

Spektroskopia laserowa wykorzystująca półprzewodnikowe grzebienie częstotliwości optycznej

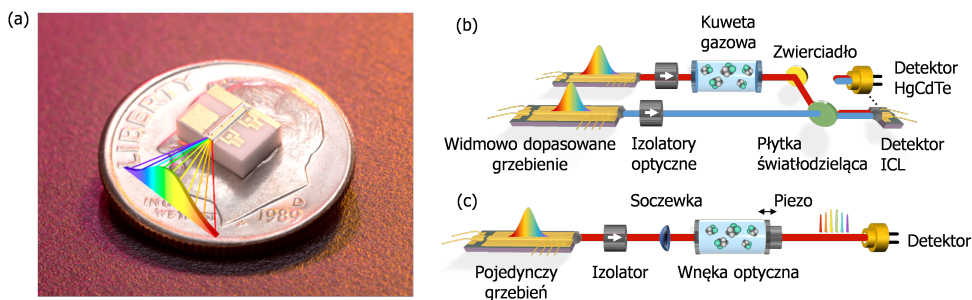
Ł. A. Sterczewski

*Grupa Elektroniki Laserowej i Światłowodowej,
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów,
Politechnika Wroclawska
ul. Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: lukasz.sterczewski@pwr.edu.pl*

Grzebienie częstotliwości optycznej zostały docenione przez Komitet Noblowski w 2005 roku za bycie kamieniem milowym w rozwoju precyzyjnej metrologii i spektroskopii molekularnej [1]. Ich niezwykła struktura widmowa łączy wąską linię emisyjną lasera z szerokopasmowym pokryciem, charakterystycznym dla niespójnych źródeł termicznych. Z punktu widzenia potencjalnych aplikacji grzebieni poza laboratorium, emisja laserowa w szerokim zakresie jest istotna dla monitorowania środowiska pod kątem zanieczyszczeń złożonymi związkami organicznymi. Przykładem może być rakotwórczy benzopiren, który powstaje wskutek niecałkowitego spalania śmieci lub węgla w zbyt niskiej temperaturze.

Ten, oraz wiele innych lotnych substancji o kluczowym znaczeniu dla środowiska, może być wykrywany spektroskopowo w zakresie średniej podczerwieni (3-8 μm). Ponieważ szczegóły widmowe takich związków w warunkach normalnych często mają setki gigaherców szerokości, utrudnia to wykorzystanie do ich detekcji wąsko-prze-strajalnych półprzewodnikowych laserów jednomodowych. To właśnie motywuje użycie grzebieni optycznych do monitorowania stężenia lotnych substancji organicznych (VOC) w powietrzu. Optymalny region do tego celu to wspomniana wcześniej średnia podczerwień – nie tylko ze względu na duży przekrój czynny na absorpcję molekuł, ale również mniejsze rozpraszanie dłuższych fal przez mgłę, deszcz czy kurz. Odpowiedzią na te wymagania są kompaktowe półprzewodnikowe źródła laserowe o strukturze rzadkiego grzebienia (tj. o dużych, GHz odstępach między liniami). Dzięki natywnej emisji laserowej w pożądanym zakresie widmowym, a nie poprzez nieliniową konwersję częstotliwości z telekomunikacyjnych długości fal (1.5 μm), uzyskuje się dużą moc optyczną na pojedynczą linię (100 μW -1 mW) oraz szerokie pokrycie (> 1 THz). Przykładem takich źródeł są kwantowe lasery kaskadowe (QCL) [2], międzypasmowe lasery kaskadowe (ICL) [3] (Rysunek 1a) oraz lasery diodowe [4].

Wysoka spójność czasowa i przestrzenna grzebieni, wytwarzanych samoczynnie przez lasery półprzewodnikowe, pozwala na ich użycie w technikach spektroskopowych pozbawionych wolnych ruchomych elementów optycznych. Przykładem jest technika dwugrzebieniowa [5] (Rysunek 1b), gdzie para grzebieni o różnych odstępach międzymodowych wytwarza powtarzający się elektryczny sygnał multi-heterodyny na fo-



Rysunek 1: (a) Międzypasmowy laser kaskadowy (ICL) emitujący grzebień częstotliwości. (b) Spektroskopia dwugrzebieniowa. (c) Spektroskopia Verniera

totodetektorze. Zamiast jednej linii mikrofalowej, otrzymuje się grzebień częstotliwości radiowych, w którym każda linia niesie informację o jednym z zębów grzebienia optycznego próbującego otoczenie. W ten sposób informacja z dziedziny optycznej przeniesiona jest do dziedziny elektrycznej. Mikrosekundowe szybkości pomiarów uzyskiwane tą techniką otwierają szerokie możliwości w badaniu dynamiki reakcji chemicznych bardziej złożonych molekuł, nawet w zakresie fal terahercowych [6].

Drugą techniką, która łączy poszerzenie wnęką z selektywną filtracją jednej linii grzebienia naraz, jest spektroskopia Verniera [7] inspirowana skalą noniusza w suwmiarce (Rysunek 1c). Idealne dopasowanie do półprzewodnikowych grzebieni częstotliwości umożliwia jednocześnie wysokorozdzielcze (MHz) i szerokopasmowe (1 THz) pomiary z wysoką czułością (ppm) w czasie milisekund. Z punktu widzenia miniaturyzacji, spektroskopia Verniera oferuje dodatkowo efektywną drogę optyczną rzędu kilkudziesięciu metrów z wnęki o odstępach luster rzędu pojedynczych centymetrów [8]. Półprzewodnikowe źródła grzebieni częstotliwości w zakresie średniej podczerwieni mogą też być wykorzystane w klasycznej spektroskopii fourierowskiej z wykorzystaniem interferometru Michelsona (spektrometrami FTIR), z rozdzielczościami nawet $1000\times$ większymi niż nominalna [9, 10].

W trakcie prezentacji zostaną omówione przykładowe zastosowania i ograniczenia wspomnianych technik do detekcji molekuł chemicznych. Poruszone będzie również zagadnienie szerokości linii laserowej grzebieni, które narzuca wybór konkretnej metody pomiaru widma.

Podziękowania

Prace badawcze były przeprowadzane częściowo w Laboratorium Napędu Odrzutowego (Jet Propulsion Laboratory, JPL) w ramach kontraktu z NASA. Część badań prowadzonych przez Ł. A. Sterczewskiego otrzymała wsparcie w ramach stażu doktorskiego zarządzanego przez Universities Space Research Association (USRA) oraz stypendium Marie Skłodowska-Curie z programu Unii Europejskiej Horyzont 2020 (nr grantu 101027721). Autor dziękuje dr. Chadwickowi L. Canedy'emu, dr. Igorowi Vurgaftmanowi oraz dr. Jerry'emu R. Meyerowi z Naval Research Laboratory (NRL, Waszyngton DC, USA) za dostarczenie materiału półprzewodnikowego. Autor dziękuje również dr. Cliffordowi Frezowi oraz dr. Mahmoodowi Bagheri z NASA Jet Propulsion Laboratory (Caltech, Pasadena, CA, USA) za wytworzenie struktur laserowych, użytych w eksperymentach oraz użyczenie fotografii z Rysunku 1a.

Bibliografia

- [1] Hänsch T. W., Nobel Lecture: Passion for Precision, *Rev. Mod. Phys.* 78, 1297 (2006).
- [2] Hugi A., Villares G., Blaser S., Liu H. C., Faist J., Mid-Infrared Frequency Comb Based on a Quantum Cascade Laser, *Nature* 492, 229 (2012).
- [3] Sterczewski L. A., Bagheri M., Frez C., Canedy C. L., Vurgaftman I., Kim M., Kim C. S., Merritt C. D., Bewley W. W., Meyer J. R., Interband Cascade Laser Frequency Combs, *J. Phys. Photonics* 3, 042003 (2021).
- [4] Sterczewski L. A., Fradet M., Frez C., Forouhar S., Bagheri M., Battery-Operated Mid-Infrared Diode Laser Frequency Combs, *Laser Photonics Rev.* 17, 2200224 (2023).
- [5] Coddington I., Newbury N., Swann W., Dual-Comb Spectroscopy, *Optica* 3, 414 (2016).
- [6] Sterczewski L. A., Westberg J., Yang Y., Burghoff D., Reno J., Hu Q., Wysocki G., Terahertz Spectroscopy of Gas Mixtures with Dual Quantum Cascade Laser Frequency Combs, *ACS Photonics* 7, 1082 (2020).
- [7] Rutkowski L., Morville J., Broadband Cavity-Enhanced Molecular Spectra from Vernier Filtering of a Complete Frequency Comb, *Opt. Lett.* 39, 6664 (2014).
- [8] Sterczewski L. A., Chen T.-L., Ober D. C., Markus C. R., Canedy C. L., Vurgaftman I., Frez C., Meyer J. R., Okumura M., Bagheri M., Cavity-Enhanced Vernier Spectroscopy with a Chip-Scale Mid-Infrared Frequency Comb, *ACS Photonics* 9, 994 (2022).
- [9] Maslowski P. *et al.*, Surpassing the Path-Limited Resolution of Fourier-Transform Spectrometry with Frequency Combs, *Phys. Rev. A* 93, 021802 (2016).
- [10] Sterczewski L. A., Bagheri M., Sub-Nominal Resolution Fourier Transform Spectrometry with Chip-Based Combs, *w red.* (2023).