

Oscillateur photonique ultrafin auto-entretenu

Mehdi Alouini, Gwennaél Danion, Marc Vallet
 Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON – UMR 6082, F-35000 Rennes, France
 mehdi.alouini@univ-rennes1.fr

Les sources laser de grande pureté spectrale sont incontournables dans un grand nombre d'applications telles que les capteurs distribués, la métrologie temps fréquence, le lidar cohérent ou la manipulation d'atomes. Dans le domaine optique micro-onde, en particulier, la cohérence optique, et donc la largeur de raie, joue un rôle primordial dans certaines architectures de traitement du signal hyperfréquence et pour la génération, le déport et la distribution de porteuses millimétrique et THz.

Les lasers à état solide présentent une largeur de raie de l'ordre de la dizaine de kHz. C'est aussi le cas des lasers à semi-conducteurs pourvus d'une contre réaction optique. Des méthodes plus ou moins complexes et/ou onéreuses permettent d'atteindre des largeurs de raie plus faibles. Elles sont souvent tributaires de systèmes d'asservissements, d'une part, et de la disponibilité de références de fréquence comme des cavités ultra-stables ou des transitions ro-vibrationnelles en absorption saturée, d'autre part. Une autre possibilité est de tirer avantage de la diffusion Brillouin stimulée dans un résonateur optique. Lorsque celui-ci est judicieusement couplé à l'onde de pompe qui le produit, nous avons montré qu'il présentait des largeurs de raie sub-Hertz [1]. Ce schéma d'auto-affinement spectral fait néanmoins intervenir une boucle à verrouillage de phase qui confère à la pompe la cohérence de l'onde Stokes, c'est-à-dire un asservissement.

Nous décrivons ici une architecture d'oscillateur photonique auto-entretenu [2] (SAPO pour Self-Adaptive Photonic Oscillator) dont le fonctionnement repose sur la diffusion Brillouin stimulée et dont le principe de fonctionnement s'inspire de celui des oscillateurs optoélectroniques, non plus dans le domaine micro-onde mais directement dans le domaine optique.

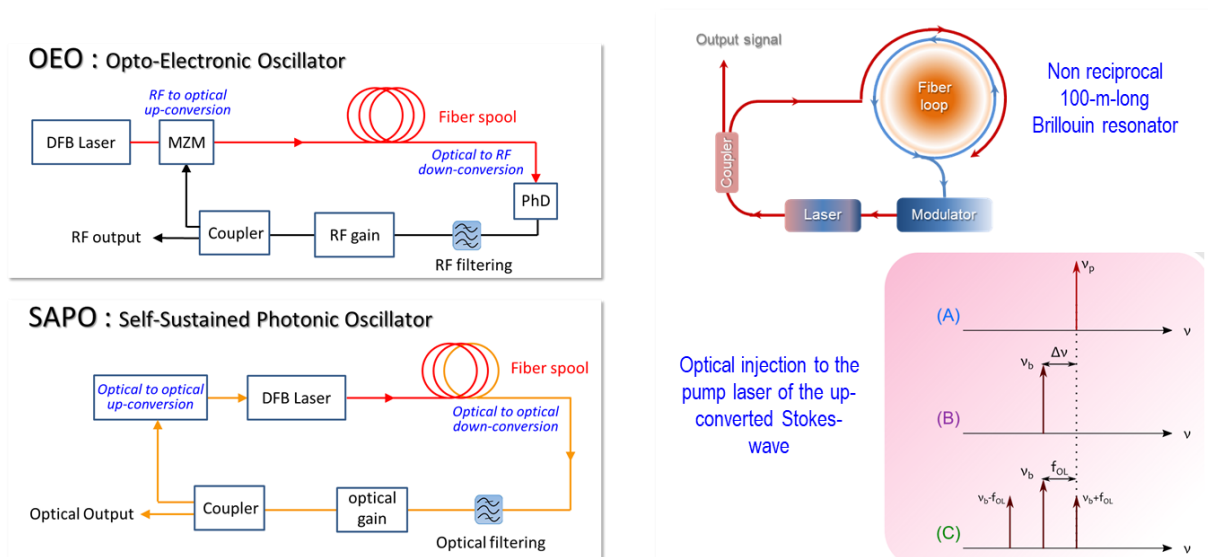


Figure 1. A gauche : similitude de fonctionnement d'un SAPO et d'un OEO. A droite : La fonction retard est obtenue dans un résonateur Brillouin non-réciproque de 110 m de long. Le rebouclage de l'oscillateur est réalisé par réinjection optique de l'onde Brillouin recalée à la fréquence de la pompe.

Le principe du SAPO repose sur l'exploitation de l'effet Brillouin dans un résonateur fibré non-réciproque constitué d'un anneau de 110 m de long. La non-réciprocité du résonateur, obtenue en refermant celui-ci par un circulateur, permet à un laser semi-conducteur standard de pomper la fibre pour atteindre le seuil Brillouin sans subir la grande sélectivité spectrale du résonateur. A contrario, l'onde Stokes générée par l'effet Brillouin stimulé étant contra-propageante, elle est résonnante pour l'anneau. Cela lui confère une pureté spectrale théorique de quelques nHz (largeur Schawlow-Townes). Un tel résonateur est par construction multimode longitudinal car la largeur du gain Brillouin de plusieurs dizaines de MHz est supérieure à l'intervalle spectral libre du résonateur (ici de 1,75 MHz). Cependant, nous avons montré [3] que le caractère multimode peut disparaître lorsque la différence de fréquence entre la pompe et l'onde Stokes est asservie exactement à la fréquence centrale du décalage Brillouin, i.e., 10,9683 GHz dans notre cas. De plus, lorsque la boucle à verrouillage de phase (PLL) utilisée pour asservir la différence de fréquence possède une bande passante suffisamment grande, nous avons observé qu'il se produisait un auto-affinement de la pompe qui, à son tour, exaltait l'efficacité de l'effet Brillouin. Nous montrons ici que cette fonction de PLL peut être simplement obtenue en décalant la fréquence de l'onde Stokes et en la réinjectant optiquement dans le laser à semi-conducteur. Un effet cascade se produit jusqu'à ce que l'ensemble atteigne la largeur de raie de l'onde Stokes. Dans ces conditions, nous mesurons une largeur de raie naturelle de 40 mHz limitée par l'instrument de mesure, et une largeur "Flicker" de 200 Hz pour un temps d'intégration de 0,1 s. De plus, en comparant deux systèmes identiques indépendants, nous avons estimé la dérive long-terme de la raie optique à 10 MHz sur plusieurs heures. Comme pour le bruit de fréquence, le bruit d'intensité de cet oscillateur photonique est dicté par la cavité résonnante de 110 m de long impliquant un régime dynamique de classe A. Par conséquent, le bruit d'intensité relatif est spectralement plat. Il est, en outre, limité par le bruit de grenaille du photo-courant mesuré. Ainsi, pour une puissance mesurée de 5 mW, nous obtenons un bruit d'intensité relatif de -160 dB/Hz.

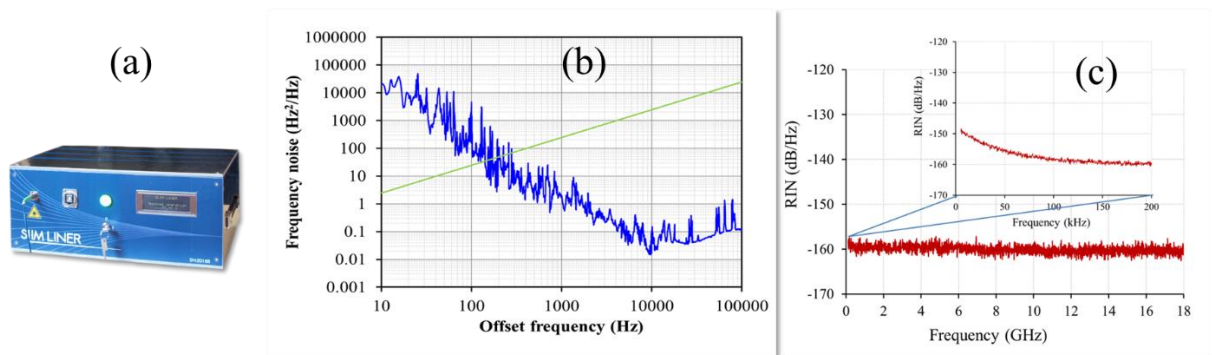


Figure 2. **(a)** Prototype de TRL 5-6. **(b)** Bruit de fréquence: largeur de raie naturelle 40 mHz. Largeur due au bruit de Flicker 200 Hz pour un temps d'intégration de 0,1s. **(c)** RIN à -160 dB/Hz, limité par le bruit de grenaille.

Nous pensons que ce nouveau concept d'oscillateur photonique auto-adaptatif est extrêmement prometteur car il permet d'atteindre des qualités spectrales sans commune mesure pour un système dépourvu d'asservissement actif. Par ailleurs, l'architecture SAPO est extrapolable à n'importe quelle longueur d'onde accessible aux lasers à semi-conducteurs. Nous l'avons par exemple démontré autour de 800 nm, où existe un besoin pour les horloges atomiques. Cet oscillateur photonique sera bientôt commercialisé par l'entreprise SilentSys.

- [1] Danion et al. Brillouin assisted optoelectronic self-narrowing of laser linewidth. *IEEE Photon. Technol. Lett.* **31**, 975-978 (2019).
- [2] Alouini et al. "Ultra-narrow linewidth self-adaptive photonic oscillator : principle and realization", *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.03468> (2021).
- [3] Danion et al., "Mode-hopping suppression in long Brillouin fiber laser with non-resonant pumping." *Opt. Lett.* **41**, 2362–2365 (2016).