

Réalisation de composantes (diode, photo-cathode,
réseau photonique) d'un accélérateur diélectrique,
version 1.1

Jean-Luc BABIGEON

13 décembre 2016

Table des matières

1	DESCRIPTION DES PROTOTYPES PROPOSES	7
1.1	CONTEXTE DE CE PROJET	8
1.2	PROTOTYPES PORTANT SUR DES MODELES DE DIODES SiC HAUTE TENSION	10
1.3	FABRICATION DE CATHODES POUR SOURCE MINIATURE D'ELEC- TRONS	11
1.4	MODULES POUR ACCELERATEURS DIELECTRIQUES	12
1.4.1	Diviseur de faisceau	12
1.4.2	Module accélérateur	13

Table des figures

1.1	Description de la source à électrons associée à un DLA	8
1.2	Description et Schéma-bloc de la source à électrons associée à un DLA . .	9
1.3	Schematique de la diode complete d'après [4]	13

Chapitre 1

DESCRIPTION DES PROTOTYPES PROPOSES

1.1 CONTEXTE DE CE PROJET

Ce document est articulé suivant une partie générale et des fiches particulières, pour chaque réalisation proposée.

Les projets d'extension du LHC à 100TeV pour les tests de théories physiques à hautes énergies, prévoient une construction d'anneaux à 100km de longueur, des travaux d'un coût très élevé, et l'emploi de technologies standards -klystrons, optiques magnétiques...- elles aussi très volumineuses et chères. Depuis quelques années, des recherches sont menées pour de nouveaux procédés d'accélération compact, notamment l'accélérateur « in chip ». Une vue plutôt artistique est donnée par la figure 1.1

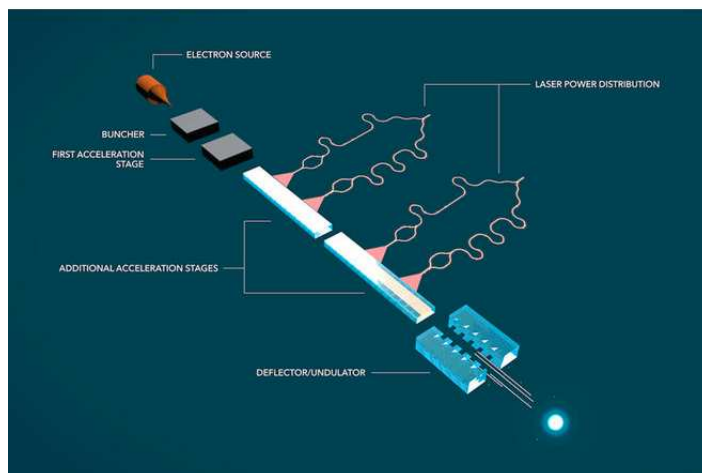


FIGURE 1.1 : Description de la source à électrons associée à un DLA

Il s'agit d'un grand nombre de petits accélérateurs diélectriques en série pilotés par sources laser de puissance faible à modérée (DLA's, Dielectric Laser Accelerators). Les dimensions caractéristiques de chaque étage sont de l'ordre du mm, et leur fabrication se prête bien aux procédés de micro-électronique. La référence [3] donne l'essentiel de l'ingénierie de ces futurs modules. Actuellement il semble que la plupart des laboratoires s'oriente vers la conception et la mise au point de ces modules accélérateurs en mode relativiste, à partir de quelques MeV. L'objectif de notre recherche est la réalisation d'un module non relativiste (low β), dont la conception est plus ardue, qui fait l'objet de peu de publications, mais qui représente bien sur un maillon clé et pour l'instant manquant, dans l'architecture de l'accélérateur tout optique du futur. Le système que nous souhaitons étudier, sera donc le premier maillon dans la gamme d'énergies (1keV-1MeV). Par ailleurs, la compacité n'est pas seule en jeu, il s'agit d'améliorer les performances faisceaux, avec de faibles charges (1 à 10 fC) mais des fréquences de récurrence élevées (1 à 100MHz) de faibles émittances et des paquets femtoseconde, voire attoseconde (micro bunches). Dans la zone d'interaction, les mécanismes de formation de la luminosité sont alors entièrement différents, conduisant peut-être à revoir certains traitements des mesures.

Ce document contient les descriptions de prototypes des composants de notre système, proposés pour fabrication à l'IEF. La diversité des réalisations illustre la nécessité d'intégrer des éléments de micro-électronique dans les applications du DACC.

Ces différents prototypes entrent dans la composition d'une source miniaturisée d'électrons suivie d'un DLA ; l'extraction dans le vide est obtenu par photoémission assistée par le champ (effet Schottky), la source est donc pulsée par des ondes électriques sub nanoseconde. à la sortie du canon, on prévoit un étage accélérateur au moyen d'un DLA.

Le schéma du système est donné par la figure 1.2 :

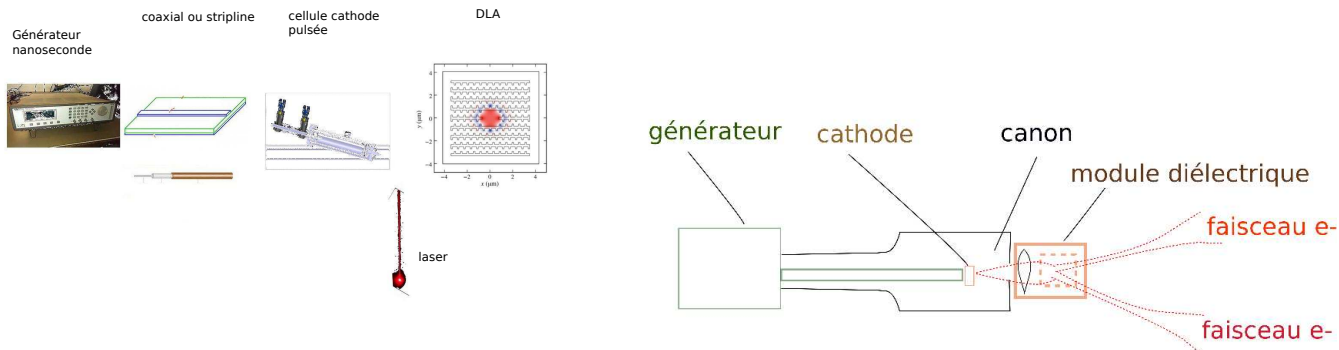


FIGURE 1.2 : Description et Schéma-bloc de la source à électrons associée à un DLA

Ce système est composé d'un générateur permettant d'appliquer des impulsions haute tension rapides à une cathode émissive. La cathode est reliée au générateur par une liaison coaxiale ou une strip line. Elle est implantée dans une chambre (cellule cathode) permettant de la changer sans rompre le vide.¹ La cellule cathode est fixée sur une chambre à vide, permettant un dpassement du porte cathode de l'ordre du cm. Il est possible d'enlever la cellule cathode pour brancher directement le générateur, lorsque la cathode est fixée sur la chambre à vide.

La cathode est fixée sur l'extrémité du porte-cathode. le conducteur de retour -dans le cas de la liaison coaxiale- est formé de telle sorte qu'il réalise un canon à électrons miniature. Des ouvertures sont aménagées pour permettre le couplage du laser avec la cathode photoémissive.²

Juste après l'anode, un premier DLA est placé à l'entrée du faisceau, et reçoit lui aussi une impulsion laser -retardée- par rapport au laser pour la photo cathode. Bien sur, le but est d'employer le même laser, et de faire appel à des sources de faible puissance. l'ensemble cathode DLA sera placé dans le vide, l'objectif étant si possible d'éviter l'ultra-vide.

¹la notice d'utilisation de ce loadlock est prévue. Elle permettra de faire la navette entre les échantillons IEF et la manip

²des aménagements futurs sont prévus pour remplacer la liaison coaxiale par une liaison plane de type strip line

Le tableau 1.1 donne les composants dont la réalisation est souhaitée à l'IEF.

COMPOSANT —	DESCRIPTION —	PARAGRAPHE
Diodes haute tension	haute tension sub nanoseconde	1.2
Cathode émissive	Field Array Emitters (FEA)	1.3
Module diélectrique de DLA	focalisation, division de faisceau	1.4

1.2 PROTOTYPES PORTANT SUR DES MODELES DE DIODES SiC HAUTE TENSION

Le contexte plus détaillé en est donné par la référence [1]. Le générateur exploite la capacité de coupure d'une diode DSRD (Drift Step Recovery Diode) pour des temps de montée de l'ordre de 100 picosecondes une largeur nanoseconde, une tension crête de 10kV (maximum) et des fréquences de récurrence 1MHz au minimum.

Pour des raisons qui apparaissent au paragraphe 1.3, il est nécessaire d'obtenir des impulsions ultra-brèves; les performances de la source pulsées dépendent de cette diode haute tension, notamment de son profil de dopage.

La diode ne sera pas encapsulée, mais bondée directement sur un circuit. L'ensemble sera placé soit dans l'huile, soit enrésiné en interne. Les performances à prendre en compte sont les suivantes :

1. tenue en tension nominale 6.5kV, (maximale 10kV)
2. Durée de vie des porteurs $3\mu s$ ou 100ns selon la stratégie employée
3. chute de tension directe sous 30A : rédaction réservée
4. courant crête en mode direct pendant 100ns : 100A
5. courant crête en mode inverse pendant 20ns : 250A

La diode a une structure P+sN+, où la zone intrinsèque s peut être dopée -faiblement- P ou N. Les résultats semblent montrer un meilleur comportement en recouvrement, donc en ouverture dynamique haute tension, pour nos applications, avec une zone s=P-. En réalité une étude d'optimisation sera menée par rapport au temps de vie des porteurs et à la charge stockée. 2 stratégies sont envisagées : temps de vie court, charge stockée très grande, structure N, ou l'inverse, probablement structure P. Le choix sera aussi déterminé concernant l'aspect NPT ou PT de la zone I, les paramètres importants étant le seuil de dopage et la largeur de la zone I (zone de drift)

La référence qui nous permet d'élaborer un projet de réalisation pour des diodes N+N-P+ est [4]. J'ai résumé les moyens et procédures employées. Il faut d'abord disposer de plaques épitaxiées, wafers, par exemple chez IBS ou au CNM. La référence guidant la conception des diode N+P-P+ est [2]

Lal/Dacc fournira les profils de dopage nécessaires. Par contre, les zones de Mesa, de JTE, les surfaces de pastilles, . . . , seront définies en rapport étroit avec les recommandations de la référence, et en commun avec A Lounis. Les tests en réponse dynamique haute tension seront effectués au Lal/Dacc.

Les simulations pourront s'appuyer sur un logiciel de type Archimede <https://www.gnu.org/server/s>

1.3 FABRICATION DE CATHODES POUR SOURCE MINIATURE D'ELECTRONS

Le but est d'obtenir des photo-cathodes de nouvelle technologie. On rappelle çitenocite que l'état de l'art actuel se partage majoritairement en 2 familles :

1. les photo-cathodes métalliques, avec comme meilleur représentant le magnésium,
2. les photo-cathodes semi-conductrices

Parmi les dernières, les couches minces Cs₂Te sur substrat Mo ou W se sont révélées de bons candidats. Néanmoins, les couches minces ne suivent pas forcément la stoechiométrie désirée, et d'autres composés Cs_xTe_y , pas forcément favorables à la photo-émission voient le jour. Bien que des essais de photo-émission (dans le contexte accélérateurs) aient eu lieu avec des revêtements comme le fullerène, le diamant,...çitenocite Peu d'entre eux portent sur des revêtements de type graphène ou nanotubes de carbone. De plus, les accélérateurs diélectriques demandent un fonctionnement complètement différent de la source d'électrons, soit des charges faibles (1 à 10 fC) et des fréquences élevées (1 à 100MHz), comparé au couple 1nC/50Hz des sources classiques. Les performances recherchées sont

1. une émittance de paquet très faible, 0.1 mm mrad,
2. un temps de réponse faible, j 100fs,
3. un rendement quantique élevé plusieurs décades au-dessus des cathodes métalliques,
4. des fréquences de récurrence élevées, 1 à 100MHz,
5. un fonctionnement dans les longueurs d'onde infrarouge, 1 à 5 μ m

Nous sacrifions au profil de ces performances la charge par pulse. L'hypothèse de notre étude, est que nous pourrions atteindre ces performances par une solution basée sur les principes suivants :

1. le choix d'un matériau de la famille carbone -graphène, nanotube...- dont les caractéristiques électriques et de transport sont « modulables » en fonction de la structure cristalline,

2. l'implantation de micro-émetteurs de type FEA à base du matériau précédent, sur un support à définir, de préférence un support métallique, un support Si étant lui aussi concevable à ce stade ; l'essentiel étant que la contribution viennent des FEA et non de leur environnement, c'est-à-dire que le support devrait avoir un QY (Quantum Yield) faible pour réduire la composante de courant d'obscurité (courant noir) et ne pas dégrader la partie spatiale de l'émittance,

La photo-émission est assistée par le champ, c'est-à-dire que l'on superpose au champ d'une impulsion électrique, le champ de l'impulsion laser. Par rapport aux canons alimentés en haute tension continue, le mode pulsé présente les avantages suivants :

1. Meilleure tenue aux claquages à proximité de la cathode,
2. réduction de l'énergie du laser, et/ou l'emploi de sources dans le visible ou l'IR,
3. protection attendue contre le bombardement ionique de la cathode, par ondes bipolaires,

Le mode d'émission Schottky en ondes ultra brèves est encore peu étudié. La formation des paquets dépendra de l'émission dans ce mode, émission entièrement différente de celle des canons DC. Pour la génération de paquets d'électrons femtoseconde, la distribution des vitesses du paquet juste après la cathode va dépendre des modes d'injection et de la physique des couches émissives juste devant le vide. Les performances des cathodes planes métalliques sont connues, et ne conviennent pas à l'émission de champ. On est conduit à l'utilisation de cathodes à effet de champ, en réseau (Field Effect Arrays, FEA's). Ces cathodes sont basées sur le principe -éprouvé- de Spindt. [6]

Les matériaux de la réalisation seront précisés par la fiche particulière. 2 candidats sont prévus : une photocathode à couches métalliques et une photo-cathode comportant des couches de carbone.

1.4 MODULES POUR ACCELERATEURS DIELECTRIQUES

1.4.1 Diviseur de faisceau

Il s'agit de concevoir un module diélectrique séparant un faisceau en deux sous-faisceaux, par exemple selon un angle 2θ , symétriquement par rapport à l'axe du faisceau origine.

Le faisceau a une divergence 2ϵ , un diamètre $2r$ et on espère que chacun des sous-faisceaux a ces mêmes caractéristiques. Parmi les possibilités, le choix se porte sur un réseau de diffraction plan.

Le principe de fonctionnement est le suivant, figure 1.3, donné par [5]

Les caractéristiques du réseau seront données prochainement, et confirmés par la suite par simulation. Les matériaux sont Si ; on donnera les possibilités de fabrication avec du saphire Al_2O_3 .

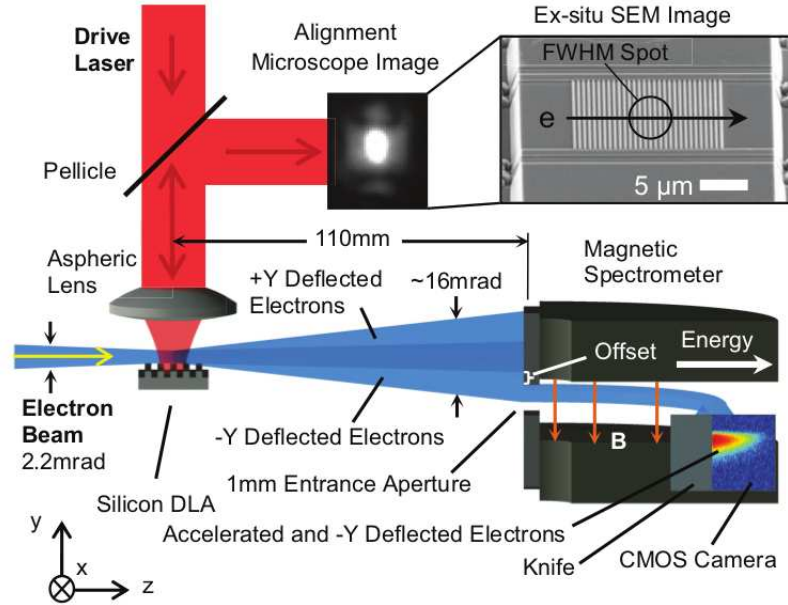


Fig. 2. Experimental setup. 96.3 keV electrons from a scanning electron microscope graze the silicon grating surface, which is illuminated surface normally by a linearly polarized laser. A pellicle beamsplitter picks off $\sim 2\%$ of the back-reflected light to form a microscope image (Ex-situ SEM image of the grating inset). Electrons that are deflected in the $-Y$ direction through the spectrometer entrance aperture are imaged by the CMOS camera if they were accelerated.

FIGURE 1.3 : Schématique de la diode complète d'après [4]

1.4.2 Module accélérateur

Plusieurs modules sont prévus, mais la difficulté du domaine suggère une première réalisation simple. De nouveau, le premier module prototype sera un réseau. N'importe, le pas sera variable, lui aussi donné ultérieurement par simulation.

Bibliographie

- [1] Jean-Luc Babigeon. Générateur à diodes dsrd. September 2016.
- [2] Michael Chudobiak. *New approaches for designing high voltage, high current silicon step recovery diodes for pulse sharpening applications*. PhD thesis, July 1996.
- [3] R. Joel England. Dielectric laser accelerators. *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, *VOLUME 86*, october 2014.
- [4] Runhua Huang. *Conception, suivi de fabrication et caractérisation électrique de composants haute tension en SiC*. PhD thesis, 2011.
- [5] Keneth J. Leedle, R.F Abian, P Ease, R. Obert, L.B. Yer, J. Ames, and S.H. Arris. Laser acceleration and deflection of 96.3 kev electrons with a silicon dielectric structure. september 2014.
- [6] C.A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey, and Westerberg E.R. Physical properties of thinfilm field emission cathodes with molybdenum cones. march 1976.