

Janusz MIKOŁAJCZYK, Jacek WOJTAS, Artur PROKOPIUK, Helena KRZYŚIAK, Zbigniew BIELECKI
 WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA,
 ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 WARSZAWA

Zautomatyzowany system do pomiaru parametrów energetycznych kwantowych laserów kaskadowych

Pplk dr inż. Janusz MIKOŁAJCZYK

Jest absolwentem Wydziału Elektroniki WAT, specjalność urządzenia optoelektroniczne. Od 2003r. pracuje w Zakładzie Systemów Optoelektronicznych Instytutu Optoelektroniki WAT. Prowadzi prace naukowe z zakresu zaawansowanych metod detekcji sygnałów optycznych i ich zastosowania m.in. w ochronie obiektów, telekomunikacji, do wykrywania obiektów, detekcji materiałów wybuchowych i skażeń, diagnostyce źródeł i detektorów promieniowania optycznego.



e-mail: jmikolajczyk@wat.edu.pl

Mjr dr inż. Jacek WOJTAS

Jest specjalistą w dziedzinie detekcji sygnałów optycznych, metrologii optoelektronicznej, optoelektronicznych sensorów niebezpiecznych gazów i materiałów wybuchowych. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w specjalności systemy łączności na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2002 roku. W 2007 r. obronił rozprawę doktorską, która była podsumowaniem dorobku naukowego w zakresie detekcji śladowych stężeń gazów metodami optoelektronicznymi oraz zaawansowanych metod detekcji sygnałów optycznych.



e-mail: jwojtas@wat.edu.pl

Mjr mgr inż. Artur PROKOPIUK

Jest absolwentem Wydziału Elektroniki WAT, specjalność urządzenia optoelektroniczne. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w roku 1998, działalność naukową rozpoczął w Instytucie Optoelektroniki WAT na stanowisku asystenta. W ramach pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi nanotechnologii, wykorzystaniem funkcjonalnych cienkich warstw dla potrzeb techniki i medycyny oraz hybrydowym osadzaniem powłok metodami laserowymi, rozpylania magnetronowego oraz chemicznego osadzania z fazy gazowej.



e-mail: aprokopiuk@wat.edu.pl

Helena KRZYŚIAK

Absolwentka V Liceum Ogólnokształcącego w Bielsku-Białej. Od 2010 roku studiuje na Wydziale Mechatroniki i Lotnictwa WAT specjalizacja: Automatyka i Sterowanie. Od 2012r. aktywnie działa w ramach Koła Naukowego Optoelektroników WAT.



e-mail: krzyśiakh@gmail.com

Prof. dr hab. inż. Zbigniew BIELECKI

Kierownik Zespołu Detekcji Sygnałów Optycznych w IOE WAT. Ekspert w dziedzinie detekcji sygnałów optycznych, metrologii optoelektronicznej, oraz sensorów optoelektronicznych. Autor i współautor czterech monografii oraz około 300 artykułów i opracowań konferencyjnych. Członek Polskiego Komitetu Optoelektroniki, Polskiego Towarzystwa Fotonicznego, Komitetu Metrologii Aparatury Pomiarowej PAN a także komitetów naukowych kilkunastu konferencji krajowych i międzynarodowych.



e-mail: zbielecki@wat.edu.pl

a temperature controller with laser housing, an optical power meter and a detection module (Fig. 4). Important features of the system are the implemented procedures for pulse shape acquisition and determination of the main performance of QC lasers. There are also listed the main requirements for both ranges and methodologies of the measured signals. Using a resistor and a laser diode (650 nm), preliminary studies were performed to verify operation of the measuring system (Figs. 5 and 6). In the main part of the paper the measurements results of the QC laser sample produced by Alpes Lasers SA are presented (Fig. 7). In the conclusions a brief description of the system performances and directions for its further development are given.

Keywords: quantum cascade lasers, metrology, optoelectronics.

Streszczenie

W pracy omówiono system pomiarowy, który jest przeznaczony do badań kwantowych laserów kaskadowych. Lasery te stanowią kolejny etap w rozwoju technik optoelektronicznych związanych np. ze spektroskopią lub łącznością optyczną w otwartej przestrzeni. Istotnymi elementami pracy są zaimplementowane procedury wyznaczenia parametrów laserów np. sprawności czy temperatur charakterystycznych. W części eksperymentalnej przedstawiono wyniki badań przykładowego lasera firmy Alpes Lasers S.A.

Słowa kluczowe: kwantowe lasery kaskadowe, metrologia, optoelektronika.

Automated system for measuring Quantum Cascade Laser parameters

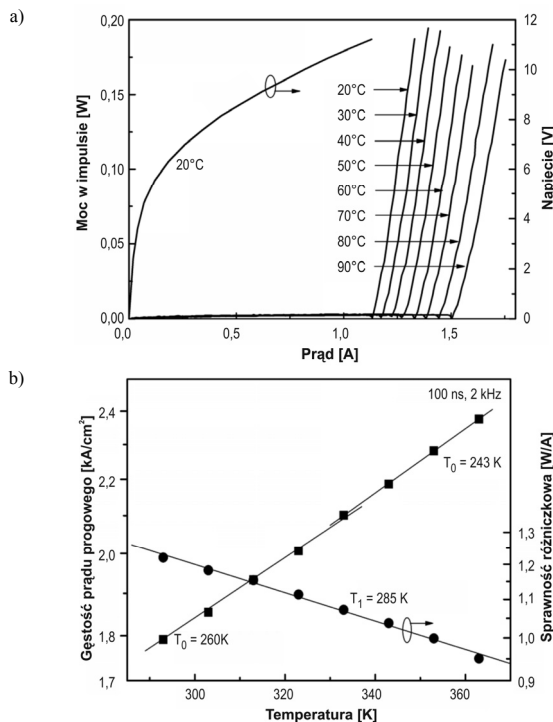
Abstract

Quantum cascade lasers (QC lasers) are very promising radiation sources in some optoelectronic techniques operating at the infrared and THz spectra. The lasers can be applied in many science areas and life fields e.g. spectroscopy or free-space optical communications. Progress in QC lasers technology contributes to the continuous improvement of their performances. But this developing process also requires the testing of each laser structure. One of the most important research tasks was to measure temperature characteristics of the light-current-voltage and to determine the threshold current, the slope efficiency or characteristic temperatures. The paper presents a measurement system for investigating some QC laser parameters using specialized equipment such as: a precision current driver,

1. Wprowadzenie

Lasery QCL (ang. *Quantum Cascade Lasers*) z zakresu średniej i dalekiej podczerwieni stanowią istotny element w rozwoju najnowszych technik spektroskopii oraz systemów łączności w otwartej przestrzeni [1-5]. W tym obszarze widmowym znajdują się absorpcyjne linie rotacyjno-wibracyjne bardzo wielu molekuł, dzięki czemu możliwe jest wykrywanie śladowych ilości substancji. Ponadto, promieniowanie w zakresie 10 μm charakteryzuje się mniejszą tłumiennością spowodowaną atmosferą, szczególnie w warunkach zamglenia. Uzyskuje się zatem większe zasięgi łączności optycznych. Brak odpowiednich źródeł promieniowania stanowił przez długi czas istotne ograniczenie rozwoju tych technologii. Dopiero odkrycie w 1994r. kwantowych laserów kaskadowych QCL spowodowało gwałtowne zainteresowanie spektroskopią molekuł i łącznością optyczną w zakresie podczerwieni [6]. Lasery te emitują promieniowanie w szerokim zakresie widmowym, tj. od 3 μm do ponad 24 μm . Stanowią one nową klasę unipolarnych laserów półprzewodnikowych, których działanie oparte jest na przejściach wewnątrzprzasmowych. W odróżnieniu od klasycznych laserów półprzewodnikowych, wykorzystujących przejścia międzypasmowe, długość fali emitowanego przez nie promieniowania praktycznie nie zależy od materiału, z którego są wykonane a jedynie od geometrii ich studni kwantowych. Umożliwiają zatem emisję promieniowania z zakresu od bliskiej, poprzez średnią, do dalekiej podczerwieni, przy wykorzystaniu

struktur opracowanych na bazie GaAs i InP. Struktury te składają się z kilkudziesięciu emitujących pojedynczych warstw charakteryzujących się małą wydajnością generacji promieniowania. Dlatego też do ich zasilania niezbędne jest zastosowanie dużych wartości prądów i napięć [7]. Powoduje to wytworzenie dużej ilości ciepła, zatem konieczne jest zastosowanie impulsów sterujących o krótkich czasach trwania oraz o małym współczynniku wypełnienia. Ponadto, impulsy sterujące powinny charakteryzować się stabilną amplitudą oraz nie powinny wprowadzać szumów. Zatem do zasilania laserów QC należy stosować wydajne układy regulacji i stabilizacji temperatury. Zmiana temperatury struktury lasera powoduje zmianę jego parametrów, np. kształtu charakterystyki prądowo-napięciowej (wartości prądu progowego, sprawności różniczkowej) oraz kształtu charakterystyki widmowej promieniowania [8]. Sprawność różniczkowa jest definiowana jako stosunek przyrostu mocy promieniowania do wywołującej ją zmiany prądu. Przy wstępnej ocenie parametrów danego lasera rozpatrywane są zatem charakterystyki temperaturowe mocy promieniowania i napięcia od prądu zasilania (ang. *Light-Current-Voltage, L-I-V*) oraz charakterystyki zmian prądu progowego i sprawności (rys. 1). Na ich podstawie wyznaczone są tzw. temperatury charakterystyczne, oznaczane jako T_0 oraz T_1 .



Rys. 1. Charakterystyki temperaturowe L-I-V: mocy promieniowania i napięcia od wartości prądu zasilania lasera (a) oraz gęstości prądu progowego i sprawności różniczkowej od temperatury (b) [7]

Fig. 1. L-I-V curves: for different heat sink temperature (a), J_{th} and the slope efficiency as a function of T (b) [7]

Temperatura charakterystyczna T_0 jest powiązana z gęstością prądu progowego następującą zależnością:

$$J_{th}(T_{in} + \Delta T) = J_{th}(T_{in}) \exp(\Delta T / T_0), \quad (1)$$

gdzie $T_{in} + \Delta T$ jest temperaturą radiatora lasera, T_{in} – temperaturą początkową, ΔT – przyrostem temperatury.

Zależność opisująca związek między sprawnością różniczkową η_S a temperaturą charakterystyczną T_1 przyjmuje postać:

$$\eta_S(T_{in} + \Delta T) = \eta_S(T_{in}) \exp(-\Delta T / T_1). \quad (2)$$

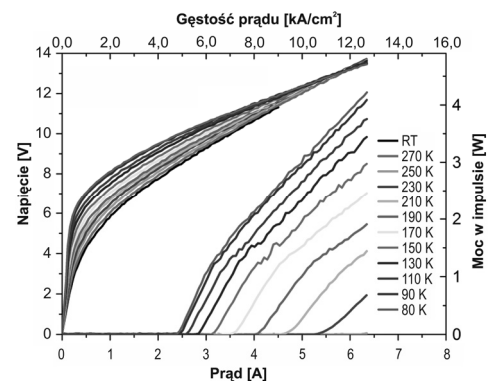
Opracowanie laserów kaskadowych w Instytucie Technologii Elektronowej w Warszawie spowodowało konieczność podjęcia

prac dotyczących ich charakteryzacji oraz opracowania układów zasilania, sterowania i chłodzenia [9]. Istotnym etapem ich projektowania jest prowadzenie wiarygodnej charakteryzacji każdej wytworzonej struktury laserowej. Wymaga to przeprowadzenia wielu pomiarów w powtarzalnych warunkach. Dlatego też, zdecydowano się na opracowanie w pełni zautomatyzowanego stanowiska laboratoryjnego stanowiącego efektywne narzędzie diagnostyczne do badań kwantowych laserów kaskadowych.

2. Opis stanowiska

Opracowanie stanowiska pomiarowego wymagało przygotowania procedury pomiarowej oraz doboru odpowiednich urządzeń. Zasadniczym etapem tych analiz było przyjęcie wstępnych założeń dotyczących zakresu mierzonych i regulowanych parametrów. Były one ściśle związane z parametrami laserów wytwarzanych w Instytucie Techniki Elektronowej.

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę temperaturową przykładowej struktury laserowej.



Rys. 2. Charakterystyka temperaturowa przykładowego lasera QC [10]
Fig. 2. Light-current-voltage (L-I-V) characteristics of the QC laser in the temperature range from 77K to RT

Zakładając, że badania będą dotyczyły tzw. temperatur pokojowych pracy laserów i uzyskiwanych za pomocą chłodziarek termoelektrycznych, założono przedstawione w tabeli 1 zakresy mierzonych parametrów.

Tab. 1. Zakresy mierzonych parametrów lasera QC

Tab. 1. Ranges of the measured parameters of the investigated QC lasers

Amplituda impulsu prądowego [A]	Amplituda napięcia [V]	Czas trwania impulsu [μ s]	Częstotliwość impulsów [kHz]	Moc TEC [W]
0-10	0-20	0,050-10	0,01-100	80

Druga grupa założeń związana była z wymaganiami funkcjonalnymi stanowiska pomiarowego. Założono, że zapewni ono prosty montaż badanych laserów, przeprowadzenie zautomatyzowanego pomiaru charakterystyki temperaturowej zależności mocy promieniowania i napięcia w funkcji prądu lasera dla zadanego kroku zmian jego temperatury pracy oraz prądu sterowania. Dodatkowo, system pomiarowy powinien umożliwiać archiwizowanie uzyskiwanych danych i wyznaczanie wartości parametrów T_0 i T_1 .

Na podstawie powyższych założeń przeprowadzono procedurę doboru elementów składowych stanowiska. Do montażu badanych laserów QC zastosowano zmodyfikowaną konstrukcję głowicy laserowej firmy ILX (Newport) model LDM-4872. Modyfikacja głowicy polegała na wymianie zamontowanej w niej chłodziarki termoelektrycznej o mocy cieplnej 10 W na moduł TEC o mocy 80 W. Do sterowania pracą lasera zastosowano impulsowy sterownik prądu. Ze względu na przyjęty szeroki zakres prądów zasilania lasera, wymiennie stosowano dwa urządzenia. W przypadku impulsów prądowych o amplitudzie powyżej 4 A zastosowano sterownik firmy IXYS model PCX7420. Zapewniał on m.in. regulację amplitudy prądu do wartości 15,8 A, częstotliwości

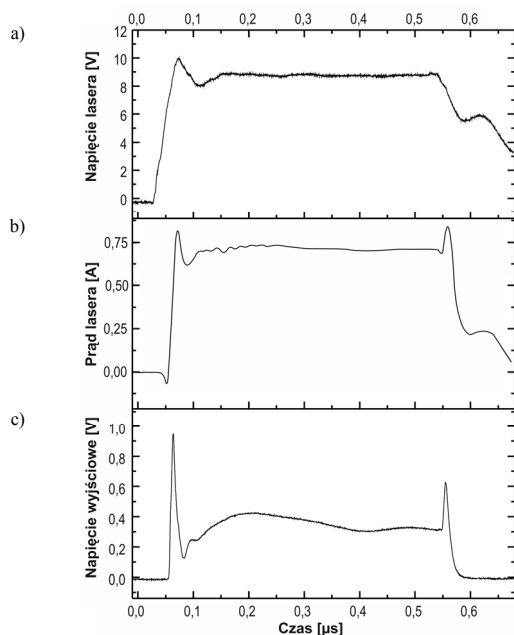
impulsów do 100 kHz i ich czasu trwania od 50 ns do 500 ms. Jest on wyposażony w wyjście monitorujące wartość prądu wyjściowego (I_{MON}), wyjście sygnału synchronizacji (TTL) oraz interfejsy danych (RS232, USB, Ethernet). Do sterowania impulsami prądowymi poniżej 4 A był natomiast użyty sterownik LDX-3232 firmy ILX Lighthwave (Newport). Wymagał on jednak zastosowania zewnętrznego generatora impulsów HAMEG 8150. W układzie tym, amplituda impulsów generowanych przez laser jest uzależniona bezpośrednio od amplitudy impulsów wytwarzanych w generatorze.

Do pomiaru temperatury pracy lasera zastosowano przyrząd firmy Arroyo model 5310. Urządzenie to umożliwia także zasilanie modułów Peltier o mocy 120 W z uwzględnieniem opcji ustawień parametrów PID.

Do wyznaczenia mocy promieniowania laserowego zastosowano dwa układy pomiarowe: miernik mocy firmy Standa model Solo 2 oraz wysokoczuły moduł detekcyjny z detektorem HgCdTe firmy Vigo System S.A. Wybór układu był ściśle uzależniony od wartości mocy mierzonego promieniowania.

Istotnym zagadnieniem pomiarowym było wyznaczenie napięcia na strukturze laserowej oraz mocy promieniowania laserowego. Napięcie to było mierzone różnicowo przy zastosowaniu dwóch sond napięciowych podłączonych bezpośrednio do obwodu zasilania lasera. Sygnały napięciowe były rejestrowane, a następnie poddane wstępnemu przetwarzaniu za pomocą oscyloskopu firmy Tektronix model DPO4104.

Aby można było zdefiniować metodologię wyznaczania parametrów laserów QC należało przeanalizować kształt ich sygnałów. Na rysunku 3 przedstawiono zarejestrowane oscylogramy przebiegu prądowego i napięciowego lasera oraz napięcia wyjściowego modułu detekcyjnego dla przykładowo badanego lasera firmy Alpes Lasers.

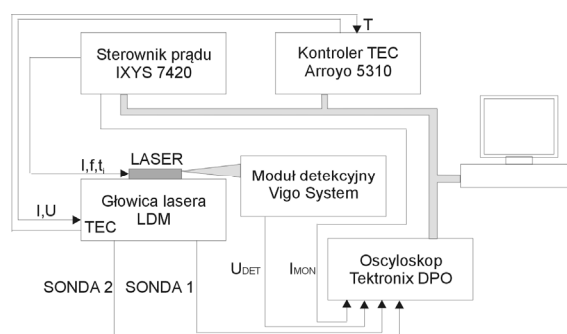


Rys. 3. Przebiegi czasowe sygnałów lasera QC: napięcia (a), prądu (b) oraz napięcia wyjściowego modułu detekcyjnego (c)

Fig. 3. QC laser signals: voltage (a), current (b) and detection unit output voltage (c)

Kształty przebiegów zależą m.in. od parametrów sond napięciowych, konstrukcji lasera, dynamicznych zmian jego impedancji w czasie trwania impulsu oraz od sposobu połączenia lasera ze sterownikiem prądu. Dlatego też, w czasie pomiarów prądu i napięcia lasera zdecydowano się na określenie ich wartości średniej w ściśle określonym przedziale czasu, tj. poza obszarem zakłóceń. Na podstawie oscylogramów wyznaczono moc szczytową. Następnie obliczone wartości mocy odniesiono do współczynnika wypełnienia impulsów prądowych sterownika. W ten

sposób zminimalizowano wpływ zmian kształtu impulsów laserowych dla różnych warunków jego pracy. Bardzo często zjawisko to jest ignorowane, i może prowadzić do dużych rozbieżności wyników pomiarów. W celu zautomatyzowania procedury pomiarowej, przyrządy zostały połączone w jeden system pomiarowy, który został oprogramowany w środowisku LabVIEW. W aplikacji pomiarowej zaimplementowano procedurę wykreślenia charakterystyk temperaturowych mocy promieniowania - prąd - napięcie, wyznaczenia wartości prądów progowych oraz sprawności różniczkowej. Na ich podstawie obliczane są wartości temperatur charakterystycznych T_0 oraz T_1 . Uproszczony schemat blokowy stanowiska przeznaczonego do pomiaru parametrów laserów QC przedstawiono na rys. 4.

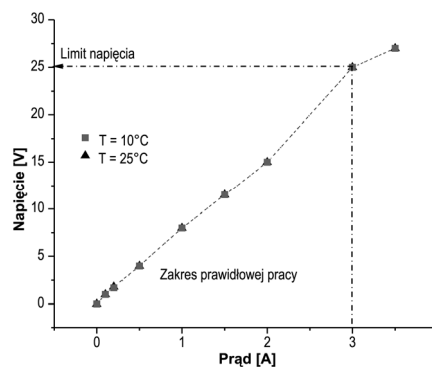


Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy stanowiska do pomiaru parametrów laserów QC

Fig. 4. Simplified block diagram of the laboratory setup for QCL investigations

3. Badania wstępne stanowiska pomiarowego

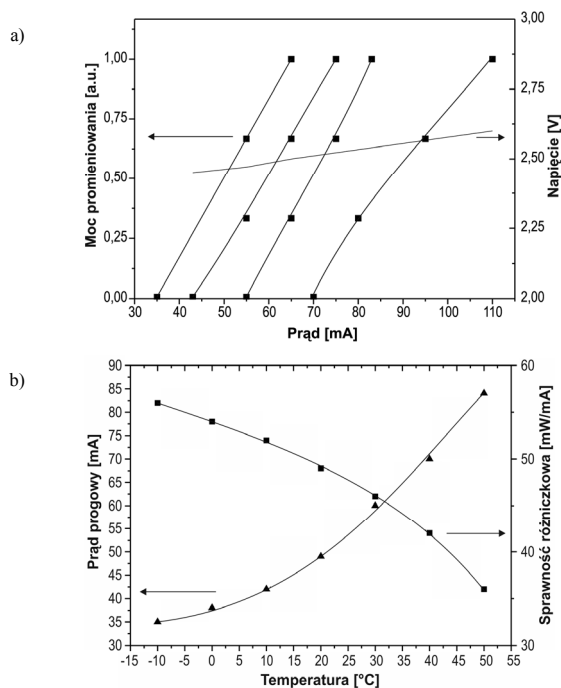
W badaniach wstępnych zamiast lasera QC zastosowano niskomomowy (8Ω), bezindukcyjny rezystor. Umieszczono go w głowicy laserowej LDM – 4872 w miejscu montażu lasera QC. Na rysunku 5 przedstawiono zmierzoną charakterystykę prądowo-napięciową rezystora. Pomiary wykonano dla $T=10^\circ\text{C}$ i $T=25^\circ\text{C}$. Otrzymane wyniki potwierdziły, że w tym zakresie pomiarowym zmiana temperatury nie wpływa na wartość rezystancji tego elementu. Właściwość ta jest również podana przez producenta. W trakcie pomiarów zauważono, że sposób montażu elementu badanego ma duży wpływ na kształt rejestrowanych przebiegów oraz na graniczną wartość napięcia wyjściowego sterownika PCX7420.



Rys. 5. Charakterystyka prądowo-napięciowa rezystora dla temperatur 10°C i 25°C
Fig. 5. The current-voltage characteristic of the resistor for temperature of 10°C and 25°C

W drugim etapie badań w miejsce rezystora włączono diodę laserową ($\lambda=650 \text{ nm}$) oraz moduł detekcyjny firmy Newport. Zmierzone charakterystyki przedstawiono na rys. 6. Na ich podstawie wyznaczono zależność prądu progowego i sprawności różniczkowej od temperatury pracy lasera (rys. 6). Ich kształt jest zgodny z danymi producenta. Dzięki zastosowaniu zaimplementowanej

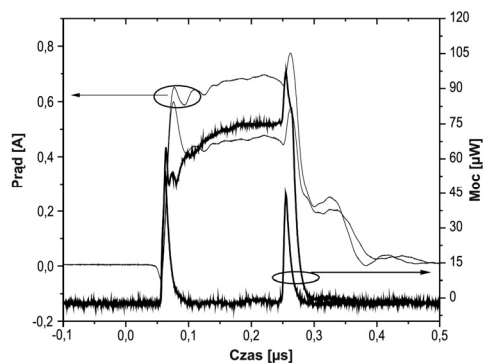
w systemie procedurze, wyznaczono również wartości temperatur charakterystycznych T_0 oraz T_I . Wyniosły one odpowiednio 68 °C oraz 135 °C.



Rys. 6. Charakterystyki temperaturowe L-I-V (a) oraz zależność prądu progowego i sprawności różniczkowej od temperatury (b) dla badanej diody laserowej
Fig. 6. L-I-V characteristics (a) as well as dependencies of threshold current and slope efficiency on temperature (b) for the investigated laser diode

4. Badanie lasera QC

Główny etap badań eksperymentalnych dotyczył wyznaczenia podstawowych charakterystyk pracy lasera QC firmy Alpes Lasers. Badania przeprowadzono na zaprojektowanym stanowisku dla następujących warunków pomiarowych: częstotliwość impulsów 10 kHz, czas trwania impulsu 0,2 μ s, zakres temperatur od 0°C do 15°C z krokiem co 5°C oraz zakres amplitudy impulsów prądowych od 0 do 800 mA. Parametry te były ściśle zdefiniowane przez producenta lasera jako tzw. zakres bezpiecznej pracy. Pełny cykl pomiarowy trwał około 9 minut. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe kształty zarejestrowanych sygnałów.

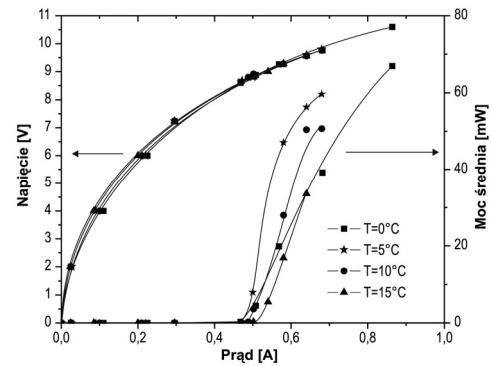


Rys. 7. Kształt impulsu prądowego i mocy promieniowania laserowego
Fig. 7. The recorded pulses of laser current and optical radiation

Na ich podstawie wyznaczone zostały charakterystyki temperaturowe napięcia i mocy średniej impulsów promieniowania w zależności od amplitudy impulsów prądowych (rys. 8).

Uzyskane dane są zbieżne z wartościami podawanymi przez producenta. Zauważalny jest znaczny wpływ temperatury na parametry lasera, chociaż dla pewnych warunków jest on nie-

zgodny z ogólnie przyjętymi zależnościami (przypadek dla $T=0^{\circ}\text{C}$). Fakt ten wynika z konstrukcji lasera QC.



Rys. 8. Zależność napięcia i mocy średniej promieniowania od prądu dla różnych temperatur pracy badanego lasera QC
Fig. 8. L-I-V characteristics of the QC laser for different operation temperatures

5. Wnioski

W pracy przedstawiono stanowisko przeznaczone do testowania laserów QC. Przeprowadzone badania wykazały, że może ono stanowić istotne narzędzie diagnostyki struktur laserowych, zwłaszcza na etapie ich opracowywania. Umożliwia ono pomiary charakterystyk temperaturowych mocy promieniowania i napięcia lasera w zależności od wartości prądu sterującego oraz kształtu sygnałów. Procedura pomiarowa jest w pełni zautomatyzowana, dzięki czemu można ją zastosować do badań większej liczby elementów. Zapewnia ona jednocześnie powtarzalność wyników pomiaru. Obecnie prowadzone są prace nad udoskonaleniem tego stanowiska. Umożliwi ono również pomiary widma promieniowania laserowego.

Wyniki badań osiągnięto w ramach prowadzonych projektów badawczych No. 179900 oraz O N515 216839, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowe Centrum Rozwoju i Badań.

6. Literatura

- [1] Wysocki G., Lewicki R., i in.: Widely tunable mode-hop free external cavity quantum cascade lasers for high resolution spectroscopy and chemical sensing, *Appl. Phys. B*, 1-7, 2008.
- [2] Tittel F. K., Bakhirkin Y., i in.: Recent Advances and Applications of Mid-Infrared based Trace Gas Sensor Technology, *Proc. of SPIE vol. 6900, 69000Z*, 2008.
- [3] Ebrahim-Zadeh M., Sorokina I.T.: *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications* 467–493. Springer, 2007.
- [4] Bielecki Z., Kolosowski W., Mikołajczyk J.: Free-space optical data link using quantum cascade laser 108–111, *PIERS*, 2008.
- [5] Blaser S., Hofstetter D., Beck M., Faist J.: Free-space optical data link using Peltier cooled quantum cascade laser, *Electronics Letters* 778–780, No. 12, 2001.
- [6] Faist J., i in.: Quantum cascade laser, *Science* 264, 553, 1994.
- [7] Zhang Y.G., Nan K.J., Li A.Z.: Characterization of InAlAs/InGaAs/InP mid-infrared quantum cascade lasers, *Spectrochimica Acta Part A* 58 2323–2328, 2002.
- [8] Razeghi M., Slivken S., i in.: High power 3–12 μ m infrared lasers: recent improvements and future trends, *Physica E* 11 233–239, 2001.
- [9] Kosiel K., Bugajski M., i in.: 177 K operation of AlGaAs/GaAs quantum cascade laser at 9 μ m, *Photonics Letters of Poland*, vol. 1 (1) 16–18, 2009.
- [10] Pierściński K., Pierścińska D., Iwińska M., Kosiel K., Szerling A., i in.: Investigation of thermal properties of mid-infrared AlGaAs/GaAs quantum cascade lasers, *J. Appl. Phys.* 112, 043112, 2012.