

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ **GENERATEUR PULSE DE PARTICULES CHARGEES ELECTRIQUEMENT ET PROCEDE D'UTILISATION D'UN GENERATEUR PULSE DE PARTICULES CHARGEES ELECTRIQUEMENT.**

②② **Date de dépôt** : 02.07.19.

③③ **Priorité** :

⑥⑥ **Références à d'autres documents nationaux apparentés** :

☐ **Demande(s) d'extension** :

⑦① **Demandeur(s)** : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Organisme à but non lucratif du secteur de la recherche — FR.

④③ **Date de mise à la disposition du public de la demande** : 08.01.21 Bulletin 21/01.

④⑤ **Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention** : 11.04.25 Bulletin 25/15.

⑤⑥ **Liste des documents cités dans le rapport de recherche** :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② **Inventeur(s)** : GELEOC Marie, RENAULT Jean-Philippe et OKSENHENDLER Thomas.

⑦③ **Titulaire(s)** : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Organisme à but non lucratif du secteur de la recherche.

⑦④ **Mandataire(s)** : CABINET CAMUS LEBKIRI.



Description

Titre de l'invention : GENERATEUR PULSE DE PARTICULES CHARGEES ELECTRIQUEMENT ET PROCEDE D'UTILISATION D'UN GENERATEUR PULSE DE PARTICULES CHARGEES ELECTRIQUEMENT DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

- [0001] L'invention se situe dans le domaine des générateurs de particules chargées électriquement pour les analyses de chimie, de physico-chimie ou de biologie. Un objet de l'invention est un générateur pulsé de particules chargées électriquement capable de générer des paquets de particules ayant une durée temporelle inférieure ou égale à 1 nanoseconde voire inférieure ou égale à 5 picosecondes selon une réalisation de l'invention, voire inférieure ou égale à 100 femtosecondes.
- [0002] Le générateur selon l'invention est capable de produire des paquets d'électrons ou d'ions. Les applications du dispositif selon l'invention concernent tous les domaines de l'interaction électron-matière : caractérisations par diffraction (LEED, RHEED, phase gaz, nano-objets, UED), études de physique des surfaces, spectroscopie Auger, expériences et sources d'ionisation (aérosols, spectrométrie de masse), durcissement de matériaux, irradiations (tests de scintillateurs, irradiations de simulation, micro-fabrication, matériaux biologiques), CND, analyse de contaminants, microscopie, désorption induite par des électrons. Un autre objet de l'invention est un procédé d'utilisation du générateur de particules chargées selon l'invention.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

- [0003] Le domaine des générateurs d'électrons ou de particules chargées, relativement récent, se trouve segmenté en plusieurs familles technologiques qui communiquent peu entre elles et ont chacune des habitudes de travail systématiques, guère remises en question, et qui découlent des origines technologiques de chaque famille de chercheurs. Dans chacune, des décennies de travail et d'expérimentations ont conduit à privilégier des choix techniques représentant de bons compromis, et à ce titre jamais remis en question. Ainsi chaque famille réalise un type de source optimisé, mais par rapport aux dits compromis ou aux habitudes de travail. Cela conduit à des choix technologiques orientant fortement les caractéristiques de la source inventée.
- [0004] Une première famille est celle des Physiciens des Accélérateurs ou des Hautes Energies. Elle développe des équipements robustes et très lourds, dont les dimensions sont importantes. Elle suppose des vides très poussés (pressions inférieures à 10^{-7} mbar, et le plus souvent ultravide avec des pressions inférieures à 10^{-9} mbar). Les

distances sont en décimètres ou en mètres, voire beaucoup plus, et les tensions appliquées aux diverses électrodes sont en dizaines de kV, voire en MV ou en GV. Les isolants aussi sont massifs et en matériaux éprouvés, pas toujours faciles à usiner.

- [0005] Sur synchrotron, les particules obtenues sont très énergétiques, en train continu ou en paquets de nombreuses particules, à haute cadence de répétition (300 GHz). Ces particules ne sont pas utilisées, car elles ne sortent pas de l'anneau, mais elles servent à produire des photons. Le laser à électrons libres (ou XFEL selon la traduction anglaise X-ray Free Electron Laser) est une machine qui tend à remplacer les synchrotrons et qui est aussi à disposition des utilisateurs des photons.
- [0006] Sur accélérateur, les cadences de répétition sont de 25 à 50 MHz en raison de la complexité des événements à détecter et des fonctionnements des détecteurs.
- [0007] La charge d'espace est alors élevée, et les répulsions coulombiennes entre les particules d'un même paquet contraignent à l'utilisation de systèmes de compression et de focalisation volumineux et puissants (tels que des lentilles électrostatiques ou des cavités RF), qui allongent fortement la durée temporelle des paquets de particules émis. De plus, les équipements doivent faire face à un environnement radiatif généralement sévère. Dans cette famille, les canons à électrons peuvent être pulsés mais jamais en régime mono-électronique (i.e. quelques électrons par paquet) car de fortes intensités de courant sont requises.
- [0008] Par exemple, le document « A pulsed electron gun for ultrafast electron diffraction at surfaces » de A. Janzen et al. publié dans « Review of Scientific Instruments » N. 78 en 2007 divulgue un canon à électrons pour l'analyse de surfaces par faisceaux d'électrons. Ce dispositif permet de maintenir l'ultravide nécessaire à l'application visée. Dans ce canon, la cathode et l'anode sont aussi espacés que possible de sorte à minimiser le risque de claquage électrique et la focalisation du faisceau d'électrons est réalisée à l'aide de lentilles électrostatiques.
- [0009] Le document « Intrinsic Emittance Reduction of an Electron Beam from Metal Photocathodes » de C. P. Hauri et al. publié dans "Physical Review Letters" N. 104 en 2010 divulgue l'utilisation de différentes cibles de conversion métalliques telles que le Mo, le Nb ou l'Al habituellement utilisées en physique des hautes énergies. Toutefois ce document se réfère exclusivement à des dispositifs de grandes tailles.
- [0010] La seconde famille est celle des Physiciens de l'Optique. Elle utilise bien entendu une source primaire laser et une cible de conversion, habituellement métallique ou semi-conductrice, mais aussi plasma. Elle est souvent pulsée, à une cadence de récurrence de 10 Hz à quelques MHz, mais toujours fixe. Les réalisations s'efforcent d'obtenir des paquets de particules significativement plus petits que pour la première famille, afin de réduire la charge d'espace. Pour cette famille, l'objectif principal affiché est la course à l'obtention de la durée ultime du paquet de particules (de la

centaine d'attosecondes à la centaine de femtosecondes), sans considérations pour le degré de vide, la simplicité ou le confort d'utilisation. Les énergies impliquées peuvent être plus faibles que celles de la première famille, mais les énergies de faisceau visées sont généralement de 30 keV à 200 MeV. Dans cette famille, les canons à électrons peuvent être pulsés en régime mono-électronique mais pas nécessairement (ils peuvent délivrer des paquets de plusieurs dizaines de milliers d'électrons, comme la 1ère famille), les distances sont en décimètres ou en mètres et un vide de type poussé ou ultravide est nécessaire.

- [0011] Par exemple, le document « On the physics of ultrashort single-electron pulses for time-resolved microscopy and diffraction » de P. Baum publié dans « Chemical Physics » en 2013 divulgue des méthodes pour la réduction de la durée des paquets d'électrons, notamment en réduisant le nombre de particules composant chaque paquet. Toutefois, ces méthodes sont applicables uniquement à des dispositifs de grande taille et dans des conditions d'utilisation strictes.
- [0012] Le document « Ultrashort pulse electron gun with a MHz repetition rate » de D. Wytrykus et al. publié dans Applied Physics B en 2009 décrit un canon à électrons générant des paquets de particules à une fréquence de 2.7 MHz. Ces paquets peuvent comprendre un nombre très faible d'électrons. Toutefois, la dispersion en énergie des électrons générés est grande avec un rapport $\Delta E/E$ de l'ordre de 0.12 eV. Par ailleurs, le système requiert une distance entre la photocathode et l'échantillon grande de l'ordre de 300 mm, ce qui limite fortement la compacité du dispositif. Par ailleurs, la durée temporelle des paquets d'électrons n'est pas mesurée et seulement une valeur théorique est donnée.
- [0013] La troisième famille technologique est celle des Physico-chimistes. Elle s'efforce de produire des particules suffisamment énergétiques pour ioniser la matière, mais ne maîtrise pas la source primaire. Elle vise à placer l'échantillon au plus proche de la production des particules et ne recherche pas nécessairement le vide poussé ou l'ultravide pour ses applications. Les instruments ainsi développés ont des résolutions temporelles faibles et des énergies mal définies. Lorsque ces deux paramètres deviennent importants pour les études, les physico chimistes doivent recourir aux instruments de la première famille.
- [0014] Par exemple, le document « Femtosecond electron diffraction: 'making the molecular movie' » de J. R. Dwyer et al. publié dans Philosophical Transactions of the Royal Society A en 2006 présente une revue sur la génération de paquets d'électrons femtosecondes, en liaison directe avec la diffraction d'électrons femtosecondes et les applications sous ultravide. Ce document enseigne en outre qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de système de détection de résolution suffisante pour monitorer les nouveaux types de paquets d'électrons produits.

- [0015] Le document « Medium Vacuum Electron Emitter as Soft Atmospheric Pressure Chemical Ionization Source for Organic Molecules » de S. Liedtke et al. décrit une source de paquets d'électrons ayant une pression interne de fonctionnement élevée. Toutefois, ce dispositif utilise une source d'électrons par chauffage d'une cathode ou émission thermo-ionique. Cela comporte une mauvaise résolution temporelle ainsi qu'une température d'utilisation élevée, ce qui n'est pas compatible avec des échantillons fragiles ou liquides.
- [0016] Une quatrième famille technologique est celle des Physiciens de la Microscopie Electronique. On peut l'illustrer par le document WO 2010/042629 A2 qui vise à faire coopérer dans un microscope électronique une source thermo-ionique et une source de photons venant moduler l'émission de la 1ère source. Le document DE 10245052 A1 concerne un microscope électronique mais dont la source d'électrons est réalisée selon les techniques de la deuxième famille avec un train de paquets d'électrons haché de manière attoseconde par une interaction avec un laser ultra-rapide. L'ensemble est sous ultravide avec des lentilles électrostatiques de focalisation.
- [0017] La demanderesse a aussi développé un canon à électrons pouvant générer des paquets de particules par émission photoélectrique. Ce dispositif, appelé LUBIOL, présente une enceinte à vide avec une pression de fonctionnement très faible et de l'ordre de 10^{-7} mbar. Les paquets d'électrons comportent un nombre de particules élevé et de l'ordre de 10^3 . L'énergie cinétique des électrons est de l'ordre du keV avec un taux de répétition de l'ordre du kHz. Un système de lentilles électrostatiques est utilisé pour maintenir ces caractéristiques du faisceau d'électrons au niveau de l'échantillon. Ce système présente un certain nombre d'inconvénients, notamment l'impossibilité de s'affranchir du vide poussé, i.e. d'augmenter la pression de fonctionnement, l'impossibilité d'extraire le faisceau en présence d'atmosphère gazeuse, l'impossibilité de travailler avec des échantillons fragiles ou liquides ou désorbants, l'impossibilité de réduire les dimensions du système et l'impossibilité d'obtenir un instrument robuste et simple d'utilisation.
- [0018] Plus généralement, les générateurs de particules chargées électriquement de l'état de l'art présentent des contraintes qui empêchent leur utilisation pour l'analyse de certains échantillons. Par exemple, les dispositifs qui requièrent un vide poussé ne permettent pas l'analyse d'échantillons biologiques, liquides ou désorbants. De plus, les systèmes qui permettent une pression de fonctionnement élevée et donc compatible avec des échantillons fragiles, ont une faible résolution temporelle et en énergie.
- [0019] En outre, la plupart des générateurs de particules chargées électriquement connus de l'homme du métier utilise des tensions d'accélération des électrons très élevées. Cela entraîne une consommation d'énergie élevée. De plus, la distance entre cathode ou

photocathode et anode doit être augmentée considérablement pour réduire tout risque de claquage électrique. Il n'existe donc pas de générateurs pulsés rapides de particules chargées électriquement de faible encombrement.

[0020] Pour résoudre au moins partiellement ces problèmes techniques, l'invention vise à réaliser une source pulsée ultrarapide de particules chargées électriquement qui soit portable, donc ayant des dimensions et une consommation en énergie aussi faibles que possible, et qui ait une résolution temporelle de l'ordre de la picoseconde, tout en détruisant le moins possible les échantillons fragiles, tels que les échantillons liquides ou biologiques.

Résumé de l'invention

[0021] A cette fin, l'invention porte sur un générateur pulsé de particules chargées électriquement comprenant :

- une source de lumière pulsée ;
- une enceinte à vide ;

ledit générateur étant caractérisé en ce que :

- l'enceinte à vide est configurée pour maintenir une pression interne de fonctionnement comprise entre 10^{-6} mbar et la pression atmosphérique ;
- l'enceinte à vide est configurée pour accueillir une photocathode et une anode, la photocathode et l'anode étant séparées par une distance ajustable inférieure ou égale à 30 mm ;
- l'enceinte à vide comporte une fenêtre optique permettant à la lumière impulsionnelle d'atteindre une face de la photocathode ;
- l'anode présente un orifice adapté pour le passage des particules chargées électriquement ;
- ledit générateur pulsé de particules chargées électriquement comprend des moyens pour appliquer une tension électrique entre photocathode et anode, ladite tension électrique étant configurée pour accélérer les particules chargées.

[0022] On entend par particules chargées électriquement des électrons ou des ions destinés à l'analyse chimique, physico-chimique ou biologique d'un échantillon à caractériser.

[0023] Selon un mode de réalisation, le canon produit au départ des électrons qui sont éventuellement convertis en ions par interaction avec un milieu approprié.

[0024] Avantagusement, le générateur selon l'invention permet de produire des paquets de particules chargées ayant une durée temporelle ultra-courte, par exemple inférieure ou égale à 5 picosecondes. Selon un mode de réalisation, les paquets générés comprennent un faible nombre de particules chargées, voire une seule particule chargée. Plus en général, l'invention permet d'obtenir des paquets de particules chargées ayant une

durée temporelle inférieure ou égale à 1 nanoseconde voire inférieure ou égale à 5 picosecondes selon une réalisation de l'invention, voire inférieure ou égale à 100 femtosecondes.

- [0025] On entend par source de lumière pulsée une source de lumière capable de fournir des impulsions de lumière. Selon un mode de réalisation, la source de lumière pulsée est un laser fournissant des impulsions de la durée de 120 fs avec un taux de répétition de 80 MHz. Selon un mode de réalisation, les impulsions ont une longueur d'onde moyenne centrée dans l'ultraviolet, par exemple autour de 266 nm. Selon un mode de réalisation, la lumière utilisée est une lumière incohérente, telle qu'une LED pulsée émettant des impulsions ayant une durée temporelle inférieure ou égale à 70 picosecondes.
- [0026] On entend par enceinte à vide un dispositif permettant de maintenir une pression interne inférieure ou égale à la pression atmosphérique. L'enceinte à vide est en outre configurée pour accueillir les éléments nécessaires à la production des paquets de particules chargées. Selon un mode de réalisation, l'enceinte à vide est configurée pour accueillir aussi l'échantillon à caractériser. Selon un autre mode de réalisation, l'enceinte à vide est munie d'une fenêtre transparente aux particules chargées et placées sur l'axe de leur trajet de sortie de l'enceinte, et l'échantillon est placé sur ce trajet à l'extérieur de l'enceinte, de préférence au plus près de celle-ci.
- [0027] L'enceinte à vide est configurée pour maintenir une pression de fonctionnement comprise entre 10^{-6} mbar et la pression atmosphérique. En particulier, le dispositif selon l'invention peut être configuré pour travailler à une pression de fonctionnement comprise entre 10^{-3} mbar et la pression atmosphérique ce qui permet l'analyse d'échantillons fragiles, liquides ou biologiques.
- [0028] On entend par photocathode une électrode destinée à émettre des électrons par effet photoélectrique ou photoélectrons. Les photoélectrons sont obtenus en envoyant la lumière pulsée sur la photocathode. Selon un mode de réalisation la photocathode est métallique.
- [0029] L'orifice présent sur l'anode permet le passage des particules chargées électriquement et accélérées par la tension d'accélération appliquée entre photocathode et anode.
- [0030] Les particules chargées sortant de l'anode peuvent ensuite être envoyées sur un échantillon à analyser.
- [0031] On entend par fenêtre optique un élément optique permettant à la lumière impulsionnelle d'atteindre la photocathode. La fenêtre optique peut par exemple comprendre un hublot, un passage de fibre optique, une lentille ou une combinaison de ces éléments. La fenêtre optique est étanche, assurant le maintien de la pression de travail à l'intérieur de l'enceinte à vide.

- [0032] La distance entre cathode et anode est ajustable, ce qui permet d'adapter la distance à la tension d'accélération utilisée. Avantageusement cela permet d'obtenir un dispositif très compact en fonction de la tension appliquée.
- [0033] Par exemple, la distance L entre la photocathode et l'anode a une valeur de 300 μm pour une tension d'accélération de 5 kV. Lorsque cette tension est de l'ordre de 10, 20 ou 30 kV, cette distance est augmentée d'un facteur proportionnel 2, 4 ou 6 pour éviter le claquage électrique, mais la taille du dispositif reste de l'ordre de grandeur du mm ce qui est bien inférieur à l'art antérieur.
- [0034] Avantageusement, la réduction de la distance entre photocathode et anode autorise une pression de fonctionnement plus élevée à l'intérieur de l'enceinte à vide. Le générateur de particules selon l'invention fonctionne avec une pression de travail plus élevée que les générateurs de particules de l'état de l'art. Cela permet d'analyser des échantillons biologiques ou liquides qui ne sont pas compatibles avec le vide ou l'ultravide.
- [0035] Avantageusement, grâce à une pression de fonctionnement élevée, l'échantillon à caractériser peut-être placé à l'intérieur de l'enceinte à vide et plus près de l'anode que dans l'art antérieur. Cela permet de réduire la distance entre photocathode et échantillon à analyser et donc de réduire les effets de dispersion temporelle des paquets de particules chargées. En d'autres termes, le générateur selon l'invention permet d'obtenir des paquets de particules chargées ayant des durées temporelles très courtes inférieures à 5 picosecondes, voire inférieures à la picoseconde.
- [0036] Avantageusement, le générateur de particules chargées selon l'invention permet donc d'analyser des échantillons fragiles tels que des échantillons liquides ou biologiques avec une résolution temporelle très élevée, ce qui n'est pas possible avec les dispositifs connus de l'homme du métier. De plus, le générateur selon l'invention présente des dimensions réduites et une faible consommation d'énergie.
- [0037] Lorsque les échantillons à analyser ne supportent pas une pression inférieure à la pression atmosphérique, on peut recourir à la variante de l'invention comportant une fenêtre transparente aux particules chargées et situés sur leur trajet. L'échantillon est alors placé contre cette fenêtre tout en étant à l'extérieur de l'enceinte à vide. Si l'échantillon est liquide, le générateur selon l'invention peut être orienté de manière à ce que le faisceau sorte par le haut, la fenêtre de sortie des particules étant alors horizontale.
- [0038] Selon un mode de réalisation, la photocathode comprend un film d'Au, ce qui permet une durée de vie bien plus grande sans entretien en conditions de vide dégradé que les photocathodes utilisées par l'homme de métier en matériau semiconducteur. L'invention peut utiliser ce type de photocathode avec film d'Au, délaissé par l'homme de métier, en raison du choix délibéré d'un faible nombre d'électrons par

impulsion, ce qui est compensé par le fait que ces impulsions sont renouvelées à haute cadence.

[0039] Selon un mode de réalisation, les éléments présents à l'intérieur de l'enceinte à vide sont obtenus par dépôt de couches minces ou ultra-minces sur des lames présentant un poli de qualité optique. Cela permet d'appliquer des champs électriques ayant des intensités supérieures à 30 MV/m tout en réduisant le risque de claquage électrique.

[0040] Selon un mode de réalisation le générateur de particules chargées selon l'invention comporte en outre des moyens pour modifier la direction du faisceau de lumière pulsée, de sorte à modifier le point et l'angle d'attaque de la photocathode. En d'autres termes, le générateur selon l'invention permet de modifier le point de focalisation du faisceau lumineux ainsi que son angle d'arrivée sur la photocathode.

[0041] Selon un mode de réalisation, le générateur selon l'invention comporte en outre un détecteur de claquage. Avantageusement, le détecteur de claquage permet de déterminer, pour une tension d'accélération donnée, la pression de claquage électrique. Il est donc possible de choisir une pression de travail élevée tout en évitant le claquage électrique.

[0042] Il est important de noter que, dans la conception usuelle des canons à électrons, on cherche à se situer hors des conditions de claquage avec une marge de sécurité, c'est la raison pour laquelle les électrodes sont très éloignées et les canons ont des dimensions de quelques dizaines de cm. A l'inverse, le dispositif selon l'invention évite le claquage électrique non pas par un vide plus poussé comme dans l'art antérieur, mais au contraire par un vide peu marqué, voire quasi inexistant associé à un détecteur de claquage constitué d'un éclateur réglé sur une tension légèrement inférieure à la tension de claquage du dispositif, et donnant un signal d'alerte permettant d'écarter un peu les conditions de fonctionnement (pression de l'enceinte à vide ou distance anode-cathode) des conditions de claquage.

[0043] Avantageusement, le dispositif selon l'invention permet de générer des paquets de particules ayant une durée temporelle inférieure ou égale à 1 nanoseconde voire inférieure ou égale à 5 picosecondes selon une réalisation de l'invention, voire inférieure ou égale à 100 femtosecondes.

[0044] Le dispositif selon l'invention peut également comporter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes selon toutes les combinaisons techniquement possibles :

- la distance entre photocathode et anode est inférieure ou égale à 2 mm et la tension électrique d'accélération est inférieure ou égale à 30 kV de sorte à obtenir des paquets de particules chargées électriquement, chaque paquet ayant une durée temporelle inférieure ou égale à 5 ps ;
- la distance entre photocathode et anode est inférieure ou égale à 2 mm et la tension électrique d'accélération est inférieure ou égale à 10 kV de sorte

à obtenir des paquets de particules chargées électriquement, chaque paquet ayant une durée temporelle inférieure ou égale à 5 ps ;

- la tension d'accélération est inférieure ou égale à 5 kV et la distance entre photocathode et anode est inférieure ou égale à 300 μm ;
- la tension d'accélération est inférieure ou égale à 10 kV et la distance entre photocathode et anode est inférieure ou égale à 600 μm ;
- la tension d'accélération est inférieure ou égale à 20 kV et la distance entre photocathode et anode est inférieure ou égale à 1,2 mm ;
- la tension d'accélération est inférieure ou égale à 30 kV et la distance entre photocathode et anode est inférieure ou égale à 1,8 mm ;
- la source de lumière pulsée produit des impulsions lumineuses ayant une durée temporelle inférieure ou égale à 5 ps ;
- le générateur comprend en outre un détecteur de claquage ;
- le détecteur de claquage est placé à proximité de l'anode et comprend:
 - un substrat en matériau isolant à forte constante diélectrique ;
 - un anneau et une tige en matériau conducteur portés au même potentiel que l'anode ;
 - une tige en matériau conducteur, ladite tige étant mobile et pouvant se rapprocher de l'anneau conducteur ;
- le détecteur de claquage est configuré pour déterminer la pression de claquage électrique sous la tension d'accélération utilisée ;
- le générateur pulsé de particules chargées électriquement est adapté pour accueillir un échantillon à analyser, la distance entre la photocathode et l'échantillon à analyser étant inférieure ou égale à 60 mm et selon un mode de réalisation inférieure ou égale à 0,7 mm ;
- l'échantillon à analyser est placé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'enceinte à vide ;
- le générateur selon l'invention possède dans l'axe du faisceau de particules chargées une fenêtre transparente aux dites particules chargées et permettant de conserver dans l'enceinte une pression inférieure à la pression atmosphérique ;
- la fenêtre transparente aux particules chargées est une membrane ;
- la membrane est en nitrure de silicium Si_3N_4 ou en graphène $(\text{C})_n$ et possède une épaisseur comprise entre quelques nm et quelques centaines de nm, typiquement entre 2 et 200 nm ;
- la photocathode comprend un empilement nanométrique métallique sur un substrat de type lame optique mince ;

- l'orifice de l'anode est anisotrope et possède une première dimension caractéristique et une deuxième dimension caractéristique, la deuxième dimension caractéristique étant au moins deux fois plus grande que la première dimension caractéristique ;
- les deux dimensions caractéristiques sont orthogonales entre elles et toutes deux orthogonales à l'axe du faisceau de particules chargées ;
- l'orifice anisotrope de l'anode est en forme de fente ;
- l'orifice en forme de fente comporte au moins deux bords parallèles, les deux bords parallèles étant à deux potentiels électriques différents.
- le générateur comprend en outre un module de diagnostic pour la détermination de la durée temporelle des paquets de particules chargées électriquement ;
- le détecteur de claquage est configuré pour fournir un signal d'alerte et/ou arrêter le générateur de particules si la pression de fonctionnement à l'intérieur de l'enceinte à vide n'est pas assez basse pour écarter le risque de claquage électrique ;
- les particules chargées sont des ions et le générateur selon l'invention comprend en outre les éléments suivants :
 - un gaz apte à émettre des ions positifs lors d'un bombardement électronique ;
 - au moins une anode de focalisation du faisceau d'ions.

[0045] Un autre objet de l'invention est un procédé d'utilisation du générateur pulsé de particules chargées selon l'invention.

[0046] Le procédé selon l'invention comprend une étape de réglage de la pression interne de fonctionnement à l'aide du détecteur de claquage, le réglage comprenant la détermination, pour une tension d'accélération donnée, de la pression de fonctionnement à la limite du claquage électrique.

[0047] En d'autres termes, le procédé selon l'invention permet, pour une tension d'accélération donnée, de trouver la pression de fonctionnement à la limite du claquage électrique.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0048] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront clairement de la description qui en est donnée ci-dessous, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux figures annexées.

[0049] La [Fig.1] illustre un mode de réalisation du générateur de particules selon l'invention.

[0050] La [Fig.2] illustre un mode de réalisation du détecteur de claquage selon l'invention.

- [0051] La [Fig.3] illustre un mode de réalisation du circuit électrique du détecteur de claquage du générateur de particules selon l'invention.
- [0052] Les figures 4 et 5 illustrent deux modes de réalisation de l'anode du générateur de particules selon l'invention.
- [0053] La [Fig.6] illustre une vue en coupe du module de diagnostic, la coupe passant par le plus petit diamètre de l'anode anisotrope.
- [0054] La [Fig.7] illustre différentes configurations de photo déclenchement du générateur de particules chargées selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE

- [0055] [Fig.1] La [Fig.1] illustre un mode de réalisation du générateur G de particules chargées électriquement selon l'invention. Dans la suite de ce document le générateur G sera appelé indifféremment générateur G de particules chargées ou Mini Canon. Le générateur G comprend une source de lumière pulsée L émettant des impulsions lumineuses LP. Les impulsions lumineuses LP sont envoyées sur un dispositif tripleur T permettant d'obtenir des impulsions lumineuses LP_UV ayant une longueur d'onde plus petite que les impulsions LP. Le faisceau LP_UV est ensuite envoyé sur une photocathode PH. Selon le mode de réalisation illustré à la [Fig.1], le faisceau LP_UV est focalisée à l'aide d'une lentille LE de sorte à être concentré sur un point précis de la photocathode PH.
- [0056] Selon un mode de réalisation, la source est une source pulsée à 1064 nm et l'on utilise un système quadrupleur de fréquence pour obtenir des impulsions lumineuses ayant une énergie plus élevée.
- [0057] Selon un mode de réalisation, le générateur G comprend en outre des moyens pour modifier le point d'arrivée et l'angle d'attaque du faisceau LP_UV sur la photocathode.
- [0058] Selon un mode de réalisation, la source de lumière pulsée LP émet des impulsions ayant une longueur centrale d'onde dans l'infrarouge. Par exemple, les impulsions ont une longueur d'onde centrale de 800 nm avec un taux de répétition de 80 MHz. La durée temporelle des impulsions est de l'ordre de quelques dizaines de fs. Selon un mode de réalisation, la source de lumière L est un laser pulsé tel qu'un laser femtoseconde. Alternativement, le laser de déclenchement est un laser pulsé UV, VIS ou IR, ou toute autre source de lumière UV, VIS ou IR pulsée.
- [0059] De façon connue de l'homme du métier, le tripleur T permet d'obtenir des impulsions lumineuses LP_UV ayant une longueur d'onde centrale environ trois fois plus petite que la longueur d'onde des impulsions émises par la source L. Par exemple, les impulsions lumineuses issues du tripleur T ont une longueur d'onde centrale de

l'ordre de 266 nm. Avantageusement, les impulsions lumineuses du faisceau LP_UV sont adaptées pour générer des photoélectrons au niveau de la photocathode PH.

- [0060] Le générateur de particules chargées selon l'invention comprend en outre une enceinte à vide V configurée pour maintenir à son intérieur une pression de travail comprise entre 10^{-3} mbar et la pression atmosphérique. L'enceinte à vide V comprend une fenêtre optique F permettant le passage des impulsions LP_UV destinées à être focalisées sur la photocathode PH.
- [0061] Selon un mode de réalisation, la photocathode PH est constituée d'un empilement nanométrique métallique sur un substrat de type lame optique mince, dont la nature est fonction de la longueur d'onde de déclenchement et de la tenue au vide souhaitée. L'état de surface du métal constitutif peut être lisse ou nano structuré. Le substrat peut être plan ou façonné en fonction de la mise en forme spatiale du faisceau souhaitée.
- [0062] Le générateur G selon l'invention comprend une anode A positionnée à une distance L de la photocathode PH et des moyens pour appliquer une tension électrique entre la photocathode et l'anode. Cette tension électrique est également appelée tension d'accélération des électrons.
- [0063] La distance L entre photocathode PH et anode AN est ajustable et peut être adaptée à la tension d'accélération choisie. Par exemple, la distance L entre la photocathode et l'anode a une valeur de 300 μm pour une tension d'accélération de 5 kV. Lorsque cette tension est de l'ordre de 10, 20 ou 30 kV, cette distance est augmentée d'un facteur proportionnel 2, 4 ou 6 pour éviter le claquage électrique, mais la taille du dispositif reste de l'ordre de grandeur du mm ce qui est bien inférieur à l'art antérieur.
- [0064] Selon un mode de réalisation, le module comprenant la photocathode PH et l'anode AN est usiné, les électrodes n'étant pas déplaçables. Le changement de la distance L entre les électrodes se fait donc par substitution du module comprenant les électrodes, en choisissant un module ayant une distance L adaptée à la tension d'accélération choisie. Selon un autre mode de réalisation, les électrodes sont mobiles et la distance L est ajustée en écartant ou en rapprochant les deux électrodes sans changer de module.
- [0065] Selon un mode de réalisation, la distance L entre photocathode PH et anode AN est inférieure à 30 mm.
- [0066] Selon un mode de réalisation, la distance L entre la cathode photoémissive et l'anode accélératrice a une valeur numérique inférieure à $L_{\text{Max (mm)}} = 1 + V_{(\text{kV})}$ où V est la tension d'accélération en kV, L_{Max} étant en millimètres.
- [0067] Avantageusement, l'invention permet de réduire la distance L entre photocathode PH et anode AN tout en utilisant des pressions de fonctionnement élevées. Cela permet de réduire la dispersion temporelle des paquets d'électrons générés et d'obtenir des

paquets d'électrons avec une durée temporelle petite, par exemple inférieure ou égale à 5 ps.

- [0068] L'anode AN présente un orifice ou ouverture pour permettre le passage des particules chargées accélérées par la tension d'accélération appliquée entre photocathode PH et anode AN.
- [0069] Selon un mode de réalisation, l'anode AN présente un orifice de passage des électrons ayant une section anisotrope dans le plan normal au faisceau d'électrons.
- [0070] [Fig.4] Comme illustré à la [Fig.4] dans le cas d'une anode circulaire, la section anisotrope de l'orifice comporte deux dimensions caractéristiques : un plus petit diamètre PD et un plus grand diamètre GD, perpendiculaires entre eux.
- [0071] Une telle anode permet l'utilisation du faisceau d'électrons sans passer par une lentille de focalisation avale qui serait difficile à mettre en œuvre.
- [0072] Le plus petit diamètre est sensiblement plus petit que selon les réalisations de l'art antérieur. Le plus grand est supérieur ou égale au double du plus petit diamètre.
- [0073] Selon un mode de réalisation, le petit diamètre est compris entre 100 μm et 2 mm et le grand diamètre est compris entre 100 μm et 20 mm.
- [0074] Avantageusement, l'anode anisotrope AN joue un rôle de filtrage des électrons générés hors axe, de façon à améliorer l'émittance du faisceau au prix du flux d'électrons transmis. Avantageusement, cela permet de réduire le nombre d'électrons et de limiter l'effet de charge d'espace qui réduirait la résolution temporelle du Mini Canon.
- [0075] Selon une variante, l'anode ne se présente pas comme un anneau ou une plaque percée mais comme une juxtaposition dans un même plan de deux plaques planes se faisant face par deux lèvres parallèles de sorte à obtenir un orifice pour le passage des particules chargées en forme de fente.
- [0076] [Fig.5] Ce mode de réalisation est illustré à la [Fig.5].
- [0077] Le générateur G selon l'invention comprend en outre un détecteur de claquage CL ou éclateur.
- [0078] La détection d'un claquage permet d'assurer que, malgré un vide faible à l'intérieur du Mini Canon, Il n'y aura pas de dégradation des composants, notamment de la cathode et de l'anode. Il n'y a pas besoin d'une véritable mesure de pression, mais simplement de l'assurance qu'à la pression de travail choisie pour l'intérieur du Mini Canon, il n'y a pas de risque de claquage. L'utilisation d'un détecteur de claquage est contre intuitive pour un homme du métier qui chercherait à utiliser un moyen de mesure de la pression à l'intérieur de l'enceinte à vide, tout en réglant pression et tension d'accélération pour s'éloigner le plus possible des conditions de claquage.
- [0079] Pour cela, on place dans l'enceinte du Mini Canon un éclateur ayant une distance disruptive inférieure à celle entre anode et cathode, de manière à ce qu'une étincelle

se produise sur cet éclateur. Selon un mode de réalisation, le détecteur de claquage CL ou éclateur est constitué d'une bague conductrice placée en vis-à-vis d'une pointe, l'ensemble étant inséré juste après l'anode selon le sens de propagation des électrons. Cet éclateur est porté à la tension à laquelle on souhaite faire fonctionner l'enceinte du Mini Canon, comprise entre 1 et 30 kV, de préférence lors d'une phase de réglage initial à une campagne de travail. L'apparition d'un claquage sur l'éclateur protège les éléments fonctionnels, à savoir cathode et anode, séparés par une distance L un peu supérieure à la distance séparant les éléments de l'éclateur. Le détecteur de claquage CL permet, pour une tension de travail choisie, de s'approcher très près du claquage sans pour autant exposer les composants fonctionnels en mode exploitation.

- [0080] Avantageusement, grâce au détecteur de claquage ou éclateur CL le générateur de particules chargées selon l'invention fournit des paquets de particules chargées ayant une très courte durée temporelle, tout en travaillant avec une pression élevée à l'intérieur de l'enceinte à vide. En d'autres termes, grâce au détecteur de claquage il est possible d'analyser des échantillons fragiles, liquides ou biologiques, avec une résolution temporelle de l'ordre de la picoseconde.
- [0081] Le générateur G selon l'invention comprend en outre un module de diagnostic D pour la détermination de la durée temporelle des paquets d'électrons ou de particules chargées. Selon un mode de réalisation le module de diagnostic D est utilisé avec une anode anisotrope ayant une ouverture en forme de fente.
- [0082] L'échantillon à analyser E peut être placé à la fois à l'intérieur ou à l'extérieur de l'enceinte à vide V.
- [0083] Selon un mode de réalisation, la distance d entre la cathode photoémissive et l'échantillon est comprise entre 30 mm pour une tension d'accélération inférieure à 5 kV, et 60 mm pour une tension d'accélération de l'ordre de 30 kV.
- [0084] Avantageusement, une faible distance entre photocathode PH et échantillon à analyser E permet de limiter la dispersion temporelle des paquets d'électrons et d'obtenir une résolution temporelle élevée.
- [0085] Selon un mode de réalisation, les particules chargées électriquement sont des ions de gaz. Dans ce cas, les éléments suivants sont ajoutés en aval du faisceau d'électrons pour obtenir un générateur d'ions de gaz :
 - un gaz apte à émettre des ions positifs lors d'un bombardement électronique ;
 - au moins une anode de focalisation du faisceau d'ions.
- [0086] [Fig.2] La [Fig.2] illustre un mode de réalisation d'un détecteur de claquage ou éclateur CL selon l'invention.
- [0087] Dans la conception usuelle des canons à électrons, on cherche à se situer hors des conditions de claquage avec une marge de sécurité, c'est la raison pour laquelle les

canons ont des dimensions de quelques dizaines de cm généralement. Une valeur de 10 kV mm^{-1} correspond au seuil de claquage du vide.

[0088] A l'inverse le Mini Canon s'approche très près de la condition de claquage : le dispositif selon l'invention travaille à la limite du claquage, d'une part car il est nécessaire d'amener des hautes tensions sur des dimensions réduites, d'autre part car l'insertion d'une jauge de pression suffisamment miniaturisée pour le système n'est pas possible.

[0089] Le claquage électrique à l'intérieur du canon est évité non pas par un vide plus poussé comme dans l'art antérieur, mais au contraire par un vide peu marqué, voire quasi inexistant associé à un détecteur de claquage CL comprenant un éclateur réglé sur une tension légèrement inférieure à la tension de claquage du canon, et donnant un signal d'alerte permettant d'écarter un peu les conditions de fonctionnement des conditions de claquage.

[0090] Le détecteur de claquage CL selon l'invention comporte :

- un substrat 1 en matériau isolant à forte constante diélectrique, par exemple en Peek ;
- un anneau 2 conducteur de l'électricité connecté à une tige 3 également conductrice, les deux étant électriquement connectés et portés au potentiel de l'anode ;
- une tige conductrice 4 coulissante dans son alésage, apte à se déplacer radialement, par exemple sous l'effet d'une vis micrométrique non représentée.

[0091] L'extrémité de la tige 4, que l'on voit à peine dépasser dans l'alésage central, est placée à une distance un peu inférieure à la distance du plus court chemin électrique entre anode AN et photocathode PH. Comme cette distance anode AN et photocathode PH varie selon la tension à laquelle on choisit de faire travailler l'enceinte du canon, la distance entre l'extrémité de la tige 4 et l'anneau au potentiel de l'anode doit être ajustée en conséquence, de sorte à avoir la même valeur ou être très faiblement en dessous. Selon une variante préférentielle, la tige 4 est solidaire de la cathode PH, de sorte que lorsque l'on ajuste la distance anode AN et photocathode PH, on modifie en même temps et dans les mêmes proportions la distance entre l'apex de la tige 4 et l'anneau 2.

[0092] Selon un mode de réalisation, l'anode AN et la photocathode PH sont séparées d'une distance de $300 \text{ }\mu\text{m}$. La résistance électrique de l'air à pression atmosphérique est de 36 kV cm^{-1} ce qui équivaut à $300 \text{ }\mu\text{m}$ pour une différence de potentiel de 1080 V . Le dispositif selon l'invention pouvant fonctionner jusqu'à 10 kV , cela n'est pas suffisant pour éviter le claquage, ainsi le fait de faire le vide permet d'augmenter cette tension

maximum avant la création d'un arc électrique qui pourrait endommager le système et créer un risque pour l'utilisateur.

- [0093] Il est important de noter que le vide est très peu poussé ou inexistant selon les besoins de l'échantillon à analyser. Cela se fait par un dispositif de pompage, mais qui est utilisé de temps à autres, par exemple avant une campagne de mesures.
- [0094] Avantageusement, le dispositif selon l'invention ne requiert aucun dispositif lourd et constamment actif comme les dispositifs travaillant sous un vide supérieur à 10^{-5} mbar, et souvent supérieur à 10^{-7} mbar.
- [0095] Avantageusement, grâce au détecteur de claquage CL, la mesure exacte de la pression n'est pas nécessaire pour l'utilisation du dispositif selon l'invention.
- [0096] Avantageusement, le dispositif selon l'invention permet d'alerter l'utilisateur ou d'arrêter le système lorsque la pression n'est plus assez basse et que cela peut représenter un risque de claquage
- [0097] Afin de répondre à cette fonction le système comprend une masse reliée à une carte électronique. Cette masse est placée de sorte à être plus proche de l'anode que la cathode, grâce à un anneau calibré qui sert d'entretoise isolante. Le claquage entre l'anode et la masse se fera donc plus tôt et on pourra ainsi traiter l'information en amont du claquage du système.
- [0098] [Fig.3] Le circuit de détection du claquage, illustré à la [Fig.3], reçoit en « Vin » la tension de la photocathode PH, alors que le reste du circuit et l'anode AN sont référencées à la masse. A chaque étincelle, une impulsion est générée sur la sortie « Vout ». Le signal à la sortie « Vout » peut donc être utilisé pour alerter l'utilisateur du risque de claquage électrique.
- [0099] Les figures 4 et 5, discutées plus haut, illustrent les deux modes de réalisation de l'anode AN ayant une ouverture anisotrope.
- [0100] [Fig.6] La [Fig.6] illustre une vue en coupe de l'anode AN et du dispositif de diagnostic D, la coupe passant par le plus petit diamètre de l'anode AN. Selon un mode de réalisation l'anode est déposée sur un substrat isolant en saphir de $700\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur, orthogonal à l'axe z correspondant à l'axe de propagation du faisceau d'électrons. Selon un mode de réalisation, l'anode AN est une seule et même électrode constituée par exemple d'un film conducteur apposé sur un substrat troué.
- [0101] L'ouverture de passage des particules chargées peut être en forme de fente, comme il est illustré à la [Fig.5]. Dans ce cas, le grand diamètre GD s'étend jusqu'aux extrémités de l'anode de manière à la couper en deux éléments distincts liés mécaniquement entre eux par un élément isolant. L'anode AN comprend alors deux lèvres parallèles soumises l'une à une tension d'accélération $E - \Delta v$, et l'autre à $E + \Delta v$.

- [0102] Selon un mode de réalisation, on peut également envisager plusieurs fentes parallèles pour plusieurs points sources en parallèle.
- [0103] Selon un mode de réalisation, une telle anode en forme de fente peut être constituée d'un conducteur apposé sur un substrat, l'ensemble ayant été découpé par une fente longiligne selon y de très petites dimensions selon x, à bords parallèles. Selon cette configuration, il est possible d'obtenir deux électrodes distinctes portées à un potentiel d'un ou plusieurs kV par rapport à la cathode émissive, mais isolées électriquement l'une de l'autre. Elles peuvent ainsi avoir entre elles une différence de potentiel faible par rapport à la tension de la cathode, mais qui peut être de quelques dizaines ou centaines de volts, créant ainsi un champ électrique E entre leurs lèvres. Ce champ électrique E peut varier dans le temps en synchronisme avec l'arrivée des paquets d'électrons, de manière à ce que les deux extrémités du paquet d'électrons ne voient pas le même champ E. Ainsi, sur le schéma de la [Fig.6], le premier électron de chaque paquet voit un champ E important qui le défléchit vers l'électrode E2, et ce champ diminue pour les électrons suivants jusqu'à un champ nul pour le dernier du paquet. Cela a pour effet de faire tourner l'axe du paquet d'électrons, et donc d'augmenter sa projection perpendiculaire à l'axe de propagation, et de permettre une mesure spatiale dont on déduira une mesure temporelle. De préférence les électrodes E1 et E2 constituent une ligne microstrip "coplanar microstrip line" d'une impédance de 50 Ω qui autorise des fronts de montée ou de descente extrêmement rapides le long de ces électrodes.
- [0104] En d'autres termes, quand l'anode est constituée de deux lèvres planes en vis-à-vis, ces deux lèvres espacées d'une distance faible et rigoureusement constante sont portées à des potentiels différents. Cela est avantageux lorsque le générateur G est pulsé avec des impulsions de courte durée ps ou fs se traduisant par de petits paquets d'électrons. L'anode remplit alors simultanément plusieurs fonctions.
- [0105] Selon une variante, les potentiels constants VE1 et VE2 appliqués aux électrodes E1 et E2 présentent une différence ΔV_E relativement faible mais variable dans le temps. L'anode a alors, en plus de sa fonction accélératrice, celle de déflecteur qui permet un diagnostic temporel du faisceau d'électrons. C'est le principe de ce diagnostic temporel, dit de « streaking » ou de balayage que l'on peut résumer ainsi: on fait passer le paquet d'électrons dans un petit domaine avec 2 éléments à un potentiel différent soumis à un champ électrique oscillant en fonction du temps, transverse par rapport à la direction de propagation du paquet d'électrons. Ainsi on va défléchir le paquet d'électrons en fonction du temps par rapport à l'axe z initial de propagation. La mesure de durée est indirecte, déduite de la dimension spatiale du paquet d'électrons projetée sur un détecteur de type galette de microcanaux et écran phosphore : plus le paquet est long temporellement et plus l'image du paquet sur le détecteur est grande. Ici on

fait passer le paquet d'électrons dans un domaine dont la dimension est donnée par l'épaisseur des lames qui constituent l'anode.

- [0106] Le fait de mettre de la tension sur les deux lèvres de l'anode permet d'obtenir, par exemple pour une tension de +/-20V, un déplacement du faisceau de 30 μm et 180 μm pour +/-100V.
- [0107] Avantageusement, ce mode de réalisation permet l'intégration d'un système de balayage directement au niveau de l'anode.
- [0108] Exemple de réalisation d'une anode avec système de balayage intégré : les électrodes sont dessinées pour constituer une ligne 50 Ω en "coplanar microstrip line". Cette configuration permettra de tester le mode balayage résolu en temps de ce dispositif. La plaque d'anode est la partie la plus complexe du dispositif. C'est un substrat de saphir de 700 μm découpé de sorte à laisser sortir les électrodes et fendu au milieu pour laisser passer les électrons, par exemple avec une fente de 100 μm . La face arrière est éventuellement amincie au milieu pour éviter tout contact avec la plaque échantillon.
- [0109] En mode statique, sans tension différentielle sur les électrodes de l'anode, le faisceau conserve une dimension réduite inférieure à 20 μm . La dimension du faisceau d'électrons est supérieure à la dimension du faisceau de photons incident sur la photocathode, mais du même ordre de grandeur. En mode balayage, avec tensions sur les électrodes de l'anode, cette taille est conservée avec une sensibilité de l'ordre de 100 $\mu\text{m}/100\text{V}$ soit un déplacement simulé de 200 μm au niveau de l'échantillon pour des tensions +/-100 V pour les électrodes. La déflexion maximale dépend de la géométrie de la fente et est de l'ordre de 1 mm pour des tensions de +/-500 V. Ces valeurs sont valides pour un déplacement perpendiculaire à la fente et mesuré à 700 μm de l'anode, au niveau de l'échantillon.
- [0110] La distance entre l'anode AN et l'échantillon E à analyser est faible et inférieure à 60 mm. En conséquence, il peut être avantageux de placer l'échantillon E dans l'enceinte du générateur G de particules chargées ou à l'extérieur.
- [0111] Avantageusement, il est possible d'utiliser le Mini Canon en position horizontale ou verticale sur un banc optique ou sur tout autre montage, étant donné que l'incidence du faisceau laser de déclenchement peut être parfaitement maîtrisée. On peut alors analyser des échantillons liquides avec un faisceau en position verticale.
- [0112] L'utilisation du système en position horizontale offre notamment la possibilité de travailler avec un échantillon liquide : on vient positionner une goutte de l'échantillon sur une interface de sortie adaptée à l'énergie des électrons, par exemple une membrane ultramince de Si_3N_4 ou de graphène ayant une épaisseur comprise entre 2 nm et 200 nm.
- [0113] Dans l'art antérieur, le faisceau d'électrons est dirigé sur un échantillon placé dans une enceinte à vide. Avantageusement, le dispositif selon l'invention offre la

possibilité à l'échantillon de rester à la pression atmosphérique, puisqu'on fait sortir le faisceau d'électrons du mini canon qui constitue une enceinte à vide miniaturisée.

- [0114] Une variante pour l'étude d'échantillons supportant le vide consiste à placer l'échantillon directement dans l'enceinte du mini canon, au plus près de l'émission, la détection du phénomène à étudier, par exemple la scintillation, pouvant être réalisée par un détecteur directement placé derrière l'échantillon.
- [0115] L'échantillon peut être conçu comme un module du mini canon, au même titre que la photocathode, l'anode ou le détecteur.
- [0116] [Fig.7] La [Fig.7] illustre différentes configurations géométriques pour le photo-déclenchement du dispositif.
- [0117] Il est important de pouvoir isoler le faisceau laser du faisceau d'électrons, qui lui est colinéaire. Une des façons de procéder est d'envoyer le laser LP_UV en incidence différente de l'incidence normale sur la photocathode PH, de sorte que le faisceau laser et le faisceau d'électrons ne soient pas colinéaires sur la cible. De plus, la fente de l'anode AN est suffisamment fermée pour que le faisceau LP_UV ne passe pas à travers le système. Selon un mode de réalisation, un angle de 30 à 45° est utilisable sur cette géométrie.
- [0118] Selon un mode de réalisation, l'axe de tir du laser impacte la cible en un point et sous un angle ajustable. Selon un mode de réalisation, l'angle d'impact est différent de 90°, et de préférence compris entre 30 et 45°.
- [0119] Selon cette variante du Mini Canon, conçu pour fonctionner de façon modulaire et plusieurs modes d'utilisation sont envisagés :
- [0120] On peut notamment choisir d'attaquer la face d'entrée du Mini Canon avec le laser LP_UV avec un angle d'incidence éloigné de la normale, avec un angle proche de la normale ou exactement sur la normale, mais avec une latitude de déplacement du faisceau selon l'axe des x du fait de l'anode fendue selon x avec un déplacement relatif parallèle à la fente. On peut ainsi travailler avec un impact sur différentes zones de la photocathode.
- [0121] On peut choisir de travailler en rétro-illumination de l'échantillon, en attaquant la face de sortie du Mini Canon.
- [0122] Avantageusement, ces modes de réalisation permettent d'augmenter la précision et la fiabilité des analyses grâce à une meilleure séparation du faisceau d'électrons et du faisceau LP_UV au niveau de l'échantillon et du module de détection utilisé pour l'analyse.
- [0123] Selon une première variante, on garde le Mini Canon fixe et on modifie l'axe du faisceau laser incident sur la face d'entrée ou de sortie du Mini Canon
- [0124] Selon une seconde variante, on garde le faisceau laser fixe et on modifie la position du Mini Canon par rapport à l'axe du faisceau laser.

- [0125] Selon une troisième variante, on place le point d'impact sur la photocathode en un point excentré, et on fait tourner la photocathode manuellement sans démontage (et sans modifier la pression dans l'enceinte) lorsqu'on veut modifier le point d'impact.
- [0126] En d'autres termes, la modification du point d'impact du laser peut se faire soit en déplaçant la photocathode dans son berceau soit en modifiant la direction du laser sur la fente. Avantageusement, la modification du point d'impact du laser sur la photocathode se fait sans casser le vide à l'intérieur de l'enceinte V.

Revendications

[Revendication 1]

Générateur pulsé de particules chargées électriquement comprenant :

- une source de lumière pulsée ;
- une enceinte à vide (V) ;

ledit générateur étant caractérisé en ce que :

- l'enceinte à vide (V) est configurée pour maintenir une pression interne de fonctionnement comprise entre 10^{-6} mbar et la pression atmosphérique ;
- l'enceinte à vide (V) est configurée pour accueillir une photocathode (PH) et une anode (AN), la photocathode (PH) et l'anode (AN) étant séparées par une distance (L) ajustable inférieure ou égale à 2 mm ;
- l'enceinte à vide (V) comporte une fenêtre optique permettant à la lumière impulsionnelle d'atteindre une face de la photocathode ;
- l'anode présente un orifice adapté pour le passage des particules chargées électriquement ;
- ledit générateur pulsé de particules chargées électriquement comprend des moyens pour appliquer une tension électrique entre photocathode (PH) et anode (AN), ladite tension électrique étant configurée pour accélérer les particules chargées.

[Revendication 2]

Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon la revendication précédente caractérisé en ce que la tension électrique d'accélération est inférieure ou égale à 30 kV de sorte à obtenir des paquets de particules chargées électriquement, chaque paquet ayant une durée temporelle inférieure ou égale à 5 ps.

[Revendication 3]

Générateur pulsé de particules chargées selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce que la source de lumière pulsée produit des impulsions lumineuses ayant une durée temporelle inférieure ou égale à 5 ps.

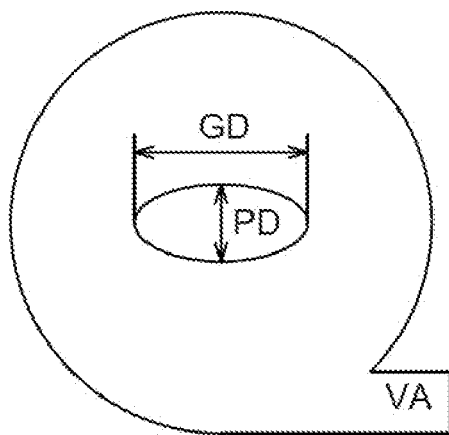
[Revendication 4]

Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend en outre un détecteur de claquage (CL).

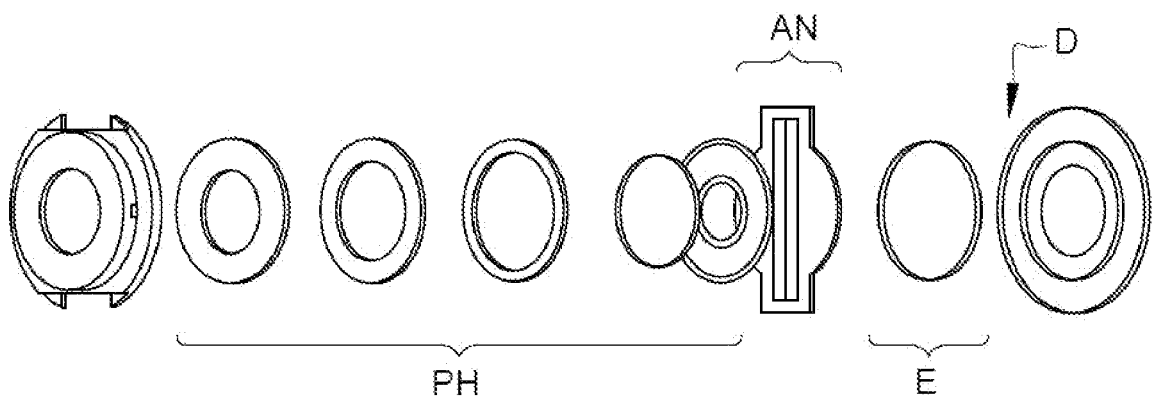
- [Revendication 5] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon la revendication précédente caractérisé en ce que le détecteur de claquage (CL) est placé à proximité de l'anode et comprend :
- un substrat (1) en matériau isolant à forte constante diélectrique ;
 - un anneau (2) et une tige (3) en matériau conducteur portés au même potentiel que l'anode ;
 - une tige (4) en matériau conducteur, ladite tige étant mobile et pouvant se rapprocher de l'anneau conducteur.
- [Revendication 6] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon la revendication 4 ou la revendication 5 caractérisé en ce que le détecteur de claquage est configuré pour déterminer la pression de claquage électrique sous la tension d'accélération utilisée.
- [Revendication 7] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce que ladite enceinte à vide est configurée pour accueillir un échantillon (E) à analyser, la distance entre la photocathode et l'échantillon à analyser étant inférieure ou égale à 0,7 mm.
- [Revendication 8] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon l'une des revendications 1 à 6 caractérisé en ce que ladite enceinte à vide comprend une fenêtre transparente aux particules chargées, l'échantillon (E) à analyser étant placé à l'extérieur de l'enceinte à vide.
- [Revendication 9] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce que la photocathode (PH) comprend un empilement nanométrique métallique sur un substrat de type lame optique mince.
- [Revendication 10] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce que l'orifice de l'anode (AN) est anisotrope et possède une première dimension caractéristique et une deuxième dimension caractéristique, la deuxième dimension caractéristique étant au moins deux fois plus grande que la première dimension caractéristique.
- [Revendication 11] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon la revendication précédente caractérisé en ce que l'orifice anisotrope de l'anode est en forme de fente.

- [Revendication 12] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon la revendication précédente caractérisé en ce que la fente comporte au moins deux bords parallèles, les deux bords parallèles étant à deux potentiels électriques différents.
- [Revendication 13] Générateur pulsé de particules chargées électriquement selon la revendication précédente caractérisé en ce qu'il comprend un module de diagnostic (D) pour la détermination de la durée temporelle des paquets de particules chargées électriquement.
- [Revendication 14] Procédé d'utilisation du générateur pulsé de particules chargées selon l'une des revendications 4 à 6 et 7 à 13 en ce qu'elles dépendent de l'une des revendications 4 à 6, caractérisé en ce que le procédé comporte une étape de réglage de la pression interne de fonctionnement à l'aide du détecteur de claquage, l'étape de réglage comprenant la détermination, pour une tension d'accélération donnée, de la pression de fonctionnement à la limite du claquage électrique.

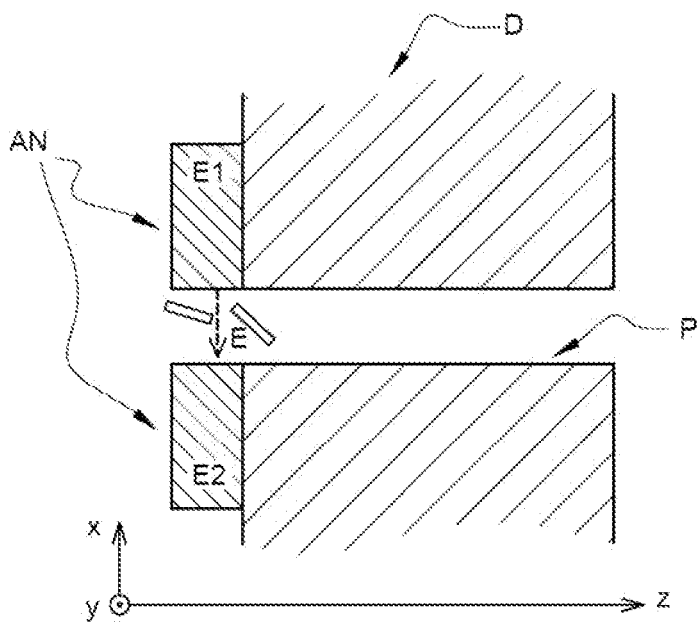
[Fig. 4]



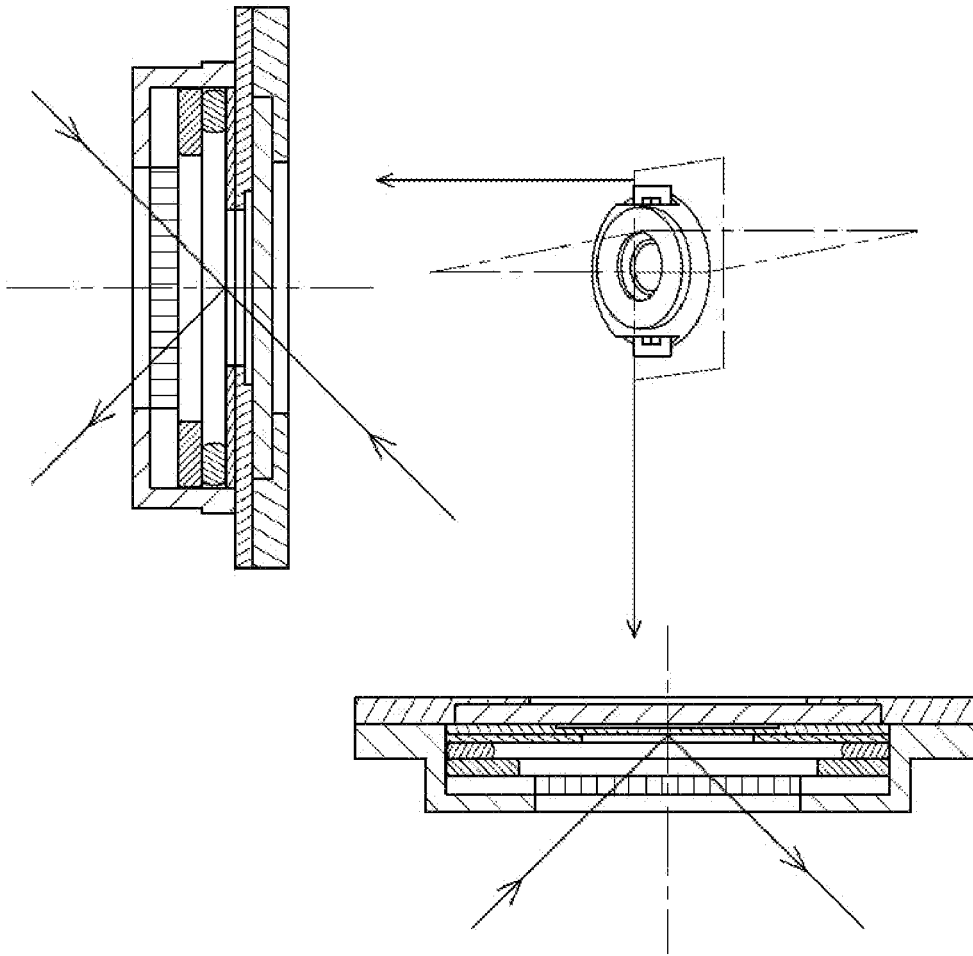
[Fig. 5]



[Fig. 6]



[Fig. 7]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☐ Le demandeur a maintenu les revendications.

☒ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NASSISI V ED - UNNO YOSHINOBU ET AL:
"ELECTRON GENERATION FROM A METAL TARGET
INDUCED BY AN XECI LASER",
NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS
RESEARCH. SECTION A, ELSEVIER BV *
NORTH-HOLLAND, NL,
vol. 340, no. 1,
11 février 1994 (1994-02-11), pages
182-185, XP000435012,
ISSN: 0168-9002, DOI:
10.1016/0168-9002(94)91297-1

IVRI J ET AL: "PHOTOEMISSION FROM U AND
MG USING A PULSED XECL LASER",
APPLIED PHYSICS LETTERS, A I P PUBLISHING
LLC, US,
vol. 62, no. 12, 22 mars 1993 (1993-03-22)
, pages 1338-1340, XP000354538,
ISSN: 0003-6951, DOI: 10.1063/1.108723

WYTRYKUS D ET AL: "Ultrashort pulse
electron gun with a MHz repetition rate",
APPLIED PHYSICS B ; LASERS AND OPTICS,
SPRINGER, BERLIN, DE,
vol. 96, no. 2-3,
23 janvier 2009 (2009-01-23), pages
309-314, XP019739057,
ISSN: 1432-0649, DOI:
10.1007/S00340-008-3355-1

BRADLEY J. SIWICK ET AL: "Femtosecond
electron diffraction studies of strongly
driven structural phase transitions",
CHEMICAL PHYSICS,
vol. 299, 24 janvier 2004 (2004-01-24),
pages 285-305, XP055693871,
DOI: 10.1016/j.chemphys.2003.11.040

JANZEN A ET AL: "A pulsed electron gun
for ultrafast electron diffraction at
surfaces",
REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AIP,
MELVILLE, NY, US,
vol. 78, no. 1,
29 janvier 2007 (2007-01-29), pages
13906-13906, XP012103605,
ISSN: 0034-6748, DOI: 10.1063/1.2431088

C. P. HAURI ET AL: "Intrinsic Emittance
Reduction of an Electron Beam from Metal
Photocathodes",
PHYSICAL REVIEW LETTERS,

vol. 104, no. 23, 1 juin 2010 (2010-06-01)
, page 85, XP055693168,
US
ISSN: 0031-9007, DOI:
10.1103/PhysRevLett.104.234802

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN
TECHNOLOGIQUE GENERAL**

NEANT

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND
DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT