

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
7 janvier 2016 (07.01.2016)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2016/001604 A1

(51) Classification internationale des brevets :

H01S 3/067 (2006.01) G02F 1/35 (2006.01)
H01S 5/00 (2006.01) B23K 26/06 (2014.01)
H01S 3/23 (2006.01) H01S 3/16 (2006.01)
H01S 3/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2015/051847

(22) Date de dépôt international :

3 juillet 2015 (03.07.2015)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

1456388 3 juillet 2014 (03.07.2014) FR

(71) Déposant : AMPLITUDE SYSTEMES [FR/FR]; 11 avenue de Canteranne, Bâtiment Méropa, Cité de la Photonique, 6 allée des Lumières, F-33600 Pessac (FR).

(72) Inventeur : COURJAUD, Antoine; 8 impasse du clos des Peyreyres, F-33850 Leognan (FR).

(74) Mandataires : CHAUVIN, Vincent et al.; Cabinet Harle et Phelip, 14-16 rue Ballu, F-75009 Paris (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,

AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasiatique (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

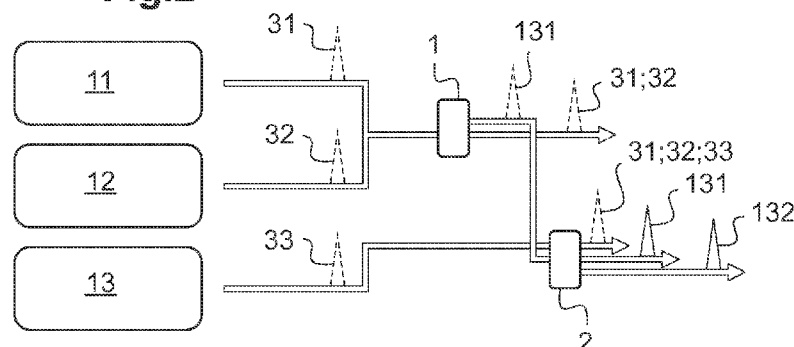
Publiée :

- avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h)

(54) Title : UV-VISIBLE LASER SYSTEM HAVING ULTRASHORT HIGH-POWER AND/OR HIGH-ENERGY PULSES

(54) Titre : SYSTÈME LASER UV-VISIBLE À IMPULSIONS ULTRA-COURTES DE FORTE PUISSANCE ET/OU DE FORTE ÉNERGIE

Fig.2



(57) Abstract : The present invention relates to a UV-visible laser system having ultrashort high-power and/or high-energy pulses. According to the invention, the laser system includes at least one non-linear optical crystal (1) suitable for receiving two separate ultrashort laser pulses (31, 32) in the visible or infrared domain, respectively emitted by two separate sources of laser pulses (11, 12), and time-synchronisation means (41, 42) adapted such that said two ultrashort laser pulses (31, 32) overlap in time and space in said non-linear optical crystal (1) with a given phase shift, and generate, by sum frequency, an ultrashort laser pulse (131) having an optical frequency equal to the sum of the respective optical frequencies of the two separate laser pulses (31, 32).

(57) Abrégé : La présente invention concerne un système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie. Selon l'invention, le système laser comprend au moins un cristal optique non linéaire

[Suite sur la page suivante]

WO 2016/001604 A1

(1) adapté pour recevoir deux impulsions laser distinctes (31, 32) ultra-courtes dans le domaine visible ou infrarouge émises respectivement par deux sources d'impulsions laser distinctes (11, 12) et des moyens de synchronisation temporelle (41, 42) adaptés de manière à ce que lesdites deux impulsions laser (31, 32) ultra-courtes se superposent temporellement et spatialement dans ledit cristal optique non linéaire (1) avec un déphasage quelconque, et génèrent, par somme de fréquence, une impulsion laser (131) ultra-courte ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques respectives des deux impulsions laser distinctes (31, 32).

SYSTEME LASER UV-VISIBLE A IMPULSIONS ULTRA-COURTES DE FORTE PUISSANCE ET/OU DE FORTE ENERGIE

Domaine technique

5 La présente invention se rapporte à un système laser à impulsions ultra-courtes, de forte puissance et/ou de forte énergie dans le domaine spectral ultraviolet-visible (UV-visible).

Plus précisément, l'invention concerne un système laser pour générer des impulsions laser UV-visible ultra-courtes utilisant un dispositif optique non linéaire de conversion de la fréquence optique pour commander la fréquence optique des impulsions laser de sortie. Dans
10 le présent document, le terme de conversion de la fréquence optique recouvre les techniques d'optique non-linéaire de génération de fréquence somme et de génération d'harmoniques multiples.

Dans le présent document, on entend par impulsions ultra-courtes des impulsions de durée picoseconde, sub-picoseconde ou femtoseconde. Plus précisément, on entend par
15 impulsion picoseconde, une impulsion lumineuse de durée comprise entre 1 ps et 20 ps et par impulsion femtoseconde, une impulsion lumineuse de durée comprise entre 1 fs et 1 ps. Un système laser à impulsions ultra-courtes émet généralement à une cadence de répétition élevée, comprise en général entre 50kHz et 10MHz. Ainsi, un système laser à impulsions ultra-courtes ayant une cadence de 1MHz émet un train d'impulsions ultra-courtes, chaque impulsion
20 étant de durée ps ou fs, avec un intervalle temporel de l'ordre de la microseconde entre impulsions successives. On entend par impulsion de forte puissance, une impulsion lumineuse ayant une puissance moyenne comprise entre 10W et 1MW et de préférence, supérieure ou égale à 10W, et par impulsion de forte énergie une impulsion lumineuse ayant une énergie comprise entre 100µJ et 1kJ et de préférence, supérieure ou égale à 1mJ. On considère ici que
25 le domaine spectral ultraviolet (UV) s'étend de 200 nm à 450 nm, le domaine visible de 450 nm à 750 nm et le domaine infrarouge de 750 nm à 1600 nm.

On entend par fréquence optique ν une variable inversement proportionnelle à la longueur d'onde λ d'un rayonnement optique, définie par l'équation : $\nu = c/\lambda$ où c représente la célérité de la lumière dans le vide.

30 Etat de la technique

Les lasers à impulsions ultra-courtes trouvent de nombreuses applications comprenant le micro-usinage laser, le marquage laser, la chimie analytique, la nano-chirurgie et la chirurgie ophtalmique.

On souhaite développer des lasers à impulsions ultra-courtes dans le domaine UV-
35 visible, à des longueurs d'onde allant de plus en plus bas dans l'UV, à des énergies de plus en plus élevées par impulsion et/ou de puissance de plus en plus élevée par impulsion.

Généralement, un système d'impulsions laser UV-visible repose sur une source laser infrarouge et un dispositif optique non linéaire de conversion de fréquence optique, par exemple par somme de fréquence (aussi appelé génération d'harmoniques). En effet, on dispose de

sources et d'amplificateurs à cristaux ou à fibre optique performants dans le domaine infrarouge, du fait de l'existence de technologies industrielles éprouvées. De telles sources laser infrarouge à impulsions ultra-courtes permettent de générer et d'amplifier des impulsions laser de forte puissance et/ou de forte énergie dans le domaine infrarouge. Un dispositif optique non linéaire de conversion de fréquence optique par somme de fréquence, permet de convertir les impulsions laser infrarouge en impulsions laser de fréquence optique égale à une harmonique double, triple ou quadruple de la fréquence optique des impulsions infrarouge. On obtient ainsi une source d'impulsions laser UV-visible ultra-courtes.

La somme de fréquence consiste en effet à produire un rayonnement optique à la fréquence optique ν_3 à partir de deux rayonnements de fréquences optiques ν_1 et ν_2 respectivement, reliés par la relation suivante entre les fréquences optiques :

$$\nu_3 = \nu_1 + \nu_2$$

Cette relation équivaut alors à la relation suivante entre les longueurs d'onde respectives :

$$1/\lambda_3 = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2$$

A titre d'exemple illustratif, la figure 1 représente une configuration classique de laser à impulsions ultra-courtes UV-visible à conversion de fréquence. Ce laser à impulsions UV-visible comporte une source 11 d'impulsions laser proche infrarouge et un dispositif optique non linéaire de conversion de fréquence basé ici sur l'utilisation de deux cristaux optiques non linéaires 1, 2 disposés en série. Par exemple, la source 11 est une source laser à fibre dopée Ytterbium. La source 11 d'impulsions laser infrarouge émet des impulsions lumineuses ultracourtes 110 de longueur d'onde λ_1 , dans l'infrarouge. Un premier cristal optique non linéaire 1 reçoit les impulsions lumineuses 110 infrarouges. Dans des conditions particulières, en particulier d'intensité des impulsions lumineuses 110 et d'accord de phase, le premier cristal optique non linéaire 1 génère des impulsions lumineuses 111 de longueur d'onde λ_2 différente de la longueur d'onde λ_1 . En particulier, lorsque le cristal optique non linéaire fonctionne en doublage de fréquence, la longueur d'onde λ_2 est égale à la moitié de la longueur d'onde λ_1 . Par exemple, si la longueur d'onde λ_1 est égale à 1030 nm, la longueur d'onde λ_2 est égale à 515 nm. Le transfert de l'énergie de la longueur d'onde λ_1 à la longueur d'onde λ_2 dans le cristal optique non-linéaire est partiel, si bien qu'en sortie du premier cristal optique non linéaire 1, on trouve une impulsion 111 de longueur d'onde λ_2 et une impulsion 110 de longueur d'onde λ_1 .

Dans l'exemple de la figure 1, un autre cristal optique non linéaire 2 est disposé sur le chemin optique en sortie du premier cristal optique non linéaire 1. L'autre cristal optique non linéaire 2 reçoit des impulsions lumineuses 110 de longueur d'onde λ_1 et des impulsions lumineuses 111 de longueur d'onde λ_2 , les impulsions lumineuses 110 et 111 provenant de la même source 11. Dans des conditions particulières d'accord de phase, l'autre cristal optique non linéaire 2 génère, par somme de fréquence, d'autres impulsions lumineuses 112 de longueur d'onde λ_3 différente des longueurs d'ondes λ_2 et λ_1 . Ainsi, les autres impulsions lumineuses 112 ont une fréquence optique égale à la somme de fréquence optique des deux

impulsions lumineuses incidentes 110, 111. Un tel dispositif permet d'obtenir des harmoniques de fréquence triple ou quadruple de la fréquence des impulsions source, la longueur d'onde λ_3 des impulsions lumineuses 112 étant respectivement égale au tiers ou au quart de la longueur d'onde λ_1 des impulsions lumineuses 110 émises par la source 11 d'impulsions infrarouge. On peut ainsi par exemple, pour une longueur d'onde λ_1 de 1030 nm, obtenir des impulsions de longueur d'onde λ_3 égale à 343,3 nm dans le cas du triplage, ou à 257,5 nm dans le cas du quadruplage.

Une seule conversion par doublage de fréquence ne permet pas d'atteindre des longueurs d'onde dans l'ultraviolet lorsque la source laser 11 génère des impulsions lumineuses 110 dans le proche infrarouge. La génération d'harmoniques triple ou quadruple est en général nécessaire pour obtenir des impulsions dans l'ultraviolet.

Cependant, l'efficacité de la conversion de fréquence par génération d'harmonique dans un cristal optique non linéaire décroît à mesure que le facteur de multiplication en harmonique augmente. Ainsi, l'efficacité de la conversion de fréquence peut atteindre 50% à 70 % pour le doublage de fréquence mais seulement 20% à 30 % pour le triplage de fréquence et 10% à 25 % pour le quadruplage de fréquence.

Dans le cas d'une source d'impulsions infrarouge à fibre optique classique de grande longueur, par exemple à fibre optique dopée erbium ou co-dopée erbium-ytterbium, la fibre optique est limitée en énergie. Lorsque des impulsions ultra-courtes de forte énergie sont amplifiées dans un système de type amplification à dérive de fréquence (CPA pour chirped pulse amplification), ces impulsions pré-étirées subissent des distorsions non-linéaires qui se cumulent lors de l'amplification dans la fibre amplificatrice. Les impulsions UV-visible en sortie du convertisseur de fréquence sont dans ce cas limitées en énergie par l'énergie maximum de la source d'impulsions infrarouge à fibre optique.

Dans le cas d'une source laser solide à cristaux, par exemple un laser Yb :YAG, le laser à cristal est limité en puissance, à cause des effets thermiques dans le cristal. Les impulsions UV-visible en sortie du convertisseur de fréquence sont dans ce cas limitées en puissance par la puissance maximum de la source laser solide à cristaux.

Dans le cas d'un milieu amplificateur de type fibre à large mode (ou LMA pour large mode area), de grand diamètre de cœur et de faible longueur (50 cm à quelques mètres), on se trouve dans un cas intermédiaire entre les lasers à fibre classiques et les lasers à solide, dans lequel les impulsions UV-visible en sortie du convertisseur de fréquence sont limitées en puissance et/ou en énergie par la puissance et/ou l'énergie maximum de la source laser à fibre large mode.

Problème technique

De manière générale, la puissance et/ou l'énergie des impulsions laser 111 ou 112, de durée picoseconde ou femtoseconde, obtenues par conversion de fréquence est donc limitée par la puissance et/ou par l'énergie de la source laser 11 utilisée et par l'efficacité de conversion dans le ou les cristaux optiques non linéaire(s) utilisés.

Un des buts de l'invention est d'augmenter l'énergie et/ou la puissance d'une source d'impulsions ultra-courtes dans le domaine UV-visible, notamment lorsque la source est basée sur une technologie à fibre optique. Un autre but de l'invention est de diminuer la longueur d'onde vers l'ultraviolet d'une source d'impulsions ultra-courtes de forte énergie et/ou de forte puissance. Encore un autre but de l'invention est d'améliorer la stabilité dans le temps d'un laser à impulsions ultra-courtes UV-visible de forte énergie et/ou de forte puissance.

D'une part, il existe un besoin pour un système et une méthode permettant d'augmenter la puissance et/ou l'énergie des impulsions laser en sortie d'un laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte énergie et/ou de forte puissance utilisant un dispositif optique non linéaire de conversion de fréquence.

D'autre part, il existe un besoin pour un laser à impulsion ultra-courtes de forte énergie et/ou de forte puissance, à des longueurs d'onde plus faibles dans l'ultraviolet, et de préférence basé sur une technologie de laser à fibre optique.

La présente invention a pour but de remédier aux inconvénients des techniques antérieures et concerne plus particulièrement un système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie.

Selon l'invention, le système laser comprend une pluralité de sources d'impulsions laser, où la pluralité de sources comporte entre deux et cinq sources distinctes, chaque source d'impulsions laser étant adaptée pour émettre au moins une impulsion laser ultra-courte dans le domaine visible ou infrarouge ; au moins un cristal optique non linéaire adapté pour recevoir deux impulsions laser ultra-courtes, lesdites deux impulsions laser ultra-courtes étant émises respectivement par deux sources distinctes d'impulsions laser et des moyens de synchronisation adaptés pour synchroniser temporellement lesdites deux impulsions laser ultra-courtes incidentes sur ledit cristal optique non linéaire, de manière à ce que lesdites deux impulsions laser ultra-courtes se superposent temporellement et spatialement dans ledit cristal optique non linéaire avec un déphasage quelconque, ledit au moins un cristal optique non linéaire étant adapté pour générer, par somme de fréquence, une impulsion laser ultra-courte convertie en fréquence, ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques respectives des deux impulsions laser ultra-courtes se superposant temporellement et spatialement dans ledit cristal optique non linéaire.

On entend ici par déphasage quelconque que le déphasage entre deux impulsions ultracourtes issues de deux sources distinctes et se superposant dans le cristal optique non linéaire peut prendre n'importe quelle valeur. De plus, ce déphasage quelconque peut varier dans le temps d'une paire d'impulsions ultracourtes à une autre paire d'impulsions ultracourtes à superposer dans un même cristal optique non linéaire.

Le système laser UV-visible permet d'augmenter la puissance et/ou l'énergie des impulsions ultra-courtes converties en fréquence, sans augmenter les pertes de conversion de fréquence. L'énergie et/ou la puissance des impulsions UV-visible ultra-courtes augmente en fonction du nombre de sources utilisées.

Le système de l'invention permet de produire une impulsion avec une efficacité de conversion prédéterminée. Lorsque le système laser génère un train d'impulsions ultra-courtes avec une certaine cadence de répétition, le système de l'invention permet d'assurer la stabilité de l'efficacité de conversion en fréquence d'une impulsion à l'impulsion suivante, et donc la stabilité de la puissance et/ou de l'énergie des impulsions ultra-courtes UV-visible.

Le système de l'invention ne requiert pas de système interférométrique pour mesurer et contrôler le déphasage optique entre chaque paire d'impulsions ultra-courtes se superposant dans un cristal optique non-linéaire à conversion de fréquence. Un simple système de synchronisation temporelle remplace le système interférométrique utilisé habituellement dans un laser fonctionnant en régime nanoseconde, pour réaliser la condition d'accord de phase entre les faisceaux se superposant dans un cristal optique non-linéaire à conversion de fréquence par somme de fréquence. Le déphasage peut être fluctuant d'une impulsion ultracourte à l'impulsion ultracourte suivante. Au contraire, en régime nanoseconde, on doit contrôler l'accord de phase pour chaque paire d'impulsions d'un train d'impulsions que l'on souhaite convertir en fréquence dans un cristal optique non-linéaire. En effet, en régime nanoseconde injecté, un laser émet en général plusieurs modes longitudinaux, ce qui génère des instabilités d'une impulsion ns à l'impulsion ns suivante. De manière particulièrement intéressante, en régime ps ou fs, les trains d'impulsions ultracourtes présentent une grande stabilité sur des durées pouvant aller jusqu'à plusieurs minutes.

Selon un mode de réalisation particulier et avantageux, le système laser comprend N cristaux optiques non linéaires, où N est un nombre entier supérieur ou égal à deux, chaque cristal optique non linéaire étant adapté pour recevoir deux impulsions laser distinctes émises respectivement par deux sources d'impulsions laser distinctes ou générées par conversion de somme de fréquence à partir de deux sources d'impulsions laser ultra-courtes, lesdites deux impulsions laser incidentes sur un cristal optique non linéaire étant synchronisées temporellement, et lesdits N cristaux optiques non linéaires étant disposés de manière à générer, par somme de fréquence successives dans lesdits N cristaux optiques non linéaire, une impulsion laser convertie en fréquence.

Selon un mode de réalisation, le système laser à impulsions comprend deux sources d'impulsions laser distinctes, chaque source d'impulsions laser étant adaptée pour émettre une impulsion laser ultra-courte, dans le domaine visible ou infrarouge, et un cristal optique non linéaire adapté pour recevoir simultanément une impulsion laser ultra-courte de chacune des deux sources d'impulsions laser distinctes, le cristal optique non linéaire étant adapté pour générer, par somme de fréquence, une impulsion laser ultra-courte, ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques des deux sources.

Selon un autre mode de réalisation, le nombre N est égal à trois, le système laser à impulsions comprenant trois sources d'impulsions laser distinctes, chaque source d'impulsions laser étant adaptée pour émettre une impulsion laser ultra-courte dans le domaine visible ou infrarouge ; et un premier cristal optique non linéaire adapté pour recevoir simultanément deux

impulsions laser ultra-courtes émises respectivement par deux parmi les trois sources d'impulsions laser distinctes, les moyens de synchronisation étant adaptés pour synchroniser temporellement lesdites deux impulsions laser incidentes sur le premier cristal optique non linéaire de manière à ce que lesdites deux impulsions laser incidentes se superposent temporellement et spatialement dans le premier cristal optique non linéaire avec un déphasage quelconque, le premier cristal optique non linéaire étant adapté pour générer, par somme de fréquence, une impulsion laser ultra-courte convertie en fréquence ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques desdites deux sources, un deuxième cristal optique non linéaire étant adapté pour recevoir simultanément ladite impulsion laser ultra-courte convertie en fréquence et une autre impulsion laser ultra-courte émise respectivement par l'autre source d'impulsions laser parmi les trois sources d'impulsions laser, les moyens de synchronisation étant adaptés pour synchroniser temporellement ladite impulsion laser ultra-courte convertie en fréquence et ladite autre impulsion laser ultra-courte incidentes sur le deuxième cristal optique non linéaire de manière à ce que lesdites impulsions laser ultra-courte se superposent temporellement et spatialement dans le deuxième cristal optique non linéaire avec un déphasage quelconque, le deuxième cristal optique non linéaire étant adapté pour générer, par somme de fréquence, une impulsion laser ultra-courte ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques desdites trois sources.

Selon un aspect particulier et avantageux de l'invention, chaque source d'impulsions laser est adaptée pour émettre une impulsion ultra-courte, et les moyens de synchronisation sont adaptés pour synchroniser temporellement deux impulsions laser distinctes incidentes sur un cristal optique non linéaire de manière à ce que lesdites deux impulsions laser distinctes se superposent temporellement dans ledit cristal optique non linéaire avec une précision temporelle inférieure ou égale à 10 % rms de la durée desdites impulsions ultra-courtes et de préférence inférieure ou égale à 5 % rms de la durée desdites impulsions ultra-courtes.

Selon un aspect particulier et avantageux de l'invention, les moyens de synchronisation comprennent au moins une ligne à retard optique disposée entre, d'une part, l'une desdites source d'impulsions lumineuses et, d'autre part, ledit cristal optique non linéaire, la ligne à retard optique étant adaptée pour réduire un retard temporel entre deux impulsions lumineuses incidentes sur ledit cristal optique non linéaire.

Selon un aspect particulier et avantageux de l'invention, les moyens de synchronisation comprennent des moyens électroniques de synchronisation adaptés pour synchroniser temporellement deux impulsions laser ultra-courtes dans un cristal optique non linéaire.

Dans un mode de réalisation, la pluralité de sources d'impulsions lumineuses comprend une pluralité de sources laser, chaque source d'impulsions laser étant adaptée pour émettre au moins une impulsion laser.

Dans un autre mode de réalisation, la pluralité de sources d'impulsions lumineuses comprend un oscillateur optique commun adapté pour générer des impulsions lumineuses mères ultra-courtes de longueur d'onde λ_1 ; et une pluralité de systèmes amplificateurs

optiques, chaque système amplificateur optique étant adapté pour recevoir une impulsion lumineuse mère ultra-courte de longueur d'onde λ_1 et pour générer une impulsion lumineuse ultra-courte amplifiée de longueur d'onde λ_1 .

5 Selon un aspect particulier et avantageux de l'invention, le système laser comporte en outre un dispositif d'asservissement temporel, comprenant un cross-corrélateur différentiel adapté pour mesurer un retard temporel entre deux impulsions laser distinctes incidentes sur un cristal optique non-linéaire.

De façon avantageuse, le cristal optique non linéaire est un cristal optique non linéaire à multiplexage par polarisation ou à multiplexage angulaire, ledit cristal optique non linéaire étant
10 choisi parmi un cristal de bêta borate de baryum ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$), ou un cristal de triborate de lithium (LiB_3O_5) ou un cristal de niobate de lithium (LiNbO_3) de type à quasi-accord de phase ou PPLN.

Dans un mode de réalisation, la pluralité de sources d'impulsions laser distinctes comporte une pluralité de sources laser à fibres optiques de forte énergie.

Dans un autre mode de réalisation, la pluralité de sources d'impulsions laser distinctes
15 comporte une pluralité de sources laser solides à cristaux de forte puissance.

Selon un aspect particulier et avantageux du deuxième mode de réalisation de l'invention, les moyens de synchronisation comprennent des moyens électroniques de synchronisation adaptés pour synchroniser temporellement une pluralité d'impulsions laser émises respectivement par ladite pluralité de sources laser.

20 Selon un autre aspect particulier et avantageux de l'invention, le système optique non linéaire pour la conversion de fréquence comprend en outre :

- une autre source d'impulsions lumineuses adaptée pour émettre au moins une autre impulsion lumineuse à une longueur d'onde ;
- des moyens de synchronisation adaptés pour synchroniser temporellement, d'une
25 part, l'impulsion lumineuse de longueur d'onde λ_2 générée par conversion de fréquence en sortie du cristal optique non linéaire avec, d'autre part, ladite autre impulsion lumineuse de longueur d'onde λ_1 émise par l'autre source d'impulsions lumineuses, et
- un autre cristal optique non linéaire adapté pour recevoir ladite impulsion lumineuse
30 de longueur d'onde λ_2 et l'autre impulsion lumineuse de longueur d'onde λ_1 , lesdites impulsions lumineuses de longueurs d'onde respectives λ_2 et λ_1 étant synchronisées temporellement, et l'autre cristal optique non linéaire étant adapté pour générer, par conversion de fréquence, au moins une autre impulsion lumineuse
35 de longueur d'onde λ_3 différente des longueurs d'ondes λ_2 et λ_1 desdites d'impulsions lumineuses synchronisées.

Dans un mode de réalisation particulier, la pluralité de sources d'impulsions laser distinctes comporte une pluralité de sources laser à fibres optiques de forte énergie.

Dans un mode de réalisation particulier, la pluralité de sources d'impulsions laser distinctes comporte une pluralité de sources laser solides à cristaux de forte puissance.

L'invention concerne aussi un procédé optique non linéaire de conversion de fréquence, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- a) émission d'une pluralité d'impulsions lumineuses, respectivement par une pluralité de sources d'impulsions lumineuses ;
- 5 b) synchronisation temporelle de ladite pluralité d'impulsions lumineuses pour générer une pluralité d'impulsions lumineuses synchronisées,
- c) réception de la pluralité d'impulsions lumineuses synchronisées sur un cristal optique non linéaire, le cristal optique non linéaire étant adapté pour générer, par conversion de fréquence, au moins une impulsion lumineuse de sortie de longueur d'onde différente
10 des longueurs d'ondes desdites d'impulsions lumineuses des sources d'impulsions lumineuses.

Préférentiellement, l'étape b) de synchronisation temporelle comprend une étape d'ajustement d'un retard optique sur au moins une ligne à retard optique disposée entre une source d'impulsions lumineuses et le cristal optique non linéaire.

15 Selon un premier mode de réalisation, l'étape a) d'émission comprend l'émission d'une pluralité d'impulsions source par un oscillateur et l'amplification de chacune desdites impulsions source par un amplificateur optique séparé.

20 Selon un deuxième mode de réalisation, l'étape a) d'émission comprend l'émission d'une pluralité d'impulsions laser par une pluralité de sources laser, chaque source laser étant adapté pour émettre au moins une impulsion laser.

Avantageusement, dans le deuxième mode de réalisation, l'étape b) de synchronisation temporelle comprend une étape de synchronisation électronique adaptée pour synchroniser temporellement une pluralité d'impulsions laser émises par respectivement par ladite pluralité de sources laser.

25 L'invention trouvera une application particulièrement avantageuse dans les systèmes d'impulsions laser ultracourtes.

L'invention permet avantageusement de combiner plusieurs sources lumineuses à la fois pour les convertir en fréquence optique et pour en sommer la puissance optique.

30 La présente invention concerne également les caractéristiques qui ressortiront au cours de la description qui va suivre et qui devront être considérées isolément ou selon toutes leurs combinaisons techniquement possibles.

Cette description donnée à titre d'exemple non limitatif fera mieux comprendre comment l'invention peut être réalisée en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 représente schématiquement un système optique non-linéaire de conversion
35 de fréquence selon l'art antérieur ;
- la figure 2 illustre schématiquement le principe d'un système optique non linéaire de conversion de fréquence selon l'invention ;
- la figure 3 illustre schématiquement un premier mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 4 illustre schématiquement un deuxième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 5 illustre schématiquement un troisième mode de réalisation de l'invention ;
- la figure 6 illustre schématiquement un dispositif cross-corrélateur différentiel pour mesurer le retard optique entre deux impulsions laser.

Description détaillée

5 La figure 2 représente un système de laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie à conversion par somme de fréquence. La configuration du système laser UV-visible proposé se base sur l'utilisation de sources laser distinctes et non pas d'une seule source comme dans le système antérieur illustré sur la figure 1.

10 A titre d'exemple illustratif, le système de la figure 2 comporte trois sources laser distinctes : une source laser 11, une source laser 12 et une source laser 13. De façon avantageuse, les sources laser 11, 12, 13 sont des sources laser à impulsions ultra-courtes de type à blocage de mode.

De manière générale, le système de l'invention comporte au moins deux sources laser distinctes et jusqu'à cinq sources laser distinctes à impulsions ultra-courtes.

15 Dans le système de la figure 2, on considère dans un premier temps une première source 11 et une deuxième source 12 qui sont des sources laser séparées spatialement. La première source 11 émet des impulsions ultra-courtes 31 de longueur d'onde λ_1 et la deuxième source 12 émet des impulsions ultra-courtes 32 de longueur d'onde λ_2 . La première source 11 et la deuxième source 12 ne sont pas cohérentes entre elles. La première source 11 et la deuxième source 12 sont agencées de manière à coupler une impulsion ultracourte 31 de la première source 11 et une autre impulsion ultracourte 120 de la deuxième source 12 dans un premier cristal non-linéaire 1 de conversion de fréquence. A cet effet, un système optique peut être disposé entre les sources 11, 12 et le cristal optique non-linéaire 1, de manière à superposer spatialement et temporellement une impulsion ultra-courte 31 et une impulsion ultra-courte 32 dans le premier cristal non-linéaire 1 de conversion de fréquence.

25 En régime nanoseconde, pour générer des impulsions par somme de fréquence dans un cristal optique non-linéaire, il est essentiel d'asservir la phase optique entre impulsions incidentes successives, afin d'assurer la stabilité en puissance et/ou en énergie des impulsions converties en fréquence en fonction du temps. L'asservissement de la phase optique requiert en général la mise en œuvre d'un système interférométrique précis pour mesurer le déphasage optique entre impulsions successives de durée nanoseconde.

35 Au contraire, selon l'invention, en plus de remplir les conditions d'accord de phase dans le cristal non-linéaire, la condition nécessaire et suffisante pour produire des impulsions ultra-courtes (en régime picoseconde, jusqu'à 20 ps, ou en régime femtoseconde) par somme de fréquence dans le cristal non-linéaire 1, est qu'une impulsion ultra-courte 31 et une autre impulsion ultra-courte 32 se superposent temporellement au sein du cristal non-linéaire 1, avec une relation de phase temporelle quelconque entre ces deux impulsions 31 et 32. De préférence, les deux sources 11, 12 émettent à une même cadence de répétition des impulsions ultracourtes 31 et 32 de même durée d'impulsion, ayant une énergie de même

niveau et qui se recouvrent spatialement dans le cristal optique non linéaire 1. Un asservissement temporel suffit à assurer la stabilité de l'efficacité de conversion de fréquence pour une série d'impulsions ultra-courtes comprises dans un intervalle de temps allant d'une microseconde jusqu'à plusieurs minutes. L'asservissement de la synchronisation temporelle étant réalisé, sans asservissement de la phase optique, on n'observe pas d'instabilité d'une 5 impulsion ultra-courte convertie en fréquence aux impulsions ultra-courtes suivantes, dans le même train d'impulsions, également converties en fréquence.

Il s'agit donc d'assurer la synchronisation temporelle entre les impulsions ultra-courtes 31 et 32 des deux sources 11 et 12 dans le premier cristal optique non-linéaire 1 de conversion 10 de fréquence, avec une précision temporelle meilleure que la durée des impulsions ultra-courtes. Cette synchronisation temporelle peut être assurée électroniquement ou optiquement, comme détaillé en lien avec les figures 3 à 5.

La première source 11, la deuxième source 12 et le premier cristal non-linéaire 1 de conversion de fréquence permettent, sous condition de synchronisation des impulsions ultra- 15 courtes 31 et 32, de générer des impulsions ultra-courtes 131, ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques respectives des impulsions source ultra-courtes 31 et 32 générées respectivement par les sources 11 et 12.

Le système de la figure 2 comporte en outre une troisième source 13 et un deuxième cristal non-linéaire 2 de conversion de fréquence. La troisième source 13 est séparée 20 spatialement de la première source 11 et de la deuxième source 12 respectivement. La première source 11, la deuxième source 12 et la troisième source 13 ne sont pas cohérentes entre elles. La troisième source 13 émet des impulsions ultra-courtes 33 à une longueur d'onde λ_3 . Le deuxième cristal optique non-linéaire 2 de conversion de fréquence est disposé sur le chemin optique en aval du premier cristal optique non-linéaire 1, de manière à recevoir une 25 impulsion ultra-courte 33 de la troisième source 13 et une impulsion ultra-courte 131 générée par somme de fréquence dans le premier cristal optique non-linéaire 1. A cet effet, un système optique (non représenté) est disposé entre la troisième source 13 et les premier et deuxième cristaux optiques non-linéaires 1, 2.

Dans des conditions où une impulsion ultra-courte 33 issue de la troisième source 13 et 30 une impulsion ultra-courte 131 générée par somme de fréquence dans le premier cristal optique non-linéaire 1, se superposent spatialement et temporellement dans le deuxième cristal optique non-linéaire 2, on observe la génération d'une nouvelle impulsion ultra-courte 132, dont la fréquence optique est égale à la somme des fréquences optiques des trois sources 11, 12 et 13.

On suppose ici que les durées des deux impulsions ultra-courtes 31, 32 respectivement 35 131, 33 à combiner dans un cristal optique non linéaire 1, respectivement 2, sont identiques, que ce soit en régime picoseconde ou en régime femtoseconde.

La synchronisation entre les impulsions ultra-courtes 33 et 131 dans le deuxième cristal optique non-linéaire 2 de conversion de fréquence doit être assurée avec une précision

temporelle meilleure que la durée de ces impulsions. Cette synchronisation peut être réalisée de manière active électroniquement ou optiquement, comme détaillé en lien avec les figures 3 à 5.

Le système de laser UV-visible à impulsions ultra-courtes ainsi configuré permet de combiner les impulsions laser ultra-courtes de plusieurs sources laser infrarouges 11, 12, 13 synchronisées temporellement les unes par rapport aux autres, pour convertir deux à deux les impulsions ultra-courtes des différentes sources par somme de fréquences successives dans des cristaux non-linéaires disposés successivement, afin de produire des impulsions ultra-courte dans l'ultraviolet de forte puissance moyenne et/ou de forte énergie par impulsion.

Par exemple, si les trois sources 11, 12, 13 émettent des impulsions ultra-courtes 31, 32, 33 de même longueur d'onde, le système laser permet de générer des impulsions ultra-courtes à la fréquence optique triple, autrement dit à une longueur d'onde égale au tiers de la longueur d'onde des sources 11, 12, 13.

La répartition de la puissance infrarouge initiale dans plusieurs sources 11, 12, 13 ou plusieurs voies d'amplification permet, avec les limitations d'une technologie donnée, de repousser les performances accessibles en puissance et/ou en énergie dans le domaine ultraviolet. L'impulsion ultra-courte 132 obtenue par conversion de fréquence a une énergie, respectivement une puissance, qui augmente en fonction de la somme en énergie, respectivement en puissance, des impulsions source 31, 32, 33. L'énergie, respectivement la puissance de l'impulsion ultra-courte 132 n'est pas limitée par l'énergie, respectivement la puissance, d'une des impulsions sources 31, 32, 33, mais par la somme des limites en énergie, respectivement en puissance, des différentes sources 11, 12, 13.

Ce principe exposé en lien avec la figure 2 peut se généraliser à tout degré harmonique à partir du rayonnement fondamental, au degré harmonique lui correspond le nombre de sources lasers maximal pouvant être combinées. Ainsi, pour le doublage de fréquence, on disposera de deux sources lasers distinctes, pour le triplage, de trois sources lasers, pour le quadruplage, de deux à quatre sources lasers.

La combinaison d'une source supplémentaire peut être réalisée aisément par l'ajout d'un module source indépendant et d'une synchronisation, sans nécessairement ajouter de cristal optique non-linéaire. Un système laser combinant plusieurs sources permet d'assurer la stabilité en énergie et/ou en puissance des impulsions ultra-courtes converties en fréquence délivrées par le système.

La configuration illustrée sur la figure 2 est particulièrement adaptée pour des sources 11, 12, 13 impulsionnelles ultracourtes, notamment lorsqu'elles sont injectées par des sources laser à blocage de mode.

Afin d'obtenir le meilleur rendement de conversion et/ou la meilleure stabilité en puissance d'une impulsion à l'impulsion suivante, la synchronisation temporelle des impulsions dans un cristal optique non-linéaire de conversion de fréquence est contrôlée et optimisée au

regard de la durée des impulsions considérées, selon différentes stratégies de synchronisation actives, détaillées en lien avec les figures 3 à 6.

La figure 3 représente schématiquement un système laser à conversion de fréquence multifaisceaux selon le premier mode de réalisation avec une synchronisation optique active.

5 Le premier mode de réalisation se base sur l'utilisation d'une source laser commune d'injection, appelée oscillateur 10. L'oscillateur 10 émet des impulsions mères ultra-courtes 20. Les impulsions mères ultra-courtes 20 sont réparties spatialement entre plusieurs modules d'amplification, aussi appelés amplificateurs optiques 21, 22, 23. L'oscillateur 10 et l'amplificateur 21 forment une première source 211 d'impulsions ultra-courtes 31. L'oscillateur
10 10 et l'amplificateur 22 forment une deuxième source 212 d'impulsions ultra-courtes 32. Les trois sources 211, 212, 213 d'impulsions ultra-courtes sont ainsi séparées spatialement. L'oscillateur 10 et l'amplificateur 23 forment une troisième source 213 d'impulsions ultra-courtes 33. Le système de la figure 3 comporte un premier cristal optique non-linéaire 1 de conversion et un deuxième cristal optique non-linéaire 2 de conversion.

15 Considérons tout d'abord deux amplificateurs optiques 21, 22 et le premier cristal optique non-linéaire 1 de conversion. L'amplificateur optique 21 reçoit une impulsion ultra-courtes 20 et génère une impulsion amplifiée ultra-courte 31. De manière similaire, l'amplificateur optique 22 reçoit une impulsion ultra-courtes 20 et génère une impulsion amplifiée ultra-courte 32. Les impulsions amplifiées ultra-courtes 31, 32 ont la même fréquence
20 optique, ou la même longueur d'onde λ_1 et en général la même durée, que l'impulsion mère 20 de l'oscillateur 10. Un système optique, par exemple à miroirs, non représenté sur la figure 2, dirige les impulsions amplifiées ultra-courtes 31, 32 vers un premier cristal optique non linéaire 1 de conversion. Les impulsions amplifiées ultra-courtes 31, respectivement 32, dans chaque amplificateur 21, respectivement 22 subissent cependant un retard temporel qui peut être
25 différent d'un amplificateur optique 21 à l'autre amplificateur optique 22. Ce retard temporel est en général de plusieurs picosecondes, il est constant d'une impulsion à l'impulsion suivante, mais il varie lentement sur une durée de plusieurs minutes. Ce retard temporel provient notamment de la différence de longueur de chemin optique entre les voies optiques associées respectivement aux amplificateurs optiques 21 et 22. Ce retard temporel dépend de la
30 technologie d'amplification, notamment du temps d'amplification et du matériau traversé, et des variations de température qui impactent la distance de propagation de l'impulsion pendant cette amplification.

Le système laser à conversion de fréquence multifaisceaux de la figure 3 prévoit de disposer au moins une ligne à retard optique 41, respectivement 42 sur au moins une voie, par
35 exemple en sortie de l'amplificateur optique 21 et/ou respectivement, en sortie de l'amplificateur optique 22. On détecte un signal d'erreur que l'on souhaite minimiser afin de minimiser le retard temporel, par exemple grâce à un cross-corrélateur. La(les) ligne(s) à retard optique 41, 42 permettent de compenser le retard temporel entre une impulsion amplifiée ultra-courte 31 issue de l'amplificateur optique 21 et une impulsion amplifiée ultra-courte 32 issue de l'amplificateur

optique 22. Ainsi, en utilisant le signal généré par le cross-corrélateur, les impulsions amplifiées ultra-courtes 31, 32 sont synchronisées temporellement dans le cristal optique non-linéaire 1 de conversion. En sortie du cristal optique non-linéaire 1 de conversion, on obtient une impulsion ultra-courte 131, doublée en fréquence.

5 Considérons maintenant, un autre amplificateur optique 23 et un autre cristal optique non linéaire 2 de conversion. De façon avantageuse, l'autre amplificateur optique 23 reçoit aussi une impulsion mère ultra-courte 20 issue de l'oscillateur 10. L'amplificateur optique 23 amplifie une impulsion mère ultra-courte 20 et génère une impulsion amplifiée ultra-courte 33, de même longueur d'onde λ_1 que les impulsions amplifiées ultra-courtes 31 et 32.

10 Un système optique non représenté sur la figure 3 dirige l'impulsion amplifiée ultra-courte 33 et l'impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence vers l'autre cristal optique non linéaire 2 de conversion.

 Cependant, l'impulsion amplifiée ultra-courte 33 présente en général un retard temporel par rapport à l'impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence provenant du premier cristal
15 optique non linéaire 1. Ce retard temporel est en général de plusieurs picosecondes, mais il est constant d'une impulsion à l'impulsion suivante, et il varie lentement sur une durée de plusieurs minutes. Le dispositif de conversion multifaisceaux prévoit de disposer une autre ligne à retard optique 43 sur la voie de l'amplificateur optique 23, par exemple en sortie de cet amplificateur
20 optique 23. La ligne à retard optique 43 permet de compenser le retard temporel entre une impulsion amplifiée ultra-courte 33 issue de l'amplificateur optique 23 et une impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence issue du premier cristal optique non-linéaire 1. Ainsi, l'impulsion amplifiée ultra-courte 33 et l'impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence sont synchronisées temporellement dans le cristal optique non-linéaire 2 de conversion. En sortie du
25 cristal optique non-linéaire 2 de conversion, on obtient une impulsion ultra-courte 132, triplée en fréquence par rapport à la fréquence de l'oscillateur 10.

 Plusieurs méthodes peuvent être employées pour combiner les impulsions dans les
30 cristaux optiques non-linéaires 1, 2 de conversion. Plus particulièrement, on considère ici le multiplexage par polarisation et le multiplexage angulaire. Le multiplexage par polarisation consiste à disposer deux impulsions telles que chaque impulsion incidente dans le cristal possède une polarisation orthogonale à l'autre, le type d'interaction étant alors de type II dans le cristal de conversion. Le multiplexage angulaire consiste à disposer deux impulsions
35 incidentes de manière à ce qu'elles forment un angle d'incidence différent dans le cristal, à condition que les deux impulsions se superposent spatialement dans ce même cristal de conversion. Dans le cas du multiplexage angulaire, les deux impulsions peuvent alors avoir la même polarisation (interaction type I), ou une polarisation orthogonale (interaction type II).

 Le premier cristal optique non-linéaire 1 de conversion est par exemple un cristal de beta borate de baryum (ou BBO) en type II, et le deuxième cristal optique non-linéaire 2 de conversion est par exemple également un cristal de BBO en type II. Avantageusement, le cristal optique non-linéaire est orienté en incidence normale et l'angle de coupe du cristal permet de

réaliser l'accord de phase entre les trois ondes se propageant dans le cristal. Selon les niveaux d'énergie des impulsions, les cristaux à quasi accord de phase (tels que le niobate de lithium polé périodiquement, ou PPLN) pourront être préférés, pour des faibles énergies (nJ) en configuration colinéaire, tandis que le triborate de lithium (ou LBO) pourra être préféré à plus haute énergie (mJ), en type II colinéaire ou type I non colinéaire.

A titre d'exemple, on considère une source laser 11 à fibre dopée Ytterbium femtoseconde de l'art antérieur. Une telle source 11 émet typiquement des impulsions 31 d'énergie 20 μJ par impulsion, avec une durée d'impulsion de 400 fs, à une longueur d'onde centrale λ_1 de 1030 nm et à une cadence de 1 MHz. Une telle source 11 est limitée en énergie par les non linéarités optiques se cumulant lors de l'amplification dans la fibre active de l'impulsion pré-étirée préalablement. Afin de disposer d'impulsions d'énergie 18 μJ à une longueur d'onde dans l'ultraviolet de 343 nm et à 1 MHz, une approche classique consisterait à développer une source émettant au moins 60 μJ à 1 MHz, nécessitant un étirement trois fois plus important de l'impulsion avant amplification ou un design de fibre ayant une aire effective trois fois plus importante. Dans ces deux cas, il est également nécessaire de gérer un dépôt thermique trois fois plus important dans cette même fibre active.

Au contraire, selon le mode de réalisation illustré sur la figure 3, on utilise par exemple trois amplificateurs 21, 22, 23 émettant des impulsions ayant chacune une énergie de 20 μJ , injectées par un même oscillateur femtoseconde 10. La synchronisation des impulsions amplifiées 31, 32, 33 est contrôlée par exemple par un dispositif de cross-corrélation optique différentiel, qui permet d'ajuster activement le retard temporel entre les trois impulsions qui sont successivement combinées par somme de fréquence dans les cristaux non linéaires 1, 2.

Ce premier mode de réalisation permet d'obtenir des impulsions de forte énergie dans l'ultraviolet sans dépasser les limites de dépôt thermique dans chacun des amplificateurs à fibre optique 21, 22, 23.

Le deuxième mode de réalisation utilise plusieurs sources laser distinctes, synchronisées l'une avec l'autre électroniquement avec une précision temporelle inférieure à la durée d'impulsion.

La figure 4 représente schématiquement un système optique de conversion de fréquence multi-faisceaux selon le deuxième mode de réalisation, avec une synchronisation électronique.

Considérons tout d'abord deux sources laser 11, 12 et le cristal optique non-linéaire de conversion 1. La source laser 11 émet une impulsion laser ultra-courte 31. La source laser 12 émet une impulsion laser ultra-courte 32. Les sources laser 11 et 12 sont séparées spatialement. Dans ce cas, les sources laser 11 et 12 et ne sont pas cohérentes entre elles. Un système électronique de synchronisation 50 classique est relié d'une part à la source laser 11 par une liaison électronique 51 et d'autre part à la source laser 12 par une liaison électronique 52. Le retard électronique, entre l'émission de la source laser 11 et de la source laser 12, est mesuré au moyen d'un détecteur de phase sur des signaux électroniques par une technique RF

classique. Le système électronique de synchronisation 50 permet ainsi de synchroniser temporellement l'impulsion laser ultra-courte 31 et l'impulsion laser ultra-courte 32.

Un système optique (non représenté) dirige les impulsions laser ultra-courtes 31 et 32 vers le cristal optique non-linéaire de conversion 1.

5 De façon complémentaire, comme illustré sur la figure 4, le système de conversion multifaisceaux comporte en outre au moins une ligne à retard optique 41 et/ou respectivement 42, sur au moins une voie, par exemple en sortie de la source laser 11 et/ou respectivement, en sortie de la source laser 12. Le retard temporel relatif entre une impulsion laser ultra-courte 31 et une impulsion laser ultra-courte 32 est par exemple mesuré par cross-corrélation. La(les)
10 ligne(s) à retard 41, 42 permettent de compenser le retard temporel relatif entre une impulsion laser ultra-courte 31 issue de la source laser 11 et une impulsion laser ultra-courte 32 issue de la source laser 12. On suppose ici que les sources différentes 11, 12 génèrent des impulsions ultracourtes de même durée et à une même cadence de répétition. Comme indiqué plus haut, en régime d'impulsions ultracourtes, le retard temporel entre les impulsions ultra-courtes 31, 32
15 provenant de deux sources est en général de l'ordre de la ps, mais ce retard est constant d'une impulsion à l'impulsion suivante et varie lentement de la durée d'une impulsion ultracourte sur un laps de temps de plusieurs minutes.

Grâce au système électronique de synchronisation temporelle, et de manière optionnelle grâce aux lignes à retard 41, 42, les impulsions laser ultra-courtes 31, 32 sont synchronisées
20 temporellement dans le cristal optique non-linéaire de conversion 1. En sortie du cristal optique non-linéaire 1, on obtient une impulsion ultra-courte 131, doublée en fréquence. Les impulsions suivantes 31, 32 sont aussi synchronisées.

Considérons maintenant une autre source laser 13 et un autre cristal optique non-linéaire de conversion 2.

25 L'autre source laser 13 émet une autre impulsion laser ultra-courte 33.

Un système optique (non représenté sur la figure 4) dirige l'impulsion laser ultra-courte 33 et l'impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence vers l'autre cristal optique non linéaire 2.

30 Cependant, l'impulsion laser ultra-courte 33 présente en général un retard temporel par rapport à l'impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence provenant du cristal optique non-linéaire 1 de conversion.

Avantageusement, le système électronique de synchronisation 50 est relié à la source laser 131 par une liaison électronique 53 qui permet de synchroniser l'impulsion laser ultra-courte 33 avec l'impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence dans le cristal optique non-
35 linéaire de conversion 2.

De manière complémentaire, une ligne à retard optique 43 est disposée entre la source laser 13 et le cristal optique non linéaire de conversion 2 pour affiner la synchronisation de l'impulsion laser ultra-courte 33 et de l'impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence dans le cristal non-linéaire de conversion 2.

Le cristal non-linéaire de conversion 2 génère, une impulsion ultra-courte 132, par conversion de fréquence, à partir de l'impulsion laser ultra-courte 33 et de l'impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence. L'impulsion ultra-courte 132 a une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques de l'impulsion laser 33 et de l'impulsion convertie 131.

5 L'impulsion ultra-courte 132 a la même durée, le même profil spatial qu'une impulsion laser ultra-courte 31, 32 ou 33, avec une énergie qui dépend de l'efficacité de conversion habituelle des cristaux non-linéaires 1 et/ou 2 : 50 à 70% pour la génération de seconde harmonique (SHG), 20 à 30% pour la génération de troisième harmonique (THG), 15 à 25% pour la génération de quatrième harmonique (FHG).

10 La figure 5 illustre schématiquement un troisième mode de réalisation de l'invention.

Les mêmes signes de référence désignent les mêmes éléments que sur la figure 4.

Le système laser comporte un dispositif 80 comprenant un oscillateur femtoseconde suivi d'un étireur, pour étirer temporellement les impulsions délivrées par l'oscillateur. Un premier système amplificateur 81 comporte un premier amplificateur optique suivi d'un premier

15 compresseur pour recomprimer les impulsions amplifiées. De même, un deuxième système amplificateur 82 comporte un deuxième amplificateur optique suivi d'un deuxième compresseur pour recomprimer les impulsions amplifiées, et un troisième système amplificateur 83 comporte un troisième amplificateur optique suivi d'un troisième compresseur pour recomprimer les impulsions amplifiées. De façon avantageuse, chaque compresseur comporte une platine de

20 translation, qui permet de modifier le temps de propagation de l'impulsion. Chaque compresseur de chacun des systèmes amplificateurs 81, 82, 83 intègre donc la fonction de recompression des impulsions étirées ainsi que la fonction de ligne à retard optique. Ces compresseurs permettent ainsi d'ajuster la synchronisation entre les différentes impulsions amplifiées 31, 32, 33.

25 Le système amplificateur 81 forme avec le dispositif 80 une première source 311 d'impulsions ultra-courtes 31. De manière analogue, le système amplificateur 82 forme avec le dispositif 80 une deuxième source 312 d'impulsions ultra-courtes 32. Enfin, le système amplificateur 83 forme avec le dispositif 80 une troisième source 313 d'impulsions ultra-courtes 33.

30 Dans une variante de ce troisième mode de réalisation, on combine des moyens de synchronisation optique et des moyens de synchronisation électronique dans un même système laser. Cette combinaison permet de tirer profit de la dynamique de synchronisation propre à chaque technique, et ainsi de décorrélérer les boucles d'asservissement.

Le système laser de la figure 5 comporte en outre un cross-corrélateur différentiel 61

35 disposé entre la sortie du premier système amplificateur 81 et du deuxième système amplificateur 82 pour mesurer le retard temporel entre une impulsion ultra-courte 31 et une impulsion ultra-courte 32. Le système laser de la figure 5 comporte en outre un autre cross-corrélateur différentiel 62 disposé entre la sortie du premier cristal optique non-linéaire 1 de conversion et la sortie du troisième système amplificateur 83 pour mesurer le retard temporel

entre une impulsion ultra-courte 131 convertie en fréquence et une impulsion ultra-courte 33 issue du troisième système amplificateur 83.

La figure 6 illustre schématiquement un dispositif cross-corrélateur différentiel pour mesurer le retard optique entre deux impulsions laser ultra-courtes.

5 Un cross-corrélateur différentiel est basé sur un dispositif de deux cristaux non-linéaires en série, ou sur un dispositif comprenant un cristal optique non linéaire utilisé en double passage, dans lequel passent les deux impulsions dont on cherche à assurer la synchronisation temporelle.

10 Dans l'exemple illustré sur la figure 6, deux impulsions ultra-courtes 31, 32 à synchroniser ont une polarisation croisée, traversent un premier miroir dichroïque 71. Les parties de chaque impulsion ultra-courte 31, 32 en recouvrement temporel avec l'autre sont converties par somme de fréquence dans un cristal optique non linéaire 72 à somme de fréquence, l'énergie cumulée de cette impulsion convertie en fréquence est mesurée sur le détecteur 75 à travers le deuxième miroir dichroïque 74. Par réflexion de l'onde fondamentale
15 sur le deuxième miroir dichroïque 74, chaque impulsion subit un retard différent cumulé deux fois en raison du double passage dans la lame biréfringente 73. Les zones de recouvrement des deux impulsions ne sont plus les mêmes, l'énergie convertie est alors mesurée sur le deuxième détecteur 76 par réflexion sur le premier miroir dichroïque 71. La différence 77 entre
20 les deux signaux mesurés par les détecteurs 75 et 76 fournit un indicateur du retard entre les deux impulsions 31 et 32 et un indicateur du sens du retard. Ce signal d'erreur 77 peut donc être directement envoyé dans une boucle de rétroaction vers une ligne à retard optique sur un des deux compresseurs des systèmes amplificateurs 81, 82, par exemple.

De manière alternative et/ou complémentaire, le système de l'invention comporte des moyens de synchronisation passive adaptés pour stabiliser la synchronisation temporelle entre
25 des impulsions ultracourtes issus de différentes sources dans un cristal optique non-linéaire convertisseur de fréquence. Ces moyens de synchronisation passive comprennent par exemple un dispositif de stabilisation mécanique vis-à-vis des vibrations de manière à réduire les fluctuations de retard optique entre impulsions ultra-courtes incidentes sur un même cristal optique non-linéaire. Les moyens de synchronisation passive peuvent aussi comprendre des
30 moyens de stabilisation thermique de manière à réduire les fluctuations de retard optique entre impulsions ultra-courtes induites thermiquement : par exemple, les supports des miroirs sur le trajet optique des impulsions ultra-courtes sont de préférence en invar de manière à limiter les dérives thermiques.

L'invention ne se limite nullement aux modes de réalisation ici décrits.

35 L'invention s'applique en particulier à un mode de réalisation à quatre sources d'impulsions ultracourtes de même fréquence optique et trois cristaux optiques non-linéaires, pour former des impulsions ultra-courtes de fréquence optique égale à la quatrième harmonique de la fréquence optique des quatre sources.

Ce mode de réalisation permet, à partir de sources émettant dans l'infrarouge de générer des impulsions ultra-courtes dans l'UV de forte puissance et/ou de forte énergie, et ayant une efficacité de conversion stable d'une impulsion à l'autre.

De même, l'invention s'applique à un mode de réalisation à cinq sources d'impulsions
5 ultracourtes de même fréquence optique et quatre cristaux optiques non-linaires, pour former des impulsions ultra-courtes de fréquence optique égale à la cinquième harmonique de la fréquence optique des cinq sources.

Une première application industrielle de l'invention concerne la réalisation d'une source
10 laser d'impulsions ultracourtes de forte énergie dans l'UV, à partir de lasers à fibres optiques, chaque fibre optique étant limitée en énergie. Un tel système offre l'avantage de délivrer des impulsions ultracourtes de forte énergie dans l'UV, avec une grande stabilité en énergie d'une impulsion à l'impulsion suivante dans un train d'impulsions.

Une autre application industrielle de l'invention concerne la réalisation d'une source
15 laser d'impulsions ultracourtes de forte puissance dans l'UV à partir de lasers solides à cristaux, chaque laser à cristal étant limité en puissance. Un tel système offre l'avantage de délivrer des impulsions ultracourtes de forte puissance dans l'UV, avec une grande stabilité en puissance d'une impulsion à l'impulsion suivante dans un train d'impulsions.

L'ajustement de la synchronisation temporelle est plus facile et plus robuste que le réglage d'un système interférométrique.

20 Le système de l'invention présente l'avantage d'être modulaire et relativement peu onéreux. Il est aisé d'ajouter ou de remplacer un module source par un autre, pour adapter la puissance ou l'énergie des impulsions ultracourtes de sortie. Ce système offre aussi l'avantage de faciliter la maintenance, par le remplacement d'un module, indépendamment du reste du système.

25

REVENDICATIONS

1. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie, caractérisé en ce qu'il comprend :

- 5 – une pluralité de sources d'impulsions laser (11, 12, 13, 211, 212, 213, 311, 312, 313), où la pluralité de sources comporte entre deux et cinq sources distinctes, chaque source (11, 12, 13, 211, 212, 213, 311, 312, 313) étant adaptée pour émettre au moins une impulsion laser ultra-courte (31, 32) dans le domaine visible ou infrarouge ; et
- 10 – au moins un cristal optique non linéaire (1) adapté pour recevoir deux impulsions laser ultra-courtes (31, 32), lesdites deux impulsions laser ultra-courtes (31, 32) étant émises respectivement par deux sources (11, 12, 211, 212, 311, 312) distinctes d'impulsions laser ;
- 15 – des moyens de synchronisation (41, 42, 50, 51, 52) adaptés pour synchroniser temporellement lesdites deux impulsions laser ultra-courtes (31, 32) incidentes sur ledit cristal optique non linéaire (1), de manière à ce que lesdites deux impulsions laser ultra-courtes (31, 32) se superposent temporellement et spatialement dans ledit cristal optique non linéaire (1) avec un déphasage quelconque ;
- 20 – ledit au moins un cristal optique non linéaire (1) étant adapté pour générer, par somme de fréquence, une impulsion laser ultra-courte convertie en fréquence (131) ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques respectives des deux impulsions laser ultra-courtes (31, 32) se superposant temporellement et spatialement dans ledit cristal optique
- 25 non linéaire (1).

2. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon la revendication 1 comprenant N cristaux optiques non linéaires (1, 2), où N est un nombre entier supérieur ou égal à deux, chaque cristal optique non linéaire (1, 2) étant adapté pour recevoir deux impulsions laser distinctes émises respectivement par deux sources d'impulsions laser distinctes ou générées par conversion de somme de fréquence à partir de deux sources d'impulsions laser ultra-courtes, lesdites deux impulsions laser incidentes sur un cristal optique non linéaire étant synchronisées temporellement, et lesdits N cristaux optiques non linéaires (1, 2) étant disposés de manière à générer, par somme de fréquence successives dans lesdits N cristaux optiques non linéaire (1, 2), une impulsion laser convertie en fréquence (132).

30

35

3. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon la revendication 2 comprenant :

- deux sources (11, 12, 211, 212, 311, 312) d'impulsions laser distinctes, chaque source d'impulsions laser (11, 12, 211, 212, 311, 312) étant adaptée pour émettre une impulsion laser ultra-courte (31, 32) dans le domaine visible ou infrarouge ; et
- un cristal optique non linéaire (1) adapté pour recevoir simultanément une impulsion laser ultra-courte (31, 32) de chacune des deux sources d'impulsions laser distinctes (11, 12, 211, 212, 311, 312),
- le cristal optique non linéaire (1) étant adapté pour générer, par somme de fréquence, une impulsion laser (131) ultra-courte, ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques des deux sources (11, 211, 12, 212, 311, 312).

4. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon la revendication 2 comprenant :

- trois sources (11, 12, 13, 211, 212, 213, 311, 312, 313) d'impulsions laser distinctes, chaque source d'impulsions laser (11, 12, 13, 211, 212, 213, 311, 312, 313) étant adaptée pour émettre une impulsion laser ultra-courte (31, 32, 33) dans le domaine visible ou infrarouge ; et
- un premier cristal optique non linéaire (1) adapté pour recevoir simultanément deux impulsions laser ultra-courtes (31, 32) émises respectivement par deux parmi les trois sources d'impulsions laser (11, 12, 211, 212, 311, 312),
- les moyens de synchronisation temporelle (41, 42, 50, 51, 52) étant adaptés pour synchroniser temporellement lesdites deux impulsions laser (31, 32) incidentes sur le premier cristal optique non linéaire (1) de manière à ce que lesdites deux impulsions laser distinctes (31, 32) se superposent temporellement et spatialement dans le premier cristal optique non linéaire (1) avec un déphasage quelconque, le premier cristal optique non linéaire (1) étant adapté pour générer, par somme de fréquence, une impulsion laser (131) ultra-courte convertie en fréquence, ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques desdites deux sources (11, 12, 211, 212, 311, 312),
- un deuxième cristal optique non linéaire (2) étant adapté pour recevoir simultanément ladite impulsion laser (131) ultra-courte convertie en fréquence et une autre impulsion laser ultra-courte (33) émise respectivement par l'autre source d'impulsions laser (13, 213, 313) parmi les trois sources d'impulsions laser,

- 5
10
- les moyens de synchronisation (43, 50, 53) étant adaptés pour synchroniser temporellement ladite impulsion laser (131) convertie en fréquence et ladite autre impulsion laser (33) incidentes sur le deuxième cristal optique non linéaire (2) de manière à ce que lesdites impulsions laser (131, 33) ultra-courtes se superposent temporellement et spatialement dans le deuxième cristal optique non linéaire (2) avec un déphasage quelconque, le deuxième cristal optique non linéaire (2) étant adapté pour générer, par somme de fréquence, une impulsion laser (132) ultra-courte ayant une fréquence optique égale à la somme des fréquences optiques desdites trois sources (11, 12, 13, 211, 212, 213, 311, 312, 313).
- 15
20
5. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel chaque source (11, 12, 13, 211, 212, 213, 311, 312, 313) d'impulsions laser est adaptée pour émettre une impulsion ultra-courte (31, 32, 33), et dans lequel les moyens de synchronisation (41, 42, 43, 50, 51, 52, 53) sont adaptés pour synchroniser temporellement deux impulsions laser distinctes (31, 32, 33) incidentes sur un cristal optique non linéaire (1, 2) de manière à ce que lesdites deux impulsions laser distinctes (31, 32, 33) se superposent temporellement dans ledit cristal optique non linéaire (1, 2) avec une précision temporelle inférieure ou égale à 10 % rms de la durée desdites impulsions ultra-courtes et de préférence inférieure ou égale à 5 % rms de la durée desdites impulsions ultra-courtes.
- 25
30
6. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel les moyens de synchronisation comprennent au moins une ligne à retard optique (41, 42) disposée entre d'une part l'une desdites source d'impulsions lumineuse (11, 12, 211, 212) et ledit cristal optique non linéaire (1), la ligne à retard optique (41, 42) étant adaptée pour réduire un retard temporel entre deux impulsions lumineuses (31) incidentes sur ledit cristal optique non linéaire (1).
- 35
7. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel les moyens de synchronisation comprennent des moyens électroniques de synchronisation (50, 51, 52, 53) adaptés pour synchroniser temporellement deux impulsions laser ultra-courtes (31, 32) dans un cristal optique non linéaire (1, 2).
8. Système laser à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel ladite pluralité de sources

comprend une pluralité de sources laser (11, 12, 13), chaque source laser (11, 12, 13) étant adaptée pour émettre au moins une impulsion laser ultra-courte (31, 32, 33).

- 5 9. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel ladite pluralité de sources d'impulsions laser comprend :
- un oscillateur optique (10, 80) commun adapté pour générer des impulsions mères ultra-courtes de longueur d'onde λ_1 ; et
 - 10 – une pluralité de systèmes amplificateurs optiques (21, 22, 23, 81, 82, 83), chaque système amplificateur optique (21, 22, 23, 81, 82, 83) étant adapté pour recevoir une impulsion mère ultra-courte (20) de longueur d'onde λ_1 et pour générer une impulsion lumineuse ultra-courte (31, 32, 33) amplifiée de longueur d'onde λ_1 .
- 15 10. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 9, comportant en outre un dispositif d'asservissement temporel, comprenant un cross-corrélateur différentiel adapté pour mesurer un retard temporel entre deux impulsions laser distinctes (31, 32, 33)
- 20 incidentes sur un cristal optique non-linéaire (1, 2).
11. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 10, dans lequel ledit cristal optique non linéaire (1, 2) est un cristal optique non linéaire à multiplexage par polarisation ou à
- 25 multiplexage angulaire, ledit cristal optique non linéaire (1, 2) étant choisi parmi un cristal de bêta borate de baryum (β -BaB₂O₄), ou un cristal de triborate de lithium (LiB₃O₅) ou un cristal de niobate de lithium (LiNbO₃) de type à quasi-accord de phase ou PPLN.
- 30 12. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 11, dans lequel la pluralité de sources d'impulsions laser distinctes (11, 12, 13, 211, 212, 213, 311, 312, 313) comporte une pluralité de sources laser à fibres optiques de forte énergie.
- 35 13. Système laser UV-visible à impulsions ultra-courtes de forte puissance et/ou de forte énergie selon l'une des revendications 1 à 12, dans lequel la pluralité de sources d'impulsions laser distinctes (11, 12, 13, 211, 212, 213, 311, 312, 313) comporte une pluralité de sources laser solides à cristaux de forte puissance.

Fig.1

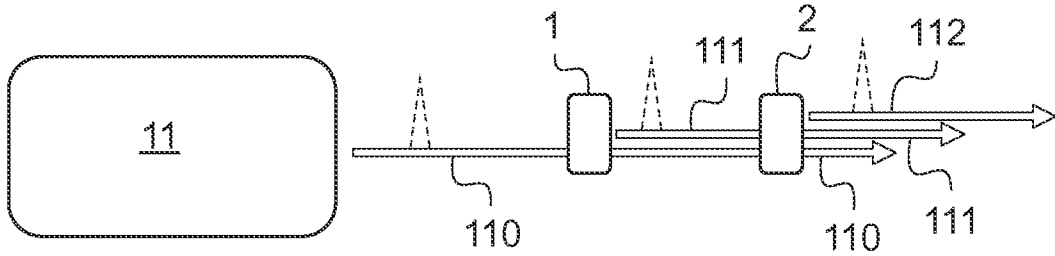


Fig.2

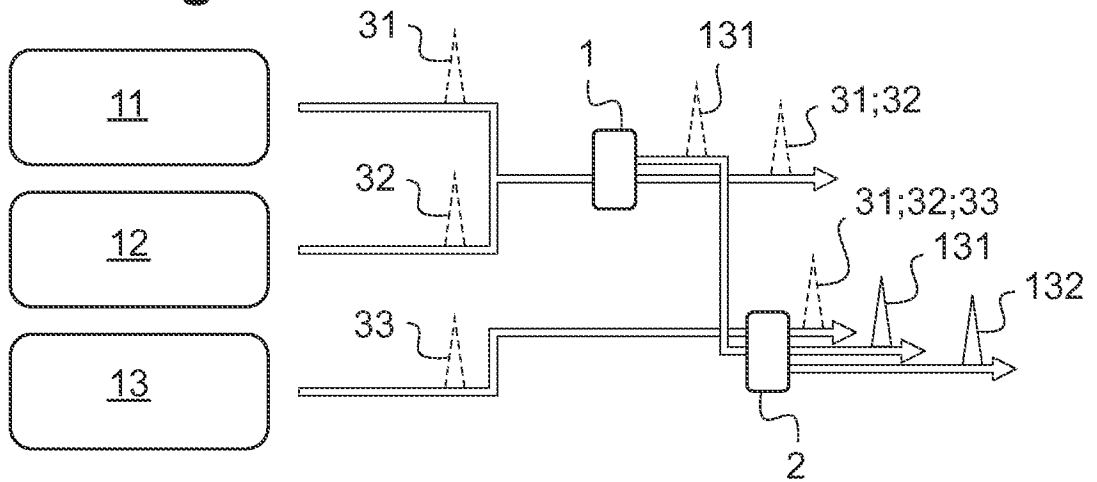


Fig.3

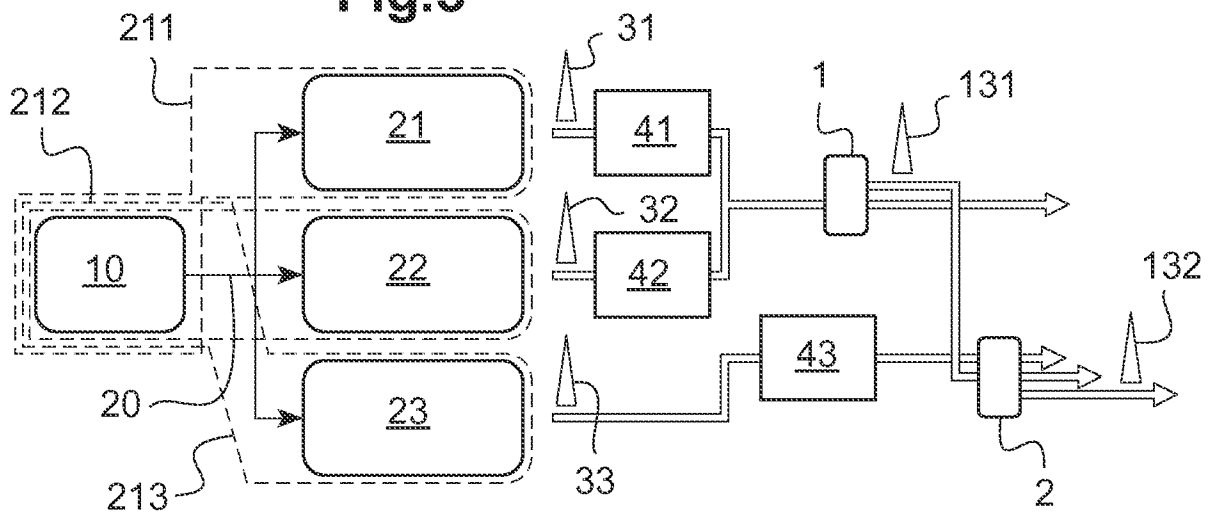


Fig.4

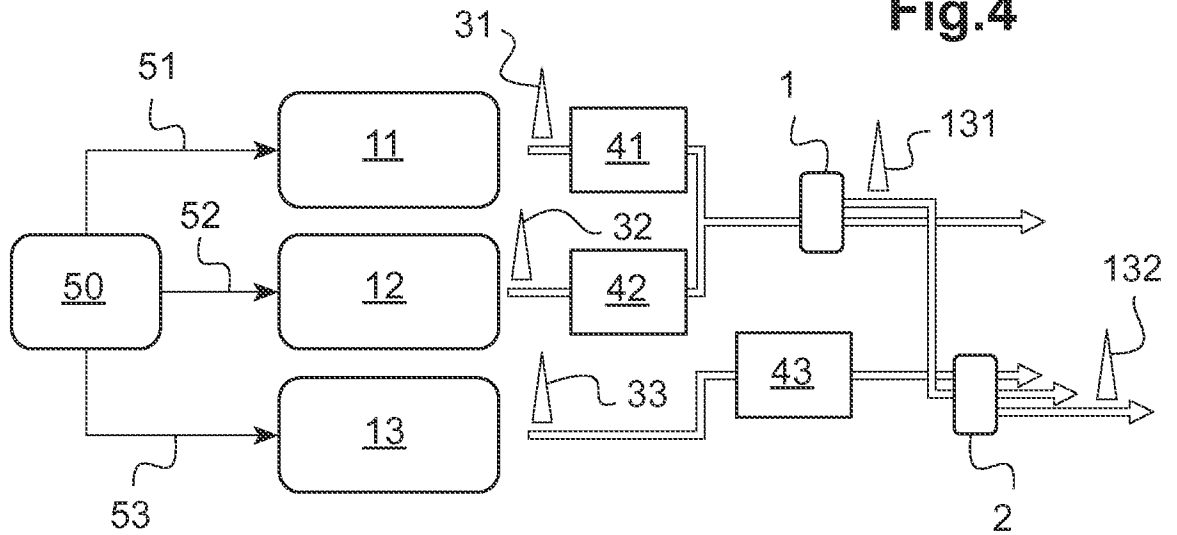


Fig.5

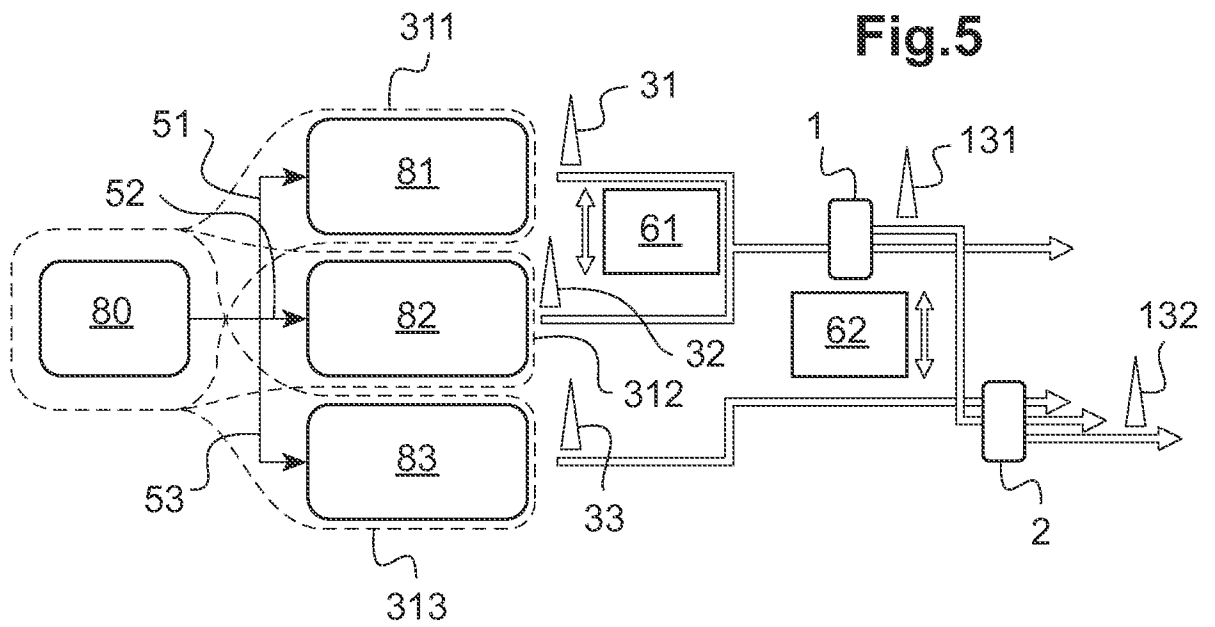
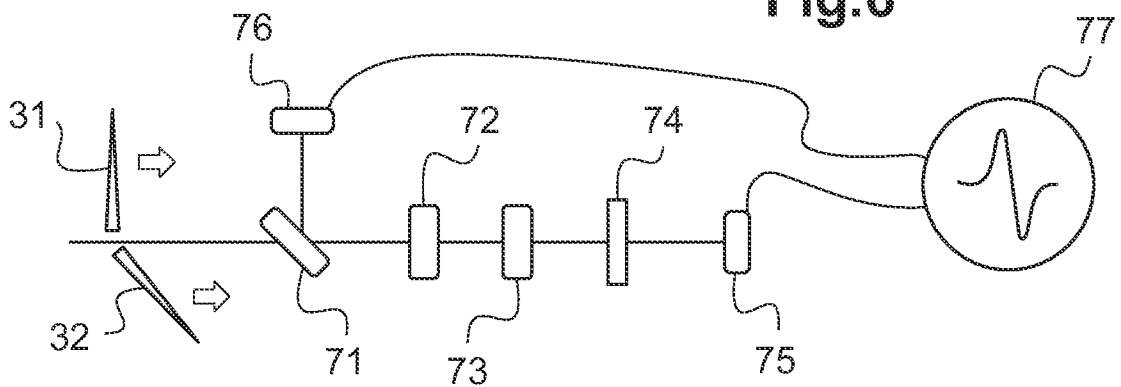


Fig.6



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2015/051847

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. H01S3/067 H01S5/00 H01S3/23 H01S3/00
 ADD. G02F1/35 B23K26/06 H01S3/16

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 H01S G02F B23K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
 EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	HUAN ZHAO ET AL: "Sum-frequency generation between an actively synchronized ultrashort Ti:sapphire laser and a Nd:YVO4 laser", JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 25, no. 7, 24 April 2008 (2008-04-24), pages B39-B43, XP007907952, ISSN: 0740-3224, DOI: 10.1364/JOSAB.25.000B39 [retrieved on 2008-04-24]	1,5,6,8, 13
A	page b39, paragraph 1-2 - page b41; figures 1,7 ----- -/--	2-4,7, 9-12

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 13 October 2015	Date of mailing of the international search report 23/10/2015
--	--

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Cortona, Anna
--	---

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2015/051847

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	US 2010/150183 A1 (STARODOUMOV ANDREI [US] ET AL) 17 June 2010 (2010-06-17) paragraphs [0002] - [0005], [0016], [0022], [0034]; figures 1,3-5 -----	1,8,9, 11,12 2-7,10, 13
X A	US 2011/267671 A1 (PENG XIAOYUAN [US] ET AL) 3 November 2011 (2011-11-03) paragraphs [0046] - [0050], [0070]; figures 1,4 -----	1,7,8 2-6,9-13
X A	WO 02/29945 A1 (UNIV JOHNS HOPKINS [US]) 11 April 2002 (2002-04-11) page 1, lines 6-8 page 10, lines 10-14; figure 2 -----	1-3 4-13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2015/051847

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2010150183	A1	17-06-2010	EP 2376980 A1 19-10-2011
			US 2010150183 A1 17-06-2010
			WO 2010074869 A1 01-07-2010

US 2011267671	A1	03-11-2011	CN 101990729 A 23-03-2011
			EP 2260551 A2 15-12-2010
			JP 5461519 B2 02-04-2014
			JP 2011516913 A 26-05-2011
			KR 20100135850 A 27-12-2010
			TW 201004073 A 16-01-2010
			US 2011267671 A1 03-11-2011
			WO 2009137182 A2 12-11-2009

WO 0229945	A1	11-04-2002	AU 1145902 A 15-04-2002
			US 2002054613 A1 09-05-2002
			WO 0229945 A1 11-04-2002

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2015/051847

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H01S3/067 H01S5/00 H01S3/23 H01S3/00 ADD. G02F1/35 B23K26/06 H01S3/16		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) H01S G02F B23K		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	HUAN ZHAO ET AL: "Sum-frequency generation between an actively synchronized ultrashort Ti:sapphire laser and a Nd:YVO4 laser", JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 25, no. 7, 24 avril 2008 (2008-04-24), pages B39-B43, XP007907952, ISSN: 0740-3224, DOI: 10.1364/JOSAB.25.000B39 [extrait le 2008-04-24]	1,5,6,8, 13
A	page b39, alinéa 1-2 - page b41; figures 1,7 ----- -/--	2-4,7, 9-12
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents		
<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets	
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale	
13 octobre 2015	23/10/2015	
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé	
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Cortona, Anna	

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X A	US 2010/150183 A1 (STARODOUMOV ANDREI [US] ET AL) 17 juin 2010 (2010-06-17) alinéas [0002] - [0005], [0016], [0022], [0034]; figures 1,3-5 -----	1,8,9, 11,12 2-7,10, 13
X A	US 2011/267671 A1 (PENG XIAOYUAN [US] ET AL) 3 novembre 2011 (2011-11-03) alinéas [0046] - [0050], [0070]; figures 1,4 -----	1,7,8 2-6,9-13
X A	WO 02/29945 A1 (UNIV JOHNS HOPKINS [US]) 11 avril 2002 (2002-04-11) page 1, lignes 6-8 page 10, lignes 10-14; figure 2 -----	1-3 4-13

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2015/051847

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2010150183 A1	17-06-2010	EP 2376980 A1	19-10-2011
		US 2010150183 A1	17-06-2010
		WO 2010074869 A1	01-07-2010

US 2011267671 A1	03-11-2011	CN 101990729 A	23-03-2011
		EP 2260551 A2	15-12-2010
		JP 5461519 B2	02-04-2014
		JP 2011516913 A	26-05-2011
		KR 20100135850 A	27-12-2010
		TW 201004073 A	16-01-2010
		US 2011267671 A1	03-11-2011
		WO 2009137182 A2	12-11-2009

WO 0229945 A1	11-04-2002	AU 1145902 A	15-04-2002
		US 2002054613 A1	09-05-2002
		WO 0229945 A1	11-04-2002
