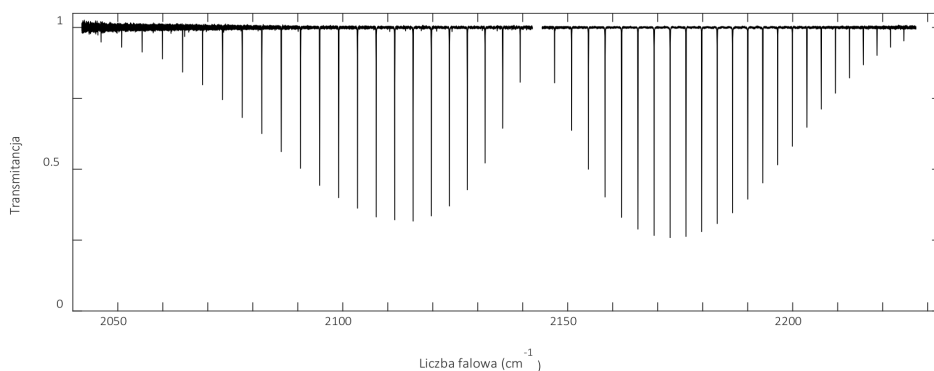


Spektroskopia szerokopasmowa z grzebieniami częstotliwości optycznych

P. Maślowski

*Institut Fizyki,
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej,
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu,
ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń
e-mail: pima@fizyka.umk.pl*

Rozwój optycznych grzebień częstości na przełomie wieków zrewolucjonizował metrologię częstotliwości [1]. Periodyczny ciąg impulsów z dopasowanego modowo (*mode-locked*) femtosekundowego lasera powoduje powstanie grzebienia częstości optycznych. Szerokie widmo takiego lasera składa się z dziesiątek tysięcy równoległych wąskich linii („zębów”) grzebienia, rozmieszczonych w szerokim zakresie częstości na przestrzeni dziesiątek czy nawet setek nanometrów. Częstość każdego z takich „zębów” jest ściśle określona przez dwie częstości radiowe – częstość repetycji lasera femtosekundowego i częstość offsetową, powstającą w wyniku różnicy prędkości grupowej i fazowej we wnętrzu lasera. Poprzez bezpośrednie połączenie domen częstości radiowych i optycznych, grzebień częstości optycznych stał się narzędziem pozwalającym na łatwy pomiar częstości optycznych z nieosiągalną wcześniej precyzją i dokładnością.



Rysunek 1: Widmo fundamentalnego pasma absorpcyjnego CO zaburzonego azotem w zakresie $4.6 \mu\text{m}$. Widmo zmierzono przy pomocy mechanicznego interferometru Michelsona, z wykorzystaniem femtosekundowego (czas trwania impulsu ok. 150 fs) optycznego oscylatora parametrycznego, pompowanego przez laser światłowodowy. Czas pomiaru każdej z gałęzi pasma to 2 minuty dla 50 pomiarów, czas jednego pomiaru to 11 s, rozdzielczość spektralna poniżej 100 kHz

Równoległe do zastosowań w metrologii zaczęto rozwijać techniki pomiarowe, bezpośrednio wykorzystujące grzebień częstotliwości optycznych do pomiarów spektroskopowych [2]. Pozwalają one na połączenie wysokiej zdolności rozdzielczej z jednoczesnym pomiarem absorpcji w szerokim zakresie częstotliwości, umożliwiając pomiary linii absorpcyjnych wielu różnych molekuł jednocześnie. Dzięki dużej energii światła w impulsie, możliwe jest efektywne przeniesienie widma grzebienia w różne zakreśy widmowe od głębokiego ultrafioletu do dalekiej podczerwieni. Stosowane techniki obejmują spektroskopię fourierowską, opartą zarówno na mechanicznym interferometrze Michelsona, jak i wykorzystującą technikę *dual-comb spectroscopy* [3, 4], jak i spektrometry dyspersyjne. Możliwe jest także połączenie pomiaru szerokopasmowego z wykorzystaniem wnęki optycznych [5].

W czasie wystąpienia omówię ideę spektroskopii fourierowskiej z rozdzielczością spektralną, nieograniczoną różnicą dróg optycznych [6], oraz wyniki pomiarów szerokopasmowych z rozdzielczością spektralną poniżej 1 kHz [7], jak przestawię wyniki szerokopasmowych pomiarów absorpcyjnych w zakresie średniej podczerwieni [8]. Przykład szerokopasmowego widma uzyskanego przy wykorzystaniu optycznego grzebienia częstotliwości przedstawiono na Rysunku 1. Omówię także szerokopasmowe pomiary nowymi technikami, opartymi na spektroskopii rezonansów wnęki optycznych – w tym spektroskopii dyspersyjnej, opartej jedynie na pomiarach częstotliwości [9] oraz szerokopasmową spektroskopię zaników czasów we wnęce (*cavity-ringdown spectroscopy*), z wykorzystaniem dwóch grzebieńi optycznych [10].

Bibliografia

- [1] Diddams S. A., Jones D. J., Ye J., Cundiff S. T., Hall J. L., Ranka J. K., Windeler R. S., Holzwarth R., Udem T., Hansch T. W., *Phys. Rev. Lett.* 84, 5102 (2000).
- [2] Masłowski P., Cossel K. C., Foltynowicz A., Ye J., in *Cavity-Enhanced Spectroscopy and Sensing*, vol. 179, p. 271, edited by G. Gagliardi and H.-P. Loock, Springer Berlin Heidelberg (2014).
- [3] Keilmann F., Gohle C., Holzwarth R., *Opt. Lett.* 29, 1542 (2004).
- [4] Coddington I., Swann W. C., Newbury N. R., *Phys. Rev. Lett.* 100, 013902 (2008).
- [5] Foltynowicz A., Ban T., Masłowski P., Adler F., Ye J., *Phys. Rev. Lett.* 107, 233002 (2011).
- [6] Masłowski P. *et al.*, *Phys. Rev. A* 93, 021802 (2016).
- [7] Kowzan G., Charczun D., Cygan A., Trawinski R. S., Lisak D., Masłowski P., *Sci. Rep.* 9, 8206 (2019).
- [8] Nishiyama A., Kowzan G., Charczun D., Masłowski P., in *Proceedings of the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, Optica Publishing Group (2022).
- [9] Charczun D., Nishiyama A., Kowzan G., Cygan A., Voumard T., Wildi T., Herr T., Brasch V., Lisak D., Masłowski P., *Measurement* 188, 110519 (2022).
- [10] Lisak D., Charczun D., Nishiyama A., Voumard T., Wildi T., Kowzan G., Brasch V., Herr T., Fleisher A. J., Hodges J. T., Ciuryło R., Cygan A., Masłowski P., *Sci. Rep.* 12, 2377 (2022).