

Układy sterowania laserami kaskadowymi

Streszczenie. W pracy przedstawiono układy sterowania laserami kaskadowymi (quantum cascade lasers – QCL) pod kątem ich zastosowania w dwóch technikach; spektroskopii strat we wnęcie optycznej oraz spektroskopii wieloprześciowej. W trakcie projektowania tych sterowników, szczególną uwagę zwrócono zarówno na parametry czasowo-energetyczne wytwarzanych sygnałów, oraz na możliwości zastosowania dwóch technik przestrajania promieniowania laserowego tzn. wewnątrzimpulsowej lub międzyimpulsowej. Przeprowadzono również wstępne badania, które umożliwiły określenie właściwości tych układów oraz dały podstawę do opracowania kompaktowych sterowników laserów QCL.

Abstract. Quantum cascade laser drivers for absorption spectroscopy - the paper presents the fundamental aspects of optical spectroscopy using quantum cascade lasers. Two driving systems were described in terms of both QCL research and QCL applications in cavity ring down and multipass techniques. During drivers designing, the particular attention was given not only to energy-time parameters range (power, frequency, pulse duration, rise time). There were also adapted so-called spectral tuning techniques, i.e. intrapulse or interpulse wavelength modulation. Preliminary studies gave the possibility to determine the properties of designed drivers. (**Quantum cascade laser drivers for absorption spectroscopy**).

Słowa kluczowe: spektroskopia laserowa, kwantowe lasery kaskadowe, analiza gazów, sterownik lasera.

Keywords: laser absorption spectroscopy, quantum cascade lasers, gases analysis, laser driver.

Wprowadzenie

Spektroskopia laserowa z zakresu podczerwieni jest skutecznym narzędziem do detekcji oraz identyfikacji śladowych ilości substancji gazowych [1]. Sensory, w których stosowana jest powyższa technika, umożliwiają uzyskanie prognozy czułości rzędu ppb (ang. *part per billion*), a w niektórych przypadkach nawet ppt (ang. *part per trillion*). Duża czułość tych sensorów jest osiągnięta dzięki absorpcji promieniowania laserowego przez molekuly w zakresie od 3 μm do 24 μm . W sensorach tych stosuje się monochromatyczne promieniowanie o długości fali precyzyjnie dopasowanej do tych widm. Przez wiele lat w technologii spektroskopii laserowej zakresu średniej podczerwieni stosowane były m.in. diody laserowe ze związku ołowiu, optyczne generatory różnicowe (DFG – ang. *differential frequency generator*), optyczne generatory parametryczne (OPO – ang. *optical parametric oscillator*) oraz lasery krystaliczne [2]. Tego rodzaju źródła promieniowania bardzo często charakteryzowały się złożoną budową, dużymi rozmiarami, koniecznością stosowania specjalnych układów chłodzenia, ograniczonym zakresem długości fal i mocy promieniowania oraz wysoką ceną. Obecnie obserwowany jest dynamiczny rozwój technologii kwantowych laserów kaskadowych (laserów QC) [3]. Stanowią one atrakcyjne źródła do budowy układów spektroskopii laserowej. Stabilizując temperaturę pracy laserów kaskadowych, przy użyciu chłodziarek termoelektrycznych, można uzyskać widmo o bardzo wąskich liniach emisji i dużej mocy. Stosując zatem lasery QC można zbudować kompaktowy i niezawodny optoelektroniczny sensor do badania związków chemicznych w zakresie średniej podczerwieni. Relatywnie duża moc promieniowania umożliwia ich zastosowanie w wielu technikach spektroskopii absorpcyjnej np. w lidarach, w spektroskopii strat we wnęcie optycznej (SSWO), wieloprześciowej (SW) i fotoakustycznej (SF) [4].

W Zespole Detekcji Sygnałów Optycznych, IOE prowadzone są badania dotyczące sensorów optoelektronicznych, które mogą znaleźć zastosowanie w detekcji biomarkerów zawartych w wydychanym przez człowieka powietrzu [5]. Do ich opracowania przewiduje się zastosowanie dwóch technik SW oraz SSWO. W przypadku techniki SW zastosowany będzie układ umożliwiający przestrajanie promieniowania laserowego. Ze wstępnych badań wynika, że do przestrajania może być zastosowana

metoda: wewnątrzimpulsowa (WI) lub międzyimpulsowa (MI) [6]. Wstępne analizy wykazały, że zastosowanie w sensorach kwantowych laserów kaskadowych wymagać będzie przeprowadzenia badań ich parametrów jak również opracowania odpowiednich układów regulacji i stabilizacji ich punktu pracy.

W artykule przedstawiono laboratoryjne układy sterowania i zasilania, które umożliwiają pomiar charakterystyk laserów QC oraz układy kompaktowe przeznaczone do zastosowania w optoelektronicznych sensorach gazów.

Laboratoryjny układ sterowania do laserów QC

Laboratoryjny układ sterowania i zasilania laserów QC jest kompaktowym urządzeniem przeznaczonym do ich badań. Umożliwia on regulację zarówno parametrów energetycznych, jak i czasowych wytwarzanych impulsów na potrzeby określenia charakterystyk prądowo-napięciowych laserów. Zapewnia on m.in. możliwość generowania impulsów prądowych o maksymalnej amplitudzie 25 A. Jest on wyposażony także w kontroler ogni termoelektrycznych o mocy do 120 W, który zapewnia stabilizację temperatury z dokładnością 0,01 K. Jest to szczególnie istotne w przypadku zastosowania laserów QC, dla których wartości szczytowe prądów sterowania mogą wynosić kilka (lub nawet kilkanaście) amperów, napięcie pracy kilkanaście woltów, a wytwarzane ciepło jest na poziomie kilkudziesięciu watów. Dodatkowymi wymaganiami stawianymi tego typu sterownikom są krótkie czasy narastania i opadania generowanych impulsów. Ich wartości nie powinny przekraczać kilku ns.

Sterownik ten może pracować zarówno w trybie impulsowym, jak i w trybie impulsowym ze składową stałą (DC). Składowa DC może być dodawana do przebiegów impulsowych z wewnętrznego lub z zewnętrznego źródła zasilania. Dopiero tak otrzymanym sygnałem wyzwalany jest laser QC. Czasy trwania i częstotliwości generowanych impulsów są regulowane w wewnętrznym generatorze (w zakresach od 200 ns do 50 ms, oraz od 10 Hz do 100 kHz). Mogą one być także otrzymane z zewnętrznego generatora (min. czas trwania impulsów 25 ns, częstotliwość repetycji <10 MHz). Dzięki zastosowaniu specjalnych wyjść monitorujących, istnieje możliwość obserwacji kształtu impulsów sterujących oraz napięcia na strukturze lasera. Opracowany sterownik składa się z układu chłodzenia lasera (kontroler, obudowa z ogniwem

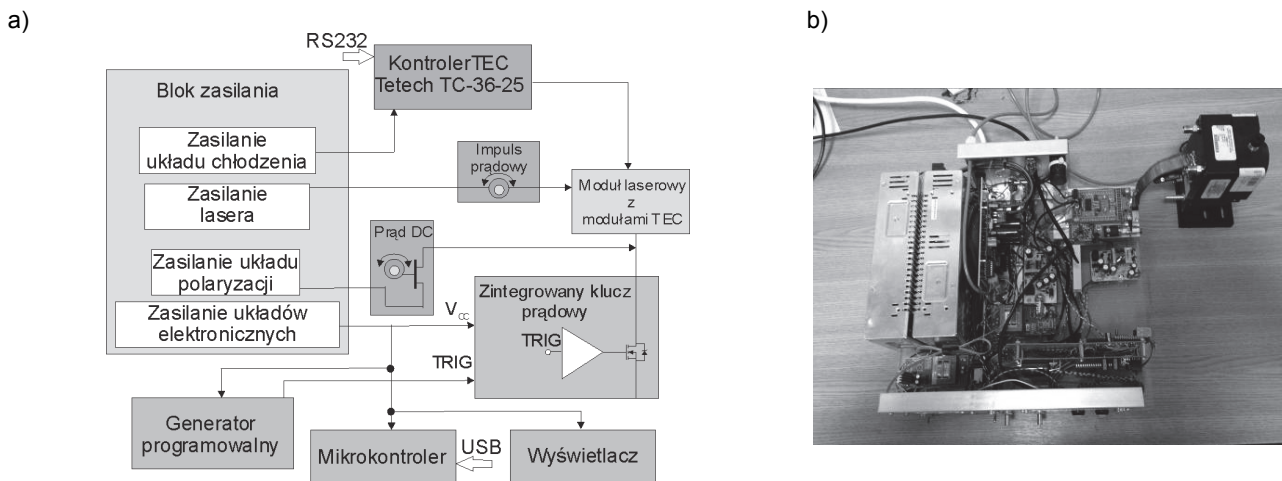
termoelektrycznym), modułu impulsowego sterownika prądu, modułu zasilania DC, mikroprocesorowego układu sterowania wraz z wbudowanym programowalnym generatorem impulsów, interfejsu (panelu) użytkownika.

Moduł impulsowego sterownika prądu jest zbudowany ze stabilizowanych zasilaczy oraz układu kluczkowania prądu. W module tym zastosowano układ PCO 7120 firmy IXYS.

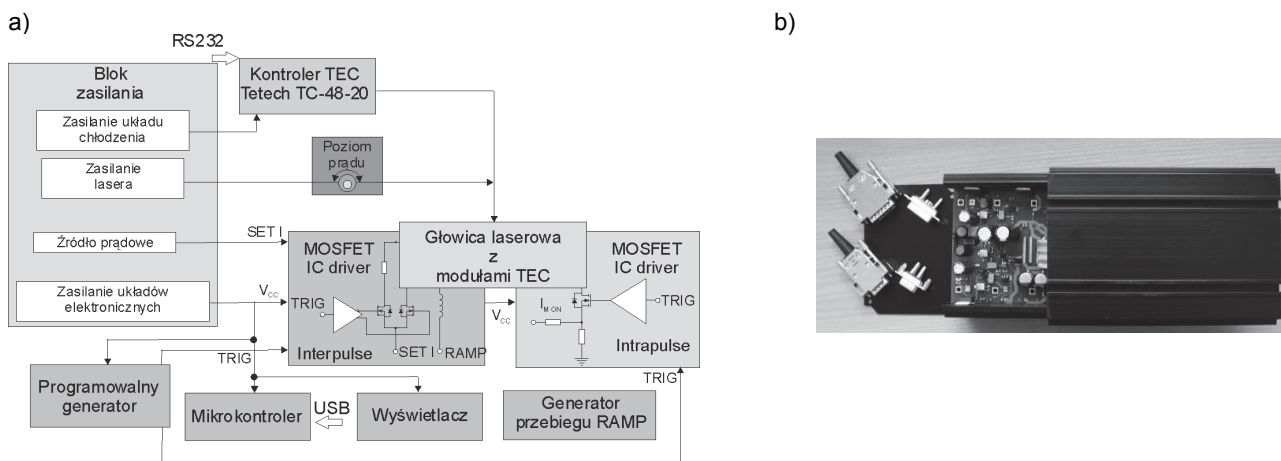
Moduł zasilania DC składa się z tranzystorowego źródła prądowego umożliwiającego płynną regulację wartości natężenia prądu wyjściowego w zakresie (0-500) mA.

Wypadkowe natężenie prądu płynącego przez laser jest sumą prądu wytwarzanego w module impulsowego sterownika i składowej DC otrzymanej z modułu zasilania.

Wszystkie moduły są sterowane za pomocą jednokładowego mikroprocesora. Umożliwia on regulację parametrów wewnętrznego generatora, oraz transmisję i wymianę danych z komputerem poprzez interfejs USB. Możliwa jest także obsługa sterownika z panelu użytkownika. Schemat blokowy i fotografię układu przeznaczonego do sterowania laserami QC przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Schemat blokowy (a) oraz fotografia laboratoryjnego układu do sterowania i zasilania laserów QC (b)



Rys.2. Schemat blokowy (a) oraz fotografia sterownika kompaktowego (b)

Kompaktowy układ sterowania do laserów QC

Parametry laserów kaskadowych istotnie zależą od temperatury pracy. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: widmo i moc promieniowania, sprawność różniczkową, prąd progowy oraz charakterystykę prądowo-napięciową. Zmiana wartości temperatury lasera może być wywołana przez zmianę punktu pracy chłodziarki termoelektrycznej, amplitudy impulsu sterującego oraz współczynnika wypełnienia ciągu impulsów sterujących.

W wypadku zastosowań spektroskopowych niezwykle ważna jest możliwość precyzyjnego kontrolowanego przestrajania długości fali promieniowania laserów QC. Właściwość ta jest wykorzystywana do precyzyjnego dopasowania długości fali lasera QC do linii absorpcyjnej badanego gazu. Realizuje się to na przykład przez zmianę punktu pracy chłodziarki TEC. Możliwość ta znajduje również zastosowanie w układach spektroskopii z modulacją długości fali do badania widm absorpcyjnych związków chemicznych. Wówczas stosuje się metody

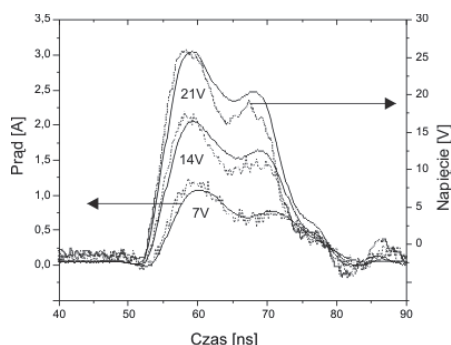
przestrajania *MI* lub *WI*. Przykładowo, w technice *WI* laser pobudzany jest prostokątnymi impulsami prądowymi o amplitudzie kilku amperów i czasie trwania od 100 ns do 1 μs. W trakcie trwania impulsu obserwuje się zmianę długości fali. Natomiast w technice *MI* laser zasilany jest przebiegiem prądowym powstałym w wyniku nałożenia około 1000 bardzo krótkich impulsów szpilkowych (rzędu 25 ns) na piłokształtny przebieg prądowy, którego czas trwania wynosi około 10 ms. Wartość piłokształtnego prądu zasilającego laser jest poniżej progu generacji, zatem powoduje on jedynie stopniowe podgrzewanie lasera. W wyniku zsumowania impulsów szpilkowych z przebiegiem piłokształtnym otrzymuje się wartość chwilową prądu powyżej progu generacji. Zatem każdy impuls szpilkowy powoduje wyzwolenie lasera. W rezultacie laser generuje promieniowanie, którego długość fali jest przestrajana w momentach czasowych odpowiadających pojawieniu się impulsów szpilkowych. Przykładowo dla laserów emitujących promieniowanie o długości fali 5,2 μm

i 14,4 μm , współczynniki przestrajania wynoszą odpowiednio 0,5 nm/K oraz 1,1 nm/K.

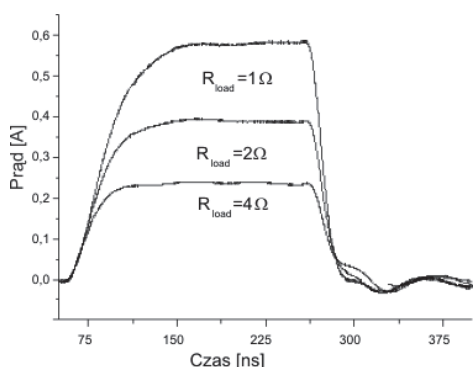
Na potrzeby wymienionych technik spektroskopowych opracowany został sterownik, którego schemat blokowy i fotografię przedstawiono na rysunku 2. Do pobudzenia lasera w technice *WI* zastosowano Sterownik *PULSE*. Z zewnętrznego generatora podane zostają impulsy sterujące TTL na wejście *PULSE*. Za pomocą klasycznego sterownika tranzystorów MOSFET realizuje się sterowanie kluczem tranzystorowym. Podanie stanu wysokiego impulsu sterującego powoduje włączenie tranzystora. Czas przepływu prądu przez laser jest równy czasowi trwania impulsu. Do pobudzenia lasera w technice *MI* zastosowano dwa układy. Impulsy szpilkowe są podane na wejście Sterownika *PULSE*, natomiast impuls piłkkształtny na wejście Sterownika *RAMP*. Sterownik ten jest klasycznym źródłem prądowym sterowanym napięciem. O czasie trwania i amplitudzie prądu podgrzewającego laser decydują parametry sygnału wejściowego *RAMP*. Pomiar natężenia prądu lasera polega na pomiarze spadku napięcia na rezystorze monitorującym $R = 1 \Omega$.

Badania opracowanych sterowników

Badania sterownika przeprowadzono przy zastosowaniu bezindukcyjnych rezystorów serii Caddock MP930-x-1%. Wyjściowy sygnał prądowy sterownika był mierzony przy użyciu sondy prądowej firmy Tektronix model CT-2. Mierzono również napięcie na wyjściu sterownika za pomocą dwóch sond napięciowych (tzw. pomiar różnicowy).



Rys.3. Oscylogram napięcia (linia przerywana) i prądu (linia ciągła) na rezystorze obciążenia 8Ω dla różnych wartości amplitudy sygnału sterującego



Rys.4. Przebiegi prądowe dla różnych wartości rezystancji obciążenia

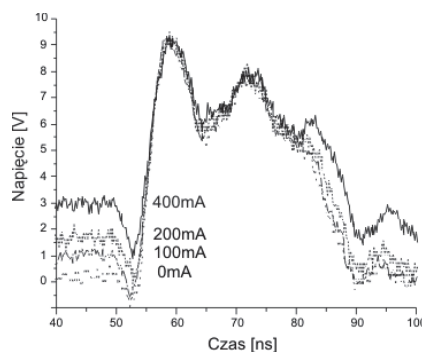
W wypadku pomiaru parametrów czasowych impulsów okazało się, że minimalny czas ich trwania wyniósł 20 ns. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe impulsów prądowych i napięciowych. Badania wykazały, że sterownik może generować impulsy o czasie trwania dłuższym niż 10 μs , ze współczynnikiem wypełnienia do 70%. Niestety, zarejestrowane sygnały posiadają oscylacje, które w głównej mierze są

spowodowane impedancją obciążenia (rezystor oraz jego połączenie ze sterownikiem).

Na rysunku 4 przedstawiono oscylogramy prądów, które zostały zmierzone przy użyciu sondy prądowej, dla różnych wartości rezystancji obciążenia.

Przeprowadzone badania wykazały, że charakter zmian prądu wyjściowego w funkcji napięcia zasilania oraz rezystancji obciążenia jest liniowy.

Sprawdzono także możliwości regulacji składowej stałej prądu. Otrzymane wyniki wykazały możliwość regulacji natężenia składowej stałej prądu w zakresie 0-400 mA (rys. 5).



Rys.5. Kształt impulsów prądowych ze składową stałą zmierzony sondą CT-2

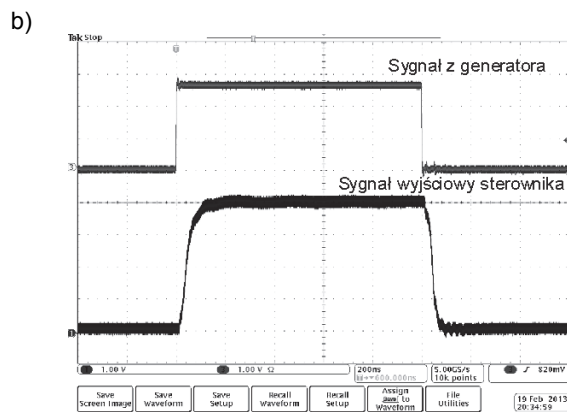
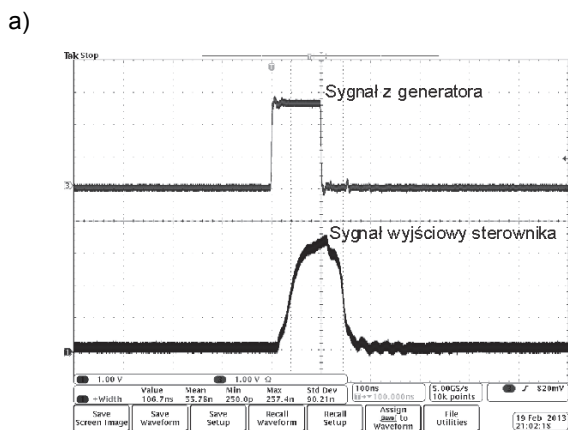
Badania wstępne układu podyktowane były potrzebą określenia parametrów granicznych sygnałów dedykowanych do techniki *WI* oraz *MI*. Impulsy sterujące (*PULSE* oraz *RAMP*) wytwarzano przy użyciu generatora firmy Tektronix model AFG3252. Badania przeprowadzono pod kątem możliwości zastosowania laserów QC opracowanych w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie. Zatem przyjęto rezystancję obciążenia równą 4Ω , zbliżoną do rezystancji lasera w przewidywanym punkcie pracy.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe oscylogramy sygnałów dla techniki *WI*. Z przeprowadzonych badań wynika, że opracowany sterownik umożliwia generację impulsów o amplitudzie do 4 A i o czasie trwania od 100 ns do 1 μs .

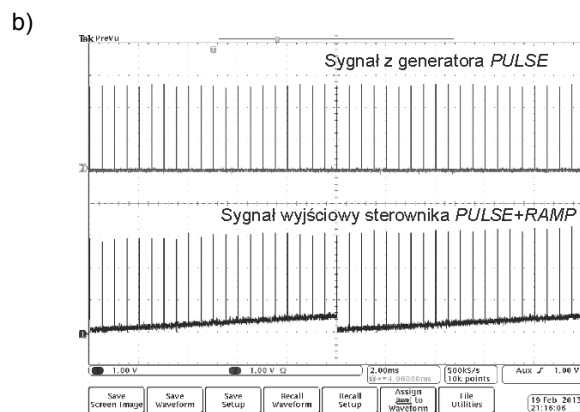
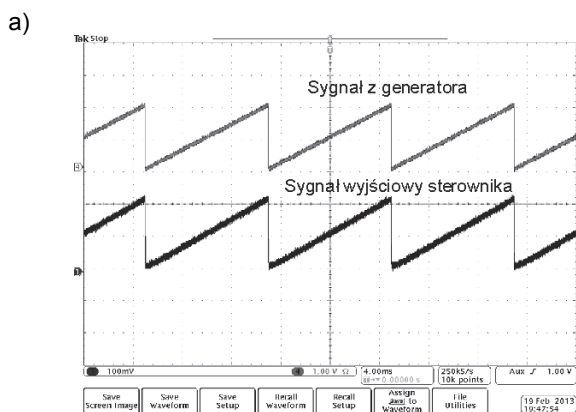
Badania weryfikujące przeprowadzono również dla techniki międzyimpulsowej przy założonym czasie trwania sygnału piłkkształtnego *RAMP* – 10 ms oraz impulsu *PULSE* – 25 ns. Na rysunku 7 przedstawiono otrzymane przebiegi. W trakcie pomiarów stwierdzono, że sterownik dokładnie odwzorował kształt sygnału piłkkształtnego *RAMP*.

Podsumowanie

W artykule omówiono dwa układy przeznaczone do sterowania kwantowych laserów kaskadowych. Ich konstrukcja i cechy funkcjonalne były optymalizowane pod kątem zastosowania w spektroskopii strat we wnęce optycznej oraz spektroskopii wieloprzejściowej. Do głównych zalet tych sterowników należy zaliczyć możliwość regulacji i stabilizacji punktu pracy laserów QC za pomocą zmiany amplitudy prądowego sygnału sterującego w szerokim przedziale wartości częstotliwości i współczynnika wypełnienia, oraz za pomocą zmiany temperatury głowicy laserowej. Na podstawie powyższych analiz opracowano również dedykowany sterownik umożliwiający wewnątrzimpulsowe i międzyimpulsowe przestrajanie długości fali laserów QC. W kolejnym etapie prac planuje się przeprowadzenie badań możliwości zastosowania krajowych laserów kaskadowych w spektroskopii z zakresu średniej podczerwieni.



Rys.6. Przykładowe przebiegi sygnałów dla techniki wewnątrzimpulsowej (WI): $t_i = 100$ ns (a) oraz $t_i = 1$ μ s (b)



Rys.7. Kształt sygnałów w technice międzyimpulsowej: RAMP (a) oraz RAMP+PULSE (b)

Wyniki badań osiągnięto w ramach prowadzonych projektów badawczych nr O N515 216839, O N515 217039 oraz projektów SENSORMED ID: 79900 i EDEN ID: 179616 finansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

[1] Kosterev A., et al., Application of quantum cascade lasers to trace gas analysis", *Applied Physics B*, 90/2 (2008), 165-176
 [2] Sigrist, M.W., et al., Trace gas monitoring with infrared laser-based detection schemes, *Applied Physics B*, 90/2(2008), 289-300
 [3] Pierściński K., et al., Investigation of thermal properties of mid-infrared AlGaAs/GaAs quantum cascade lasers, *J. Appl. Phys.*, 112 (2012) <http://dx.doi.org/10.1063/1.4746791>, 2012
 [4] Tittel F.K., et al., Mid-Infrared Laser Applications in Spectroscopy, *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources, Topics Appl. Phys.*89(2003), 445-516

[5] Wojtas J., et al., Ultrasensitive laser spectroscopy for breath analysis, *Opto-Electronics Review*, 20/1 (2012), 26-39
 [6] Szabra D., et al., Quantum cascade lasers driver for intra and interpulse spectroscopic techniques, *IOS 2013 – Sensors, Sensing Structures and Method*, materiały konferencyjne.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Zbigniew Bielecki, *Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: zbielecki@wat.edu.pl*; dr inż. Dariusz Szabra, *E-mail: dszabra@wat.edu.pl*; dr inż. Mirosław Nowakowski, *E-mail: mnowakowski@wat.edu.pl*; dr inż. Janusz Mikołajczyk, *E-mail: jmikołajczyk@wat.edu.pl*; dr inż. Jacek Wojtas, *E-mail: jwojtas@wat.edu.pl*.