

Zbigniew BIELECKI
Janusz MIKOŁAJCZYK
Mirośław NOWAKOWSKI
Jacek WOJTAS

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA LASERA QCL W SYSTEMIE ŁĄCZNOŚCI OPTYCZNEJ W OTWARTEJ PRZESTRZENI^{*)}

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono analizę i rezultaty badań dwóch laserów QCL. Otrzymane wyniki dały możliwość oceny przydatności poszczególnych laserów do budowy łącza optoelektronicznego w otwartej przestrzeni. Przeprowadzone badania obejmowały m.in. określenie wzajemnych zależności pomiędzy czasem trwania, częstotliwością wytwarzanych impulsów oraz mocą średnią emitowanego promieniowania. Dodatkowo w artykule zamieszczono wyniki wstępnych badań układu łącza optycznego wykorzystującego ww. źródła.*

Słowa kluczowe: *optoelektronika, promieniowanie optyczne, łącza optoelektroniczne, FSO*

prof. dr hab. inż. Zbigniew BIELECKI
e-mail: zbielecki@wat.edu.pl

dr inż. Janusz MIKOŁAJCZYK
e-mail: jmikolajczyk@wat.edu.pl

dr inż. Mirośław NOWAKOWSKI
e-mail: mnowakowski@wat.edu.pl

dr inż. Jacek WOJTAS
e-mail: jwojtas@wat.edu.pl

Wojskowa Akademia Techniczna
Instytut Optoelektroniki

1. WSTĘP

Łączność w otwartej przestrzeni (ang. *Free Space Optics*) wymaga zastosowania odpowiedniego promieniowania optycznego. Zakres widmowy tego promieniowania uwarunkowany jest przede wszystkim przez właściwości transmisyjne atmosfery oraz bezpieczeństwem ludzi.

Określenie właściwości łącza można przeprowadzić poprzez analizę wzoru opisującego moc promieniowania docierającego do powierzchni fotoczułej odbiornika

$$P_{odb} = \frac{P_{nad} D_{odb}}{(\Theta L)^2} e^{-\gamma L} \quad (1)$$

Wartość odbieranej mocy promieniowania zależy zatem od mocy nadajnika P_{nad} , apertury wejściowej odbiornika D_{odb} , rozbieżności wiązki Θ , odległości L , wpływu kanału transmisyjnego (tłumienia atmosfery) $e^{-\gamma L}$. Większość z tych czynników może być odpowiednio dobierana i optymalizowana w trakcie projektowania łącza optycznego. Pewne trudności stwarza zastosowanie odpowiedniego modelu opisującego właściwości transmisyjne atmosfery w różnych warunkach. Dlatego szczególną uwagę należy zwrócić na eksperymentalną weryfikację wyników, uzyskanych na etapie modelowania pracy łącza optoelektronicznego w otwartej przestrzeni.

Na świecie zauważalny jest obecnie szczególny rozwój otwartych łączy optoelektronicznych drugiej generacji tzn. pracujących w zakresie długości fali 10 000 nm. Zakres ten jest szczególnie interesujący, gdyż występuje w nim niższe tłumienie wprowadzane przez mgły o niewielkich cząstkach aerozoli i większe bezpieczeństwo dla wzroku. Główną trudnością opracowania tego typu łączy był brak odpowiedniego źródła promieniowania. Jedyne dostępne dotychczas lasery CO₂ pracujące w tym zakresie długości fal nie miały praktycznego uzasadnienia w budowie prostych i niezawodnych szeroko-pasmowych łączy transmisji danych.

Opracowanie nowych unipolarnych laserów kaskadowych umożliwiło zaprojektowanie łączy pracujących w zakresie 10 μm [1, 2]. Obecnie są dostępne komercyjne lasery kaskadowe emitujące promieniowanie o długościach fal od 3,5 μm do 24 μm . Do najważniejszych firm, w których są one wytwarzane należy zaliczyć AOI, Alpes Lasers oraz Lucent Technologies [3-6]. Ważną właściwością tych laserów jest możliwość osiągnięcia wysokiego stopnia spójności emitowanego promieniowania. Istnieją również wielomodowe lasery im-

pulsowe QCL pracujące w temperaturach pokojowych lub chłodzone termoelektrycznie o mocach do 500 mW. Są to lasery w układzie z rezonatorem Fabry-Perot. W obu przypadkach uzyskuje się zbliżone parametry energetyczne emitowanego promieniowania, tzn. moc średnią $2\div 10$ mW oraz moc szczytową $100\div 500$ mW.

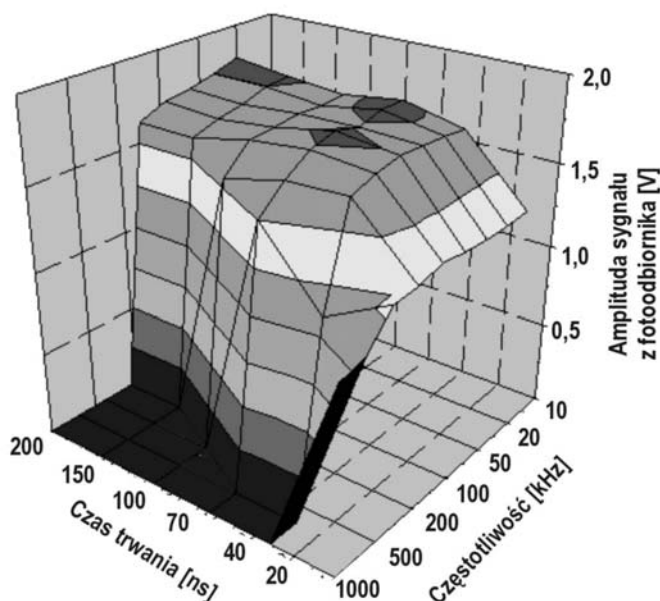
W ramach pracy przeprowadzono badania dwóch laserów oferowanych przez firmę Alpes Lasers oraz firmę Cascade Technologies.

2. BADANIA LASERA FIRMY ALPES LASERS

W skład badanego zestawu laserowego wchodzi: wielomodowy laser QCL, głowica laserowa, kontroler temperatury lasera, generator impulsowy oraz układ zasilania lasera [7]. Laser ten emituje promieniowanie o maksymalnej mocy w impulsie rzędu 500 mW na długości fali $10,5\ \mu\text{m}$. Ze względu na pole przekroju złącza, emitowana wiązka charakteryzuje się rozbieżnością rzędu 60° w płaszczyźnie prostopadłej do obszaru złącza i 20° w płaszczyźnie złącza. Zważywszy na dużą rozbieżność wiązki w nadajniku należało zastosować układ kolimujący. Zastosowano obiektyw SUPIR-35 mm f1 firmy OPHIR.

Pierwszy etap badań lasera dotyczył określenia wpływu parametrów czasowych impulsów na efektywność energetyczną lasera. Częstotliwość pracy lasera zmieniano w zakresie od 10 kHz do 1,4 MHz, natomiast czas trwania impulsów od 20 ns do 200 ns. Na rysunku 1 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów amplitudy sygnału wyjściowego fotoodbiornika dla różnych częstotliwości i czasów trwania impulsów laserowych.

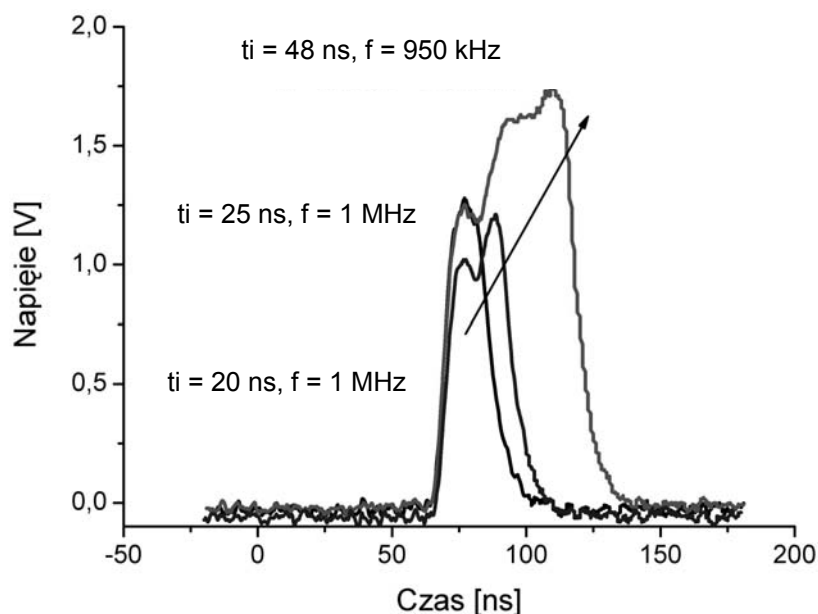
Wyniki badań wykazały, że dla małych wartości czasu trwania impulsów, laser może pracować z maksymalną częstotliwością wy-



Rys. 1. Zależność amplitudy sygnału otrzymanego na wyjściu fotoodbiornika od częstotliwości powtarzania impulsów oraz ich czasu

noszącą 1,3 MHz. Wraz ze wzrostem czasu trwania impulsu pojawia się próg częstotliwości, przy którym moc szczytowa lasera zaczyna gwałtownie maleć. Zjawisko to jest wywołane ograniczeniem prądowym sterownika lasera. Dla impulsów o dłuższym czasie trwania, zaobserwowano znacznie szybszy spadek ich amplitudy, wraz ze wzrostem częstotliwości, w porównaniu z impulsami o krótkim czasie trwania. W obu przypadkach wykryto wartości progowe, przy których następuje znaczny spadek mocy lasera.

Ze względu na wymogi szybkości stawiane łączom optoelektronicznym przeprowadzono dokładną analizę pracy lasera dla $f = 1$ MHz. Na rysunku 2 przedstawiono oscylogramy sygnałów napięciowych otrzymane na wyjściu fotoodbiornika, dla dwóch czasów trwania impulsu sterującego laserem.



Rys. 2. Wpływ szerokości impulsów lasera na amplitudę sygnału otrzymanego na wyjściu fotoodbiornika

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiana czasu trwania impulsu wpływa nie tylko na jego amplitudę, ale także na kształt. Wybór punktu pracy lasera powinien stanowić zatem kompromis między szybkością pracy łącza a jego zasięgiem.

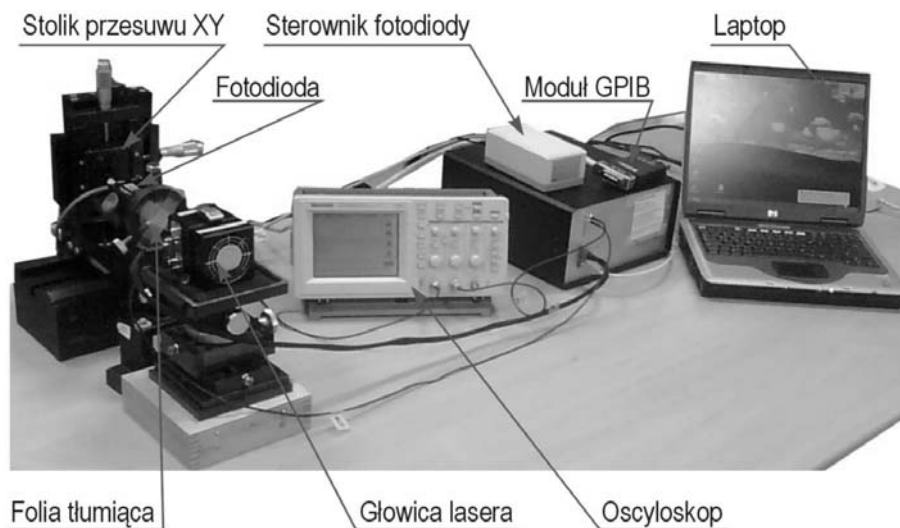
Istotnym parametrem określającym właściwości łącza jest rozbieżność wiązki (wzór 1). W układzie nadajnika z laserem firmy Alpes przeprowadzono badania przekroju wiązki w celu odpowiedniego umieszczenia krawędzi emitującej lasera w ognisku zastosowanej soczewki. W pomiarach tych zastosowano specjalne układy stolików przesuwnych. Wyniki badań wykazały, że

najmniejsza uzyskana wartość rozbieżności wiązki wyniosła 10 mrad. Parametr ten powoduje znaczne zmniejszenie gęstości powierzchniowej energii promieniowania w funkcji zmian odległości od nadajnika i ogranicza zasięg łącza.

3. BADANIA LASERA FIRMY CASCADE TECHNOLOGIES

Laser firmy Cascade Technologies model LM-03-D składa się z modułu sterującego oraz modułu laserowego [8]. Parametry pracy są sterowane komputerowo przy użyciu specjalistycznego oprogramowania. Laser może pracować z częstotliwością repetycji do 100 kHz i maksymalnym współczynnikiem wypełnienia impulsów 1%. Moc średnia promieniowania emitowanego przez ten laser na długości fali 10,5 μm wynosi 6 mW.

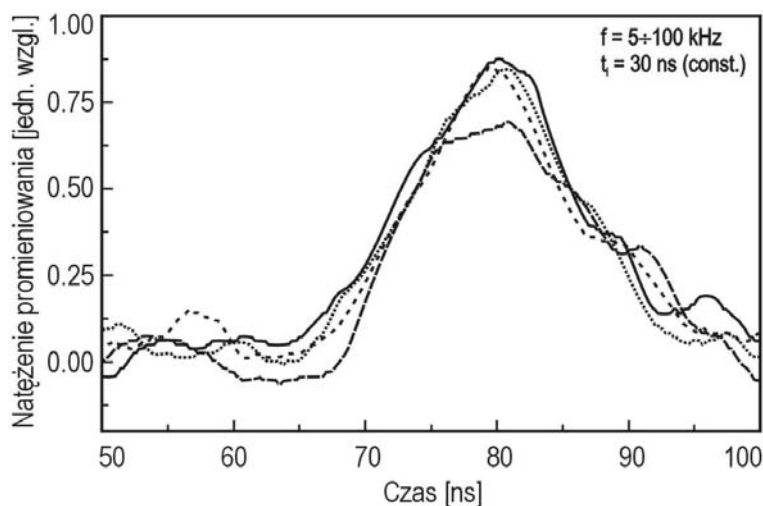
Badania lasera QCL przeprowadzono na stanowisku, którego widok przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat i widok stanowiska przeznaczonego do badań parametrów lasera QCL

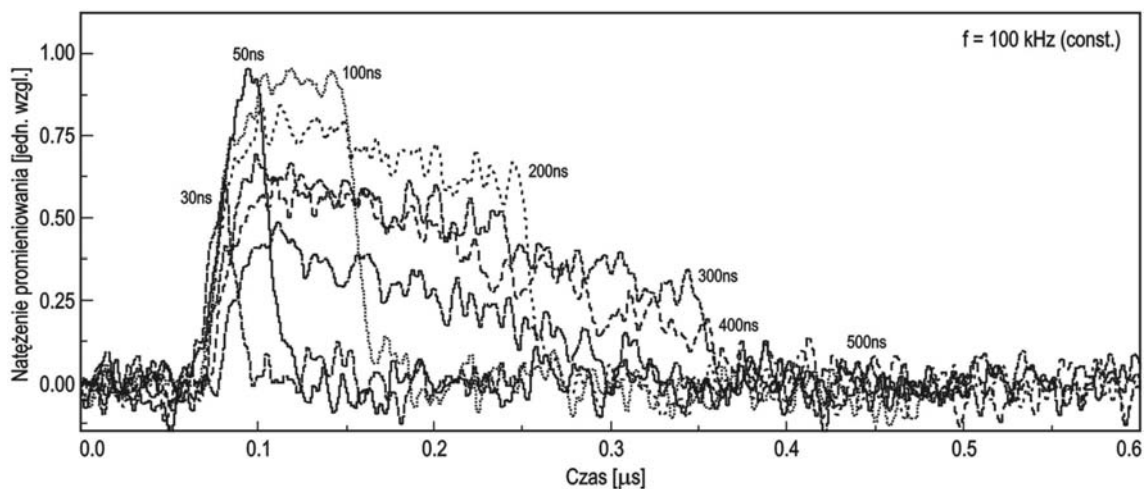
W trakcie badań zarejestrowano przebiegi sygnału na wyjściu fotoodbiornika, dla stałej wartości czasu trwania impulsów i zmieniającej się ich częstotliwości powtarzania. Z otrzymanych przebiegów wynika, że zmiana częstotliwości nie wpływa zasadniczo na parametry czasowo-energetyczne promieniowania laserowego.

Badania wpływu czasu trwania impulsów sterujących laserem na kształt sygnału napięciowego otrzymanego na wyjściu fotoodbiornika przeprowadzono dla stałej częstotliwości pracy lasera wynoszącej 100 kHz. Czas trwania impulsu regulowano w przedziale od 20 ns do 500 ns (rys. 4).



Rys. 4. Przebiegi sygnałów na wyjściu fotoodbiornika dla różnych częstotliwości impulsów laserowych przy stałym czasie ich trwania

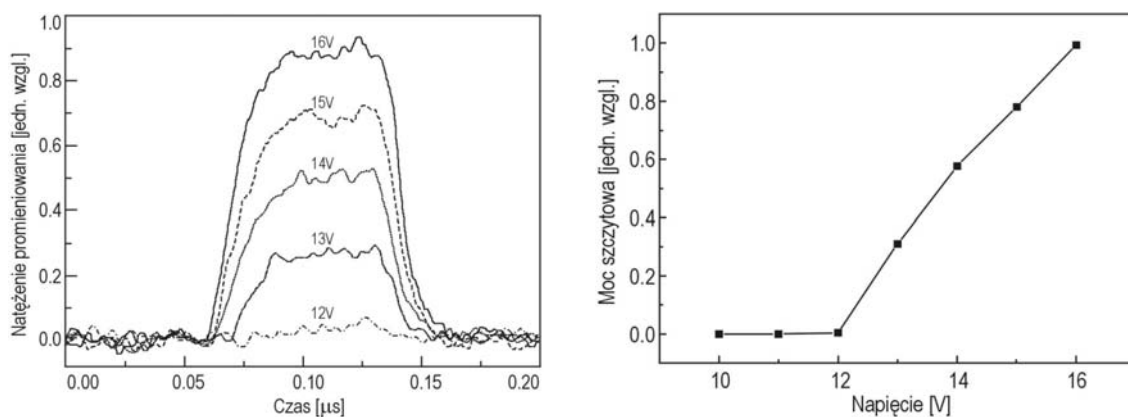
Z przeprowadzonych badań wynika, że czas trwania impulsów nie tylko wpływa na kształt impulsu laserowego, ale również na jego parametry energetyczne (rys. 5).



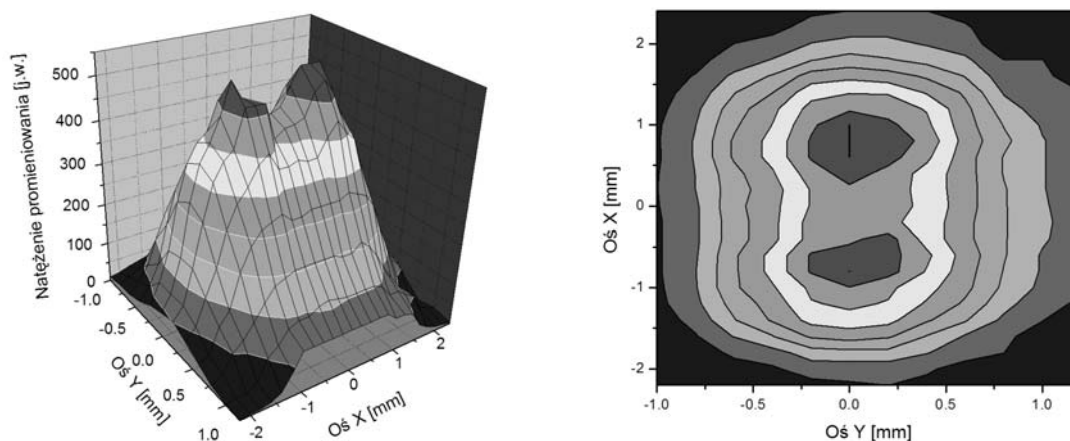
Rys. 5. Przebiegi sygnałów napięciowych na wyjściu fotoodbiornika dla różnych czasów trwania impulsów laserowych przy stałej częstotliwości powtarzania

Oprócz progowej wartości czasu trwania impulsu (20 ns), zaobserwowano zjawisko zmiany kształtu sygnału począwszy od przebiegu podobnego do krzywej Gaussa (dla czasów 30÷80 ns), poprzez kształt zbliżony do prostokątnego (100÷180 ns) a kończąc na przebiegu piłokształtnym (powyżej 200 ns). Zwiększenie czasu trwania impulsów powyżej 120 ns powoduje spadek amplitudy sygnału. W trakcie kontroli czasu trwania impulsów zaobserwowano również pewną krytyczną jej wartość. Wartość ta wyniosła około 20 ns.

Regulując napięcie zasilania lasera stwierdzono, że istnieje jego wartość progowa wynosząca 12 V, poniżej której laser nie emituje promieniowania. Wzrost napięcia zasilania lasera powyżej 12 V powoduje pojawienie się promieniowania (rys. 6). Energia tego promieniowania rośnie wraz ze wzrostem napięcia zasilania. Jednak napięcie to nie może przekroczyć wartości 16 V, gdyż wówczas może nastąpić uszkodzenie struktury złącza.



Rys. 6. Wpływ napięcia zasilania lasera na kształt i amplitudę wytwarzanych impulsów



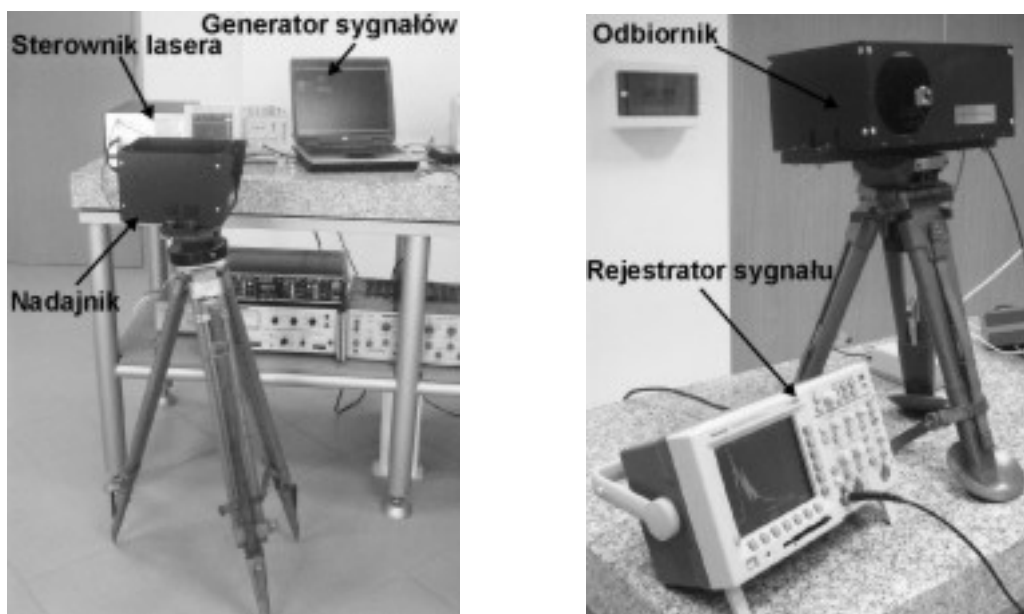
Rys. 7. Profil wiązki laserowej w prezentacji trój- i dwuwymiarowej

Badania przekroju poprzecznego wiązki laserowej przeprowadzono dla dwóch odległości między nadajnikiem a odbiornikiem (0,5 m i 3 m). Z przeprowadzonych badań wynika, że wiązka jest asymetryczna a jej kształt zbliżony jest do elipsy (rys. 7).

Na podstawie powyższych pomiarów oraz w oparciu o zależności trygonometryczne wyznaczono rozbieżność wiązki. Maksymalna jej wartość wyniosła 1,35 mrad.

4. WSTĘPNE BADANIA EKSPERYMENTALNE UKŁADU ŁĄCZA

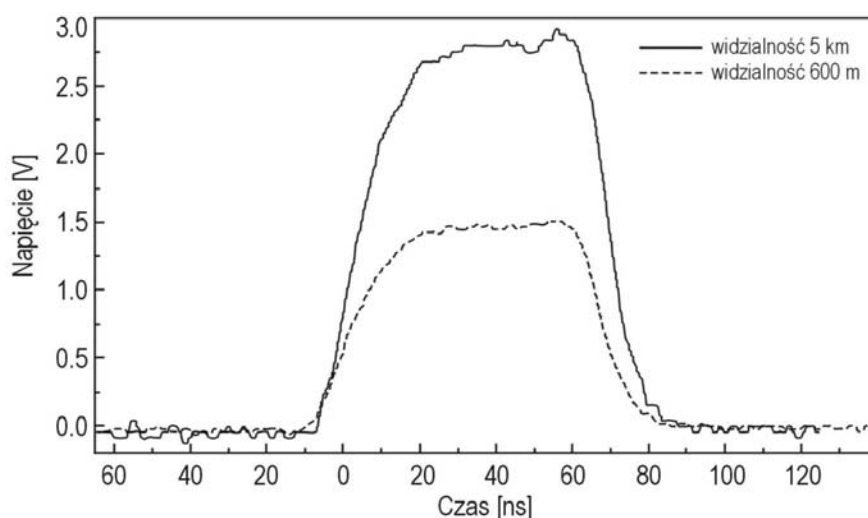
Do badań parametrów łącza pracującego w zakresie długości fali 10 μm zastosowano zaprojektowany układ nadajnika i odbiornika, których fotografie przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Fotografie nadajnika i odbiornika łącza pracującego na długości fali 10 μm

Badania eksperymentalne dotyczyły określenia wpływu warunków atmosferycznych na poziom rejestrowanego sygnału. Przeprowadzono je na terenie Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Odległość między nadajnikiem a odbiornikiem wyniosła 96 m.

Badania przeprowadzono w dniu 21.02.2008 r. oraz 10.03.2008 r. Warunki atmosferyczne w tych dniach zostały określone na podstawie danych podawanych przez stację meteorologiczną Warszawa-Bielany. Pierwszy dzień charakteryzował się dobrą widzialnością 5 km, natomiast drugi bardzo słabą rzędu 0,6 km. Na rysunku 9 przedstawiono zarejestrowane przebiegi dla powyższych warunków atmosferycznych.



Rys. 9. Zarejestrowane przebiegi dla różnych wartości widzialności

5. PODSUMOWANIE

W ramach prowadzonych prac opracowano dwa systemy nadawcze z laserami QCL. Systemy te składają się z interfejsu, układu zasilania i sterowania laserem oraz układu optycznego. Porównując właściwości badanych laserów można stwierdzić, że do budowy mobilnego łącza otwartej przestrzeni, które powinno charakteryzować się minimalnym zasięgiem 1 km lepszym źródłem promieniowania okazał się laser oferowany przez firmę Cascade Technologies Co.

Mimo, że dla tego lasera optymalny punkt pracy odnosi się jedynie do częstotliwości 100 kHz oraz czasu trwania impulsów 80 ns, to laser ten ma dwie zasadnicze zalety:

- mniejszą rozbieżność wiązki, nie wymaga zatem dodatkowych zewnętrznych układów optycznych przez co upraszcza się jego konstrukcja i ewentualne justowanie,

- blok sterowania stanowi pojedynczy podzespół, za pomocą którego można regulować parametry lasera przy użyciu opracowanego interfejsu wraz z oprogramowaniem.

*) Autorzy dziękują **Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego** za poparcie udzielone tej tematyce. Praca finansowana jest ze środków projektu **PBG nr T00A 002 31/3962**

LITERATURA

1. Juarez J.C.: Free-space optical communications for next-generation military networks. IEEE Communications Magazine, nr 11, str. 46–51, rok 2006.
2. Kinkade K.: Free-space optics builds invisible bridges. Laser Focus World, nr 12, rok 2003
3. Maulini R., Mohan A., Giovannini M., Faist J., Gini E.: External cavity quantum-cascade laser tunable from 8.2 to 10.4 μm using a gain element with a heterogeneous cascade. Appl. Phys. Lett., nr 88, str. 201-213, rok 2006.
4. Capasso F., et al.: Quantum cascade lasers: Ultrahigh-speed. Operation, optical wireless communication, narrow linewidth, and far-infrared emission. IEEE Journal of quantum electronics, vol. 38, nr 6, rok 2002.
5. Faist J.: Continuous-wave, room temperature quantum cascade lasers. OPN, nr 5, str. 32-36, rok 2006.
6. Razeghi M., Wu D.: Recent development in Sb-based MWIR interband laser diodes, Opto-Electr. Rev., nr 6, str. 195-205, rok 1998.
7. www.alpeslasers.ch
8. <http://www.cascade-technologies.com>

Rękopis dostarczono, dnia 04.04.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Władysław Dybczyński

QUANTUM CASCADE LASER APPLICATION
IN FREE SPACE OPTICS

Zbigniew BIELECKI, Janusz MIKOŁAJCZYK
Mirosław NOWAKOWSKI, Jacek WOJTAS

ABSTRACT *The paper presents analysis and research of two quantum cascade lasers. The results make it possible to define some lasers virtues for construction of Free Space Optical systems. The main aim of the investigations was a determination of time-energy and beam geometry dependence of the laser radiation. Additionally, the results of the preliminary investigation of the FSO system constructed at the Institute of Optoelectronics, MUT were described.*