Maciej BUGAJSKI, Grzegorz SOBCZAK, Dorota PIERŚCIŃSKA, Krzysztof MICHALAK Piotr GUTOWSKI, Kamil JANUS, Kamil PIERŚCIŃSKI, Joanna BRANAS, Aleksandr KUZMICZ, Krzysztof CHMIELEWSKI, Iwona SANKOWSKA
Instytut Technologii Elektronowej

doi:10.15199/48.2018.08.10

Stan badań nad laserami kaskadowymi na zakres średniej podczerwieni w ITE

Streszczenie. *W artykule omówione zostaną paramery laserów kaskadowych wutwarzanych w Instytucie Technologii Elektronowej. Wskazane zostaną obszary w których lasery wytwarzane w kraju mogą konkurowac z podobnymi przyrządami wytwarzanymi za granicą.*

Abstract. *The paper describes the status of technology of mid-IR quantum cascade lasers (QCLs) based on GaAs/AlGaAs and InAlAs/InGaAs/InP material system developed at the Institute of Electron Technology. Two main types of lasers were investigated. First, was based on lattice matched active region designed for wavelengths of λ=9.0 μm-10.0 μm. The second, was based on strain-compensated active region designed for wavelengths of λ=4.5 μm-5.5 μm. Basic characteristics and parameters of all types of lasers are discussed. Possible applications in which the lasers developed at ITE can compete with those available on world market are indicated.* ***(Mid-infrared quantum cascade lasers developed at ITE)***

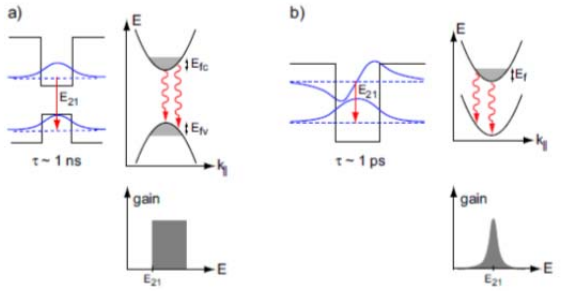
Słowa kluczowe: kwantowe lasery kaskadowe, średnia podczerwień
Keyword: quantum lasers, cascade lasers, mid-nfrared

Wprowadzenie

Prace nad laserowymi źródłąmi średniej podczerwieni prowadzone są w ITE od ponad 10-ciu lat. Dotyczą one nowej generacji laserów półprzewodnikowych, których działanie opiera się na wykorzystaniu specyficznych zjawisk fizycznych zachodzących w nanostrukturach, tzw. kwantowych laserów kaskadowych. Są to prace pionierskie w skali kraju, nawiązujące do aktualnych trendów nauki światowej. W tym czasie opracowano technologię i wytworzono serie prototypowe kilku typów laserów z zakresu średniej podczerwieni. Lasery wytwarzane w ITE wykorzystują heterostruktury GaAs/AlGaAs i AlInAs/InGaAs/InP; te ostatnie zarówno dopasowane sieciowo jak i z kompensacją naprężeń. Opracowano lasery emitujące w pasmie 4.5-5.5 μm i 9.0-10.0 μm. Wszystkie wytwarzane lasery pracują impulsowo w temperaturze pokojowej; niektóre typy laserów pracują na fali ciągłej. Podstawową technologią stosowaną do wytwarzania struktur jest epitaksja z wiązek molekularnych MBE i hybrydowa technologia MBE + MOVPE.

Lasery kaskadowe średniej podczerwieni

Kwantowe lasery kaskadowe stanowią nową klasę unipolarnych laserów półprzewodnikowych, których działanie oparte jest na przejściach wewnątrzpasmowych. 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 jam kwantowych stanowiących ich obszar czynny. Zasada działania lasera kaskadowego przedstawiona jest na rys.1.



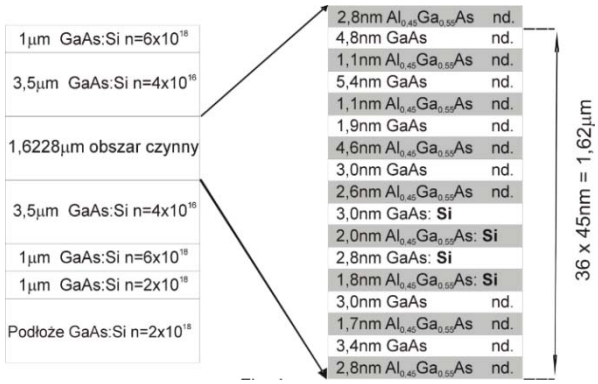
Rys.1 Przejścia międzypasmowe w jamie kwantowej (a), przejścia wewnątrzpasmowe w jamie kwantowej (b).

Pozwala to na pokrycie szerokiego spektrum, długości fal od średniej do dalekiej podczerwieni za pomocą struktur wytwarzanych na bazie GaAs i InP, materiałów, których technologia jest doskonale opanowana. Kaskadowa natura generacji promieniowania umożliwia powielanie fotonów i uzyskiwanie mocy przekraczających te, które generowane są w laserach bipolarnych. Z kolei obecność tylko jednego rodzaju nośników (elektronów) eliminuje większość niekorzystnych procesów rekombinacji niepromienistej. Lasery kaskadowe są idealnym źródłem promieniowania w układach detekcji zanieczyszczeń gazowych i systemach telekomunikacji w swobodnej przestrzeni. Znajdują również zastosowanie w technice wojskowej, medycynie, oraz do wczesnego wykrywania skażeń i substancji biologicznych.
Lasery wytwarzane są z heterostruktur AlGaAs/GaAs lub AlInAs/InGaAs/InP otrzymywanych techniką epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). Lasery kaskadowe z AlGaAs/GaAs pracują w zakresie średniej podczerwieni (~9.0 μm-10.0 μm). Lasery z AlInAs/InGaAs/InP emitują promieniowanie z zakresu 4.5μm – 5.5 μm zakresu ~9.0 μm. Przesunięcie pasma emisji w kierunku fal krótszych pociąga za sobą konieczność optymalizacji procesu epitaksji, która umożliwi kompensację naprężeń wynikających z niedopasowania sieciowego w strukturach..
Zasada działania lasera kaskadowego nakłada na heterostruktury epitaksjalne oraz na technologię ich wykonania ścisłe wymogi dotyczące precyzji odnoszącej się zarówno do dokładności realizacji założonej konstrukcji i co za tym idzie jednorodności struktury w obszarze płytki epitaksjalnej, jak również do powtarzalności technologii osadzania warstw w procesie MBE. Krytyczną dla działania lasera, ze względu na konieczność uzyskania wymaganych czasów życia i prawdopodobieństwa przejść, jest wysoka zgodność geometrii obszaru aktywnego (grubości i składów warstw) z teoretycznymi założeniami konstrukcyjnymi.

Lasery AlGaAs/GaAs (~9.0 μm-10.0 μm) [1-3].

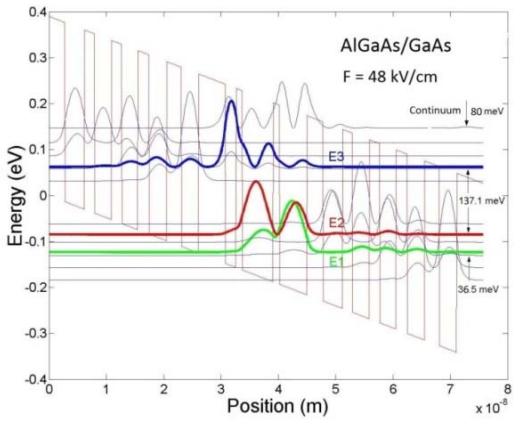
Opracowanie w 2009 r. technologii wzrostu struktur laserów kaskadowych z AlGaAs/GaAs było ogromnym sukcesem naukowym i technicznym. O stopniu trudności zadania świadczy przedstawiona na rys. 2 zdjęcie z transmisyjnego mikroskopu elektronowego (TEM), na którym pokazano fragment obszaru czynnego w laserze kaskadowym. Układ warstw w pojedynczym segmencie lasera zilustrowany jest na rys.3.

Rys.2 Obraz TEM fragmentu obszaru czynnego lasera kaskadowego. Ciemne linie odpowiadają barierom z $Al_{0,45}Ga_{0,55}As$, jasne studniom potencjału z GaAs.



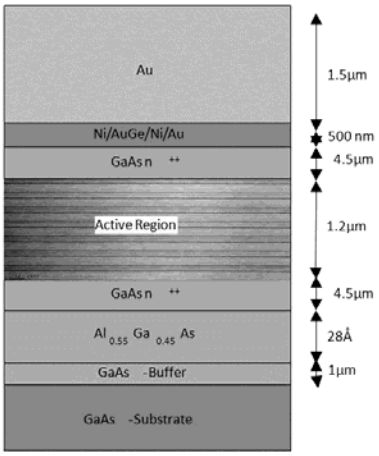
Rys.3 Układ warstw w pojedynczym segmencie lasera kaskadowego. Obszar czynny lasera składa się w tym przypadku z 36 segmentów.

Obszar aktywny lasera tworzy układ 3 studni kwantowych o grubości pojedynczych nanometrów, sprzężonych z spersieciowym injektorem (patrz rys.4). Układ ten powtórzony kilkadziesiąt razy tworzy rdzeń lasera. Falowód lasera składa się z warstw GaAs. Dla poprawy ograniczenia pola e-m wykorzystywany jest efekt plazmonowy w silnie domieszkowanym półprzewodniku. Układ warstw w pełnej strukturze lasera przedstawiony jest schematycznie na rys.5.

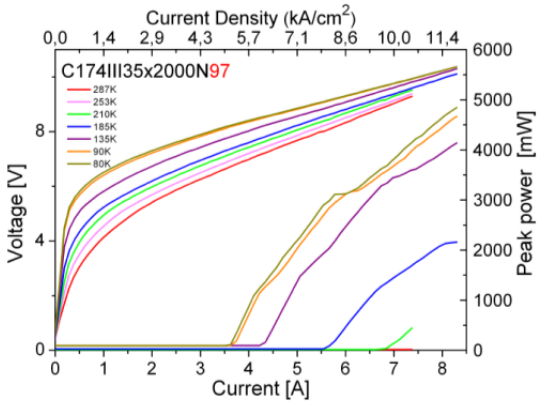


Rys.4 Laser kaskadowy z $Al_{0,45}Ga_{0,55}As/GaAs$ (λ= 9.4μm) o konstrukcji 3QW. Obszar aktywny tego lasera składa się z 36 modułów, z których każdy zbudowany jest z 8 sprzężonych kwantowych studni potencjału. Przejście laserowe zachodzi pomiędzy poziomem E3 → E2.

Lasery z AlGaAs/GaAs pracują impulsowo. Typowe warunki zasilania to impulsy o długości 200 ns i repetycji 5 kHz (współczynnik wypełnienia 0.1%). W temperaturach kriogenicznych (77 K) emitują do 5 W w impulsie, w temperaturach pokojowych osiągają moce ~ 1 mW. Charakterystyki prądowo-napięciowe (I-V) i moc optyczna -- prąd (P-I) lasera kaskadowego z $Al_{0.45}Ga_{0.55}As/GaAs$ (λ= 9.4 μm) reprezentującego aktualny poziom technologii w ITE w tym zakresie przedstawione są na rys. 6. Podstawowe parametry laserów zebrane są w tabeli 1.



Rys.5 Układ warstw w strukturze lasera AlGaAs/GaAs na pasmo (~9.0 μm-10.0 μm).



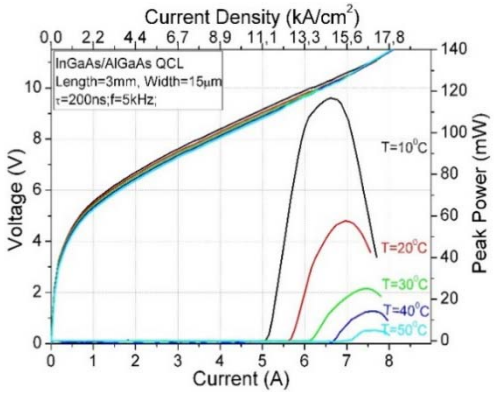
Rys.6 Charakterystyki prądowo-napięciowe (I-V) i moc optyczna -- prąd (P-I) lasera kaskadowego z $Al_{0.45}Ga_{0.55}As/GaAs$ (λ= 9.4 μm) reprezentującego aktualny poziom technologii w ITE w tym zakresie.

Tabela 1. Parametry laserów kaskadowych z $Al_{0.45}Ga_{0.55}As/GaAs$ (λ= 9.4 μm).

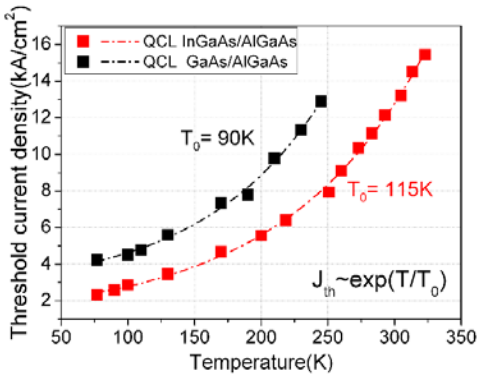
Parametr	Opis	Wartość
Gęstość prądu progowego	J_{th} (77K)	5 kA/cm^2 – 6 kA/cm^2
Gęstość prądu progowego	J_{th} (300K)	10 kA/cm^2 - 15 kA/cm^2
Napięcie progowe	V_{th} (77K)	~ 8.5 V
Moc w impulsie	P (77K)	> 4 W (max 6 W)
Moc w impulsie	P (300K)	25 mW – 35 mW
Długość fali	λ (300K)	~ 9.4 μm - 9.5 μm
Temperatura charakterystyczna	T_0	~ 100 K
Rezystancja szeregowa	R_s (77K-300K)	0.5 Ω – 0.7 Ω
Zewnętrzna sprawność różniczkowa	η_d (77K)	0.8 W/A - 1.2 W/A
Sprawność energetyczna	η_{wpe} (77K)	6 % - 8 %

Lasery InGaAs/AlGaAs/GaAs (~9.0 μm) [7,9]

Poprawę parametrów laserów AlGaAs/GaAs można uzyskać dodając niewielkie ilości indu do studni kwantowych GaAs co skutkuje wzrostem nieciągłości pasma przewodnictwa w heterostrukturze InGaAs/AlGaAs i poprawą jakości (mniejszą szorstkością) interfejsów. Ze względu na niedopasowanie sieciowe pomiędzy InGaAs i AlGaAs zawartość In w InGaAs nie może być zbyt duża, ale już ~3% In prowadzi do istotnej poprawy parametrów laserów. Obserwowane jest dwukrotne zmniejszenie gęstości prądu progowego i wzrost maksymalnej temperatury pracy do 50 ^{0}C. W temperaturze pokojowej (300 K) uzyskiwane są moce kilkudziesięciu mW, co jest w zupełności wystarczające dla większości zastosowań.



Rys.7 Charakterystyki prądowo-napięciowe (I-V) i moc optyczna - prąd (P-I) lasera kaskadowego z $In_{0.03}Ga_{0.97}As/Al_{0.45}Ga_{0.55}As/GaAs$ (λ= 9.2 μm)



Rys.8 Gęstość prądu progowego w funkcji temperatury dla lasera AlGaAs/GaAs i lasera InGaAs/AlGaAs/GaAs

Tabela 2. Parametry laserów $Al_{0.45}Ga_{0.55}As/GaAs$ (λ= 9.4 μm) i $In_{0.03}Ga_{0.97As/}Al_{0.45}Ga_{0.55}As/GaAs$ (λ= 9.2 μm).

	GaAs/AlGaAs QCL	**InGaAs/AlGaAs QCL**
J_{th} (77 K) J_{th} (250 K)	4.2 (kA/cm^2) 13.3 (kA/cm^2)	2.2 (kA/cm^2) 7.3 (kA/cm^2)
T_0 (77 K-300 K)	90 (K)	115 (K)
WPE (77 K)	5.6 %	9.94 %
□ (77 K)	0.6 W/A	1.3 W/A
Tmax	273 K (0 °C)	323 K (50 °C)
P (77 K) P (250 K)	2.2 W 90 mW	5.2 W 1.1 W

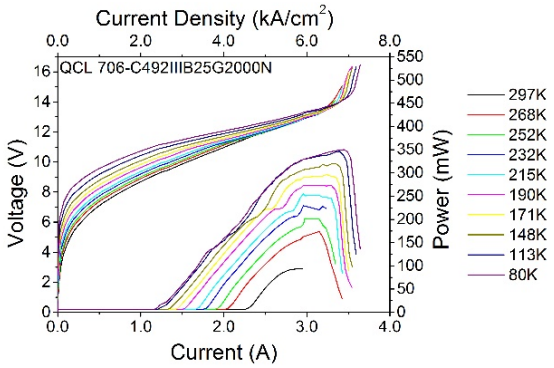
Biorąc pod uwagę bardzo dobre opanowanie technologii opartych na GaAs i ich relatywnie niski koszt, lasery InGaAs/AlGaAs/GaAs mogą stanowić budżetową alternatywę dla laserów kaskadowych na podobne długości fali wytwarzanych na bazie InP. Charakterystyki (I-V) i lasera kaskadowego z $In_{0.03}Ga_{0.97As/}Al_{0.45}Ga_{0.55}As/GaAs$ (λ= 9.2 μm) przedstawione są na rys.7i 8. Porównanie temperaturowych zależności gęstość prądu progowego dla obu typów laserów przedstawione jest na Rys.8 a ich podstawowe parametry zebrane są w yabeli 2.

Lasery InGaAs/InAlAs/InP (~9.5 μm) dopasowane sieciowo do InP [4-6]

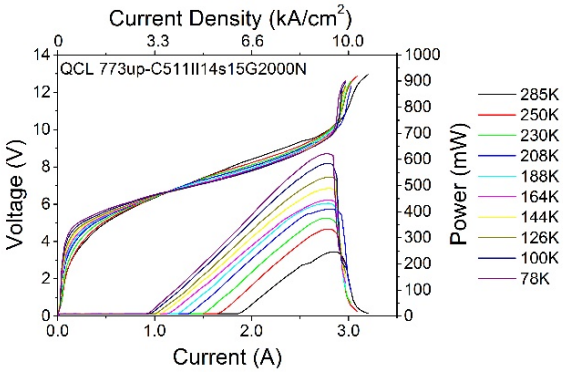
Alternatywne podejście do wytworzenia lasera na długość fali rzędu 9-10 μm polegaja na wykorzystaniu heterostruktur InGaAs/InAlAs/InP. W przypadku gdy heterostruktura jest dopasowana sieciowo do InP, nieciągłość pasma przewodnictwa wzrasta do ~520 meV w porównaniu z 390 meV dla GaAs/AlGaAs, co pozwala na uzyskanie tej samej co poprzednio długości fali promieniowania (~9.4 μm), przy istotnie większej, energii aktywacji procesu ucieczki termicznej nośników do kontinuum. Powinno to umożliwić pracę na fali ciągłej w temperaturze pokojowej, niemożliwą do osiągnięcia w laserach $GaAs/Al_{0.45}Ga_{0.55}As$.

Struktury na podłożach z InP pozwalają dodatkowo na wytworzenie niskostratnych, w porównaniu z falowodem plazmonowym z silnie domieszkowanego GaAs, naturalnych falowodów z InP co skutkuje niższymi prądami progowymi, ze wszystkimi tego pozytywnymi konsekwencjami dla pracy przyrządu. Dodatkowo falowody z InP charakteryzują się bardzo dobrym przewodnictwem cieplnym. Charakterystyki (I-V) i (P-I) laserów kaskadowego z InGaAs/InAlAs/InP (λ= 9.4 μm) wytworzonych w technologii MBE i technologii hybrydowej MBE+MOVPE przedstawione są na rys.9 i 10.

Lasery InGaAs/InAlAs/InP dopasowane sieciowo do podłoża z InP pracują w temperaturach znacznie powyżej temperatury pokojowej (do 100 ^{0}C) i dostarczają mocy rzędu kilkuset mW w impulsie. Są to parametry umożliwiające ich szerokie zastosowanie w ochronie środowiska, przemyśle i medycynie.



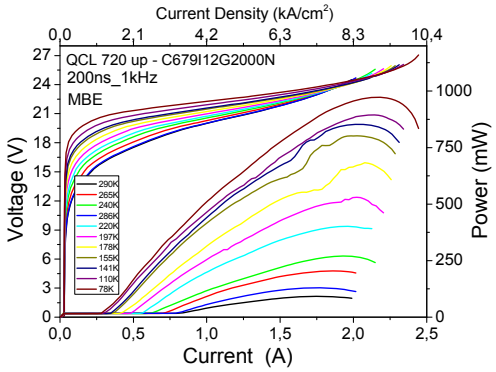
Rys.9 Charakterystyki (I-V) i (P-I) lasera kaskadowego z InGaAs/InAlAs/InP (λ=9.4 μm) wytworzonego w technologii MBE.



Rys.10 Charakterystyki (I-V) i (P-I) lasera kaskadowego z InGaAs/InAlAs/InP (λ=9.4 μm) wytworzonego w technologii MBE+ MOVPE.

Lasery InGaAs/InAlAs/InP z kompensacją naprężeń (~4.7 μm) [8].

Heterostruktury InGaAs/InAlAs/InP mogą być również użyte do konstrukcji laserów emitujących w pasmie 4.5 μm – 5.5 μm. W tym celu wykorzystuje się modyfikację struktury pasmowej kryształów mieszanych AlInAs i GaInAs wywołaną naprężeniami. Charakterystyki takiego lasera (λ=4,7μm) wytworzonego w technologii MBE przedstawione są na rys.11.



Rys. 11 Charakterystyki (I-V) i (P-I) lasera kaskadowego z InGaAs/InAlAs/InP (λ=4.7 μm) z kompensacją naprężeń (technologia MBE)

Tabela 3. Parametry laserów InGaAs/InAlAs/ InP (λ=4.7 μm) wytwarzanych w technologii MBE.

Parametr	T = 300 K
Gęstość prądu progowego, J_{th}	2.5 kA/cm^2 0.7 kA/cm^2 (77K)
Sprawność kwantowa, η_d	~1.5 W/A
Moc w impulsie, P	~0.6 W
Napięcie progowe, V_{th}	~9 V
Długość fali, λ	~ 4.7 μm

Lasery z InGaAs/InAlAs/InP emitujące promieniowanie z zakresu 4.5μm – 5.5μm, z falowodem z InP wytwarzane w technologii MBE pracują w sposób quasi-ciągły (długości impulsów ~10μs) w T=300K, z mocą powyżej 0.5W. Jednocześnie, lasery te charakteryzują się niskimi gęstościami prądu progowego (~2.5 kA/cm^2).

Podsumowanie.

Osiągnięty w kraju wysoki poziom prac nad laserami kaskadowymi, stwarza realną możliwość włączenie się na zasadach konkurencyjnych w badania przemysłowe i prace rozwojowe nad sensorami gazów opartymi na wymienionej technologii. Badania i prace aplikacyjne w nad wykorzystaniem laserów kaskadowych mają charakter wybitnie nowatorski i dotyczą elementów, które ciągle są trudno dostępne w sprzedaży. Ze względu na ogromną różnorodność konstrukcji i długości fali emitowanego promieniowania lasery kaskadowe nie będą nigdy produktem wytwarzanym masowo. Przewiduje się, że rynek laserów kaskadowych będzie się rozwijał w kierunku urządzeń projektowanych i wytwarzanych na zamówienie klienta, pod konkretne zastosowanie. Na takim rynku liczy się przede wszystkim innowacyjność produktu i w tym upatrujemy szanse dla krajowych wytwórców laserów.

Autorzy: *Prof. dr hab Maciej Bugajski Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Dr Grzegorz Sobczak Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Dr Dorota Pierścińska Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Mgr Krzysztof Michalak Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Dr Piotr Gutowski Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Mgr Kamil Janus Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Dr Kamil Pierściński Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa Mgr Joanna Branas Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Dr Aleksandr Kuzmicz Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Krzysztof Chmielewski Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, Dr Iwona Sankowska Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa*

LITERATURA

[1] K. Kosiel, M. Bugajski, A. Szerling, J. Kubacka-Traczyk, P. Karbownik, E. Pruszyńska-Karbownik, J. Muszalski, A. Łaszcz, P. Romanowski, M. Wasiak, W. Nakwaski, I. Makarowa, P. Perlin , "*77 K operation of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers*", Photonics Letters of Poland, vol.1, 16 (2009)

[2] K. Kosiel, A. Szerling, P. Karbownik, I. Sankowska, E. Pruszyńska-Karbownik, K. Pierściński, D. Pierścińska, P. Gutowski, M. Bugajski, "*Room Temperature AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers*", Photonics Letters of Poland, vol. 3, nr. 2, str. 55-57 (2011)

[3] M. Bugajski, K. Kosiel, A. Szerling, P. Karbownik, K. Pierściński, D. Pierścińska, G. Hałdaś and A. Kolek, „*High power AlGaAs/GaAs quantum cascade lasers*" (invited paper), Semiconductor Lasers and Laser Dynamics V, K. Panajotov, M. Sciamanna, A. Valle, R. Michalzik, (eds.), Proc. of SPIE Vol. 8432, 84320I

[4] M. Bugajski, P. Gutowski, P. Karbownik, A. Kolek, G. Hałdaś, K. Pierściński, D. Pierścińska, J. Kubacka-Traczyk, I. Sankowska, A. Trajnerowicz, K. Kosiel, A. Szerling, J. Grzonka, K. Kurzydłowski, T. Slight, W. Meredith, „*Mid-IR quantum cascade lasers: Device technology and non-equilibrium Green's function modeling of electro-optical characteristics*" (invited paper), Physica Status Solidi (b), vol. 251, no. 6, 1144–1157 (2014)

[5] A. Kolek, G. Hałdaś, M. Bugajski, K. Pierściński, P. Gutowski, "*Impact of Injector Doping on Threshold Current of Mid-Infrared Quantum Cascade Laser - Non-Equilibrium Green's Function Analysis*", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (2014)

[6] P. Gutowski, P. Karbownik, A. Trajnerowicz, K. Pierściński, D. Pierścińska, I. Sankowska, J. Kubacka-Traczyk, M. Sakowicz, M. Bugajski, "*Room-temperature AlInAs/InGaAs/InP quantum cascade lasers, Photonics Letters of Poland*", vol. 6, nr. 3, (2014)

[7] I. Sankowska, P. Gutowski, A. Jasik, K. Czuba, J. Dąbrowski, M. Bugajski, "*On the onset of strain relaxation in the $Al_{0.45}Ga_{0.55}As/In_xGa_{1-x}As$ active region in quantum cascade laser structures*" J. Appl. Crystallogr. 50, 1376 (2017)

[8] P. Gutowski, I. Sankowska, P. Karbownik, O. Serebrennikowa, M. Morawiec, E. Pruszyńska-Karbownik, K. Gołaszewska-Malec, D. Pierścińska, K. Pierściński, J. Muszalski, M. Bugajski, "*MBE growth of strain compensated InGaAs/InAlAs/InP quantum cascade lasers*", Journal of Crystal Growth, 466, 22-29 (2017)

[9] D. Pierścińska, P. Gutowski, G. Hałdaś, A. Kolek, I. Sankowska, J. Grzonka, J. Mizera, K. pierściński, M. Bugajski, *Above room temperaturę operation of InGaAs/AlGaAs/GaAs quantum cascade lasers*, Semicond. Sci. Technol. 33, 035006 (2017