau, +3\tau]$  et de contraste infini. Enfin, le quatrième non linéariseur permettra d'éliminer tout résiduel de fluorescence paramétrique dans le troisième non-linéariseur et permettra d'améliorer le profil temporel de l'impulsion et d'atténuer notablement les imperfections spectrales. Si la longueur d'onde finale  $\lambda_5$  est en outre différente de  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  et  $\lambda_4$  l'impulsion à  $\lambda_5$  ne pourra contenir trace d'éventuelles réflexions ou diffusions sur les dernières optiques.

25  
30

Avantageusement, l'invention comprendra des moyens pour :

- garantir une synchronisation stable entre les impulsions à  $\lambda_1$  et  $\lambda_3$  ainsi qu'une relation de phase stable entre ces impulsions,
- stabiliser passivement et/ou activement la phase absolue de l'impulsion aux longueurs d'onde  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  et  $\lambda_5$ ,
- 5 - garantir une compression optimale avant le quatrième non- linéairiseur. Le troisième disperseur permettra en effet d'ajuster la phase spectrale,
- ajuster la largeur spectrale des impulsions à  $\lambda_4$  au moyen du troisième disperseur et en conséquence adapter la durée des impulsions à  $\lambda_5$ ,
- transformer, toujours au moyen du troisième disperseur, la source en  
10 une source de faible largeur spectrale mais accordable,
- fonctionner à différentes cadences, et/ou
- ne pas inclure de dispositif(s) électro-optique(s) sur le premier bras.

Un mode de mise en œuvre d'un dispositif selon l'invention est décrit ci-après,  
15 à titre d'exemple non limitatif, avec référence aux dessins annexés dans lesquels :

La figure 1 est une représentation schématique de la structure d'un  
dispositif selon l'invention ;

20

La figure 2 est une représentation schématique de la structure du  
dispositif selon une première variante ;

La figure 3 est une représentation schématique de la structure du  
dispositif selon une seconde variante ; et

25

La figure 4 est une représentation schématique de la structure du  
dispositif selon une troisième variante.

30 Dans l'exemple représenté sur la figure 1, le dispositif selon l'invention comprend :

- un dispositif D1 délivrant une ou plusieurs impulsions courtes à une longueur d'onde  $\lambda_1$ . Ces impulsions sont éventuellement amplifiées puis séparées et réparties suivant deux bras, ci-nommés bras 1 et bras 2,
- le bras 1 ne modifie pas nécessairement la durée d'impulsion mais, 5  
préférentiellement, un retard optique sera introduit et la durée d'impulsion sera allongée au moyen d'un système optique dispersif S1,
- le bras 2 comprend un dispositif D2 permettant de décaler la longueur d'onde initiale à une longueur d'onde  $\lambda_2$ ,
- le bras 2 contient un dispositif D3 permettant d'amplifier et de contrôler 10  
l'énergie, la durée et l'instant d'arrivée d'une des impulsions issues de D2. Le dispositif D3 permet également de bloquer périodiquement l'impulsion pour réduire la cadence des dispositifs D1 et D2,
- l'une des impulsions issues du bras 1 est recombinaisonnée avec une fraction 15  
de l'impulsion issue du bras 2 dans un dispositif, noté NL1, qui, par génération de différence de fréquence, génère une impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_3$ . Les impulsions aux longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont bloquées par NL1,
- l'impulsion issue de NL1 à la longueur d'onde  $\lambda_3$  est dirigée vers un 20  
deuxième disperseur, noté S2, pour amener à sa durée minimale la durée de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_3$ ,
- un deuxième non-linéariseur, noté NL2, placé en aval du deuxième disperseur S2, génère une impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$ . L'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_3$  est bloquée par le deuxième non-linéariseur. Préférentiellement, le deuxième non-linéariseur NL2 comprend 25  
une génération de seconde harmonique,
- un troisième disperseur, noté S3, placé en aval du deuxième non-linéariseur NL2, reçoit l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$  et permet de contrôler le spectre, la phase spectrale et la phase absolue de l'impulsion 30  
à la longueur d'onde  $\lambda_4$ . Préférentiellement, S3 comprend un filtre dispersif acousto-optique programmable,

- l'impulsion issue de S3 à la longueur d'onde  $\lambda_4$  est recombinaison avec le résiduel de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_2$  issue du dispositif D3, dans un non-linéariseur, noté NL3, qui, par amplification paramétrique optique, accroît l'énergie de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$ . Les longueurs d'onde autres que  $\lambda_4$  sont bloquées par NL3. Préférentiellement, NL3 comprend plusieurs sous-étages d'amplification paramétrique,
- la durée de l'impulsion issue de NL3 à la longueur d'onde  $\lambda_4$  est amenée à sa durée minimale au moyen d'un disperseur S4,
- un dispositif, noté NL4, convertit l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$  en une impulsion de longueur d'onde  $\lambda_5$ . Avantageusement, NL4 sera une génération de seconde harmonique.

Dans l'exemple représenté sur la figure 2, le dispositif selon l'invention comprend, en addition à celui décrit selon la figure 1, une liaison entre le troisième dispositif D3 et le troisième dispositif non linéaire NL3.

Par ailleurs, en remplacement d'une génération de seconde harmonique, l'utilisation d'une somme de fréquence avec  $\lambda_2$  rend le processus de conversion plus efficace mais le contrôle de la phase absolue devient impossible et le contraste est moindre.

Dans l'exemple représenté sur la figure 3, le dispositif selon l'invention comprend, en addition à celui décrit selon la figure 1, un dispositif d'amplification laser supplémentaire, noté D4, mis en place en aval du dispositif D3 dans le bras B2, pour augmenter l'énergie de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_2$  avant recombinaison avec le dispositif non linéaire NL3.

Dans l'exemple représenté sur la figure 4, le dispositif selon l'invention comprend, en addition à celui décrit selon la figure 1, une liaison entre le troisième dispositif D3 et le quatrième dispositif non linéaire NL4.

En remplacement d'une génération de seconde harmonique, l'utilisation d'une somme de fréquence avec  $\lambda_2$  rend le processus de conversion plus efficace mais le contrôle de la phase absolue devient impossible.

- 5 La meilleure manière de réaliser l'invention est de considérer :
- que  $\lambda_1=1530$  nm,  $\lambda_2=1030$  nm, et  $\lambda_3=3160$  nm,
  - que D1 soit un oscillateur femto-seconde fibré à base d'Erbium, émettant à 1530 nm des impulsions de durées inférieures à 40 fs,
  - que le bras 1 contienne une ligne à retard programmable,
  - 10 - que S1 soit constitué d'un ou plusieurs matériaux massifs tel que du Silicium,
  - que D2 contienne une fibre non linéaire permettant de générer un super continuum couvrant au moins la plage 1000-1600 nm, un filtre spectral fibré sélectionnant la bande spectrale 1020-1040 nm et éventuellement,
  - 15 un ou plusieurs amplificateurs laser fibrés à base d'Ytterbium,
  - que D3 soit un amplificateur laser à dérive de fréquence basé sur des ions Ytterbium, lequel amplifie les impulsions autour de 1025-1040 nm jusqu'à un niveau d'énergie de l'ordre de 1mJ,
  - que D4 soit un amplificateur laser à dérive de fréquence basé sur des
  - 20 ions Ytterbium,
  - que NL1 soit un cristal non linéaire retourné périodiquement de type MgO :PPLN conçu pour une différence de fréquence 1030 nm->1530 nm+3160 nm et que des miroirs dichroïques et/ou un filtre en Germanium soient placés à la sortie de NL1,
  - 25 - que NL2 soit un cristal retourné périodiquement de type MgO :PPLN ou AGS conçu pour une génération de seconde harmonique 3160nm+3160nm->1580nm, et que le signal à 3160 nm soit bloqué par des miroirs dichroïques et/ou une lame de Silice,
  - que S2 soit constitué d'un ou plusieurs matériaux massifs tels que du
  - 30 Silicium,
  - que S3 contienne un filtre dispersif acousto-optique programmable,

- que NL3 contienne deux étages d'amplification paramétrique optique utilisant des cristaux retourné périodiquement de type MgO :PPLN conçu pour une amplification paramétrique de type  $1030 \text{ nm} \rightarrow 1580 \text{ nm} + 2960 \text{ nm}$ ,
- 5 - que S4 soit un constitué d'un ou plusieurs matériaux massifs, et
- que NL4 soit un cristal non linéaire de BBO taillé pour la génération de seconde harmonique de type  $1580 \text{ nm} + 1580 \text{ nm} \rightarrow 790 \text{ nm}$  et que la longueur d'onde à  $790 \text{ nm}$  soit sélectionnée par un jeu de miroirs dichroïques et/ou un filtre coloré de type Schott BG39.

## REVENDICATIONS

1. Générateur d'impulsions optiques courtes à très haut contraste temporel,

- 5 caractérisé en ce qu'il comprend :
- un premier dispositif (D1) pour délivrer une ou plusieurs impulsions courtes à une longueur d'onde  $\lambda_1$ , lesquelles sont amplifiées puis séparées et réparties suivant un premier bras (B1) et un deuxième bras (B2),
  - 10 - ledit premier bras (B1) contenant un premier disperseur (S1) lequel introduit un retard optique et un allongement de la durée desdites impulsions optiques courtes,
  - ledit deuxième bras (B2) contenant un deuxième dispositif (D2) pour décaler la longueur d'onde initiale à une longueur d'onde  $\lambda_2$ , puis un
  - 15 troisième dispositif (D3) pour amplifier et contrôler l'énergie, la durée et l'instant d'arrivée d'une des impulsions issues dudit deuxième dispositif (D2),
  - un premier non-linéariseur (NL1) placé en aval dudit premier disperseur (S1) pour combiner l'une des impulsions issues dudit premier bras (B1)
  - 20 avec une fraction de l'impulsion issue dudit deuxième bras (B2), et générer une impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_3$ , par génération de différence de fréquence, l'impulsion aux longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  étant bloquée par ledit premier non-linéariseur (NL1),
  - un deuxième disperseur (S2) pour amener à sa durée minimale la durée
  - 25 de l'impulsion issue du premier non-linéariseur (NL1), à la longueur d'onde  $\lambda_3$ ,
  - un deuxième non-linéariseur (NL2) placé en aval dudit deuxième disperseur (S2), pour générer une impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$ , l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_3$  étant bloquée par le deuxième non-
  - 30 linéariseur (NL2),

- un troisième disperseur (S3), placé en aval du deuxième non-linéariseur (NL2), pour recevoir l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$  et pour contrôler le spectre, la phase spectrale et la phase absolue de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$ ,
- 5 - un troisième non-linéariseur (NL3) pour recombinaison l'impulsion issue dudit troisième disperseur (S3) à la longueur d'onde  $\lambda_4$  avec le résiduel de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_2$ , qui, par amplification paramétrique optique, accroît l'énergie de l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$ ,
- 10 - un quatrième disperseur (S4) pour amener à sa durée minimale la durée de l'impulsion issue dudit troisième non-linéariseur (NL3), à la longueur d'onde  $\lambda_4$ ,
- un quatrième non-linéariseur (NL4) pour convertir l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_4$  en une impulsion de longueur d'onde  $\lambda_5$ .

15

2. Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le troisième dispositif (D3) comprend des moyens pour bloquer périodiquement l'impulsion à la longueur d'onde  $\lambda_2$  afin de réduire la cadence dudit premier bras (B1).

20

3. Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le troisième non-linéariseur (NL3) comprend une génération de seconde harmonique.

25

4. Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le troisième disperseur (S3) comprend un filtre dispersif acousto-optique programmable.

5. Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le troisième non-linéariseur (NL3) comprend plusieurs sous-étages d'amplification paramétrique.

30

6. Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le quatrième non-linéariseur (NL4) est une génération de seconde harmonique.

5

7. Procédé pour la génération d'impulsions optiques courtes à très haut contraste temporel, caractérisé en ce qu'il comprend une amplification paramétrique optique à dérive de fréquence synchronisé optiquement avec un laser de pompe, incluant  
10 un étage de différence de fréquence, un étage de conversion, un étage de mise en forme, un étage d'amplification paramétrique et un étage final de génération de seconde harmonique.

