

Lasers UV à électrons libres

M.E. Couprie^{*,**}

^{*} CEA/DRECAM/SPAM, bâtiment 522, Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

^{**} LURE, bâtiment 209D, Centre Universitaire Paris-Sud, BP. 34, 91898 Orsay, France

Résumé : Les Lasers à Électrons Libres (LEL) sont des sources cohérentes, accordables, de puissance moyenne élevée et de durée picoseconde. Les LELs couvrent, actuellement, une vaste gamme spectrale allant des ondes millimétriques au VUV. Dans le domaine UV-VUV-X, les LELs sont implantés sur des accélérateurs linéaires ou sur des anneaux de stockage. L'état de l'art du point de vue des performances est ici brossé.

1. PRINCIPES

Les LELs sont des sources de rayonnement cohérent et accordable, résultant de l'interaction d'une onde optique avec un faisceau d'électrons relativistes circulant dans le champ magnétique B_0 permanent sinusoïdal de période λ_0 d'un "onduleur". Les particules relativistes accélérées émettent donc un rayonnement synchrotron à la longueur d'onde λ , dite de résonance, et ses harmoniques impaires, sur

l'axe, selon : $\lambda = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$, où K désigne le paramètre de déflexion de l'onduleur, soit

$K = 0,94 \lambda_0(B)$. $B_0(T)$ et γ est l'énergie des particules E, normalisée par rapport à leur énergie au repos (0,511 MeV). L'interaction de cette onde optique avec le paquet d'électrons se réalise au fur et à mesure de la progression dans l'onduleur, et se produit généralement sur de multiples passages lorsqu'une cavité optique de longueur adaptée à la récurrence des paquets d'électrons, permet de stocker le rayonnement. Un échange d'énergie a lieu entre l'onde optique et les particules chargées, conduisant, sous certaines conditions, à une modulation de la densité électronique des paquets d'électrons à la longueur d'onde de la lumière, mettant ainsi en phase l'émission et renforçant la cohérence du rayonnement produit. Un échange d'énergie au deuxième ordre entre l'onde optique et le faisceau d'électrons conduit à l'amplification de l'onde lumineuse stockée dans la cavité optique qui voit alors, au fur et à mesure des allers-et-retours dans la cavité, son intensité augmenter de façon non linéaire jusqu'à atteindre la saturation où le gain du système devient égal aux pertes du résonateur optique, et sa largeur spectrale et temporelle s'affine. Le gain par passage augmente avec la longueur d'interaction, la densité électronique et diminue avec l'énergie du faisceau [1].

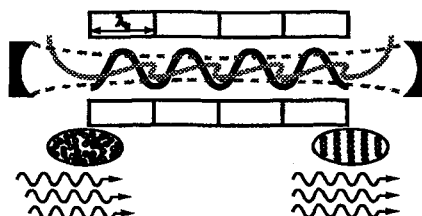


Fig.1 : Principe du Laser à Électrons Libres

Différentes configurations, reposant sur l'interaction "électron-photon", peuvent être mises en œuvre : l'oscillateur (décrit ci-dessus), la génération d'harmoniques cohérentes [2] (qui sont produites par le même principe à partir du laser à électrons libres lui-même ou d'une source laser extérieure alignée et synchronisée) et le mode super-radiant (SASE ou Self Amplified Spontaneous Emission, où une interaction très importante dans un onduleur très long produit une amplification de plusieurs ordres de grandeur conduisant à l'émission cohérente en un seul passage) [3]. On compte plus d'une vingtaine de

LELs dans le domaine infrarouge où, à paramètres faisceau équivalents, les gains sont généralement plus importants que pour les courtes longueurs d'onde. Il y a une dizaine d'expériences dans le domaine ultraviolet où le gain est plus faible et les optiques sont plus critiques. Un LEL UV implanté sur un accélérateur linéaire présente une structure temporelle identique à celle du faisceau d'électrons, à savoir des micro-impulsions à l'intérieur de macro-impulsions; la saturation se produit car les électrons ne sont plus résonants en fin d'onduleur, ayant cédé trop d'énergie au laser. Sur anneau de stockage (AS), le faisceau recircule à haute cadence, et la saturation se produit par augmentation de la dispersion en énergie résultant de l'interaction avec l'onde lumineuse; de plus, le laser est naturellement synchronisé avec le rayonnement synchrotron (RS), rendant aisées les utilisations pompe-sonde à deux couleurs. La polarisation du laser résulte de la configuration adoptée pour le champ magnétique de l'onduleur.

2. INSTALLATIONS

En ce qui concerne le domaine UV-VUV, il existe moins de sources LELs (gains plus faibles, difficultés avec les optiques) : 4 LELs sur anneaux de stockage (Super-ACO [4] en France, NIJI4 [5] et UVSOR [6] au Japon, DUKE [7] aux États-Unis) et 1 sur Linac fonctionnant actuellement (FELI au Japon [8]). Trois LELs sont implantés sur des anneaux dédiés, à NIJI4, DUKE et DELTA (Allemagne) [9] en cours de tests. Les LELs de Super-ACO et d'UVSOR fonctionnent sur des anneaux destinés au rayonnement synchrotron, et un projet de LEL sur l'anneau de troisième génération ELETTRA [10] en Italie se développe dans un cadre européen. Un LEL est aussi optimisé sur le projet SOLEIL [11] en France, il surpassera en performances celui d'ELETTRA de par la possibilité de fonctionner en harmoniques cohérentes dans le domaine VUV, grâce à la grande section droite disponible. Les nouveaux LELs sur anneau ont tendance à utiliser des sections droites plus longues (supérieures à 5 m) pour disposer de suffisamment de gain, et présentant des cavités optiques longues (en général supérieures à 30 m).

3. CARACTÉRISTIQUES DES LELs UV

3.1 Gamme spectrale

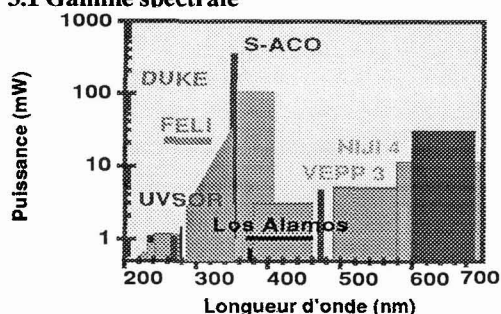


Fig. 2 : LELs ayant obtenu l'oscillation dans l'UV. Les installations de Los Alamos et de VEPP3 sont arrêtées depuis quelques années. 5 LELs sont implantés sur AS et 2 sur linac (soulignés).

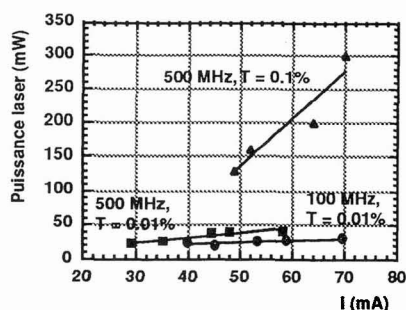


Fig. 3. Puissance moyenne fournie par le LEL de Super-ACO. Par l'implantation récente d'une cavité RF harmonique à 500 MHz, le gain légèrement supérieur a rendu possible l'utilisation de miroirs plus transparents, et l'extraction d'une puissance laser plus grande.

Les plus courtes longueurs d'onde obtenues en mode LEL résonateur autour de 240 nm à VEPP3 [12] et UVSOR, puis très récemment, à 217 nm à DUKE et 212 nm à NIJI4 constituent plutôt des records, mais n'offraient pas un laser utilisable (les basses énergies employées pour disposer d'un gain suffisant conduisaient à des durées de vie du faisceau et à des puissances laser extrêmement faibles). Les puissances associées sont inférieures au milliwatt. Les miroirs de la cavité optique du LEL sont placés dans un environnement hostile. Dans le cas d'un onduleur plan (produisant un champ sinusoïdal dans le plan vertical), le rayonnement émis présente un large spectre s'étendant aux rayons X, et la puissance moyenne émise est importante. Ce rayonnement peut donc induire un échauffement des optiques et une dégradation des performances des miroirs (création de centres colorés, modification de la stoechiométrie, augmentation de l'absorption des couches). L'emploi d'un onduleur hélicoïdal ne présente pas de rayonnement harmonique sur l'axe, et offre une alternative intéressante, déjà exploitée à UVSOR [13].

Pour les plus courtes longueurs d'onde et en particulier le domaine VUV, la génération d'harmoniques cohérentes produites par le LEL, ou un laser extérieur, dans l'onduleur est une solution bien adaptée; c'est

d'ailleurs par ce schéma que fut obtenue la plus courte radiation de type LEL, à 100 nm et à 177 nm à partir d'un laser Nd-YAG doublé et à modes bloqués, synchronisé avec le fonctionnement de l'anneau [2]. Ce schéma fut aussi étudié pour le projet SOLEIL (génération d'harmoniques cohérentes à partir du LEL UV ou d'un laser Titane-Saphir), ce qui offrirait un nombre de photons cohérents significatifs par seconde jusqu'à 40 nm [11].

Dans le domaine X, les projets actuels en développement sont basés sur une interaction de type super-radiant, avec des onduleurs très longs et des accélérateurs linéaires très performants, assez semblables aux futurs collisionneurs. Le plus avancé est certainement le projet TESLA Test Facility à Hambourg (Allemagne) [3], avec une activité importante sur l'interaction SASE dans d'autres Laboratoires [14].

3.2 Puissance

Sur accélérateur linéaire, la puissance laser est directement proportionnelle à la puissance disponible dans le faisceau d'électrons. Les résultats récents dans l'infrarouge au Jefferson Lab. (USA) [15] conduisent à des puissances élevées (300 W de puissance moyenne), et un laser de puissance est attendu dans l'UV pour des applications industrielles. Cette puissance moyenne élevée est aussi due à la cadence élevée des macro-impulsions issues de l'accélérateur supraconducteur. Néanmoins, la puissance moyenne fournie par un LEL UV actuellement en fonctionnement sur LINAC RF (FELI) reste inférieure à celle fournie par le LEL de Super-ACO, et ceci, grâce à l'énergie de faisceau élevée qui est employée, ou par DUKE, suite à une transmission plus grande du miroir de sortie. La puissance d'un LEL sur anneau de stockage est néanmoins limitée à un pourcentage de la puissance émise par rayonnement synchrotron à cause de la recirculation.

3.3 Cohérence temporelle

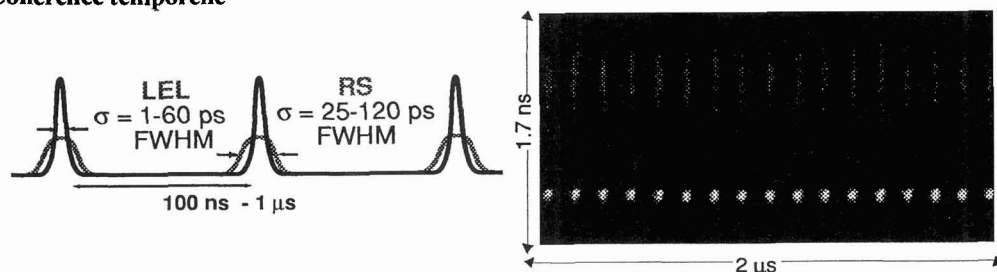


Fig. 4 Structure microtemporelle d'un LEL sur anneau de stockage à gauche. Cas de Super-ACO à droite : une coupe verticale donne le profil temporel du RS (en haut) et du LEL (en bas), l'axe horizontal permet de suivre les impulsions au cours du temps (ici, apparaît la haute cadence).

Sur anneau de stockage, la *structure temporelle* du LEL se présente comme une série de micro-impulsions de durée relativement courte (1-50 ps FWHM) avec un taux de répétition élevé (MHz ou dizaine de MHz) pour un fonctionnement à nombre de paquets réduits. Les impulsions LEL sont plus courtes d'un facteur 5 à 40 que les paquets dont elles sont issues, car l'amplification se produit au maximum de la densité électronique. La limite de Fourier peut être raisonnablement atteinte [16]. La combinaison LEL/Rayonnement Synchrotron permet d'étudier la relaxation d'états excités par des expériences pompe-sonde résolues en temps sur une plage allant de quelques ps à 1 μ s. Selon la condition d'accord longitudinal, une structure macrotemporelle additionnelle peut se présenter, à une fréquence de répétition de quelques kHz. Le laser peut aussi fonctionner en mode déclenché à une centaine de Hz, un mode intéressant pour l'obtention de fortes puissances crêtes. Spectralement, l'emploi d'une cavité optique où les impulsions de lumière sont stockées permet d'affiner la raie d'émission de l'onduleur (largeur relative égale à l'inverse du nombre de périodes) à quelques 10^{-4} en relatif. Une meilleure résolution spectrale peut être contrôlée à l'aide d'un étalon Fabry-Perot intra-cavité [17]. La stabilité du LEL pour les utilisations est d'une importance capitale comme l'ont montré les premières applications menées sur Super-ACO. La mise en œuvre d'une contre-réaction longitudinale sur la position de la micro-impulsion laser est nécessaire pour compenser son jitter, la dérive spectrale et les fluctuations d'intensité.

Sur accélérateur linéaire, les impulsions laser ont une structure temporelle identique à celle des paquets d'électrons dont elles sont issues, avec des séries de macro-impulsions constituées de micro-impulsions qui peuvent se situer dans la gamme femtoseconde. Les impulsions LEL les plus courtes sont fournies

par des accélérateurs linéaires, tandis que les meilleures résolutions spectrales sont atteintes sur anneaux de stockage.

3.4 Cohérence spatiale

La structure transverse du LEL est gouvernée par la géométrie de la cavité optique et la propagation des faisceaux gaussiens (avec un faisceau d'électrons "rond" adapté au mode TEM₀₀ du laser). Bénéficiant d'une source spatialement cohérente, par une bonne adaptation optique, toute la puissance laser peut être focalisée sur la dimension désirée de l'échantillon, la limite étant donnée par la diffraction, d'autant plus que la monochromatisation de la lumière qui introduirait des aberrations stigmatiques n'est pas nécessaire.

4. APPLICATIONS

Les utilisations des LELs UV ont débuté sur la source LEL de Super-ACO par l'étude des déclins d'anisotropie de fluorescence d'un cofacteur enzymatique, tirant profit de la haute cadence, de la puissance moyenne, et des impulsions relativement courtes du rayonnement synchrotron. Des résultats originaux ont pu être obtenus, concernant l'équilibre thermodynamique entre les différents états conformationnels, et le volume hydrodynamique de l'état replié [19]. Les LELs sur anneaux de stockage sont particulièrement bien adaptés aux expériences pompe-sonde avec le rayonnement synchrotron, naturellement synchronisé avec le LEL. Un état est excité par le laser et sondé par le rayonnement synchrotron : les processus dynamiques étant alors suivis en modifiant le retard entre la pompe et la sonde. Cette technique fut d'abord appliquée à des études de surface, pour suivre l'effet de photovoltage (mesuré par photo-émission de niveaux de cœur) de différentes interfaces : GaAs/Ag, Si, Si/Au, Si/SiO₂ [20]. Plus récemment, la technique d'absorption transitoire couplant le LEL et le rayonnement blanc fut testée avec deux systèmes chimiques : POPOP et anthracène. D'autres expériences sont prévues, en absorption transitoire infra-rouge, ou comme l'étude des mécanismes de transfert d'électrons photo-induits dans des complexes. Le LEL UV sur accélérateur linéaire du Jefferson Laboratory, qui devrait fonctionner bientôt dans l'UV, va être utilisé par des groupes industriels (procédé CVD sur des films minces, modification de surfaces de polymères, amorphisation de surfaces de métal, modification de surface de l'aluminium [5]).

5. CONCLUSION

Les LELs UV apparaissent comme des sources cohérentes accordables, offrant une puissance moyenne élevée et une haute cadence. De premières utilisations originales sont en cours, actuellement sur anneaux de stockage, tirant ainsi parti de la synchronisation naturelle avec le rayonnement synchrotron, largement accordable. Sur accélérateur linéaire supraconducteur, des puissances moyennes très élevées pourront être atteintes, et laissent présager des avancées significatives. Le domaine VUV est accessible par génération d'harmoniques cohérentes, tandis que l'activité se poursuit activement pour fournir un rayonnement X par émission super-radiante. Les LELs apparaissent donc comme des sources laser complémentaires de l'ensemble des sources UV, VUV et X actuellement disponibles.

Références

1. J.M.J. Madey *Jou. Appl. Phys.*, **42**, (1971) 1906
2. R. Prazeres, J.M. Ortega, C. Bazin, M. Bergher, M. Billardon, M.E. Couprie, H. Fang; M. Velghe and Y. Petroff *Europhys. Lett.*, **4** (7), (1987) 817
3. J. Rossbach, *Nucl. Instrum. Meth.* **A375** (1996) 269
4. R. Roux et al *Phys. Rev. E.* **58** n°5, (1998) 6584-6593
5. K. Yamada et al, *Proced. 20th FEL conf, Williamsburg* (1998), to be published in NIM A
6. H. Hama et al. " FEL and its applications in Asia", P17-24, edited by FELI, Ionics publishing Co, Tokyo. AFEL97
7. V. Litvinenko et al, *Proced. 20th FEL conf, Williamsburg* aug 1998, to be published in NIM A
8. T. Tomimasu et al., *Free Electron Laser and its appl. in Asia*, Jan. 21-24-97, 65-98, Ionics Publish. Co. ltds Tokyo
9. DELTA: a short Status Report" DELTA group Univ. of Dortmund, Inst. of Physics 1990
10. R. P. Walker et al. *Proced. 20th Intern. FEL conference, Williamsburg* 08/98
11. Avant Projet Détaillé (en cours)
12. Kulipanov G.N. et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A296**, 1-3 (1990)
13. "A helical optical klystron for an UV-FEL project at UVSOR" H. Hama *Nucl. Instrum. Meth.* **A375**(1996) 57-61
14. M. Hogan et al *Phys. Rev. Lett* **80** (1998) 289
15. S. Benson et al, *Proced. 20th FEL conf, Williamsburg* aug 1998, to be published in NIM A
16. M. E. Couprie et al, *Proced. 20th FEL conf, Williamsburg* aug 1998, to be published in NIM A
17. M. E. Couprie et al, *Nucl. Inst. Meth.* **A 304** (1991) 47-52
18. M. E. Couprie, D. Garzella, T. Hara, J. H. Codarbox, M. Billardon, *Nucl. Instrum. Meth.* **A358** (1995), 374.
19. M. E. Couprie, P. Tauc, F. Merola et al *Rev. of Scient. Inst.*, **65** (5)1485-1495 May 1994
20. M. Marsi et al *Appl. Phys. Lett.* **70**(7) (1997) 895