



Korelacyjny pomiar gęstości widmowej mocy szumów detektorów fotonowych do spektroskopii absorpcyjnej

KRZYSZTOF ACHTENBERG, JANUSZ MIKOŁAJCZYK,
ZBIGNIEW BIELECKI, JACEK WOJTAS

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, krzysztof.achtenberg@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów gęstości widmowej napięcia szumów detektorów fotonowych o małych rezystancjach przy użyciu specjalnie opracowanego stanowiska pomiarowego. Badania tych detektorów mają duże znaczenie dla wielu aplikacji. Są one szczególnie istotne dla układów laserowej spektroskopii absorpcyjnej do wykrywania śladowych ilości gazów. Uzyskiwana w nich granica wykrywalności jest bezpośrednio związana nie tylko z szumami źródeł promieniowania i szumem tła, lecz także z szumami detektora oraz kolejnych stopni fotoodbiornika. Zastosowanie w opracowanym systemie specjalnie zaprojektowanych ultramałoszumowych torów pomiarowych (wzmacniacze o napięciu szumów $3,6 \times 10^{-19} \text{ V}^2/\text{Hz}$ dla $f > 1 \text{ kHz}$) oraz operacji korelacji sygnałów w czasie 10 minut umożliwiło uzyskanie szumu tła poniżej $10^{-18} \text{ V}^2/\text{Hz}$ dla $f > 10 \text{ Hz}$ oraz poniżej $10^{-19} \text{ V}^2/\text{Hz}$ dla $f > 1 \text{ kHz}$. Efektywność systemu zweryfikowano poprzez pomiary referencyjnych rezystorów, a następnie detektora z supersieci drugiego rodzaju (T2SL) wykonanego z InAs/InAsSb.

Słowa kluczowe: szумы, detektory IR, spektroskopia absorpcyjna w podczerwieni, detektory supersieciowe

DOI: 10.5604/01.3001.0015.3826

1. Wprowadzenie

Laserowa spektroskopia absorpcyjna (LAS - ang. *Laser Absorption Spectroscopy*) jest perspektywiczną metodą diagnostyczną zapewniającą dokładne, wysoko selektywne i szybkie pomiary stężeń gazów [1]. Jej granice wykrywalności są definiowane zarówno przez zastosowanie odpowiedniej metody, jak również parametry użytych elementów. W praktyce, aby ocenić próg czułości czujnika, należy wyznaczyć poziom szumów jego komponentów. Duży poziom szumów czujnika „przesłania” sygnał niosący informację, powodując ograniczenie jego czułości. W układach LAS szумы te pochodzą m.in. od lasera, fotodetektora, przetwornika analogowo-cyfrowego, elementów optycznych i otoczenia. Dlatego istotnym zagadnieniem staje się pomiar szumów, również ze względu na potrzebę badania zjawisk występujących w tych elementach. Badania te dają możliwość modyfikacji stosowanych technologii lub opracowania całkowicie nowych. Powyższe działania można zauważyć, analizując m.in. rozwój technologii detektorów fotonowych stosowanych w układach LAS pracujących w zakresie promieniowania podczerwonego (IR) [2]. Badania właściwości szumowych tych elementów najczęściej przeprowadza się, mierząc szum różowy (szum typu $1/f$), który dominuje w zakresie małych częstotliwości (do 10 kHz), oraz szum termiczny charakteryzujący się równomiernym rozkładem gęstości widmowej mocy szumu.

W pracy przedstawiono metodę korelacyjną służącą do pomiaru gęstości widmowej napięcia szumów detektorów IR o małych wartościach rezystancji (poniżej 100 Ω). Pomiary szumów tych detektorów są utrudnione ze względu na niski poziom szumów termicznych (poniżej 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$), który jest porównywalny, a nawet bardzo często znajduje się poniżej szumów własnych dostępnych przyrządów pomiarowych. Ograniczenia te występują nie tylko ze względu na małą wartość gęstości widmowej napięcia szumów termicznych, lecz także z powodu układów polaryzacji detektora wnoszących nieznaczny wzrost szumów $1/f$. Aby powyższe ograniczenia można było zminimalizować, zastosowany został dwukanałowy ultraniskoszumowy wzmacniacz oraz układ analizy sygnału realizujący metodę dwukanałowej korelacji krzyżowej. Redukcja szumów własnych wprowadzanych przez poszczególne elementy opracowanego systemu pomiarowego doprowadziła do zmniejszenia gęstości widmowej napięcia szumów do poziomu poniżej 300 pV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, dla częstotliwości rzędu kilkuset Hz. Osiągnięcie takiego wyniku jest możliwe dzięki zastosowaniu procedury korelacji sygnałów w czasie 10 minut. System pomiarowy został przetestowany z zastosowaniem rezystorów referencyjnych (10 Ω oraz 100 Ω typu drutowego), a następnie zastosowany do wyznaczenia charakterystyk szumowych detektora podczerwieni o małej rezystancji.

2. Istota problemu badawczego

2.1. Detektory stosowane w LAS

W układach spektroskopii absorpcyjnej stosunek mocy sygnału do mocy szumu (SNR – ang. *Signal to Noise Ratio*) stopnia wejściowego fotoodbiornika oraz układu przetwarzania sygnału jest kluczowym parametrem wpływającym na granicę wykrywalności czujnika. Promieniowanie optyczne po przejściu przez absorbujący gaz jest rejestrowane przy użyciu różnych typów detektorów. W zakresie ultrafioletu (UV), promieniowania widzialnego (VIS) i bliskiej podczerwieni (NIR) (od około 100 nm do 1,7 μm) najpopularniejsze są fotopowielacze (PMT). Charakteryzują się dużym wzmocnieniem, dużą szybkością działania i małym prądem ciemnym. W zakresie średniej podczerwieni (MWIR) są stosowane dwa rodzaje detektorów: termiczne i fotonowe. Mimo że detektory termiczne wykrywają promieniowanie podczerwone i ich czułość jest niezależna od długości fali, to jednak charakteryzują się długim czasem odpowiedzi oraz małą wykrywalnością. Dlatego też w laserowej spektroskopii absorpcyjnej w zakresie podczerwieni są stosowane detektory fotonowe o dużej czułości i wykrywalności oraz krótkich czasach odpowiedzi. Najpopularniejszymi detektorami fotonowymi stosowanymi w optoelektronicznych czujnikach gazów są fotodiody HgCdTe (MCT – ang. *Mercury Cadmium Telluride*). Charakteryzują się one dużą wykrywalnością (około $10^{12} \text{ cm} \cdot \sqrt{\text{Hz/W}}$) oraz szerokim pasmem sygnałowym ($\sim 1 \text{ GHz}$). W tabeli 1 zestawiono przykładowe limity detekcji uzyskane w czujnikach LAS.

TABELA 1

Zestawienie przykładowych limitów detekcji uzyskanych w czujnikach LAS

Gaz	Zakres widmowy	Limit detekcji	Detektor	Literatura
NH ₃	0,211-0,215 μm	40 ppm	MCP-PMT*	[3]
O ₃	0,283-0,310 μm	2 ppb	PMT	[4]
NO ₂	0,414 μm	1 ppb	PMT	[5]
CO ₂	2,05 μm	–	Sb – fototranzystor	[6]
CH ₄	3,3-3,4 μm	–	InAs – fotodioda	[7]
NH ₃	9,06 μm	50 ppb	MCT	[8]
NO	5,2629 μm	60 ppb	MCT	[9]
N ₂ O	4,5258 μm	10 ppb	MCT	[10]
NO ₂	6,25 μm	500 ppb	MCT	[11]
O ₃	9,3-9,81 μm	< 10 ppb	MCT	[12]

*micro-channel-plate photomultiplier tube

2.2. Pomiar szumów

Pomiary szumów w zakresie małych częstotliwości stanowią bardzo istotne źródło danych do badań jakości i niezawodności przyrządów półprzewodnikowych oraz materiałów. Umożliwiają one m.in. przeprowadzenie badań mechanizmów transportu elektrycznego oraz opracowanie, czy też udoskonalenie, modeli przyrządów półprzewodnikowych. Defekty ich struktur mogą powodować kształtowanie się dodatkowych poziomów energetycznych i objawiać jako fluktuacje prądu związane z mechanizmami generacyjno-rekombinacyjnymi nośników ładunków elektrycznych [13]. Wnioski z analizy tych fluktuacji stanowią przydatną informację w procesie kontroli ich produkcji.

Małe szумы umożliwiają uzyskanie dużej wykrywalności detektorów IR, którą opisuje się wzorem:

$$D^* = \frac{R_i (A \Delta f)^{1/2}}{I_n}, \quad (1)$$

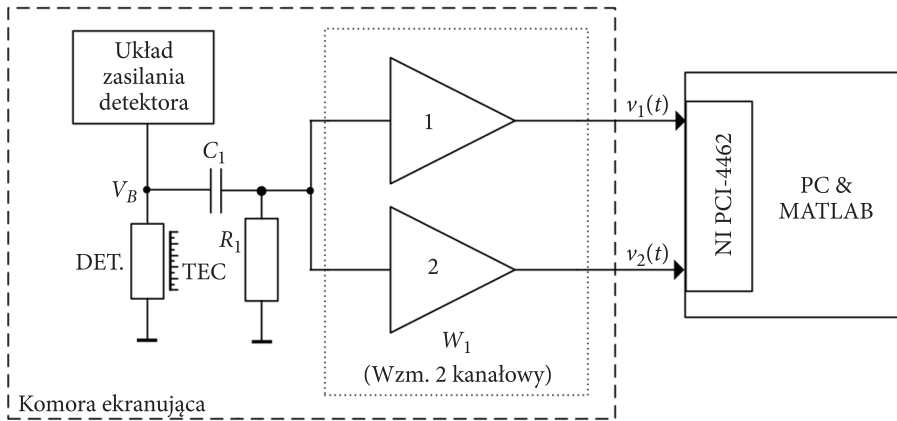
gdzie: R_i — czułość prądowa detektora,
 A — powierzchnia detektora,
 Δf — pasmo szumowe,
 I_n — wartość skuteczna prądu szumu detektora.

Zazwyczaj w widmie szumu spolaryzowanego detektora można wyróżnić szумы termiczne, śrutowe, $1/f$ oraz generacyjno-rekombinacyjne (g-r). Szумы g-r objawiają się w postaci charakterystycznego podbicia charakterystyki szumowej zwanego lorencjanem [14-16]. Przeprowadzanie dokładnych pomiarów szumów w zakresie małych częstotliwości nigdy nie stanowiło prostego zadania, zwłaszcza dla detektorów IR o małych rezystancjach. W tym celu opracowano specjalny system pomiarowy, który został opisany w dalszej części pracy.

3. Korelacyjny pomiar gęstości widmowej napięcia szumów

3.1. Opis systemu pomiarowego

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy systemu pomiarowego. Składa się on z niskoszumowego źródła zasilania detektora wytwarzającego napięcie V_B , ultranisko-szumowego dwukanałowego wzmacniacza W_1 , karty akwizycji PCI-4462 oraz komputera z oprogramowaniem [17]. Podzespoły te (oprócz komputera z kartą akwizycji) zostały umieszczone w specjalnej komorze ekranującej.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu pomiarowego

W celu uzyskania małej wartości napięcia szumu wejściowego tego systemu należy dokonać starannego doboru jego elementów składowych. W tym przypadku jednym z najważniejszych podzespołów systemu jest wzmacniacz, którego szum odniesiony do wejścia ma bezpośredni wpływ na parametry systemu pomiarowego. W stopniach wejściowych fotoodbiorników mogą być stosowane przedwzmacniacze napięciowe, transimpedancyjne (TIA) i ładunkowe. Dla wzmacniacza TIA, wraz ze spadkiem rezystancji badanego detektora, rośnie udział szumu napięciowego wzmacniacza w całkowitym zastępczym szumie wejściowym. Kiedy stanie się on dominujący, można założyć, że gęstość widmowa mocy prądu szumu odniesiona do wejścia wyniesie:

$$S_{iBN} = \frac{S_{en}}{R_{det}^2}, \quad (2)$$

gdzie: S_{en} — gęstość widmowa mocy napięcia szumu odniesionego do wejścia wzmacniacza TIA,
 R_{det} — rezystancja detektora.

Dla wzmacniacza napięciowego całkowity zastępczy poziom mocy napięcia szumu wejściowego jest równy

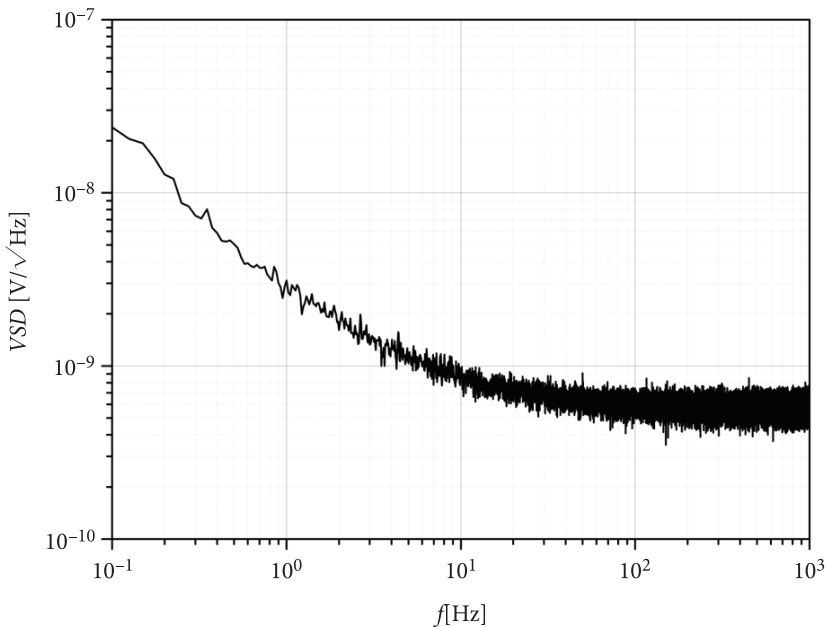
$$S_{eBN} = S_{en} + S_{in}R_{det}^2 \quad (3)$$

gdzie: S_{en} — gęstość widmowa mocy źródła napięciowego,
 S_{in} — gęstość widmowa mocy szumu prądowego odniesionego do wejścia wzmacniacza napięciowego.

W opisywanym układzie zdecydowano się zastosować wzmacniacz napięciowy, gdyż poziom szumu wejściowego układu zależy w głównej mierze od źródła napięciowego szumów. W tym przypadku udział źródła prądowego w całkowitym zastępczym szumie wejściowym układu maleje wraz ze zmniejszaniem się rezystancji detektora. Przy zastosowaniu wzmacniaczy z tranzystorami polowymi możemy pominąć drugi składnik wzoru 3, gdyż prąd szumu jest rzędu pojedynczych $fA/\sqrt{\text{Hz}}$ [18]. Wówczas ograniczeniem systemu są szumy pochodzące jedynie od mocy napięcia szumu wzmacniacza:

$$S_{eBN} \cong S_{en}. \quad (4)$$

W przedstawionym systemie zastosowano dwukanałowy wzmacniacz z tranzystorami JFET w stopniu wejściowym [19]. Każdy z kanałów charakteryzuje się gęstością widmową napięcia szumów odniesioną do wejścia wynoszącą $0,6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (dla $f > 100 \text{ Hz}$). Uzyskana wartość napięcia szumu odpowiada szumom termicznym rezystora o wartości 22Ω w temperaturze 300 K . Charakterystykę gęstości widmowej napięcia szumu (VSD — ang. *Voltage Spectral Density*) odniesionego do wejścia jednego z kanałów wzmacniacza przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkład gęstości widmowej napięcia szumów odniesionego do wejścia wzmacniacza

W celu kontroli i utrzymania stałej wartości zadanej temperatury podczas pomiaru badany detektor był umieszczany na radiatorze zintegrowanym z chłodziarką termoelektryczną TEC (ang. *Thermoelectric Cooler*). Detektor zasilano ze specjalnego ultraniskoszumowego programowalnego źródła napięcia [20]. Badany sygnał fluktuacji napięcia poprzez filtr górnoprzepustowy (R_1C_1) dostarczono do dwóch jednakowych kanałów wzmacniających. Wzmocnione sygnały wyjściowe $v_1(t)$ i $v_2(t)$ doprowadzono do 24-bitowej karty akwizycji danych PCI-4462. Po przeprowadzeniu operacji próbkowania sygnału w zadanym czasie wykonywana jest korelacja krzyżowa, w wyniku której uzyskuje się redukcję składników nieskorelowanych pochodzących od szumów napięciowych wzmacniaczy [21, 22]. Opiszana powyżej procedura pomiarowa realizowana jest z użyciem skryptu opracowanego w środowisku MATLAB jako przesuwany iloczyn skalarny wyznaczający gęstości widmowe mocy S_v dla konkretnych częstotliwości f_k :

$$S_v(f_k) = C \cdot \{V_n(k) \cdot V_n^*(k)\}, \quad f_k = \frac{k}{N} f_s \quad 0 \leq k < \frac{N}{2}, \quad (5)$$

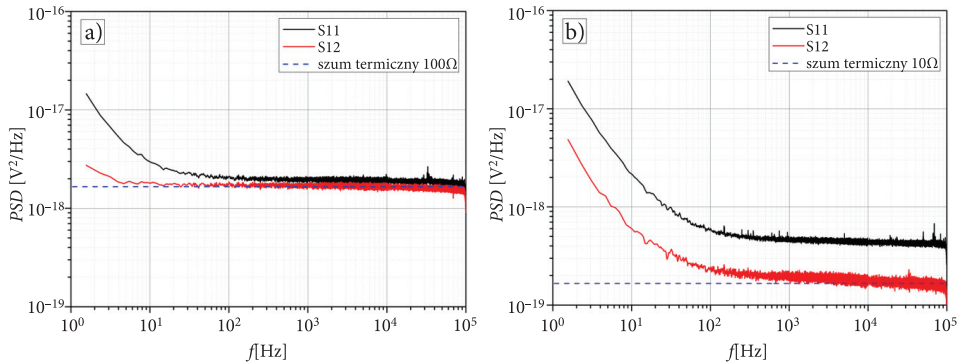
gdzie $V_n(k)$ jest dyskretną transformatą Fouriera (DFT) sekwencji N próbek $V_n(i)$, C jest stałą zależną od N oraz użytej funkcji okienkowania, f_s — częstotliwość próbkowania.

4. Wyniki pomiarów

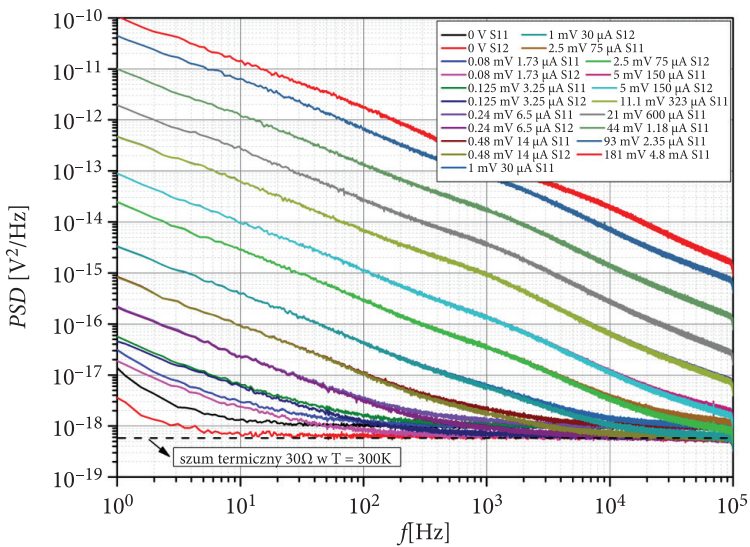
Badania testowe stanowiska przeprowadzono w formie referencyjnych pomiarów gęstości widmowej napięcia szumów termicznych niezasilonych rezystorów o wartościach rezystancji 100 Ω oraz 10 Ω . Przyjęto czas korelacji 10 minut oraz częstotliwość próbkowania 204,8 kS/s. Umożliwiło to wyznaczenie widma w zakresie od 1,5 Hz do 100 kHz. Na rysunku 3 przedstawiono gęstość widmową mocy szumów (PSD — ang. *Power Spectral Density*) otrzymaną bezpośrednio z jednego kanału, oznaczoną jako „S11” dla wyników uzyskanych z sygnału $v_1(t)$, oraz widmo po przeprowadzeniu operacji korelacji sygnałów $v_1(t)$ i $v_2(t)$, oznaczone jako „S12”. Na wykresach naniesiono również referencyjny poziom szumów termicznych ($4kTR$) tych rezystancji.

Wyniki referencyjnych pomiarów pokazały, że operacja korelacji daje oczekiwane rezultaty w postaci redukcji szumów pochodzących od torów pomiarowych. Dla małych wartości rezystancji (10 Ω) dla częstotliwości powyżej 1 kHz zmierzony poziom szumu odpowiada poziomowi szumów termicznych referencyjnego rezystora. Uzyskane wyniki pokazują, że szum toru pomiarowego wyniósł poniżej 10^{-18} V^2/Hz dla $f > 10$ Hz oraz poniżej 10^{-19} V^2/Hz dla $f > 1$ kHz.

W drugim etapie badań system został zastosowany do pomiarów gęstości widmowej szumów detektora podczerwieni InAs/InAsSb z supersieci II rodzaju (T2SL) o rezystancji około 30Ω ($T = 300 \text{ K}$).



Rys. 3. Wyniki pomiarów gęstości widmowej mocy szumów termicznych rezystorów referencyjnych o wartościach 100Ω (a) oraz 10Ω (b)



Rys. 4. Rozkład gęstości widmowej mocy szumów detektora T2SL w 300 K . „S11” odnosi się do pomiaru jednym kanałem, a „S12” stanowi wynik pomiaru po operacji korelacji krzyżowej dwóch kanałów

Na rysunku 4 przedstawiono rozkłady gęstości widmowej mocy szumów detektora T2SL otrzymane dla różnych napięć zasilania. Zaletę zastosowania metody korelacji (S12) można zauważyć zwłaszcza przy braku zasilania detektora oraz dla małych wartości napięć zasilania. Przy braku zasilania zmierzony poziom szumów odpowiada szumom termicznym rezystancji o wartości 30Ω . Charakterystyki odnoszące się do detektora zasilanego wykazują obecność szumu nadmiarowego typu $1/f$, którego amplituda zależy od wartości napięcia. Jego zwiększenie jednoznacznie powoduje wzrost poziomu szumów typu $1/f$ i przesunięcie częstotliwości narożnej (dla której szumy termiczne są równe szumom typu $1/f$) w zakres częstotliwości wyższych. Szumy toru pomiarowego stają się w tym przypadku niezauważalne i zastosowanie metody korelacji jest w zasadzie nieefektywne (widmo „S11” pokrywa się z widmem „S12” dla napięć powyżej $11,1 \text{ mV}$). Na podstawie tych widm można oszacować nie tylko poziom szumów generowanych w detektorze, lecz także dokonać analizy „jakości” jego wykonania. Dla napięć powyżej kilku mV można zauważyć charakterystyczne podbicie w postaci lorencjana w okolicach kilku kHz, które może świadczyć o istniejących defektach w strukturze detektora i stanowić sygnaturę do zdefiniowania kierunku poprawy technologii jego produkcji.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono korelacyjne pomiary gęstości widmowej szumów detektora podczerwieni charakteryzującego się małą rezystancją. W tym celu wykorzystano specjalne stanowisko o bardzo małym poziomie szumów toru pomiarowego wynoszącym poniżej $300 \text{ pV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Poziom ten został osiągnięty dzięki zastosowaniu dwóch niskoszumowych stopni wzmacniających i układu zasilania oraz zaimplementowaniu procedury estymacji badanego widma na bazie metody korelacji krzyżowej sygnałów. Właściwości opisanego systemu przetestowano w trakcie pomiarów szumów rezystorów referencyjnych. Wyniki wykazały, że uzyskany poziom szumów własnych umożliwia pomiar szumów termicznych rezystancji o wartości powyżej 10Ω . Dzięki temu możliwe jest badanie charakterystyk szumowych nowoczesnych detektorów IR przeznaczonych do wysokoczułych optoelektronicznych czujników gazów. Stanowisko to umożliwia nie tylko precyzyjny pomiar szumów detektora, lecz także dobór optymalnego napięcia zasilania, przy którym uzyska się maksymalizację stosunku sygnału do szumu układu detektor - przedwzmacniacz, a zatem polepszenie limitu detekcji układów LAS.

Badania przeprowadzono w laboratorium IOE WAT przy wsparciu finansowym z projektu ID: 347510 pt. „Opracowanie technologii struktur dla jednomodowych laserów kaskadowych do zastosowań w układach optycznej detekcji gazów” – TECHMATSTRATEG1/ 347510/15/NCBR/2018.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.06.2021 r. Zatwierdzono do publikacji 12.07.2021 r.

Krzysztof Achtenberg <https://orcid.org/0000-0003-3806-9276>

Janusz Mikołajczyk <https://orcid.org/0000-0002-7091-3521>

Zbigniew Bielecki <https://orcid.org/0000-0002-2777-620X>

Jacek Wojtas <https://orcid.org/0000-0003-4350-0729>

LITERATURA

- [1] BIELECKI Z., STACEWICZ T., WOJTAS J., MIKOŁAJCZYK J., *Application of quantum cascade lasers to trace gas detection*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 63, 2, 2015, 515–525, DOI:10.1515/bpasts-2015-0059.
- [2] SCHERET J.J., PAUL J.B., O'KEEFE A., SAYKALLY R.J., *Cavity ringdown laser absorption spectroscopy: history, development, and application to pulsed molecular beams*, Chem. Rev., 97, 1997, 25–51, <https://doi.org/10.1021/cr930048d>.
- [3] KALDVEE B., BRACKMANN C., ALDEN M., BOOD J., *Highly range-resolved ammonia detection using near-field picosecond differential absorption lidar*, Opt. Express, 20, 2012, 20688.
- [4] ALVAREZ R.J., SENFF C.J., LANGFORD A.O., WEICKMANN A.M., LAW D.C., MACHOL J.L., MER-RITT D.A., MARCHBANKS R.D., SANDBERG S.P., BREWER W.A., HARDESTY R.M. AND BANTA R.M., *Development and application of a compact, tunable, solid-state airborne ozone lidar system for boundary layer profiling*, J. Atmos. Ocean. Technol., 28, 2011, 1258–1272.
- [5] WOJTAS J., MIKOŁAJCZYK J., NOWAKOWSKI M., RUTECKA B., MEDRZYCKI R., BIELECKI Z., *Applying CEAS method to UV, VIS, and IR spectroscopy sensors*, Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci., 59, 2011, 415–418.
- [6] REFAAT T.F., ISMAIL S., KOCH G.J., RUBIO M., MACK T.L., NOTARI A., COLLINS J.E., LEWIS J., DE YOUNG R., CHOI Y., ABEDIN M.N. AND SINGH U.N., *Backscatter 2- μ m lidar validation for atmospheric CO₂ differential absorption, lidar applications*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 49, 2011, 572–580.
- [7] GHYSELS M., GOMEZ L., COUSIN J., AMAROUCHE N., JOST H. AND DURRY G., *Spectroscopy of CH₄ with a difference-frequency generation laser at 3.3 micron for atmospheric applications*, Appl. Phys. B, 104, 2011, 989–1000.
- [8] OWEN K., ES-SEBBAR E., FAROOQ A., *Measurements of NH₃ line strengths and collisional broadening coefficients in N₂, O₂, CO₂, and H₂O near 1103.46 cm⁻¹*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 121, 2013, 56–68.
- [9] CHAO X., JEFFRIES J.B., HANSON R.K., *In situ absorption sensor for NO in combustion gases with a 5.2 μ m quantum-cascade laser*, Proc. Combust. Inst., 33, 2011, 725–733.
- [10] WOJTAS J., BIELECKI Z., STACEWICZ T., MIKOŁAJCZYK J., MEDRZYCKI R., RUTECKA B., *Application of quantum cascade lasers in nitric oxide and nitrous oxide detection*, Acta Physica Polonica A, 120, 4, 2011, 794–797, DOI:10.12693/APhysPolA.120.794.
- [11] SUR R., PENG W.Y., STRAND C., MITCHELL SPEARRIN R., JEFFRIES J.B., HANSON R.K., BEKAL A., HALDER P., POONACHA S.P., VARTAK S., SRIDHARAN A.K., *Mid-infrared laser absorption spectroscopy of NO₂ at elevated temperatures*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 187, 2017, 364–374.
- [12] LIU P.Q., *Quantum cascade laser open-path system for remote sensing of trace gases in Beijing, China*, Opt. Eng., 49, 2010, 111125.

- [13] VANDAMME L.K.J., *Noise as a diagnostic tool for quality and reliability of electronic devices*, IEEE Trans. Electron Devices, 41, 1994, 2176–87.
- [14] CIURA Ł., KOLEK A., JURENCZYK J., CZUBA K., JASIK A., SANKOWSKA I., PAPIS-POLAKOWSKA E., KANIEWSKI J., *Noise-current correlations in InAs/GaSb Type-II superlattice midwavelength infrared detectors*, IEEE Trans. Electron Devices, 63, 2016, 4907–4912.
- [15] CIURA Ł., KOPYTKO M., MARTYNIUK P., *Low-frequency noise limitations of InAsSb, and HgCdTe-based infrared detectors*, Sensors and Actuators A: Phys., 305, 2020, 1–6.
- [16] CIURA Ł., KOLEK A., JUREŃCZYK J., CZUBA K., JASIK A., SANKOWSKA I., KANIEWSKI J., *1/f Noise modeling of InAs/GaSb superlattice midwavelength infrared detectors*, Opt. Quantum Electron., 50, 36, 2018, 1–11.
- [17] ACHTENBERG K., MIKOŁAJCZYK J., CIOFI C., SCANDURRA G., MICHALCZEWSKI K., BIELECKI Z., *Low-frequency noise measurements of IR photodetectors with voltage cross correlation system*, Measurement, 183, 2021, 109867, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109867>.
- [18] CIOFI C., GIUSI G., SCANDURRA G., NERI B., *Dedicated instrumentation for high sensitivity, low frequency noise measurement systems*, Fluct. Noise Lett., 4, 2, 2004.
- [19] ACHTENBERG K., MIKOŁAJCZYK J., BIELECKI Z., *FET input voltage amplifier for low frequency noise measurements*, Metrol. Meas. Syst., 27, 3, 2020, 531–540.
- [20] ACHTENBERG K., MIKOŁAJCZYK J., CIOFI C., SCANDURRA G., BIELECKI Z., *Low-noise programmable voltage source*, Electronics, 9, 8, 1245, 2020, 1–13.
- [21] SAMPIETRO M., ACCOMANDO G., FASOLI L.G., FERRARI G., GATTI E.C., *High sensitivity noise measurement with a correlation spectrum Analyzer*, IEEE Trans. Instrum. Meas., 49, 4, 2000, 820–822.
- [22] SAMPIETRO M., FASOLI L., FERRARI G., *Spectrum analyzer with noise reduction by cross-correlation technique on two channels*, Rev. Sci. Instrum., 70, 5, 1999, 2520–2525.

K. ACHTENBERG, J. MIKOŁAJCZYK, Z. BIELECKI, J. WOJTAS

Cross-correlation method for noise measurements of photodetectors used for laser absorption spectroscopy

Abstract. The paper presents noise measurements of low-resistance photon detectors with a specially developed system. These measurements are significant for many applications. This issue is particularly critical for laser absorption spectroscopy systems to detect trace amounts of gases. In these systems, the detection limit is determined by noise origins, e.g., light source, background, and detector noise and its readout electronics. The use of some specially designed components of the system (low-noise - $3.6 \times 10^{-19} \text{ V}^2/\text{Hz}$ for $f > 1 \text{ kHz}$) cross-correlation signal processing provides to obtain a measuring floor noise below $10^{-18} \text{ V}^2/\text{Hz}$ for $f > 10 \text{ Hz}$ and below $10^{-19} \text{ V}^2/\text{Hz}$ for $f > 1 \text{ kHz}$ after ten minutes' analysis. Measurements of some reference resistors have verified the system's performance. Finally, the system was also applied to determine the spectral noise density of the II-Type SuperLattice photodetector made of InAs / InAsSb.

Keywords: noise, infrared detectors, infrared absorption spectroscopy, superlattice detectors

DOI: 10.5604/01.3001.0015.3826

