

# Metrologie de fréquence dans le domaine optique

G. D. Rovera, A. Brusch  
BNM-SYRTE, Observatoire de Paris, France  
e-mail daniele.rovera@obspm.fr

Pour mesurer la fréquence d'un étalon de fréquence dans le domaine optique il est nécessaire de multiplier la fréquence de l'oscillateur de référence, travaillant dans le domaine des radiofréquences, pour un facteur très élevé, de l'ordre de 30 millions. Dans le domaine des micro-ondes il est relativement simple d'atteindre des facteurs de multiplication de 50 ou plus à chaque étage de multiplication, mais lorsque l'on monte dans le lointain infrarouge ces facteurs sont notablement réduits. Dans le proche infrarouge la multiplication par 3 est un fait exceptionnel, étant la multiplication par 2 normalement utilisée. Ce grand facteur de multiplication ne peut donc être réalisé qu'avec un grand nombre d'étages, chacun avec son oscillateur intermédiaire et son élément non linéaire.

La mesure absolue de la fréquence dans le domaine optique, avec la technique traditionnelle de la multiplication directe, était jusqu'à présent possible seulement avec des moyens très lourds à mettre en œuvre [1]. Par conséquent dans le monde entier le nombre de laboratoires qui disposent de ces moyens est très restreint.

L'avènement d'une nouvelle méthode pour la mesure de la fréquence des radiations laser dans le domaine visible a beaucoup changé cette situation. Cette méthode[2], dite du "peigne optique de fréquences", permet de mesurer tout étalon de fréquence dans le domaine optique avec un investissement qui désormais est à la portée de plusieurs laboratoires.

Cette méthode est une conséquence de deux événements indépendants: l'un est le développement d'une nouvelle génération de lasers impulsions, à haute fréquence de répétition, produisant des impulsions de durée de l'ordre de la dizaine de femtosecondes[3]; l'autre est le développement des fibres optiques dites "à cristaux photoniques" ou "à micro-structure"[4].

Le train d'impulsions généré par un tel laser peut être représenté comme un peigne de raies spectrales, espacées exactement de la fréquence de répétition, qui s'étend sur environ le réciproque de la durée des impulsions. Lorsque ce train d'impulsions passe dans une fibre à cristaux photoniques, la grande densité de puissance excite des phénomènes non linéaires dans la silice. Grâce à ces phénomènes le spectre peut être élargi jusqu'à couvrir plus qu'une octave, environ de 1100 nm à 480 nm.

Cet ensemble de raies peut être considéré comme une règle virtuelle, dont la fréquence de la raie  $n^{ième}$  est donné par la relation  $\nu_n = \delta + n f_{rep}$ . Ou  $\delta$  est le décalage du peigne et  $f_{rep}$  la fréquence de répétition, qui peut être asservie en phase sur un étalon primaire de fréquence.

Pour utiliser cette règle pour mesurer de façon absolue, il est nécessaire de connaître le décalage  $\delta$ , mais ceci peut être mesuré précisément à l'aide d'un seul étage de multiplication, car la fréquence du battement  $b$  entre le double

de la fréquence de la raie  $n^{iEme}$  et la raie  $2n^{iEme}$  est donné par la relation:  
 $b = 2(\delta + n f_{rep}) - \delta + 2n f_{rep} = \delta$ .

Pratiquement cette relation peut être utilisée soit en doublant la fréquence d'un ensemble de raies de la partie basse fréquence du peigne, soit en doublant la fréquence d'un laser auxiliaire. Les premiers résultats obtenus avec un système de ce type, réalisé au BNM-SYRTE, ont montré qu'il est possible de transférer dans le domaine optique la stabilité et l'exactitude des étalons primaires[5, 6]. La simplicité du dispositif nous a permis de mesurer les étalons optiques qui auparavant avaient fait l'objet d'une mesure avec la chaîne classique. De même nous avons pu utiliser ce dispositif pour la spectroscopie à haute résolution sur l'atome de strontium refroidi. La mesure de différentes raies afférentes au triplet métastable nous a permis, pour la première fois, de exciter la transition fortement interdite entre l'état de base et le niveau  $^3P_0$  de ce triplet[7]. Cette raie devrait être utilisée pour la réalisation d'un horloge optique de très haute performance.

## References

- [1] G. D. Rovera and O. Acef, "Optical frequency measurements relying on a mid infrared frequency standard," in *Frequency measurement and control* (A. Luiten, ed.), vol. 79 of *Topics in Applied Physics*, Springer-Verlag, 2000.
- [2] S. A. Diddams, D. J. Jones, J. Ye, S. T. Cundiff, J. L. Hall, J. K. Ranka, R. S. Windeler, R. Holtzwarth, T. Udem, and T. W. Hänsch, "Direct link between microwave and optical frequency with a 300 THz femtosecond laser comb," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, pp. 5102–5105, May 2000.
- [3] A. Bartels, T. Dekorsy, and H. Kurz, "Femtosecond Ti:sapphire ring laser with a 2-GHz repetition rate and its application in time-resolved spectroscopy," *Optics Letters*, vol. 24, no. 14, pp. 996–998, 1999.
- [4] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. S. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Optics Letters*, vol. 22, no. 13, pp. 961–963, 1997.
- [5] G. D. Rovera, F. Ducos, J.-J. Zondy, O. Acef, J.-P. Wallerand, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, "Absolute frequency measurement of an I<sub>2</sub> stabilized Nd:YAG optical frequency standard," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 918–922, 2002.
- [6] G. D. Rovera, J.-P. Wallerand, F. Ducos, J.-J. Zondy, O. Acef, M. Lours, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, "Mesure absolue de fréquences optiques au BNM: application à un étalon à 563 thz (532 nm)," *Bulletin BNM*, 2003. in press.
- [7] I. Courtillot, A. Quessada, R. P. Kovacich, A. Brusch, D. Kolker, J.-J. Zondy, G. D. Rovera, and L. Pierre, "Clock transition for a future optical frequency standard with trapped atoms," *Physical Review A*, vol. 68, p. 030501(R), 2003.