

Stan badań nad laserami kaskadowymi na zakres średniej podczerwieni w ITE

Streszczenie. W artykule omówione zostaną parametry laserów kaskadowych wytwarzanych w Instytucie Technologii Elektronowej. Wskazane zostaną obszary w których lasery wytwarzane w kraju mogą konkurować 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 $\lambda=9.0\ \mu\text{m}-10.0\ \mu\text{m}$. The second, was based on strain-compensated active region designed for wavelengths of $\lambda=4.5\ \mu\text{m}-5.5\ \mu\text{m}$. 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)

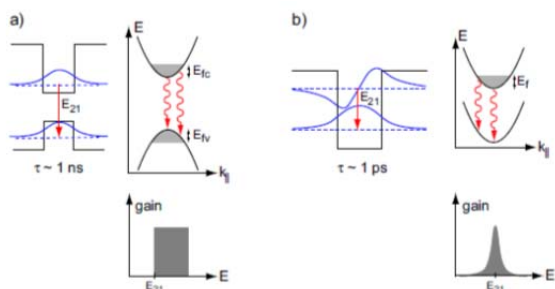
Słowa kluczowe: kwantowe lasery kaskadowe, średnia podczerwień
Keyword: quantum lasers, cascade lasers, mid-nfrared

Wprowadzenie

Prace nad laserowymi źródłami 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.

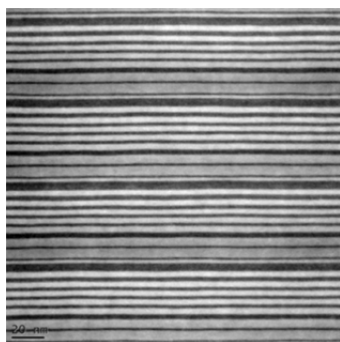


Rys.1 Przejścia międzypasmowe w jamie kwantowej (a), przejścia wewnątrzpasemowe w jamie kwantowej (b).

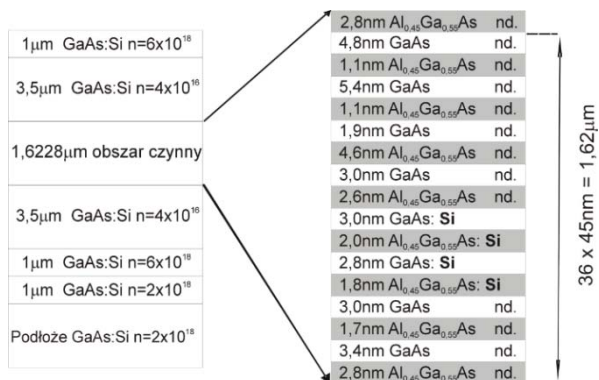
Pozwala to na pokrycie szerokiego spektrum, długości fal od średniej do dalekiej podczerwieni za pomocą struktur wytwarzanych na bazie GaAs i InP, materiałów, których technologia jest doskonale opanowana. Kaskadowa natura generacji promieniowania umożliwia powielanie fotonów i uzyskiwanie mocy przekraczających 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 ($\sim 9.0\ \mu\text{m}-10.0\ \mu\text{m}$). Lasery z AlInAs/InGaAs/InP emitują promieniowanie z zakresu 4.5 μm – 5.5 μm zakresu $\sim 9.0\ \mu\text{m}$. 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 ($\sim 9.0\ \mu\text{m}-10.0\ \mu\text{m}$) [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.

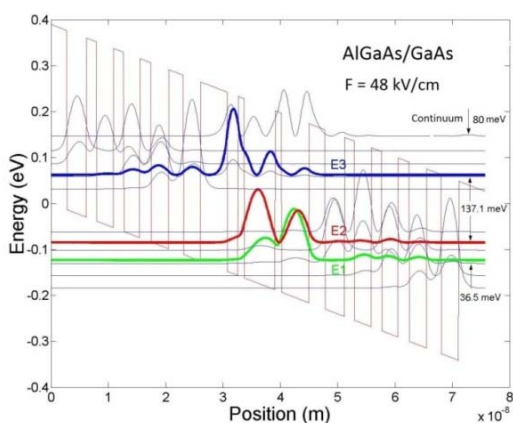


Rys.2 Obraz TEM fragmentu obszaru czynnego lasera kaskadowego. Ciemne linie odpowiadają barierom z $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$, jasne studniom potencjału z GaAs.



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

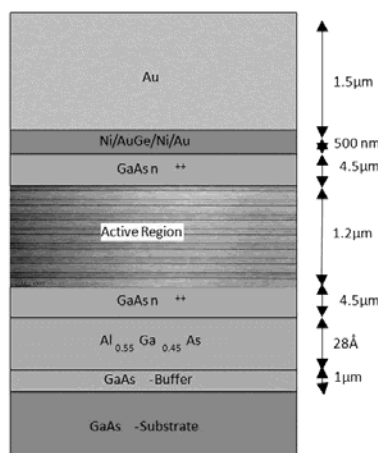
Obszar aktywny lasera tworzy układ 3 studni kwantowych o grubości pojedynczych nanometrów, sprzężonych z spersyciowym injektorem (patrz rys.4). Układ ten powtórzony kilkadziesiąt razy tworzy rdzeń lasera. Falowód lasera składa się z warstw GaAs. Dla poprawy ograniczenia pola e-m wykorzystywany jest efekt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



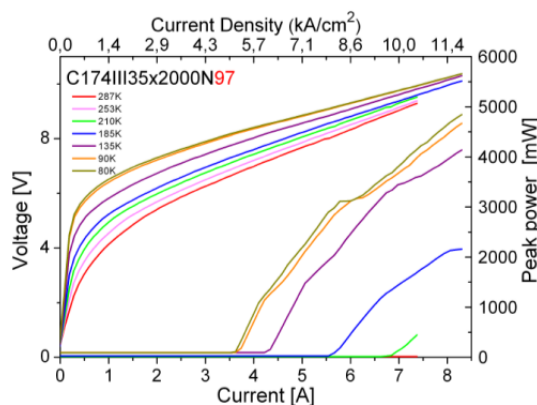
Rys.4 Laser kaskadowy z $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.4\mu\text{m}$) o konstrukcji 3QW. Obszar aktywny tego lasera składa się z 36 modułów, z których każdy zbudowany jest z 8 sprzężonych kwantowych studni potencjału. Przejście laserowe zachodzi pomiędzy poziomem E3 \rightarrow 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 $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.4\mu\text{m}$) 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 ($\sim 9.0\mu\text{m}$ - $10.0\mu\text{m}$).



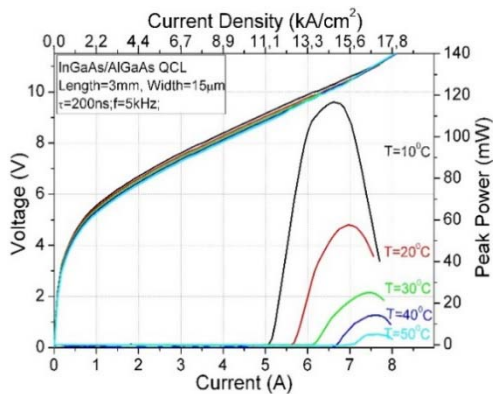
Rys.6 Charakterystyki prądowo-napięciowe (I-V) i moc optyczna -- prąd (P-I) lasera kaskadowego z $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.4\mu\text{m}$) reprezentującego aktualny poziom technologii w ITE w tym zakresie.

Tabela 1. Parametry laserów kaskadowych z $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.4\mu\text{m}$).

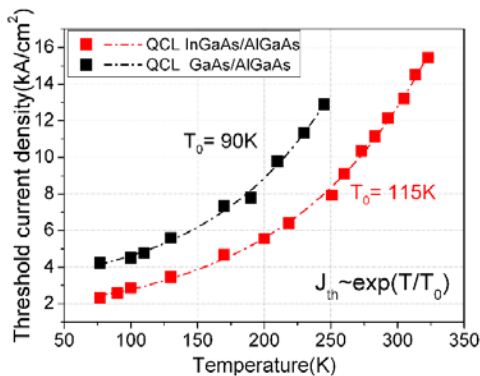
Parametr	Opis	Wartość
Gęstość prądu progowego	$J_{th}(77K)$	5 kA/cm^2 – 6 kA/cm^2
Gęstość prądu progowego	$J_{th}(300K)$	10 kA/cm^2 – 15 kA/cm^2
Napięcie progowe	$V_{th}(77K)$	~ 8.5 V
Moc w impulsie	P (77K)	> 4 W (max 6 W)
Moc w impulsie	P (300K)	25 mW – 35 mW
Długość fali	λ (300K)	$\sim 9.4\mu\text{m}$ - $9.5\mu\text{m}$
Temperatura charakterystyczna	T_0	~ 100 K
Rezystancja szeregową	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 °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 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.2 \mu\text{m}$)



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

Tabela 2. Parametry laserów $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.4 \mu\text{m}$) i $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.2 \mu\text{m}$).

	GaAs/AlGaAs QCL	InGaAs/AlGaAs QCL
J_{th} (77 K)	4.2 (kA/cm^2)	2.2 (kA/cm^2)
J_{th} (250 K)	13.3 (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 %
η (77 K)	0.6 W/A	1.3 W/A
Tmax	273 K (0 °C)	323 K (50 °C)
P (77 K)	2.2 W	5.2 W
P (250 K)	90 mW	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 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ ($\lambda = 9.2 \mu\text{m}$) przedstawione są na rys.7 i 8. Porównanie

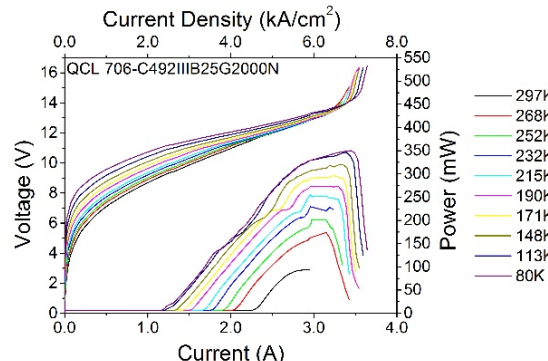
temperaturowych zależności gęstość prądu progowego dla obu typów laserów przedstawione jest na Rys.8 a ich podstawowe parametry zebrane są w tabeli 2.

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

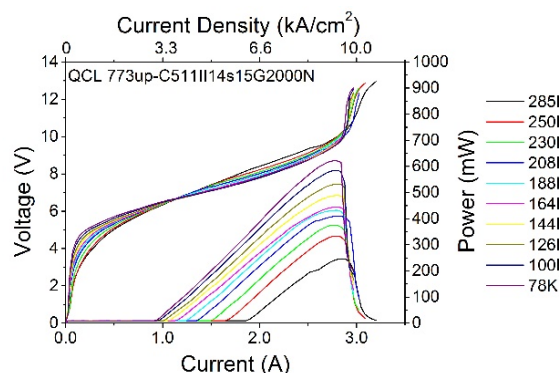
Alternatywne podejście do wytworzenia lasera na długość fali rzędu 9-10 μm polega na wykorzystaniu heterostruktur InGaAs/InAlAs/InP. W przypadku gdy heterostruktura jest dopasowana sieciowo do InP, nieciągłość pasma przewodnictwa wzrasta do ~520 meV w porównaniu z 390 meV dla GaAs/AlGaAs, co pozwala 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 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$.

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 ($\lambda = 9.4 \mu\text{m}$) 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 °C) i dostarczają mocy rzędu kilkuset mW w impulsie. Są to parametry umożliwiające ich szerokie zastosowanie w ochronie środowiska, przemyśle i medycynie.



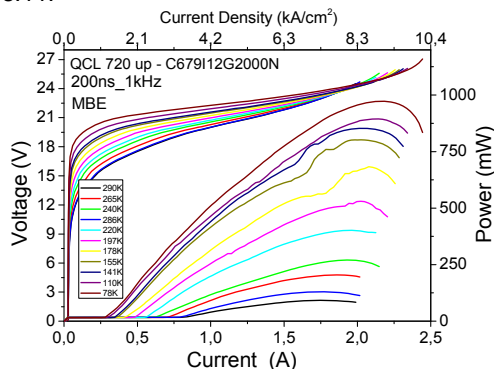
Rys.9 Charakterystyki (I-V) i (P-I) lasera kaskadowego z InGaAs/InAlAs/InP ($\lambda = 9.4 \mu\text{m}$) wytworzonego w technologii MBE.



Rys.10 Charakterystyki (I-V) i (P-I) lasera kaskadowego z InGaAs/InAlAs/InP ($\lambda = 9.4 \mu\text{m}$) 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/cm²).

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 Kuzmich 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 temperature operation of InGaAs/AlGaAs/GaAs quantum cascade lasers, Semicond. Sci. Technol. 33, 035006 (2017)