

## Streszczenie

Laserowa detekcja gazów stanowi obecnie bardzo istotne narzędzie w wielu aspektach działalności człowieka, od wydobycia surowców naturalnych, przez ochronę środowiska naturalnego, po badania naukowe. Galopujący rozwój technologiczny i ekonomiczny stawia w szybkim tempie nowe wyzwania przed czujnikami gazów, takie jak miniaturyzacja, energooszczędność, niezawodność i zwiększona dostępność przy zredukowanych kosztach produkcji i eksploatacji. Aby sprostać tym wymaganiom, potrzebne są badania naukowe nad innowacjami w laserowej spektroskopii, które prowadzić będą do opracowania nowych rozwiązań wspomagających pracę układów pomiarowych, a także takich, które zaowocują całkowicie nowymi konfiguracjami, które przesuną dalej granicę możliwości laserowych detektorów gazów.

Celem naukowym przedstawianej rozprawy doktorskiej jest zaprezentowanie wyników prac badawczych skupionych wokół zastosowań światłowodów antyrezonansowych z pustym rdzeniem (AR-HCF) oraz optycznej detekcji heterodynowej (OHD) w laserowej spektroskopii gazów. Obydwie technologie stanowią obecnie bardzo obiecujące gałęzie badań nad optycznymi czujnikami gazów, pierwsze – jako niewielkie stabilne optomechanicznie komórki z gazem, drugie zaś – jako technika detekcji sygnału, pozwalająca na pokonanie pewnych ograniczeń, które występują w konwencjonalnych układach spektroskopowych.

Rozprawa podzielona jest na kilka części. W pierwszej z nich (rozdział 2.), wprowadzono czytelnika w niezbędne podstawy oddziaływania światła z cząsteczkami gazu, będące podstawą spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni. W drugiej opisano techniki laserowej spektroskopii absorpcyjnej z użyciem przestrajalnych diod laserowych (TDLAS) wraz ze spektroskopią modulacji długości fali (WMS), którą powszechnie używa się we współcześnie prezentowanych układach czujnikowych. W rozdziale 3. pochyłono się również nad przeglądem zastosowań światłowodów z pustym rdzeniem w spektroskopii laserowej gazów, poczynając od pierwszych demonstracji z cylindrycznymi falowodami z metaliczną warstwą odbijającą, aż po współczesne zaawansowane układy interferometryczne na bazie włókien antyrezonansowych, w których wykrywa się gazy w bliskiej i średniej podczerwieni z niespotykaną wcześniej rozdzielczością spektralną i czułością rzędu pojedynczych ppb. Tematyce spektroskopii absorpcyjnej w światłowodach AR-HCF poświęcony jest rozdział 4. rozprawy. W pierwszej sekcji rozdziału zaprezentowany jest układ do detekcji metanu w średniej podczerwieni wykorzystujący międzypasmowy laser kaskadowy emitujący przy 3,27  $\mu\text{m}$ . Dzięki wysokiej czułości detekcji, możliwe było zastosowanie tego układu do długoczasowego monitorowania stężenia metanu we wrocławskim powietrzu (ok. 2 ppm), co zaowocowało pierwszą demonstracją praktycznego wykorzystania czujnika z AR-HCF. Podczas badań nad tym czujnikiem zdano sobie również sprawę z pewnych problemów, natury fundamentalnej oraz technicznej, związanych z wykorzystaniem włókien antyrezonansowych w detekcji gazów. Zaliczono do nich: łączenie światłowodów z możliwością ich jednoczesnego wypełniania gazem, skuteczne napełnianie dłuższych odcinków AR-HCF gazem, pomiar linii absorpcyjnych w warunkach niejednorodnego poszerzenia spowodowanego gradientem ciśnienia we włóknie, czy interferencja międzymodowa w AR-HCF objawiająca się obecnością prążków w widmach absorpcyjnych. Rozwiązania tych trudności opisano w drugiej sekcji rozdziału 4. w nowych układach do detekcji metanu w bliskiej podczerwieni, gdzie wykorzystano dodatkowo dostępność komponentów światłowodowych do opracowania tzw. „w pełni światłowodowych” układów czujnikowych, które charakteryzuje prostota oraz odporność na rozjustowanie. W ostatniej części rozprawy (rozdział 5.) opisano układy do detekcji gazów, w których detekcja heterodynowa posłużyła do zaprezentowania nowych możliwości pomiarowych. W pierwszym z czterech eksperymentów ukazano, jak OHD umożliwia pracę czujnika z AR-HCF w konfiguracji odbiciowej. W drugim opisano jak różnicowa spektroskopia dyspersyjna w interferometrze heterodynowym może posłużyć do detekcji różnic w stężeniu tlenu pomiędzy dwoma komórkami gazowymi. Dwie ostatnie demonstracje dotyczyły zastosowań OHD w interferometrii fototermałnej w konfiguracji *pump-probe*, najpierw z jednoczesnościowym źródłem światła, a następnie z grzebieniem częstotliwości z kwantowego lasera kaskadowego (QCL-FC). W obydwu przypadkach detekcja heterodynowa umożliwiła obserwację fototermałnej modulacji fazy w sygnale dudnienia dwóch wiązek próbujących o delikatnie różnych częstotliwościach. System z modulowanym w spektrometrze fourierowskim QCL-FC był pierwszą demonstracją szerokopasmowej multiheterodynowej spektroskopii fototermałnej w średniej podczerwieni na ok. 8  $\mu\text{m}$ .

Podsumowując, w rozprawie doktorskiej opisano, w jaki sposób zastosowanie antyrezonansowych światłowodów z pustym rdzeniem oraz detekcji heterodynowej może posłużyć do opracowania nowych metod i konfiguracji w laserowej detekcji gazów. Układy które zaprezentowano stanowią studium możliwości oraz problemów tych technologii, a pokazane rozwiązania pozwoliły na opracowanie czujników gazów o właściwościach niedostępnych wcześniej.