

JARZENIOWY PROMIENNIK CO₂

Jan Kubicki

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki

Streszczenie. W pracy przedstawiono podstawy fizyczne zbudowanego modelu promiennika jarzeniowego CO₂ emitującego promieniowanie podczerwone o częstotliwościach dokładnie pokrywających się z widmem absorpcji dwutlenku węgla. Opisano podstawowe badania tego modelu i podano interpretację fizyczną otrzymanych wyników. Zwrócono uwagę na własności emitowanego przez to urządzenie promieniowania oraz na możliwości wykorzystania urządzenia w różnych dziedzinach.

Słowa kluczowe: promiennik, dwutlenek węgla, absorpcja promieniowania

GLOW RADIATOR CO₂

Abstract. The paper presents the physical basis of the constructed model of the fluorescent emitter of CO₂ emitting infrared radiation with frequencies exactly coinciding with the absorption spectrum of carbon dioxide. This study describes the basic model and gives a physical interpretation of the results. Attention is paid on the properties of the emitted radiation by the device and the ability to use the device in various fields.

Keywords: radiator, carbon dioxide, the absorption of radiation

Wstęp

Dwutlenek węgla należy do najpopularniejszych związków chemicznych występujących w przyrodzie. Powszechnie wiadomo, że powietrze zawiera 79 procent azotu, 20,9 procent tlenu i tylko 0,04 procent dwutlenku węgla. Pomimo tak małej zawartości, dwutlenek węgla jest ważnym ogniwem w procesach życiowych, zwłaszcza przy asymilacji roślin.

Należy również zauważyć, że wydychane przez człowieka powietrze zawiera około 16 procent tlenu, zwiększone ilości pary wodnej i aż 4 procent dwutlenku węgla. Dlatego bardzo ważna jest znajomość zawartości dwutlenku węgla w otaczającej nas przestrzeni. Na jej podstawie można decydować między innymi o potrzebie wentrowania pomieszczeń, w których przebywają ludzie lub zwierzęta co jest istotne szczególnie w czasie mrozów, by nie wyziębiać niepotrzebnie pomieszczeń.

Sprawdzając zawartość dwutlenku węgla w okolicach ust i nosa konkretnych osób, można wnioskować o ich procesach życiowych (czy oddychają, czy są zmęczone itp.). W ostatnich czasach dwutlenek węgla został uznany przez wiele ośrodków jako gaz cieplarniany powodujący ocieplenie na Ziemi. W związku z tym wykrywanie i pomiar stężenia CO₂ w powietrzu a także dokładne badanie własności absorpcyjnych tego gazu jest niezwykle ważne.

Obecnie znanych jest wiele metod wykrywania dwutlenku węgla. Do najpopularniejszych należą metody chemiczne lub tak zwana metoda NDIR (Non-Dispersive Infrared) [6] wykorzystująca zjawisko pochłaniania promieniowania podczerwonego w sprawdzanym powietrzu. Najczęściej źródłem tego promieniowania jest promiennik z rozgrzaną ceramiką emitującą promieniowanie o ciągłym widmie. Z promieniowania tego odpowiedni filtr „wycina” pasmo 4,3 μm absorbowane przez wykrywany dwutlenek węgla.

W metodach tych wymagane jest zasysanie sprawdzanego powietrza do odpowiedniego pojemnika w celu przebadania i dlatego są to metody kłopotliwe w użyciu.

W przypadku innych gazów, powszechnie stosowany jest system zdalnego monitorowania typu „stand-off” [4] pozwalający wykrywać zanieczyszczenia (gazy, aerozole, dymy, pyły) ze znacznej odległości bez kontaktu z obszarem w którym te zanieczyszczenia występują. Najczęściej wykorzystywane są w nim aktywne systemy laserowe (lidary z laserami przestrzajalnymi i systemami obróbki danych pozwalającymi wyznaczyć absorpcję różnicową – Difference Absorption Lidar DIAL). Opisane metody pozwalają analizować ośrodek w sposób niezwykle szybki i dyskretny.

Systemy takie mogłyby być bardzo przydatne dla wykrywania i pomiaru stężenia dwutlenku węgla w otaczającej nas przestrzeni. Problemem jest jednak brak prostych urządzeń emitujących skolimowaną wiązkę światła monochromatycznego mogącego prześwietlać kontrolowany obszar z odpowiednio dużej odległości.

Prowadzone są prace nad wykrywaniem dwutlenku węgla w różnych układach „stand-off”, ale wykorzystywane są do tego złożone laboratoryjne układy laserowe [2, 5] nie nadające się do powszechnego użytku.

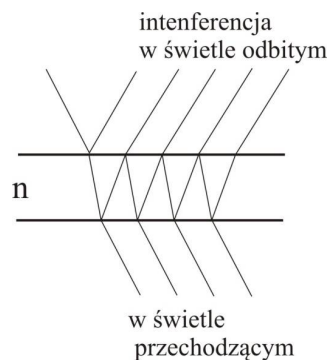
W związku z tym w pracy przeprowadzono analizę możliwości wykonania prostego promiennika jarzeniowego emitującego promieniowanie silnie absorbowane przez dwutlenek węgla i wysyłane w postaci wiązki mogącej prześwietlać sprawdzany obszar z odpowiednio dużej odległości [3]. Opisano wykonany model promiennika i wstępne badania tego modelu.

Analizując zjawiska rezonansowego oddziaływania promieniowania podczerwonego z dwutlenkiem węgla, poświęcono nieco uwagi problemowi powszechnego uznawania tego gazu za gaz cieplarniany wpływający niekorzystnie na zmiany klimatyczne oraz możliwościom wykorzystania proponowanego urządzenia do badań nad tym problemem.

1. Ocena przydatności źródeł promieniowania do zdalnego wykrywania CO₂

Do zdalnego wykrywania par i gazów najczęściej wykorzystywane jest promieniowanie laserowe. Charakterystyczne cechy tego promieniowania to mała rozbieżność wiązki, stosunkowo duża gęstość mocy, spójność (koherencja) i wąskie pasmo spektralne.

Przy zdalnym wykrywaniu substancji zwłaszcza na większych odległościach mała rozbieżność wiązki świetlnej jest bardzo korzystna natomiast duża jej moc nie jest konieczna. Przy wykrywaniu substancji w otwartej przestrzeni nie ma znaczenia spójność promieniowania. Cecha ta jest jednak niekorzystna przy prześwietlaniu kabin z oknami zwłaszcza gdy te kabiny są w ruchu. Okna stają się wówczas filtrami interferencyjnymi a ich transmisja zależy między innymi od kąta nachylenia okna i tym samym może się zmieniać, utrudniając pomiar transmisji wykrywanych substancji. Można to zilustrować na poniższym rysunku.



Rys. 1. Ilustracja zjawiska transmisji promieniowania przez płytkę płasko-równoległą

Ma to szczególnie duże znaczenie przy wykrywaniu stosunkowo małych stężeń w niewielkich kabinach, gdy zmiany transmisji spowodowane absorpcją przez wykrywany gaz mogą być porównywalne ze zmianami transmisji w szybach wywołanymi zjawiskami interferencyjnymi.

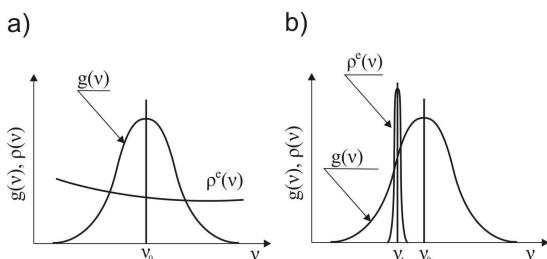
Pozostaje jeszcze pytanie, jak wpływa szerokości konturu linii widmowej prześwietlającego promieniowania na współczynnik absorpcji tego promieniowania w wykrywanym gazie a tym samym jaka jest skuteczność wykrywania interesującego nas gazu przez aparaturę wykorzystującą źródła emitujące promieniowanie o takim widmie.

Prześledzimy w związku z tym zjawiska fizyczne zachodzące podczas procesu absorpcji w gazie. Prawdopodobieństwo absorpcji kwantu promieniowania na jednostkę czasu można opisać powszechnie znanym wzorem:

$$W_{12} = B_{12} \int_0^{\infty} \rho^e(\nu) g(\nu, \nu_0) d\nu \quad (1)$$

gdzie: $g(\nu, \nu_0)$ – funkcja kształtu linii absorpcji, $\rho^e(\nu)$ – funkcja kształtu linii emisyjnej promieniowania prześwietlającego.

W przypadku światła białego proces można zilustrować na rysunku 2a natomiast przypadek absorpcji światła laserowego, na rysunku 2b.



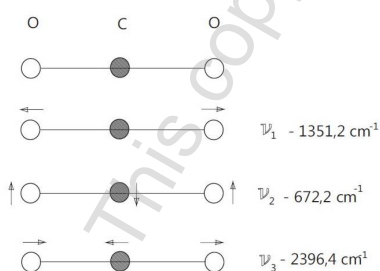
Rys. 2. Poglądowe rysunki „nałożenia” konturu pasma spektralnego dla promieniowania oświetlającego $\rho^e(\nu)$ na widmo absorpcyjne $g(\nu)$ dla: a – oświetlenia światłem „białym”, b – oświetlenia promieniowaniem laserowym

Widać że dla stosunkowo wąskiej linii absorpcyjnej, w przypadku promieniowania „białego”, tylko niewielka jego część może być zaabsorbowana. Analogicznie niekorzystne zjawisko wystąpi również w sytuacji, gdy wykrywany ośrodek o wąskiej linii absorpcyjnej będziemy prześwietlać promieniowaniem laserowym o częstotliwości niedokładnie dopasowanej do częstotliwości centralnej tej linii.

Na podstawie przedstawionych rozważań, należy stwierdzić, że zarówno klasyczne promienniki wykorzystujące emisję promieniowania z rozgrzanych elementów ceramicznych jak i źródła laserowe, nie zawsze są źródłami optymalnymi do zdalnego wykrywania par i gazów o wąskich liniach absorpcyjnych.

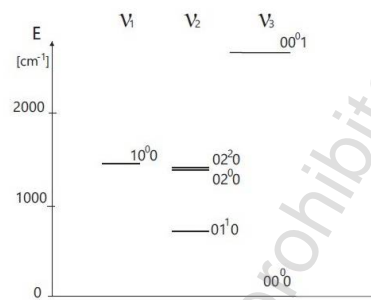
2. Spektralne własności dwutlenku węgla

Stosunkowo złożone widmo spektralne dwutlenku węgla wynika oczywiście z układu poziomów energetycznych dla liniowej molekule CO_2 . W literaturze poświęcono temu zagadnieniu stosunkowo dużo uwagi po wynalezieniu przez Kumara Patela w 1964 roku lasera CO_2 [7]. Powszechnie wiadomo, że molekula ta składa się z dwóch atomów tlenu i jednego atomu węgla, które wykonują względem siebie ruchy oscylacyjne (rys. 3).



Rys. 3. Ruchy oscylacyjne w molekule CO_2

Na rysunku 4 przedstawiono dobrze znany, uproszczony diagram poziomów energetycznych CO_2 odpowiadający przedstawionym ruchom oscylacyjnym.



Rys. 4. Schemat poziomów oscylacyjnych molekule CO_2

Należy zauważyć, że w przypadku stanów nieustalonych, na obsadzenie poszczególnych poziomów oscylacyjnych CO_2 duży wpływ mają molekule lub atomy gazów znajdujących się w mieszaninie z tym gazem. Tak na przykład molekule N_2 posiadają poziomy energetyczne położone blisko poziomów ν_3 a ponieważ same nie mogą emitować promieniowania, gdyż nie posiadają momentu dipolowego, swoją energię oddają molekułom CO_2 , zwiększając populację tego stanu. W związku z tym przy stosunkowo wysokiej temperaturze lub podczas wyładowania elektrycznego, obsadzenie poziomu ν_3 odpowiadającego drganiom antysymetrycznym, powinno być bardzo duże. Należy się zatem spodziewać intensywnej emisji spontanicznej w paśmie $4,3 \mu\text{m}$ związanej z promienistą relaksacją molekuł z tego poziomu na poziom podstawowy.

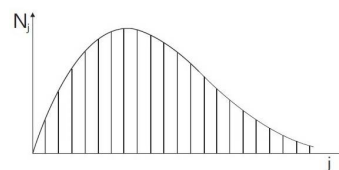
Molekuła CO_2 wykonuje oczywiście również ruchy rotacyjne. Tym samym poziomy oscylacyjne zostają rozszczerzone na poziomy rotacyjne.

Ostatecznie rozkład obsadzeń na poziomach rotacyjnych wybranego stanu oscylacyjnego można opisać wyrażeniem [10]:

$$N_{\nu,j} = N_{\nu} (2hcB_{\nu} / kT) (2j + 1) \cdot \exp\left\{-[B_{\nu} j(j + 1) - D_{\nu} j^2(j + 1)^2] (hc / kT)\right\} \quad (2)$$

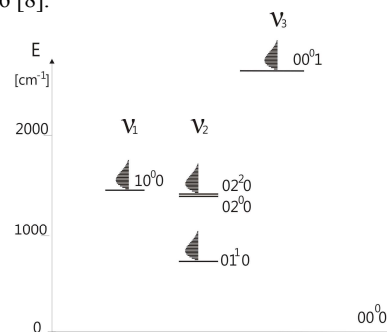
gdzie: ν – numer stanu oscylacyjnego, j – numer stanu rotacyjnego, N_{ν} – całkowite obsadzenie poziomu oscylacyjnego ν , h – stała Plancka, c – prędkość światła, k – stała Boltzmana, T – temperatura, B_{ν} i D_{ν} – stałe rotacyjne.

Przykładowy rozkład obsadzeń poziomów rotacyjnych dla molekuł CO_2 w temperaturze 400K przedstawiono na rys. 5 [9].



Rys. 5. Rozkład obsadzeń molekuł CO_2 na poziomach rotacyjnych

Ostatecznie diagram oscylacyjno-rotacyjnych poziomów energetycznych dla molekuł CO_2 przyjmie postać przedstawioną na rysunku 6 [8].



Rys. 6. Diagram poziomów oscylacyjno-rotacyjnych dla molekule CO_2

Z przedstawionego diagramu poziomów energetycznych wynika stosunkowo bogate widmo absorpcyjne lub emisyjne w zakresie średniej podczerwieni dla molekuł CO_2 , które są typowymi molekułami symetrycznymi. Jego podstawą są oczywiście przejścia oscylacyjno-rotacyjne, zachodzące zgodnie z regułami wyboru: ($\Delta v = 1, \Delta j = \pm 1$). Wynika z nich, że widmo ma charakter dyskretnych linii oscylacyjno-rotacyjnych, w których można wyróżnić dwie gałęzie: P dla $\Delta j = -1$ i R dla $\Delta j = +1$

W przypadku poziomów związanych z drganiami deformacyjnymi, możliwe jest również przejście $\Delta j = 0$ i odpowiadająca mu gałąź Q.

Odległość pomiędzy poszczególnymi liniami zawiera się w granicach od około 30 do 60 GHz. Każda linia oscylacyjno-rotacyjna ma oczywiście swój profil na który najbardziej wpływa temperatura i ciśnienie. Dla niskich ciśnień można go opisać wzorem:

$$S(v, v_0) = \frac{c}{v_0} \left(\frac{M}{2\pi kT} \right) \exp\left(-\frac{Mc^2}{2kTv_0^2} (v - v_0)^2 \right) \quad (2)$$

gdzie: M – masa molekuły, v_0 – częstotliwość centralna linii.

Poszerzenie jest niejednorodne, o szerokości połówkowej określonej wyrażeniem:

$$\Delta v_D = 2v_0 \sqrt{\frac{2kT}{Mc^2}} \ln 2 \quad (3)$$

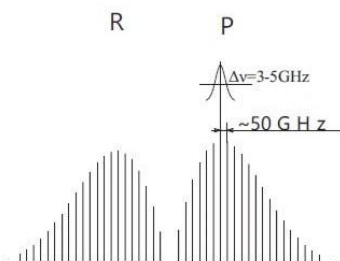
Dla wyższych wartości ciśnienia, linia jest poszerzona jednorodnie i w przypadku mieszanek gazowych wykorzystywanych w laserach CO_2 , określana formułą [1]:

$$\Delta v = 10,11(\psi_{\text{CO}_2} + 0,73\psi_{\text{N}_2} + 0,64\psi_{\text{He}})p \left(\frac{300}{T} \right)^{\frac{1}{2}} [\text{MHz}] \quad (4)$$

w której: ψ_x – frakcja x-go komponentu, p – ciśnienie całkowite.

Praktycznie przy ciśnieniu atmosferycznym szerokość linii wynosi 3÷5 GHz.

Przedstawiony opis można zilustrować na poglądowym rysunku 7.

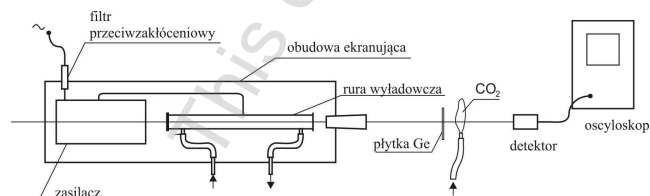


Rys. 7. Poglądowy rysunek widma emisyjnego (lub absorpcyjnego) dla dwutlenku węgla

Przedstawione rozważania pokazują, że istnieją duże możliwości zarówno wykrywania dwutlenku węgla poprzez absorpcję promieniowania o odpowiedniej długości fali jak i możliwości emisji tego promieniowania poprzez odpowiednie wzbudzenie molekuł CO_2 .

3. Eksperyment z jarzeniowym promiennikiem CO_2

Celem eksperymentu było sprawdzenie możliwości zbudowania promiennika emitującego promieniowanie o długościach fal dokładnie pokrywających się z liniami absorpcyjnymi dwutlenku węgla. Został zestawiony układ eksperymentalny przedstawiony na schemacie (rys. 8).

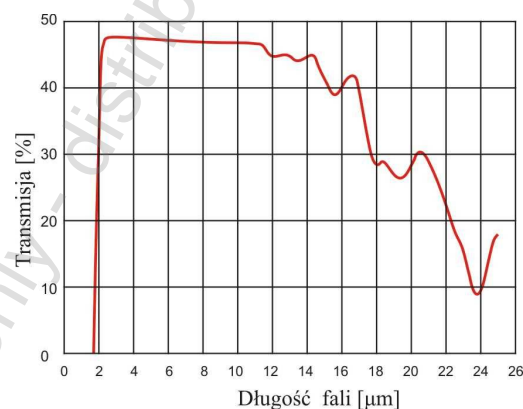


Rys. 8. Schemat układu eksperymentalnego

Podstawowym elementem układu była kwarcowa rurka wyładowcza o długości 30 cm i średnicy 20 mm zamknięta z jednej strony zwierciadłem metalowym a z drugiej oknem z selenku cynku. Wewnątrz rurki były wstawione trzy metalowe elektrody. Ponadto rurka była wyposażona w końcówki odpowiednio do pompy próżniowej i do butli z mieszaną gazową zawierającą dwutlenek węgla. Impulsowe wyładowanie elektryczne w rurce było realizowane przy pomocy odpowiedniego zasilacza.

Całość została zamknięta w obudowie ekranującej z filtrem przeciwzakłóceńowym w przepięciu zasilającym, przepustami gazowymi do pompy próżniowej i butli z gazem oraz z odpowiednią tubą metalową wyprowadzającą promieniowanie emitowane z rurki wyładowczej na zewnątrz i zabezpieczającą przed emisją zakłóceń elektromagnetycznych przez układ.

Dzięki takim zabezpieczeniom możliwa była detekcja pojedynczych impulsów emitowanego promieniowania o stosunkowo małym natężeniu. Emitowane promieniowanie po przejściu przez płytkę germanową i strumień dwutlenku węgla wypływający z dodatkowej butli, padało na chłodzony detektor PbSe, z którego sygnał był rejestrowany na oscyloskopie. Widmo transmisyjne wykorzystywanej płytki germanowej wykonane na spektrofotometrze zostało przedstawione na rys. 9.



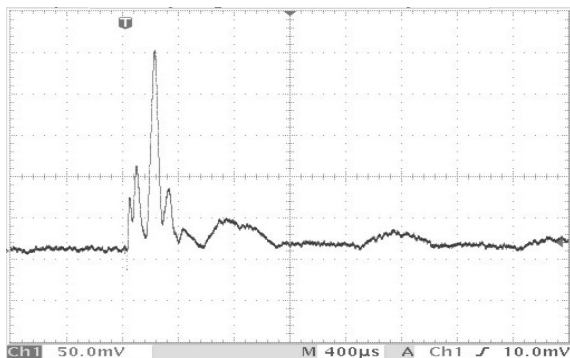
Rys. 9. Widmo transmisyjne wykorzystywanej płytki germanowej

Widok modelu promiennika pokazano na rys. 10.



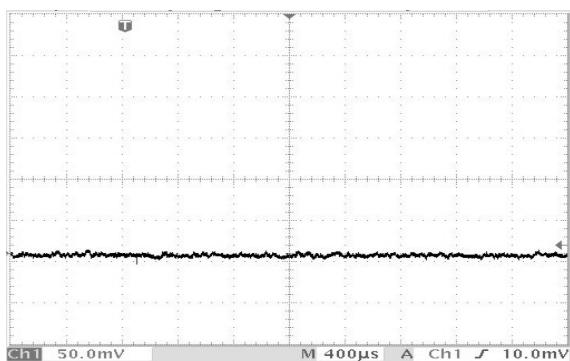
Rys. 10. Widok modelu promiennika

W pierwszym etapie eksperymentu odpompowano rurkę wyładowczą z powietrza do ciśnienia ~ 1 hPa i przy zamkniętym zaworze butli z mieszaną gazową, realizowano impulsowe wyładowanie w rurce. Z toru wiązki emitowanego promieniowania usunięto płytkę germanową i bez zewnętrznego strumienia dwutlenku węgla promieniowanie to oświetlało detektor. Obserwowane na oscyloskopie impulsy elektryczne z detektora, odpowiadające impulsom emitowanego promieniowania przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Impuls z detektora przy braku płytki germanowej w torze wiązki świetlnej (50 mV/dz; 0,4 ms/dz)

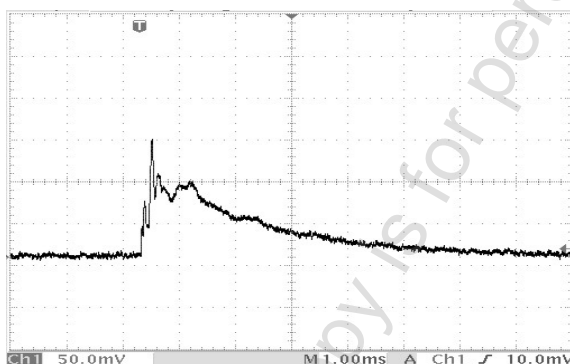
Następnie w tych samych warunkach wstawiono w tor wiązki promieniowania płytkę germanową. Otrzymany na oscyloskopie obraz przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Obraz na ekranie oscyloskopu po wstawieniu płytki germanowej (50 mV/dz; 0,4 ms/dz)

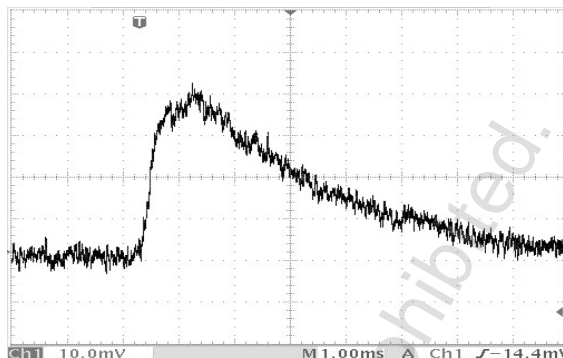
Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że w czasie wyładowania w rurce napełnionej rozrzedzonym powietrzem, emitowane jest jedynie promieniowanie nie przepuszczone przez płytkę germanową. Oznacza to, że mamy w tym przypadku do czynienia z promieniowaniem o stosunkowo krótkich długościach fal.

W kolejnym eksperymencie został otwarty zawór w butli i przez rurkę wyładowczą przepływała mieszanka gazowa o składzie $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$ pod ciśnieniem ~ 2 hPa. Podobnie jak w pierwszym eksperymencie, usunięto płytkę germanową. Na oscyloskopie otrzymano impuls przedstawiony na rys. 13.



Rys. 13. Impuls z detektora przy wyładowaniu w mieszance gazowej i przy braku płytki germanowej w torze wiązki świetlnej (50 mV/dz; 1 ms/dz)

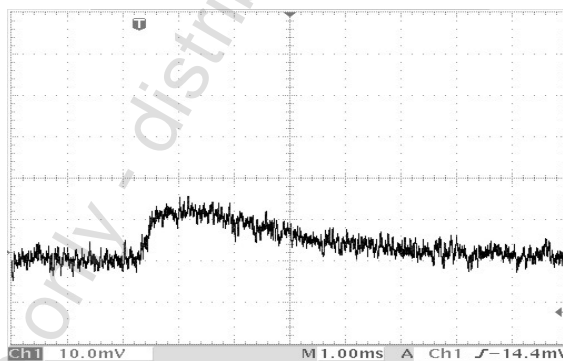
W kolejnym doświadczeniu, po wstawieniu płytki germanowej w tor wiązki emitowanego promieniowania, otrzymano impuls przedstawiony na rys. 14.



Rys. 14. Impuls na oscyloskopie przy wyładowaniu w mieszance gazowej i po wstawieniu płytki germanowej (10 mV/dz; 1 ms/dz)

Z przedstawionych przebiegów oscyloskopowych wynika, że płytkę germanową przepuszczała duża część promieniowania podczerwonego, natomiast nie przepuszczała promieniowania krótkofalowego odpowiadającego przejściom elektronowym.

Następnie otwarto zawór w butli i skierowano strumień dwutlenku węgla w tor wiązki światła, otrzymując przebieg przedstawiony na rys. 15.



Rys. 15. Impuls na oscyloskopie po wpuszczeniu strumienia dwutlenku węgla w tor wiązki promieniowania (10 mV/dz; 1 ms/dz)

Porównując przebiegi na rysunku 11 i 13, widzimy że przy wyładowaniu w powietrzu mamy do czynienia z promieniowaniem widzialnym odpowiadającym przejściom elektronowym i emitowanym jedynie w czasie wyładowania, natomiast przy wyładowaniu elektrycznym w mieszance dwutlenku węgla z azotem, impuls świetlny jest znacznie dłuższy. Można to tłumaczyć emisją promieniowania podczerwonego najprawdopodobniej o długości fali $4,3\mu\text{m}$ przez molekule CO_2 wzbudzone na poziom ν_3 bezpośrednio w czasie wyładowania oraz w wyniku przekazu energii od wzbudzonych molekulek N_2 w czasie znacznie dłuższym niż czas wyładowania elektrycznego.

Potwierdza to przebieg na rysunku 14, który pokazuje, że płytkę germanową przepuszczała duża część promieniowania $4,3\mu\text{m}$, natomiast nie przepuszczała promieniowania krótkofalowego odpowiadającego przejściom elektronowym zachodzącym w czasie procesu wyładowania.

Ponadto z dwóch ostatnich rysunków (14 i 15) wynika, że po wpuszczeniu dwutlenku węgla w tor wiązki światła, amplituda sygnału zmalała z ~ 40 mV do ~ 15 mV. Biorąc pod uwagę stosunkowo krótką drogę przejścia wiązki świetlnej w strumieniu dwutlenku węgla, widzimy że mamy do czynienia z bardzo dużą absorpcją emitowanego promieniowania przechodzącego przez tą strugę.

4. Podsumowanie i wnioski

Bardzo silne pochłanianie emitowanego przez zbudowany promiennik promieniowania w dwutlenku węgla wynika przede wszystkim z dokładnego pokrywania się widma tego promieniowania z widmem pochłaniania. Emisja i absorpcja zachodzi w takich samych molekułach a z uwagi na małe ciśnienie gazu w rurce wyładowczej, linie promieniowania emitowanego są

znacznie węższe od linii absorpcyjnych dwutlenku węgla będącego pod ciśnieniem atmosferycznym.

Tym samym cała linia promieniowania emitowanego jest „objmowana” przez linię absorpcyjną. Możliwości takich nie mają klasyczne promienniki, w których rozgrzana ceramika emituje promieniowanie o widmie ciągłym i jedynie niewielka jego część jest absorbowana w wykrywanym gazie.

Ponadto w naszym przypadku promieniowanie jest absorbowane przez molekuly CO₂ na wszystkich liniach oscylacyjno-rotacyjnych natomiast w przypadku wykorzystywania laserów, ich promieniowanie o bardzo wąskiej linii może być absorbowane jedynie w ramach jednej linii.

Przedstawiony artykuł zawiera wstępne prace nad omawianym tematem. Należy dopracować przede wszystkim zagadnienia związane z kolimacją wiązki, ze zwiększeniem mocy i oczywście z miniaturyzacją urządzenia aby było to urządzenie przenośne. Pozwoliłoby to na prześwietlanie obszarów znacznie oddalonych.

Jak już wspomniano we wstępie, zdalne wykrywanie dwutlenku węgla mogłoby być wykorzystane we wielu dziedzinach. Można je wykorzystać np. w ratownictwie medycznym w trudno-dostępnych miejscach, upewniając się że poszkodowana osoba oddycha. Może być wykorzystane przy zdalnej kontroli trzeźwości osób, gdzie również musimy być pewni, że sprawdzana osoba wydycha powietrze.

Ponadto moglibyśmy przy pomocy tego urządzenia badać rozkład stężenia dwutlenku węgla w atmosferze, co jest niezwykle ważne z punktu widzenia potrzeby przeprowadzenia poważnych badań nad udziałem dwutlenku węgla w efekcie cieplarnianym naszego globu. Jest to niezwykle ważne z ekologicznego punktu widzenia.

Opisane urządzenie pozwoliłoby na dokładny pomiar absorpcji promieniowania przez dwutlenek węgla o bardzo słabym stężeniu. Tym samym można by przeprowadzić dokładne pomiary rozkładu stężenia dwutlenku węgla w atmosferze (np. poprzez wykorzystanie ruchomych retroreflektorów i dalmierzy określających odległość do nich).

Przeprowadzona w pracy analiza i wnioski jakie można z niej wyciągnąć nasuwają wiele wątpliwości odnośnie przyjętej powszechnie tezy, że dwutlenek węgla jest gazem cieplarnianym. W zdecydowanej większości publikowanych na ten temat prac nie rozpatruje się między innymi subtelnej struktury widma absorpcyjnego CO₂, co może skutkować wyciąganiem nieprawdziwych wniosków wykorzystywanych powszechnie przy podejmowaniu ważnych decyzji ekonomicznych.

Literatura

- [1] Abrams R. L.: Broadening coefficients for the P(20) CO₂ laser transition. Appl. Phys. Lett., vol. 25, 1974, 609–611.
- [2] Frish M. B., Wainner R. T.: Standoff gas leak detectors based on tunable diode laser absorption spectroscopy. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2005.
- [3] Kubicki J., Kopczyński K.: Urządzenie do emisji skolimowanej wiązki promieniowania absorbowanego przez dwutlenek węgla. Patent nr P.401265.
- [4] Mierczyk Z., Maziejuk M., Mielczarek G., Kwaśny M., Kopczyński K., Kałdoński G.: Optoelektroniczny monitoring emisji zanieczyszczeń w instalacjach utylizacji odpadów. Konferencja EKOMILITARIS 2004.
- [5] Ming W., M. Ray, Hang Fung K., Mark W., Harder D., Sedlacek A.: Stand-off Detection of Chemicals by UV Raman Spectroscopy. Applied Spectroscopy, Vol. 54, Issue 6, 2000, 800–806.
- [6] Nieradka G., Mocny W.: Pomiar stężenia dwutlenku węgla przy wykorzystaniu absorpcji promieniowania podczerwonego techniką NDIR. II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna Ekologia w Elektronice Warszawa, 5–6.12.2002.
- [7] Patel C. K. N.: Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational of CO₂, Physical Review vol. 136, No. 5A, 1964.
- [8] Pliński E. F., Abramski K. M.: Spectral analysis and frequency control of CO₂ laser radiation. Journal of Technical Physics, 40, No. 3, 1999, 85–96.
- [9] Pliński E. F.: Właściwości promieniowania falowodowych laserów CO₂ wzbudzonych prądem w.c.z. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [10] Witteman W. J.: The CO₂ laser, Springer Series in Optical Sciences. New York 1987.

Dr inż. Jan Kubicki

e-mail: jkubicki@wat.edu.pl

Dr inż. Jan Kubicki jest absolwentem Wydziału Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej. W 1980 r. obronił pracę doktorską z dziedziny laserów molekularnych. Obecnie pracuje w Instytucie Optoelektroniki WAT. Zajmuje się między innymi zdalną detekcją par i gazów w przestrzeniach otwartych i zamkniętych.

Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu publikacji naukowych z dziedziny fizyki laserów, układów laserowych dużej mocy, spektroskopii laserowej, oddziaływania promieniowania laserowego z materią oraz wykorzystania impulsowych wyładowań elektrycznych do modyfikacji powierzchni metalowych. Autor lub współautor opracowań technologicznych i patentów z zakresu wykorzystania impulsów laserowych dużej mocy, impulsowych wyładowań elektrycznych w gazach i w cieczy oraz zagadnień dotyczących zdalnego wykrywania par alkoholu.



otrzymano/received: 23.10.2014

przyjęto do druku/accepted: 06.12.2015