

Autoreferat

1. Imię i nazwisko:

Anna Szerling

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.:

- 19.09.2002 - Magister inżynier, Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, kierunek: fizyka techniczna, specjalność: optoelektronika. Praca magisterska pt. „Wpływ pokryć dielektrycznych AR i HR na parametry laserów półprzewodnikowych z rezonatorem Fabry’ego – Perota”, promotor: prof. dr hab. Maciej Bugajski
- 30.09.2008 - Doktor nauk technicznych, Instytut Technologii Elektronowej, dziedzina: Nauki techniczne, dyscyplina: Elektronika. Rozprawa doktorska p.t. „Technologia wytwarzania krawędziowych laserów półprzewodnikowych dużej mocy na pasmo 980 nm”; promotor: dr hab. Kazimierz Regiński, recenzenci: prof. dr hab. inż. Andrzej Czerwiński, prof. dr hab. Marek Tłaczała. Praca wyróżniona decyzją Rady Naukowej Instytutu Technologii Elektronowej.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych

03.2002	stażysta, Zakład Fizyki i Technologii Struktur Niskowymiarowych, ITE
06.2002	technik, Zakład Fizyki i Technologii Struktur Niskowymiarowych, ITE
09.2002	inżynier, Zakład Fizyki i Technologii Struktur Niskowymiarowych, ITE
01.2003	asystent, Zakład Fizyki i Technologii Struktur Niskowymiarowych, ITE
09.2006	asystent, p.o. Kierownika Laboratorium Wytwarzania Przyrządów Fotonicznych, Zakład Fotoniki, ITE
03.2007	asystent, Kierownik Laboratorium Wytwarzania Przyrządów Fotonicznych, Zakład Fotoniki, ITE
10.2008	adiunkt, Kierownik Laboratorium Wytwarzania Przyrządów Fotonicznych, Zakład Fotoniki, ITE
01.2014	adiunkt, Zakład Mikro i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych, ITE

03.2015 – do teraz; adiunkt, z-ca Kierownika Zakładu Mikro i Nanotechnologii
Półprzewodników Szerokoprzerwowych, ITE

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

Jako **osiągnięcie naukowe** wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595, Dz. U. z 2005r. nr 164, poz. 1365 oraz Dz. U. z 2011r. nr 84, poz. 455), wskazuję jednotematyczny cykl 10 publikacji pt. „**Optymalizacja technologii wytwarzania laserów kaskadowych jako narzędzie podnoszenia ich funkcjonalności**”

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),

H1. Szerling A., Karbownik P., Kosiel K., Kubacka-Traczyk J., Pruszyńska-Karbownik E., Płuska M., Bugajski M., „Mid-Infrared GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers Technology”, *Acta Physica Polonica A*, vol. 116, str. S45-S48, (2009); IF (2009) = 0,433; MNiSW = 15 pkt

H2. Barańska A., Szerling A., Karbownik P., Hejduk K., Bugajski M., Łaszcz A., Gołaszewska-Malec K., Filipowski W., „Ohmic Contacts for Room-Temperature AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers (QCL)”, *Optica Applicata*, vol. XLIII, nr. 1, str. 5-15, (2013); IF (2013) = 0,643; MNiSW = 15 pkt

H3. Szerling A., Kosiel K., Karbownik P., Wójcik-Jedlińska A., Płuska M., „Chapter 20. Influence of Mesa-Fabrication-Dependent Waveguide-Sidewall Roughness on Threshold Current and Slope Efficiency of AlGaAs/GaAs Mid-Infrared Quantum-Cascade Lasers”, *Terahertz and Mid Infrared Radiation. Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz)*, [NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics] Springer, Dordrecht, str. 143-151, (2014)

H4. Kosiel K., Kubacka-Traczyk J., Sankowska I., **Szerling A.,** Gutowski P., Bugajski M., „Multi-Step Interrupted-Growth MBE Technology for GaAs/AlGaAs (~9.4 μm) Room Temperature Operating Quantum-Cascade Lasers”, *Opto-Electronics Review*, vol. 20, nr. 3, str. 239-246, (2012); IF (5years) = 1,374; IF (2012) = 0,923; MNiSW = 20 pkt

H5. Szerling A., Kruszka R., Kosiel K., Wzorek M., Gołaszewska K., Trajnerowicz A., Karbownik P., Kuc M., Czyszanowski T., Walczakowski M., Pałka N., „Al_{0.45}Ga_{0.55}As/GaAs-based single-mode distributed-feedback quantum-cascade lasers with surface gratings”, *Journal of Nanophotonics* 11.2, 026004-1 – 026004-13, (2017); IF (5years) = 1,562; IF (2016/2017) = 1,325; MNiSW = 25 pkt

H6. Szerling A., Kosiel K., Kozubal M., Myśliwiec M., Jakiela R., Kuc M., Czyszanowski T., Kruszka R., Pągowska K., Karbownik P., Barcz A., Kamińska E., Piotrowska A., „Proton Implantation for the isolation of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers”, *Semiconductor Science and Technology*, vol. 31, nr. 7, str. 075010, 11 str., (2016); IF (2016) = 2,305; MNiSW = 30 pkt

H7. Szerling A., Slivken S., Razeghi M., „High peak power 16 μm InP-related quantum cascade laser”, *Opto-Electronics Review*, vol. 25, str. 205–208, (2017); IF (5years) = 1,374; IF (2016) = 1,449; MNiSW = 20 pkt

H8. Szerling A., Kosiel K., Szymański M., Wasilewski Z., Gołaszewska K., Łaszcz A., Płuska M., Trajnerowicz A., Sakowicz M., Walczakowski M., Pałka N., Jakiela R., Piotrowska A., „Processing of AlGaAs/GaAs Quantum-Cascade Structures for Terahertz Laser”, *Journal of Nanophotonics*, vol. 9, nr. 1, str. 093079-1-17, (2015); IF (5years) = 1,562; IF (2015) = 1,488; MNiSW = 25 pkt

H9. Szymański M., **Szerling A.**, Kosiel K., Płuska M., „A Study of Different Metals Employed in Metal-Metal Waveguides for Terahertz Quantum Cascade Lasers”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 49, str. 275102 (7str.), (2016); IF (2016/2017) = 2,588; MNiSW = 35 pkt

H10. Szerling A., Kosiel K., Prokaryn P., Szymański M., Trajnerowicz A., Sakowicz M., Karbownik P., Płuska M., Walczakowski M., Pałka N., „AlGaAs/GaAs Terahertz Quantum Cascade Laser with Gold-Based Metal - Metal Waveguide”, M.F. Pereira, O. Shulika (eds.), THz for CBRN and Explosives Detection and Diagnosis, NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, Springer, (2017), DOI 10.1007/978-94-024-1093-8_17

Oświadczenia współautorów publikacji, potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku znajdują się w załączniku nr 5.

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

1. Wprowadzenie

Lasery kaskadowe (ang. *Quantum Cascade Lasers*, QCLs) to unipolarne źródła promieniowania koherentnego, których podstawy teoretyczne zostały przedstawione w latach 70, a po raz pierwszy zostały wykonane w 1994 roku [1]. Zasada ich działania opiera się na tunelowym transporcie nośników i przejściach wewnątrzprzasmowych [1, 2]. Długość fali generowanej przez lasery kaskadowe obejmuje zakres zarówno średniej (MIR), dalekiej (FIR) podczerwieni, jak i promieniowania terahercowego (THz), z wyjątkiem obszaru promieniowania resztkowego (*Reststrahlen band*), który dla materiałów III-V, z których najczęściej wykonuje się struktury epitaksjalne – obszary aktywne omawianych przyrządów, leży w przedziale od 20 do 60 μm . Struktury wykonane na podłożach InP i GaAs okazały się

być szczególnie efektywnymi źródłami promieniowania w zakresie MIR [3-5] – zwłaszcza promieniowania o długości fali do 12 μm , ale także źródłami promieniowania w zakresie FIR jak i promieniowania terahercowego [3, 6-9]. Lasery te znalazły zastosowanie w systemach wykrywania gazów niebezpiecznych (np. w układach detekujących NH_3 , CO_2 , NO , CH_4) [10-12], diagnostyce medycznej [13] oraz w systemach monitorujących środowisko [14].

Gdy porównujemy lasery kaskadowe z innymi źródłami promieniowania podczerwonego, to ich główne zalety są następujące: (i) – możliwość zaprojektowania struktury emitującej określoną długości fali z szerokiego spektrum, przy użyciu tylko jednego systemu materiałowego, np. AlGaAs/GaAs; (ii) – możliwość zmiany długości emitowanej fali poprzez zmianę temperatury pracy przyrządu; (iii) – są to monolityczne o małych rozmiarach przyrządy; (iv) – charakteryzują się wysokimi mocami optycznymi uzyskanymi z pojedynczego lasera.

Pomimo wspomnianych wyżej zalet, główną trudność stwarza ich technologia, którą możemy podzielić na **dwie zasadnicze składowe**: technologię epitaksji struktur półprzewodnikowych oraz technologię wytwarzania przyrządów ze struktur półprzewodnikowych (ang. *device processing/device fabrication*). W tekście przedstawiającym mój dorobek opisuję opracowywaną i optymalizowaną przeze mnie technologię przetwarzania struktur epitaksjalnych, której celem i wynikiem są działające przyrządy (lasery kaskadowe), przy czym stosuję w nim zamiennie kilka określeń oznaczających każdorazowo tę właśnie technologię. Te określenia to: technologia wytwarzania przyrządu, obróbka technologiczna oraz *processing*. Określenia te nie odnoszą się natomiast do technologii epitaksji struktur półprzewodnikowych, którą w ramach swojego opisywanego dorobku nie zajmowałam się.

Zasada działania oraz skomplikowana konstrukcja laserów kaskadowych nakładają warunek zastosowania wysokiej dokładności, jednorodności i powtarzalności w technologii struktur, zarówno w technologii epitaksji, jak i w technologii wytwarzania przyrządów [15].

Obszar aktywny laserów kaskadowych jest periodyczny, wielomodułowy i zbudowany jest ze sprzężonych kwantowych studni potencjału (a każdy moduł typowo składa się z fragmentu pełniącego rolę iniektora elektronów oraz z emitera fotonów). Obszar aktywny lasera zazwyczaj zawiera setki warstw o grubościach rzędu nanometrów. Wysokie wymagania stawiane technologii epitaksji związane są z koniecznością dokładnego i powtarzalnego wykonania sekwencji bardzo cienkich warstw tworzących periodyczny obszar aktywny, w którym wygenerowany musi być odpowiedni zespół funkcji falowych (tzw. inżynieria funkcji falowych, ang. *wave function engineering*) [16-18]. Zasadniczo, dokładność grubości wykonanych warstw powinna być lepsza niż kilka procent. Innym ważnym elementem technologii epitaksji jest optymalizacja poziomu domieszkowania warstw pełniących rolę iniektorów, co jest konieczne do zapewnienia wystarczająco szerokiego dynamicznego zakresu pracy lasera [10, 17,19,20].

Wysokie wymagania postawione technologii wytwarzania przyrządów są niezbędnym warunkiem uzyskania pracujących laserów oraz dalszego zwiększania ich funkcjonalności i polepszenia ich parametrów, takich jak moc optyczna, maksymalna temperatura pracy, prądy progowe czy też ścisła kontrola ich struktury modowej. Prace

proceeding to the increase of device functionality must be focused on the control of key physical phenomena, such as: reduction of optical losses, control of thermal properties through reduction of heat generation or its effective extraction, and also damping of optical modes in lasers.

In my work, I present my achievements in the development of technology for the production of three different types of cascade lasers, emitting three different wavelengths. I also present my research on further increasing the functionality of these lasers through optimization/change of technology for their production, on the way to change of device construction and/or production conditions of lasers. These changes led to the elimination/control of the mentioned above unwanted or parasitic physical phenomena. Including this issue in a different way, I describe the development of appropriate technological platforms in the field of technology for the production of devices, thanks to which operating lasers and further development of these technologies.

Technologia wytwarzania przyrządów jest bardzo wymagającą i skomplikowaną technologią, która obejmuje wiele różnych wyrefinowanych technik, takich jak: fotolitografię, trawienie w roztworach, trawienie plazmowe, chemiczne i/lub plazmowe czyszczenie powierzchni, osadzanie warstw dielektrycznych lub metalicznych z zastosowaniem różnych technik (np. magnetronowe rozpylanie katodowe, PECVD, kąpiele galwaniczne i in.), szlifowanie podłoży, montaż typu: *die bonding*, *wire bonding*, *wafer bonding*. Wszystkie wymienione techniki wymagają zastosowania odpowiedniego podejścia dostosowanego do ich specyficznych możliwości. Umiejętne dopasowanie wszystkich technik w ramach opracowywanej technologii jest kluczowe dla uzyskania działających laserów.

Zasilanie elektryczne laserów kaskadowych może generować nieintencjonalny silny efekt samoogrzewania (ang. *self-heating effect*). Prąd zasilający przyrząd może zostać zmniejszony poprzez zredukowanie obszaru pompowanego, do czego konieczne jest zastosowanie odpowiedniej technologii wytwarzania laserów. Znanych jest kilka rozwiązań technologicznych mających na celu ograniczenie rozprzyszczenia prądu, wśród których najbardziej popularnym jest zastosowanie konstrukcji z falowodem grzbietowym. Falowód taki musi być na tyle głęboki, aby odseparować cały obszar aktywny lasera. W tego typu konstrukcji, w celu redukcji strat optycznych, bardzo ważnym wymogiem są wysokiej jakości, gładkie ściany boczne mesy – falowodu grzbietowego [H1, H3, 21]. Znanych jest kilka procesów, takich jak straty nośników, rozprzyszczenie prądu, straty wewnętrzne i straty związane z rozpraszaniem promieniowania, straty na lustrach oraz zagadnienia związane z odprowadzaniem ciepła, które mogą negatywnie wpływać na parametry laserów półprzewodnikowych, takie jak gęstość prądu progowego (J_{th}), sprawność kwantowa (η_s) czy temperatura charakterystyczna (T_0). Zastosowanie odpowiedniej konstrukcji czy też technologii przyrządów może być rozwiązaniem na powyżej wspomniane pasożytnicze zjawiska. Dla przykładu, warto skoncentrować się na zagadnieniach związanych ze stratami wynikającymi z rozpraszania promieniowania (ang. *scattering losses*) spowodowanymi nieintencjonalnymi nierównościami ścian bocznych mesy tworzącej falowód grzbietowy. Gładka morfologia tych ścian jest warunkiem koniecznym, aby w laserze wzbudzona została akcja laserowa, gdyż nierówności

ścian są źródłem strat optycznych, które mogą powodować silne pogorszenie parametrów lasera. Straty związane z rozpraszaniem promieniowania rosną z kwadratem chropowatości ścian bocznych (Eq. 20.1 w [H3]), i dlatego też wzrost nierówności powoduje szybki wzrost gęstości prądu progowego (Eq. 2.2 w [H3]) oraz szybki spadek sprawności kwantowej lasera (Eq. 20.3 w [H3]).

Zastosowanie konstrukcji z falowodem grzbietowym wymaga zastosowania izolacji elektrycznej wokół grzbietu mesy. Dla przykładu, izolacja może zostać wykonana metodą osadzania odpowiednich warstw dielektrycznych [H1]. Jednakże, takie warstwy izolujące mogą wprowadzać dodatkowe straty optyczne [15]. Jest to spowodowane tym, iż rząd częstości drgań wiązań molekularnych w warstwach dielektrycznych odpowiada zakresowi promieniowania średniej i dalekiej podczerwieni, co jest powodem nieintencjonalnej absorpcji promieniowania laserowego [15]. Dla przykładu, warstwa SiO₂ może absorbować promieniowanie podczerwone [22]. W kilku publikacjach przedstawiono, iż kształt widma absorpcji konkretnej warstwy SiO₂ może zależeć od warunków, w jakich ta warstwa została osadzona [23-25], a tym samym widma absorpcji SiO₂ mogą być różne dla warstw otrzymanych różnymi metodami. Również metal może być źródłem strat absorpcyjnych (już dla promieniowania z zakresu dalekiej podczerwieni). Dla laserów emitujących promieniowanie FIR ($\lambda > 13\mu\text{m}$) obliczenia pokazują trzykrotny wzrost strat absorpcyjnych, jeśli na grzbiecie falowodu występuje ciągła warstwa metalu [26].

Dlatego też należy uwzględnić dwa główne zagadnienia w technologii wytwarzania laserów kaskadowych z falowodem grzbietowym, które mogą spowodować wzrost strat falowodowych w laserze. Są to: absorpcja spowodowana warstwami dielektrycznymi oraz rozproszenia promieniowania wynikające z nierówności ścian bocznych mes [15].

W literaturze przedstawione są różne typy konstrukcji przyrządów – laserów kaskadowych i różne podejścia technologiczne ich wykonania [15, 27]. Page i in. zaprezentowali falowód grzbietowy wykonany w konstrukcji dwukanałowej (położenie kanałów definiuje grzbiet falowodu lasera), który umożliwił właściwe przekrywanie się bocznego modu z obszarem wzmocnienia, a także umożliwił wykonywanie stabilnego montażu w konfiguracji z warstwami epitaksjalnymi do dołu (ang. *epi-down*), co jest konieczne do efektywnego chłodzenia przyrządów [28]. Sirtori i in. [15] przedstawili taką samą konstrukcję, w której wykonano stosunkowo płytką implantację jonową na głębokość nieco powyżej obszaru aktywnego ($\sim 3,3\ \mu\text{m}$). Implantacja została użyta do izolacji zamiast warstw dielektrycznych. W przedstawionym rozwiązaniu obszary implantowane zostały rozszerzone na część obszaru falowodu grzbietowego, co spowodowało że okno dla zasilania było węższe niż falowód zdefiniowany przez mesę dwukanałową [15,29].

Zasilanie laserów kaskadowych zazwyczaj wymaga zastosowania relatywnie wysokich napięć – kilku woltów, jak również relatywnie wysokich gęstości prądów – kilku kA/cm² (głównie dla laserów kaskadowych osadzanych na podłożach GaAs). Jest to powodem szczególnego zapotrzebowania na niskorezystywne kontakty omowe w celu zminimalizowania szeregowej rezystancji laserów oraz ograniczenia niepożądanego grzania przyrządów. Wysokiej jakości kontakty omowe pozwalają uzyskać niskie napięcia progowe oraz ograniczają ilość generowanego ciepła w strukturze. Kontakty muszą charakteryzować się stabilnością termiczną i jednorodną międzypowierzchnią metal – półprzewodnik. Ważne

jest również ograniczenie dyfuzji metalicznych składników kontaktu do struktury półprzewodnikowej. Najpopularniejszym systemem metalicznym tworzącym kontakty omowe dla GaAs domieszkowanego na typ n oraz heterostruktur AlGaAs/GaAs jest układ oparty na AuGe/Ni/Au [30-35].

W celu zwiększenia funkcjonalności laserów, wytwarza się jednomodowe lasery kaskadowe. Znajdują one wiele zastosowań, jako skuteczne źródła promieniowania, szczególnie użyteczne w wysoko selektywnych systemach wykrywania gazów niebezpiecznych oraz w komunikacji w wolnej przestrzeni [36, 37, 38]. Można wyróżnić kilka metod wytwarzania laserów jednomodowych [37-40]. Najpopularniejszymi są lasery z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym – lasery DFB (ang. *distributed feedback lasers*) [37-39]. W laserach DFB wytwarzana jest periodyczna siatka dyfrakcyjna. Jednowymiarowa siatka powoduje rozproszenie braggowskie i zapewnia optyczne sprzężenie zwrotne. Laser DFB działa jako wąski filtr, dzięki któremu wybierana jest pojedyncza linia z charakterystyki wzmocnienia o konkretnej częstotliwości, dla której spełniony jest warunek odbicia braggowskiego. W celu uzyskania sprzężenia zwrotnego, okres siatki (Λ) musi być wielokrotnością połowy długości fali promieniowania generowanego przez ośrodek [40].

Wyróżnia się trzy różne najpopularniejsze metody wytwarzania laserów DFB, dobierane każdorazowo do konstrukcji struktury epitaksjalnej [37, 41].

Jak już wcześniej podkreślono, poprawna technologia *processingu* laserów kaskadowych, pozwalająca otrzymać wysokiej jakości przyrządy, tj. o niskim prądzie progowym, wysokiej temperaturze pracy, wysokiej mocy emitowanej i wysokiej sprawności stanowi duże wyzwanie nawet w przypadku laserów generujących promieniowanie z zakresu MIR. Gdy zbliżamy się do obszaru promieniowania resztkowego (*Reststrahlen band*) od strony krótszych fal (Promieniowanie FIR) lub od strony dłuższych fal (promieniowanie THz) technologia laserów kaskadowych staje się jeszcze bardziej wymagająca. Jeśli chodzi o źródła promieniowania z zakresu długości fal 12-20 μm dotychczas zaprezentowano jedynie nieliczne lasery kaskadowe generujące promieniowanie z tego zakresu, pomimo istniejących strategicznych obszarów zastosowań takich źródeł [42, 43]. W szczególności w zakresie 12-16 μm można wykrywać duże cząsteczki węglowodorów jak na przykład związki BTX (benzen, toluen, ksylen) [36], ważne w przemyśle rafineryjnym [9]. Źródła emitujące dłuższe fale z tego zakresu byłyby bardzo cenne w radioastronomii jako lokalne oscylatory w detektorach heterodynowych [9].

Promieniowanie terahercowe ma szerokie spektrum istniejących i potencjalnych zastosowań, począwszy od pomiarów i diagnostyki stosowanych w dziedzinach takich jak spektroskopia molekularna, poprzez trójwymiarowe obrazowanie w biologii, medycynie, wojskowości, bezpieczeństwie publicznym aż do komunikacji w wolnej przestrzeni. Obecnie maksymalne temperatury pracy THz laserów kaskadowych nie przekraczają ~ 200 K [44], jeśli ich działanie nie jest oparte na mieszanii częstotliwości (ang. *difference frequency generation effect*). Dlatego też technologia kaskadowych laserów terahercowych nadal jest w początkowej fazie rozwoju. Ogólnym problemem wszystkich laserów THz QCL jest bardzo niska efektywność pompowania obszaru aktywnego, co jest wynikiem dużych trudności związanych z uzyskaniem inwersji obsadzeń pomiędzy poziomami stanów kwantowych oddzielonymi energią z zakresu ~ 4 -40 meV. Innym kluczowym problemem jest absorpcja na swobodnych nośnikach, która jest bardzo intensywna w tym zakresie promieniowania

i odpowiedzialna za straty falowodowe w laserze. Absorpcja na swobodnych nośnikach i straty falowodowe są powodem niskich maksymalnych temperatur pracy laserów THz QCL, co utrudnia ich dalszy rozwój i szerokie zastosowanie.

Prawdopodobny dalszy wzrost maksymalnej temperatury pracy terahercowych laserów kaskadowych możliwy jest na drodze zarówno optymalizacji konstrukcji obszaru aktywnego jak i konstrukcji oraz technologii płaszczu falowodu. Wyróżnia się dwa typy falowodów w laserach THz QCL: falowód plazmonowy typu SISP (ang. *semi-insulating surface plasmon waveguide*), w którym występują relatywnie wysokie straty na swobodnych nośnikach, charakterystyczne dla wysokodomieszkowanych struktur półprzewodnikowych oraz falowód o konstrukcji metal-metal [45,46]. Ten drugi rodzaj falowodu zbudowany jest z dwóch płaszczy metalicznych, które otaczają półprzewodnikowy obszar aktywny lasera. Głębokość wnikania w metal (ang. *skin depth effect*) przez promieniowanie terahercowe jest niewielka, sięgająca kilkunastu nanometrów, dlatego też wykonanie płaszczy metalicznych umożliwia wytworzenie stosunkowo niskostratnych falowodów i uzyskanie współczynnika uwięzienia bliskiego jedności. Jednak nawet w laserach z płaszczy metalicznymi około 30-70% wartości strat falowodowych mogą być zależne od płaszcza falowodu. Wartości te będą zależne od długości fali emitowanej przez laser, schematu rdzenia falowodu oraz poziomu jego domieszkowania [46]. Straty optyczne wynikające z zastosowania płaszczy metalicznych będą zależały od użytego metalu, wyróżnia się kilka typów metalicznych płaszczy falowodowych [46]. Dotychczas, ukazało się niewiele publikacji przedstawiających właściwości tych warstw metalicznych [47]. Badania naukowe dotyczące morfologii warstw metalicznych tworzących płaszcze falowodów i odpowiadającej im morfologii międzypowierzchni metal/półprzewodnik nie są dostępne. Innym bardzo ważnym aspektem jest to, że metaliczne warstwy wytworzone jako płaszcze falowodu muszą również pełnić rolę stabilnych termicznie i niskorezystywnych kontaktów elektrycznych. Historycznie zastosowano system Ti/Au do formowania metalicznych płaszczy. Lasery THz QCL z płaszczy metalicznymi były wykonane z użyciem niskotemperaturowego montażu, gdzie spoiwem był ind (ang. *low temperature In-Au metallic bonding*) [48,49]. Autorzy stwierdzili, iż zastosowanie warstw Ti/Au było powodem uzyskania relatywnie wysokich napięć progowych [49]. Williams i in. [50,51] zaproponowali zastosowanie Ta/Cu jako warstw płaszczy oraz jako warstw osadzanych na podłożach zastępczych (ang. *receptor*). Belkin i in. [46] porównali wpływ zastosowania dwóch różnych typów metalicznych płaszczy w laserach THz QCL na ich podstawowe parametry, z największym naciskiem na porównanie płaszczy wykonanych ze złota z płaszczy opartymi na miedzi. Wyniki wskazują, iż lasery z płaszczy miedzianymi charakteryzują się niższymi stratami falowodowymi w porównaniu z laserami, w których wykonano płaszcze Ti/Au [46].

2. Omówienie celów naukowych i osiągniętych wyników

W osiągnięciu przedstawiłam moje badania nad technologią wytwarzania i charakteryzacją laserów kaskadowych. Punktem wyjściowym dla tej części technologii były struktury epitaksjalne opracowane i wykonane przez dr hab. Kamila Kosiela (Instytut Technologii Elektronowej, Polska) [H1-H6; H8-H10], prof. dr. Zbigniewa (Zbigo) Wasilewskiego (University of Waterloo, Kanada) [H8] oraz Prof. Steven'a Slivken'a (the Center of Quantum Devices (CQD), Northwestern University, USA) [H7]. Wyniki badań zaprezentowane w autoreferacie obejmują działające lasery z opisem ich konstrukcji (chodzi tu o konstrukcję przyrządu) oraz technologii wytwarzania.

Wyniki badań zebrane w mojej dysertacji habilitacyjnej zostały przedstawione w serii publikacji [H1-H10]. Wspólnym mianownikiem tych prac jest opracowanie podstawowej technologii wytwarzania trzech różnych wybranych typów laserów QCL, emitujących w trzech różnych zakresach długości fali: MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$), FIR ($\lambda \sim 16 \mu\text{m}$), THz ($\nu \sim 3 \text{ THz}$, tj. $\lambda \sim 100 \mu\text{m}$), oraz badania nad poprawą ich funkcjonalności poprzez zmianę ich konstrukcji lub technologii wytwarzania. Opracowane procedury technologiczne są zróżnicowane, ze względu na konieczność dostosowania ich do specyfiki związanej z laserami emitującymi w różnych zakresach długości fali.

Prace badawcze zawierały:

- opracowanie standardowej technologii wytwarzania laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) [H1],
- rozwój technologii wytwarzania wysokiej jakości kontaktów omowych dla laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) [H2],
- rozwój technologii wytwarzania wysokiej jakości falowodu grzbietowego o konstrukcji dwukanałowej dla laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) [H3],
- badanie wpływu pokryć wysokoodbiciowych (ang. *High Reflective (HR) Coatings*) na wzrost temperatury pracy w laserach $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) [H4],
- opracowanie technologii siatek braggowskich jako struktur zawężających oraz stabilizujących emisję lasera dla laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) [H5],
- opracowanie szczególnego wariantu technologii wytwarzania laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$). Ten typ technologii nie zawiera etapu formowania falowodu

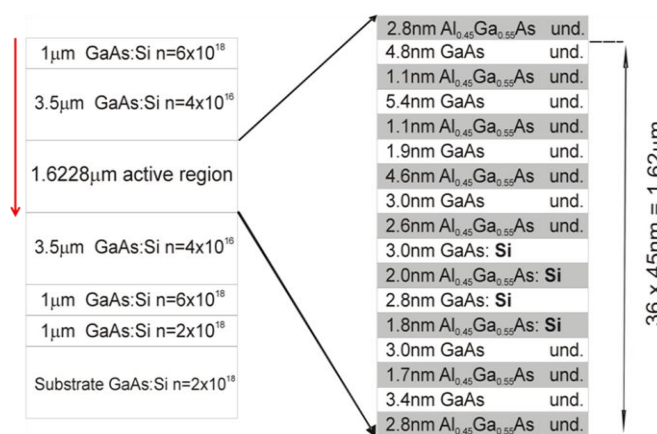
grzbietowego. Zamiast wytwarzania falowodu grzbietowego w celu izolacji elektrycznej wykonuje się implantację jonów wodoru [H6],

- opracowanie technologii wytwarzania laserów $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ QCL emitujących promieniowanie w zakresie dalekiej podczerwieni, FIR ($\lambda \sim 16 \mu\text{m}$) [H7],
- opracowanie technologii wytwarzania laserów $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu terahercowego, THz ($\nu \sim 3 \text{ THz}$, co odpowiada $\lambda \sim 100 \mu\text{m}$) [H8, H9, H10].

Badania zaprezentowane w załączonych do cyklu publikacjach [H1-H10] są oparte na pionierskich pracach nad laserami kaskadowymi emitującymi promieniowanie z zakresu MIR i THz w Polsce [H1-H6, H8-H10], jak również na pracy eksperymentalnej nad laserami kaskadowymi emitującymi promieniowanie FIR, którą wykonywałam podczas mojego stażu (Short Term Scientific Mission (STSM)) w Center of Quantum Devices (CQD) na uniwersytecie Northwestern University w USA [H7].

2.1. Lasery kaskadowe emitujące promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni [H1-H6]

Do wytwarzania laserów emitujących promieniowanie z zakresu MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$) użyłam struktur epitaksjalnych $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ (rys. 1) [H1-H6], opracowanych i wykonanych przez dr. hab. Kamila Kosiela (Instytut Technologii Elektronowej, Polska), w których obszar aktywny składał się z 36 okresów. Struktura obszaru aktywnego pierwotnie została zaproponowana i wykonana przez Page i współpracowników [2].



Rys. 1. Schemat struktury lasera kaskadowego $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ [H6].

Obszar aktywny tego lasera składa się z 36 modułów, z których każdy jest zbudowany z 8 sprzężonych kwantowych studni potencjału $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$. W ramach obszaru

aktywnego domieszkowany jest jedynie fragment każdego iniektora, złożony z dwóch par studnia-bariera. Obszar aktywny lasera wbudowany jest w obszar podwójnego falowodu plazmonowego, którego płaszcz wykonany jest z GaAs:Si. Szczegółowy opis procesu epitaksji z wiązek molekularnych (ang. *Molecular Beam Epitaxy*, MBE) jest przedstawiony w pracach [H4, 52-54]. Zasada działania laserów kaskadowych wymaga uzyskania struktur półprzewodnikowych charakteryzujących się określonymi grubościami i składem poszczególnych warstw, jak również utrzymania periodyczności obszaru aktywnego. Warunkiem uzyskania akcji laserowej jest wykonanie struktur z zachowaniem ekstremalnie wysokiej precyzji geometrii obszaru aktywnego i poziomu domieszkowania warstw iniektorowych. Wykonane laserowe struktury epitaksjalne były osadzone z dokładnością lepszą niż 1% jeśli chodzi o grubości poszczególnych warstw, a dokładność uzyskanego składu warstw była na poziomie co najmniej 1% [H4].

Prace badawcze nad *processingiem* laserów emitujących promieniowanie z zakresu MIR obejmowały:

- opracowanie standardowej technologii wytwarzania laserów [H1],
- rozwój technologii wytwarzania wysokiej jakości kontaktów omowych [H2],
- rozwój technologii wytwarzania wysokiej jakości mesy – falowodu grzbietowego [H3],
- badanie wpływu pokryć wysokoodbiciowych na wzrost temperatury pracy w laserach [H4],
- opracowanie technologii siatek braggowskich [H5],
- opracowanie nowej konstrukcji lasera kaskadowego, w której nie formuje się falowodu grzbietowego ani nie osadza się warstw dielektrycznych [H6],

H1 „Mid-Infrared GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Lasers Technology”, Szerling A., Karbownik P., Kosiel K., Kubacka-Traczyk J., Pruszyńska-Karbownik E., Płuska M., Bugajski M., *Acta Physica Polonica A*, vol. 116, str. S45-S48 (2009)

W pracy [H1] przedstawiono **opracowanie standardowej technologii wytwarzania laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie w zakresie MIR.** Rezultatem opisanych badań nad technologią wytwarzania przyrządów było **uzyskanie platformy technologicznej dla technologii wytwarzania przyrządów zapewniającej uzyskanie działających laserów**, gotowej do dalszej poprawy/ulepszenia.

Opisana standardowa technologia wytwarzania obejmuje:

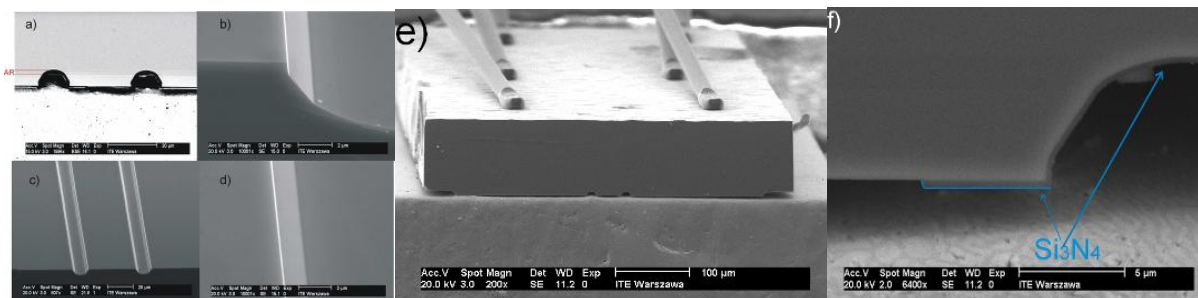
- formowanie falowodu grzbietowego, które zawiera procesy fotolitografii oraz trawienia mesy w roztworach,

- wytwarzanie izolacji dielektrycznej, poprzez procesy osadzania warstw dielektrycznych metodą PECVD, procesy fotolitografii oraz otwieranie okna pod kontakt omowy w dielektryku na grzbiecie falowodu metodą reaktywnego trawienia plazmowego,
- formowanie górnego kontaktu omowego, które obejmuje procesy fotolitografii, procesy osadzania metodą magnetronowego rozpylania katodowego, proces lift-off oraz wygrzewanie kontaktu metodą RTA (ang. *rapid thermal annealing*)
- mechaniczne pocienianie podłoża lasera QCL do około 100 μm ,
- formowanie dolnego kontaktu omowego,
- łamanie płytki na pojedyncze lasery,
- montaż laserów na miedziane chłodnice.

W tamtym czasie przedstawiona **standardowa technologia wytwarzania laserów MIR QCL została zastosowana po raz pierwszy w Polsce**. Należy również podkreślić, że w prezentowanej pracy **znajdował się element optymalizacyjny**, tzn. zastosowałam warstwę dielektryczną – **azotek krzemu (Si_3N_4)**, który pełnił rolę **izolacji elektrycznej**, zamiast zazwyczaj stosowanego do tego celu dwutlenku krzemu (SiO_2). Zostało to podyktowane tym, iż **promieniowanie o długości fali emitowanej przez opracowywane lasery było mniej absorbowane przez Si_3N_4 niż przez SiO_2** . Prawdopodobnie zastosowanie Si_3N_4 **zmniejszyło absorpcję emitowanego przez laser promieniowania**, a tym samym **zmniejszyło falowodowe straty absorpcyjne**. Zmniejszenie optycznych strat falowodowych prowadzi do **zmniejszenia gęstości prądu progowego oraz do zwiększenia maksymalnej temperatury pracy lasera**.

W celu ograniczenia rozplywu prądu w laserze uformowano falowód grzbietowy w konstrukcji dwukanałowej. Szczegóły dotyczące *processingu* wytworzonych laserów opisane są w pracy [H1]. Na rysunku 2e przedstawiono gotowy laser kaskadowy zmontowany warstwami epitaksjalnymi do dołu, na podkładce diamentowej z użyciem stopu lutowniczego AuSn, który następnie został zmontowany na chłodnicy miedzianej.

Podczas prac nad standardowym *processingiem* laserów QCL zwrócono szczególną uwagę na uzyskanie dobrej jakości ścian bocznych falowodu grzbietowego (mesy lasera). Jest to konieczne, aby zminimalizować straty związane z rozproszeniem promieniowania na nierównościach ścian bocznych (rys. 2a-d). Jak już wspomniano powyżej, jako izolację elektryczną zastosowano warstwę Si_3N_4 o grubości 300 nm (rys. 2f), która została umieszczona na powierzchni kanałów i celowo rozciągnięta na długość 5 μm na obie krawędzie falowodu grzbietowego (rys. 2f).



Rys. 2. Zdjęcie ze skaningowego mikroskopu elektronowego lasera z falowodem grzbietowym w konstrukcji mesy dwukanałowej uformowanego metodą trawienia w roztworach. Proces trawienia został zatrzymany tuż za obszarem aktywnym lasera (AR) (a); wysokiej jakości ściany boczne uformowanego falowodu grzbietowego (b-d); Laser $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL wytworzony w ITE (e) mesa z warstwą Si_3N_4 o grubości 300 nm, która została osadzona na powierzchni kanałów i celowo rozciągnięta na długość 5 μm na obie krawędzie falowodu grzbietowego (f) [H1].

Wytworzono lasery $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujące promieniowanie o długości fali $\sim 10 \mu\text{m}$, których temperatura maksymalna pracy wynosiła **262 K**, moc optyczna generowana przez lasery przekraczała **1 W** w temperaturze **77 K**, gęstości prądów progowych wyniosły ok **7 kA/cm^2** , a sprawności kwantowe przekraczały **0,6 W/A**. Przedstawione wartości mocy optycznej są wartościami dla pojedynczego zwierciadła lasera, gdyż lasery wytworzone w ramach pracy nie posiadały powłok antyrefleksyjnych i wysokoodbiciowych. [H1].

H2 “Ohmic Contacts for Room-Temperature AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers (QCL)”, Barańska A., Szerling A., Karbownik P., Hejduk K., Bugajski M., Łaszcz A., Gołaszewska-Malec K., Filipowski W., *Optica Applicata*, vol. XLIII, nr. 1, pp. 5-15 (2013)

W pracy [H2] przedstawiono **szczegółowe badania nad technologią wysokiej jakości kontaktów omowych dla laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$)**. Wynikiem opisanych badań technologicznych było **osiągnięcie optymalnego układu warstw metalicznych** osadzanych na strukturze półprzewodnikowej (chodzi tu o konstrukcję kontaktu omowego), jak również warunki jego wytwarzania ze szczególnym naciskiem na **zminimalizowanie wartości rezystywności kontaktu elektrycznego oraz stabilność termiczną kontaktu**. Zmniejszenie wartości rezystywności kontaktu powoduje **ograniczenie występowania niepożądanego efektu grzania** w laserze, co prawdopodobnie będzie skutkowało **ograniczeniem wzrostu gęstości prądu progowego lasera**. Warunkiem uzyskania **wysokiej stabilności termicznej kontaktów** było wykonanie struktury metalicznej o odpowiedniej morfologii, co również zostało zbadane w ramach tej pracy. **Wysoka termiczna stabilność kontaktów jest warunkiem koniecznym długotrwałej pracy lasera**.

Głównym celem pracy było uzyskanie długoterminowo stabilnych kontaktów omowych charakteryzujących się niską rezystywnością i gładką powierzchnią. Przeprowadzono badania nad dwoma układami metalicznymi: układ Ni/AuGe/Ni/Au jako kontakt górny (kontakt od strony heterostruktury – obszaru aktywnego lasera) oraz układ AuGe/Ni/Au jako kontakt do podłoża GaAs:Si. Dla pierwszego systemu sprawdziliśmy wpływ czasu i temperatury wygrzewania na właściwości elektryczne, chropowatość powierzchni i mikrostrukturę kontaktu. Dla drugiego systemu przeprowadziliśmy badania mające na celu sprawdzenie wpływu stosunku grubości warstw Ni/AuGe na właściwości elektryczne, stabilność termiczną, chropowatość powierzchni oraz mikrostrukturę kontaktu omowego [H2]. Dla obu układów przeprowadziliśmy obszerne prace eksperymentalne obejmujące badania strukturalne i elektryczne. Szczegóły zostały opisane w pracy [H2].

Dla kontaktu elektrycznego składającego się z układu warstw **Ni/AuGe/Ni/Au** (Ni(5 nm)/AuGe(100 nm)/Ni(35 nm)/Au(300 nm)) zastosowanego w laserach $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie o długości fali $\sim 10 \mu\text{m}$ najlepsze parametry uzyskaliśmy po **wygrzewaniu kontaktu w temperaturze 440°C przez 60 s** (w atmosferze 67% N_2 + 26% Ar + 7% H_2). Rezystywność kontaktu wynosiła $\rho_c = 2 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$. Struktura metaliczna tego kontaktu charakteryzowała się niską chropowatością powierzchni (**RMS (20 μm x 20 μm) = 4,9 nm**) oraz właściwą stabilnością termiczną. Mikrostruktura takiego kontaktu składała się z dwóch głównych metalicznych faz, tj. fazy NiAs(Ge) oraz fazy β -AuGa.

Kontakt elektryczny składający się z warstw **AuGe/Ni/Au** (AuGe(225 nm)/Ni(x)/Au(300 nm), x=45 nm lub 56 nm lub 60 nm lub 70 nm) charakteryzował się najlepszymi parametrami w przypadku, gdy stosunek grubości **AuGe/Ni wynosił 0,2 lub 0,25**. Kontakty omowe o takiej konstrukcji **po wygrzewaniu w temperaturze 400°C** charakteryzowały się niską rezystywnością, tj. $\rho_c = 1.48 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$, niską chropowatością powierzchni **RMS (50 μm x 50 μm) = 9 nm** i jednorodną mikrostrukturą zbudowaną głównie z dwóch faz metalicznych, tj. fazy NiAs(Ge) oraz fazy β -AuGa. Wraz ze wzrostem stosunku grubości Ni/AuGe mikrostruktura kontaktu ulegała pogorszeniu i ziarna NiAs(Ge) (odpowiedzialne za niską rezystywność kontaktu) były zastępowane na międzypowierzchni metal/GaAs przez fazę bogatą w Au (ang. *Au-rich phase*) [H2].

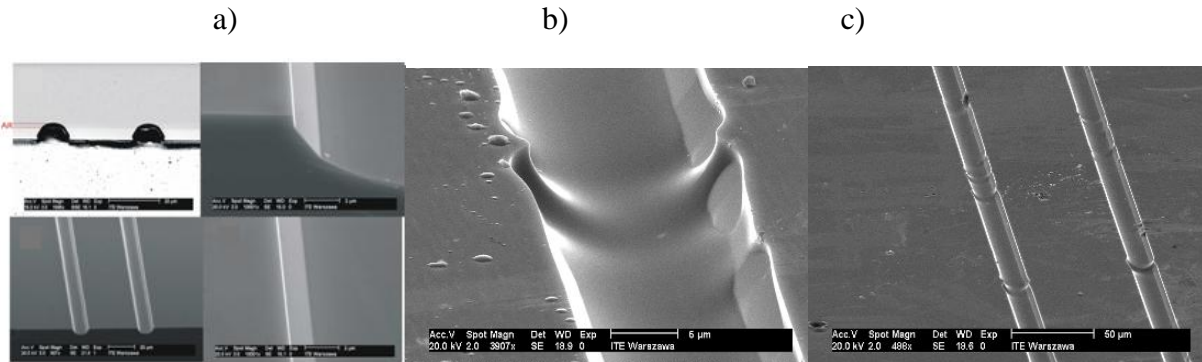
H3 “Chapter 20. Influence of Mesa-Fabrication-Dependent Waveguide-Sidewall Roughness on Threshold Current and Slope Efficiency of AlGaAs/GaAs Mid-Infrared Quantum-Cascade Lasers”, Szerling A., Kosiel K., Karbownik P., Wójcik-Jedlińska A., Płuska M., *Terahertz and Mid Infrared Radiation. Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz)*, [w serii: NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics] Springer, Dordrecht, 2014, pp. 143-151

W pracy [H3] przedstawiono **szczegółowe badania nad rozwojem technologii formowania wysokiej jakości mesy dwukanałowej dla laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$)**. Wynikiem przedstawionych badań technologicznych było **uzyskanie optymalnych warunków formowania takiej mesy, ze szczególnym nastawieniem na uzyskanie maksymalnie gładkich ścian bocznych mesy**, które są konieczne, aby wyeliminować straty falowodowe **pochodzące z rozpraszania promieniowania, które są destrukcyjne dla działania lasera**. Obniżenie strat falowodowych prowadzi do **spadku gęstości prądu progowego oraz do wzrostu maksymalnej temperatury pracy lasera**. Określono konkretny poziom gładkości ścian bocznych mesy, niezbędny do uzyskania działających laserów. Przedstawiono **optymalne warunki formowania falowodu grzbietowego** (mesy lasera). Warunki formowania mesy dające w efekcie chropowate ściany boczne, a co za tym idzie pogorszenie parametrów lasera, zostały wyeliminowane z procedur technologicznych.

Wpływ nieintencjonalnych nierówności ścian bocznych falowodu grzbietowego na parametry laserów QCL został zbadany ilościowo. Przeanalizowano jak wartość chropowatości mesy (średniego odchylenia standardowego) - σ_{rough} , która wzrasta w zakresie od $0 \mu\text{m}$ do $1,42 \mu\text{m}$, powoduje wzrost strat związanych z rozproszeniem promieniowania, a tym samym negatywnie wpływa na parametry lasera. Stwierdzono, że gdy chropowatość ścian bocznych falowodu grzbietowego jest $\geq 1,8 \mu\text{m}$ to powoduje pogorszenie parametrów lasera, tj. nie wzbudza się akcja laserowa [H3]. Opracowanie idealnie gładkich ścian bocznych mesy było warunkiem koniecznym do uzyskania laserów o bardzo dobrych parametrach, które z powodzeniem zostały zastosowane w układzie do wykrywania gazów [12].

W pierwszej kolejności wykonano prace mające na celu dobór optymalnych warunków trawienia w roztworach, w wyniku którego otrzymano falowód grzbietowy charakteryzujący się gładkimi ścianami. Końcowy wynik formowania falowodu grzbietowego w kontrolowanych warunkach został przedstawiony na rys. 3a, dwukanałowa mesa charakteryzuje się w pełni kontrolowanym kształtem i idealnie gładkimi ścianami bocznymi. Wykonano również lasery, których ściany boczne falowodu grzbietowego były częściowo chropowate (jest to wynik zastosowania nieoptymalnych warunków trawienia) (rys. 3b, 3c). Należy tutaj podkreślić, że zazwyczaj ściany boczne mesy składały się z kilku fragmentów

o różnej chropowatości. Na podstawie równania nr 4 przedstawionego w pracy [H3] wyznaczono całkowitą wartość chropowatości ścian bocznych falowodu grzbietowego σ_{roughAll} (średnie odchylenie standardowe).



Rys. 3. Zdjęcia ze skaningowego mikroskopu elektronowego: ścian bocznych falowodów grzbietowych charakteryzujących się wysoką gładkością (a) oraz falowody grzbietowe, w których zaobserwowano nieintencjonalne chropowatości ścian bocznych (b, c) [H3].

Lasery, które analizowano w pracy zostały wykonane z tej samej heterostruktury, co pozwala założyć, iż mają takie same wartości współczynników wzmocnienia i uwięzienia. W pracy porównano charakterystyki elektro – optyczne laserów (rys. 20.3 w pracy [H3]) z różną geometrią rezonatora oraz różną morfologią ścian bocznych falowodu grzbietowego (charakteryzujące się różną wartością chropowatości).

Udowodniono, iż dla opracowywanych laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ emitujących promieniowanie z zakresu $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$, prąd progowy wzrasta, a sprawność kwantowa maleje wraz ze wzrostem chropowatości ścian bocznych, bez względu na długość zastosowanego rezonatora. W laserach, w których chropowatość ścian bocznych (średnie odchylenie standardowe) wynosi $\sigma_{\text{rough}} \geq 1,8 \mu\text{m}$ nie wzbudzała się akcja laserowa. Opracowana technologia formowania mesy (falowodu grzbietowego) w ramach pracy pozwala na uzyskanie laserów, w których chropowatość wynosi $\sigma_{\text{rough}} = 0$.

H4 “Multi-Step Interrupted-Growth MBE Technology for GaAs/AlGaAs ($\sim 9.4 \mu\text{m}$) Room Temperature Operating Quantum-Cascade Lasers”, Kosiel K., Kubacka-Traczyk J., Sankowska I., Szerling A., Gutowski P., Bugajski M., *Opto-Electronics Review*, vol. 20, nr. 3, pp. 239-246 (2012)

Ogólnie rzecz ujmując praca [H4] przedstawia **szczegółowy opis technologii epitaksji z wiązek molekularnych struktur laserowych $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ emitujących promieniowanie z zakresu średniej podczerwieni i działających w temperaturze**

pokojoyej (300 K). Temperatura pokojowa jest relatywnie wysoką maksymalną temperaturą pracy dla tego typu konstrukcji obszaru aktywnego lasera. Jednakże, w artykule podkreślono iż, aby uzyskać tak wysoką temperaturę pracy konieczne było zastosowanie odpowiedniego *processingu* przyrządowego. Mianowicie, konieczne było osadzenie **pokryć wysokoodbiciowych (ang. *Highly-Reflective (HR)*) na tylne zwierciadło lasera – co było kluczową poprawą/udoskonaleniem wcześniej opracowanej standardowej technologii wytwarzania przyrządów (należy porównać z [H1]).** A zatem, najważniejszym wynikiem opracowywanego *processingu* było **uzyskanie/zoptymalizowanie konstrukcji warstw: dielektryk/metal/dielektryk tworzących wysokoodbiciowe zwierciadło** wykonane na tylnym zwierciadle laserów, a także **warunki ich wytwarzania**, ze szczególnym naciskiem na **uzyskanie najwyższej możliwej odbijalności i długoterminowej stabilności wykonanych pokryć.** Dzięki zastosowaniu tej zmiany technologii możliwe było **zwiększenie temperatur pracy laserów do temperatur pokojowych**, co jest warunkiem koniecznym do skutecznego zastosowania przyrządu, np. w przenośnych układach do spektroskopii gazów.

Moim zadaniem w prezentowanej pracy był *processing* – przetworzenie struktur epitaksjalnych i podstawowa charakteryzacja wykonanych laserów (charakterystyki elektro – optyczne). Dodatkowym zagadnieniem był rozwój technologii wytwarzania pokryć wysokoodbiciowych, które wykonywane są na tylnym zwierciadle. Dlatego też, została wykonana seria procesów, mająca na celu uzyskanie optymalnych warunków osadzania, ale również optymalnej konstrukcji pokryć. Układ o budowie 100 nm Al₂O₃/100 nm Au/100 nm Al₂O₃ charakteryzował się najlepszymi parametrami (wysoką odbijalnością ~98% oraz stabilnością długoterminową). W pracy stwierdzono, iż wzrost temperatury pracy lasera do temperatury pokojowej był możliwy gdy zastosowano pokrycia wysokoodbiciowe na tylnym zwierciadle lasera.

Dla przygotowania serii struktur laserów kaskadowych zastosowane zostały procesy epitaksji zakładające podejście wieloetapowe, związane z przerywaniem wzrostu struktur (ang. *multi-step interrupted-growth epitaxy processes*) [H4]. Następnie struktury zostały poddane obróbce technologicznej i uzyskano gotowe przyrządy [H4]. Po wykonaniu standardowego *processingu* płytka została podzielona na linijki o długościach rezonatora $L = 1 \text{ mm}, 1,5 \text{ mm}, 2 \text{ mm}$ and 3 mm , na których osadzono pokrycia wysokoodbiciowe (100 nm Al₂O₃/100 nm Au/100 nm Al₂O₃) metodą magnetronowego rozpylania katodowego w specjalnie do tego przygotowanym uchwycie. Następnie linijki zostały podzielone na pojedyncze lasery i zmontowane warstwami epitaksjalnymi do dołu bezpośrednio na połączonych chłodnicach miedzianych lub połączonych chłodnicach miedzianych z użyciem spoiwa indowego. Wykonano pomiary elektro – optyczne laserów w szerokim zakresie temperatury pracy, tj. od 77 K do 300 K [H4].

Opracowane pokrycia wysokoodbiciowe dla laserów Al_{0,45}Ga_{0,55}As/GaAs emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$ umożliwiły dalszy wzrost temperatury pracy laserów (w porównaniu z [H1]), aż do temperatury pokojowej. Lasery te charakteryzowały się

prądami progowymi niższymi o ponad 30% w porównaniu z laserami bez pokryć, przy tej samej mocy optycznej. **Moc optyczna, zmierzona w temperaturze pokojowej wynosiła ~12 mW, a gęstość prądu progowego ~20 kA/cm²**, dla laserów o geometrii 15 μm × 2 mm.

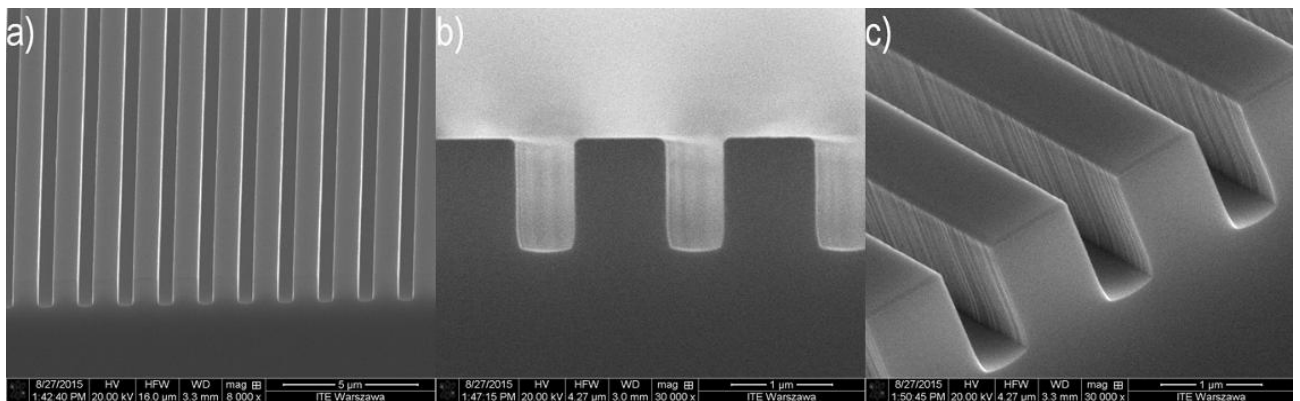
H5 “Al_{0,45}Ga_{0,55}As/GaAs-based single-mode distributed-feedback quantum-cascade lasers with surface gratings”, Szerling A., Kruszka R., Kosiel K., Wzorek M., Gołaszewska K., Trajnerowicz A., Karbownik P., Kuc M., Czyszanowski T., Walczakowski M., Pałka N., *Journal of Nanophotonics* 11.2 (2017): 026004-1 – 026004-13

W pracy [H5] przedstawiono **szczegółowe badania dotyczące opracowania struktur siatek Braggowskich jako rozwiązania prowadzącego do zawężania i stabilizacji emitowanej długości fali w laserach Al_{0,45}Ga_{0,55}As/GaAs QCL działających w zakresie MIR (λ ~ 10 μm)**. W [H5] opisano w bardzo szczegółowy sposób **badania technologiczne nad uzyskaniem optymalnych warunków wytwarzania siatek**. Konstrukcja siatek została wyznaczona teoretycznie, tak aby **promowała konkretny mod laserowy – tj., tak aby wykonana struktura braggowska spowodowała efektywną dyskryminację pozostałych niepożądanych modów obecnych w wyjściowej strukturze bez siatki**. Takie rozwiązanie jest bardzo pożądaną cechą w źródłach promieniowania dla niektórych zastosowań w spektroskopii gazów. Dlatego też, przedstawiona w pracy **opracowana technologia wytwarzania jednomodowych laserów była znaczącą poprawą w stosunku do wcześniej zademonstrowanego standardowego *processingu* lasera wielomodowego [H1]**.

W pracy przedstawiono warunki wytwarzania siatek braggowskich pierwszego rzędu zaprojektowanych dla jednomodowych laserów kaskadowych Al_{0,45}Ga_{0,55}As/GaAs, które emitują promieniowanie o długości fali ~ 10 μm [H5]. Przedstawiono siatki o prostokątnym kształcie i głębokości 1 μm, w których okres siatki (Λ) wynosił ~ 1,55 μm, a ich współczynnik wypełnienia (σ) zawierał się w przedziale 65-71%. Siatki te zostały uformowane z zastosowaniem klasycznej fotolitografii [H5]. Krytyczne podczas formowania tych siatek okazało się uzyskanie odpowiedniej ich geometrii, tj. kształtu i rozmiaru grzbietów siatek oraz maksymalnie gładkich ścian siatek. Prostokątny profil siatek oraz gładkie ich ściany zwiększają możliwość kontroli właściwości siatek. Badania teoretyczne wskazały, że kluczowym parametrem jest okres siatki, a w celu lepszej selekcji modów głębokość siatek powinna wynosić 1 μm. Współczynnik wypełnienia siatek nie jest krytycznym parametrem w laserach DFB (powinien się zawierać w przedziale 50%-80%) [H5]. Powyższe wymogi projektowe wymuszają, aby procesy fotolitografii były przeprowadzane powtarzalnie, co jest utrudnione przy formowaniu kilkuset nanometrowych wzorów, a jest konieczne w celu zapewnienia odpowiedniego współczynnika wypełnienia.

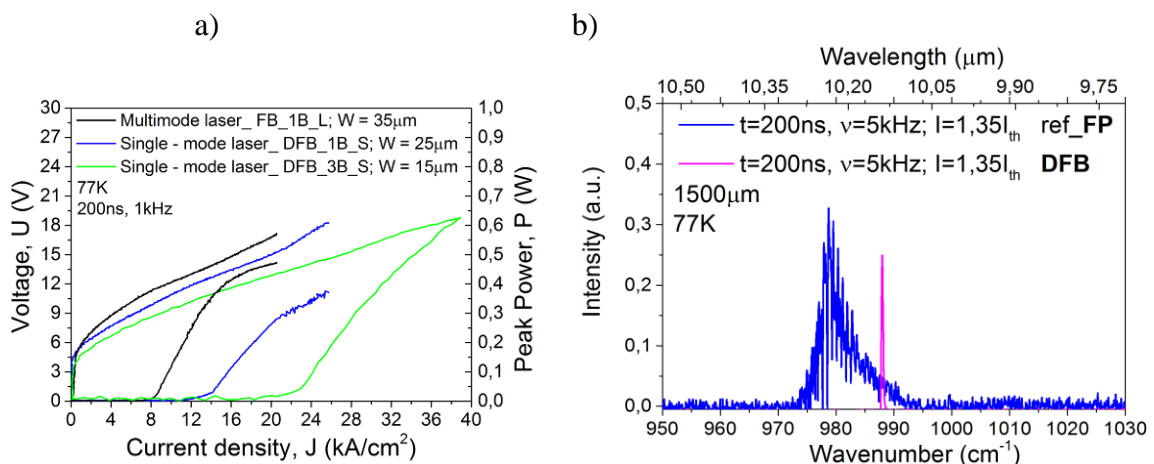
Ponadto ważne jest zapewnienie wysokiej dokładności procesów trawienia wykonywanych w GaAs:Si o grubości 1 μm na dokładnie tą samą głębokość, jaką ma grubość tej warstwy, tj. 1 μm . Opracowanie technologii formowania siatek było wykonane na strukturach testowych GaAs [H5]. Wykonaliśmy szereg prac technologicznych, które obejmowały: wybór maski do trawienia, procesy fotolitografii i trawienia siatek. Szczegóły tych prac zawarte są w przedstawianym artykule [H5].

Poprawność opracowanych warunków technologicznych została potwierdzona w praktyce poprzez wykonanie działających przyrządów. Na rys. 4 przedstawiono przykładowe siatki braggowskie wykonane w laserach DFB [H5].



Rys. 4. Zdjęcia ze skaningowego mikroskopu elektronowego wykonanych siatek braggowskich. Zdjęcia przedstawiają te same struktury braggowskie tylko w różnych powiększeniach, tj.: 8000x (a) and 30000x (b, c) [H5].

Podczas pomiarów charakterystyk elektro – optycznych zastosowano impulsy o długości 200 ns i częstotliwości z zakresu 1 – 5 KHz [H5]. Porównanie podstawowych charakterystyk elektro – optycznych laserów wielomodowych oraz jednomodowych przedstawiono na rysunku 5a.



Rys. 5. Porównanie charakterystyk elektro – optycznych dla laserów wielomodowych i jednomodowych z różnymi szerokościami falowodu grzbietowego wytworzonych z tej samej struktury epitaksjalnej (a) porównanie charakterystyk widmowych dla laserów wielomodowych (niebieska linia) i jednomodowych (różowa linia) wytworzonych z tej samej struktury epitaksjalnej (b) [H5]

Charakterystyki widmowe wykonano w reżimie pracy impulsowej, w której stosowano długości impulsów z zakresu 200-300 ns i częstotliwości od 1 kHz do 5 kHz. Na rysunku 5b przedstawiono porównanie charakterystyk widmowych dla laserów DFB (długość rezonatora, $L = 1,5$ mm) oraz laserów wielomodowych zmierzonych w temperaturze 77 K. Pomiar widma wykonano z rozdzielczością $0,2 \text{ cm}^{-1}$. Szerokość połówkowa widma (ang. *full width at half maximum, FWHM*) lasera jednomodowego wynosiła $\sim 0,4 \text{ cm}^{-1}$.

W ramach pracy uzyskano lasery jednomodowe $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujące promieniowanie z zakresu MIR. Długość fali emitowanej przez laser jest przestrajalna z szybkością $\sim 1 \text{ nm/K}$ w zakresie temperatur pracy przyrządu 77-120 K, a liczba falowa jest przestrajalna z szybkością $1,1 \text{ cm}^{-1}/100 \text{ ns}$ przy spadku szerokości impulsu laserowego w zakresie od 300 ns do 200 ns podczas zmiany warunków zasilania lasera. Przy wzroście częstotliwości zasilania z 1kHz na 5 kHz liczba falowa spada o $\sim 0,8 \text{ cm}^{-1}$. Dla wzrostu wartości prądu zasilającego laser o ok. 10% laser jest przestrajany o $0,2 \text{ cm}^{-1}$. Dla laserów z identycznym okresem siatki, ale z różną szerokością falowodów grzbietowych **długość fali emitowanej przez laser przesuwają się do niższych wartości dla węższych falowodów – dla laserów o szerokości paska $W = 25 \mu\text{m}$ i $W = 15 \mu\text{m}$ następuje przestrojenie z $\lambda \sim 10,12 \mu\text{m}$ do $10,06 \mu\text{m}$.**

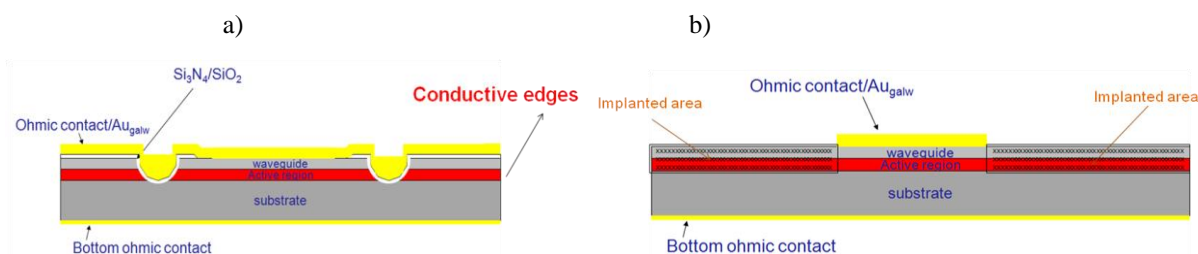
H6 “Proton Implantation for the isolation of AlGaAs/GaAs Quantum Cascade Lasers”, Szerling A., Kosiel K., Kozubal M., Myśliwiec M., Jakiela R., Kuc M., Czyszanowski T., Kruska R., Pągowska K., Karbownik P., Barcz A., Kamińska E., Piotrowska A., *Semiconductor Science and Technology*, vol. 31, nr. 7, pp. 075010 (11pp) (2016)

W pracy [H6] przedstawiono **badania nad szczególną wersją technologii wytwarzania laserów kaskadowych $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ emitujących promieniowanie z zakresu MIR ($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$).** Różnica pomiędzy przedstawioną w pracy metodą, i opisanym wcześniej [H1] standardowym *processingiem* polega na tym, że w aktualnej wersji **nie wykonuje się tu formowania falowodu grzbietowego (nie trawi się mesy).** Zamiast tego, stosuje się **implantację jonów wodoru w celu wykonania izolacji elektrycznej** i ograniczenia rozptyłu nośników. Jednocześnie takie rozwiązanie zapewnia pojawienie się uwięzienia promieniowania. Zaletą tego rozwiązania jest **znacząca redukcja ilości etapów technologicznych**, które są niezbędne do wytwarzania przyrządu – stąd też można uznać to rozwiązanie za innowację procesową. Należy tu podkreślić, że nowa konstrukcja przyrządu jest zupełnie inna niż dla struktury falowodu grzbietowego otrzymywanej w ramach standardowego *processingu*. Dzięki tej różnicy, **dużo łatwiej jest odprowadzić ciepło z laserów wykonanych w oparciu o proces implantacji (ang. *implantation-based*), a co więcej istnieje również możliwość łatwiejszego wytworzenia monolitycznych matryc**

laserowych. Po drugie, dla wybranego zakresu szerokości rezonatorów **możliwa jest praca jednomodowa, a więc zaproponowana technologia związana z implantacją może być rozpatrywana jako metoda wytwarzania laserów jednomodowych.**

W przedstawionej propozycji, izolacja elektryczna jest wykonana poprzez głęboką ($6,5\ \mu\text{m}$) implantację protonów. Zastosowana implantacja ogranicza rozptył prądu, a zarazem powoduje pojawienie się ograniczenia promieniowania bez konieczności formowania falowodu grzbietowego. Koncepcja przewiduje głęboką implantację protonów, a co za tym idzie wytworzenie obszarów zdefektowanych, które lokalnie kompensują nośniki tworząc w ten sposób obszary odizolowane elektrycznie. Złoto galwaniczne o grubości co najmniej $3,5\ \mu\text{m}$ osadzone na górnym kontakcie omowym zostało zastosowane jako maska podczas procesów implantacji jonami wodoru. Maska ta nie była usuwana po procesie. Były to warstwy metaliczne, które zwykle są osadzane na górze struktury kontaktu omowego podczas *processingu* lasera. Kontakt omowy został uformowany z układu warstw Ni/AuGe/Ni/Au i miał całkowitą grubość submikronową. Na nim została wytworzona warstwa pogrubionego złota metodą elektrochemiczną. Dzięki tej pogrubionej warstwie złota ułatwiony jest rozptył ciepła generowanego w działającym laserze, ponadto tak uformowana warstwa umożliwia wykonywanie połączeń drutowych (ang. *wire bonding*) [H6].

Zaproponowaliśmy nową konstrukcję lasera kaskadowego, w której nie formuje się falowodów grzbietowych ani nie osadza się warstw dielektrycznych. Schemat takiej konstrukcji został przedstawiony na rys. 6b. W tej konstrukcji, półprzewodnik znajdujący się pod paskiem złota pozostaje niezniszczony podczas procesu implantacji i dalej pełni rolę kanału dla przepływu prądu przez strukturę. Dla wytwarzanych laserów głębokość implantacji wynosi $\sim 6,5\ \mu\text{m}$, a więc głębokość implantacji sięga do głębokości $\sim 0,3\ \mu\text{m}$ pod obszar aktywny lasera. Dzięki nowej konstrukcji lasera, jego krawędzie pozostają nieprzewodzące, nawet po procesie łamania na pojedyncze lasery (w przeciwieństwie do tych wytwarzanych w sposób standardowy – rys. 6a). Kolejną zaletą nowej metody jest to, że obróbka technologiczna składa się tylko z 14 etapów [H6].



Rys. 6. Schemat lasera kaskadowego ze strukturą typu mesa – falowodem grzbietowym (a) oraz schemat lasera kaskadowego, w którym zastosowaną głęboką implantację jonami wodoru (b) [H6]

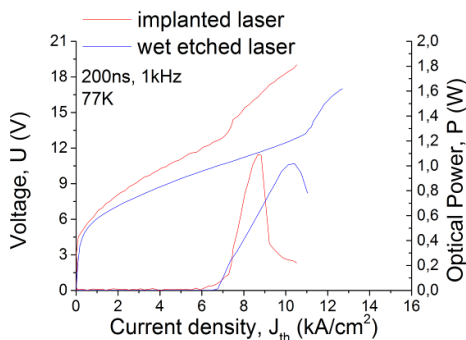
W pierwszej kolejności, dobrano właściwą energię i dawkę protonów (jony H^+) konieczną do zaizolowania struktury laserowej $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ na głębokość $\sim 6,5\ \mu\text{m}$

[H6]. Wykonane zostały również obliczenia mające na celu wyznaczenie profili i rozkładów koncentracji protonów i towarzyszących im wakansów w różnych typach potencjalnych masek do procesów implantacji, np. w emulsji fotolitograficznej i w złocie. Obliczono również rozkład boczny koncentracji protonów, co jest kluczowe ponieważ określa obszar dla przepływu prądu, a tym samym wpływa na efektywną szerokość laserów. Informacja na ten temat jest konieczna przy projektowaniu laserów. Szczegóły opisane zostały w pracy [H6].

Przeprowadzono szereg eksperymentów mających na celu opracowanie procesu wytwarzania laserów, w których pogrubiony kontakt omowy pełnił rolę maski podczas procesów implantacji, a następnie pełnił rolę kontaktu elektrycznego [H6]. Wykonano serię pomiarów, w celu zbadania wpływu implantacji na parametry elektryczne struktur półprzewodnikowych oraz parametry elektryczne wyżej wspomnianego złota [H6].

Wytworzono lasery według nowego przewodnika technologicznego. Szczegóły przedstawiono w pracy [H6].

Podstawowe charakterystyki elektro – optyczne wykonanych laserów zmierzono w temperaturze 77 K. Porównano lasery z falowodem grzbietowym oraz lasery, w których wykonano implantację protonów – wyniki zaprezentowano na rys. 7. Wzrost rezystancji dynamicznej, obserwowany na charakterystyce I-V lasera implantowanego rozpoczynający się dla polaryzacji zewnętrznej $U \sim 12$ V nie powinien być interpretowany jako wynik niedopasowania poziomów laserowych. Spadek mocy optycznej implantowanego lasera jest spowodowany raczej przez proces *thermal roll-over*. Moce wyjściowe i gęstości prądów progowych obu typów laserów są porównywalne.



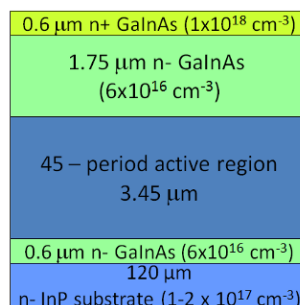
Rys. 7. Charakterystyki elektro – optyczne laserów, w których wykonano implantację (czerwona linia) oraz laserów, w których wykonano falowód grzbietowy z izolacją dielektryczną – warstwą Si_3N_4 (niebieska linia), zmierzona w temperaturze 77K w trybie pracy impulsowej [H6].

Podsumowując, zaprezentowano nowy schemat wytwarzania laserów kaskadowych $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ z falowodem plazmonowym emitujących promieniowanie z zakresu MIR ($\sim 10 \mu\text{m}$), w których izolacja elektryczna zastosowana w celu ograniczenia rozprzyszczenia prądu została wykonana metodą implantacji protonów na głębokość $6,5 \mu\text{m}$

(bez formowania falowodu grzbietowego w formie mesy). Przedstawiony sposób wytwarzania laserów umożliwia jednocześnie ograniczenie promieniowania. Złoto galwaniczne o grubości 3,5 μm pełniące rolę maski podczas procesu implantacji nie było usuwane po procesie, lecz pozostało na strukturze pełniąc rolę kontaktu elektrycznego i elementu wspomagającego odprowadzanie ciepła z przyrządu. Gęstości prądów progowych wynosiły $\sim 6 \text{ kA/cm}^2$ w temperaturze 77 K. Wytworzenie laserów o tej nowej, korzystnej konstrukcji jest znacznie uproszczone w porównaniu ze standardową technologią wytwarzania laserów, ponieważ zostało skrócone o 11 etapów technologicznych.

2.2. Lasery kaskadowe emitujące promieniowanie z zakresu dalekiej podczerwieni [H7]

Do wytwarzania laserów emitujących promieniowanie z zakresu FIR ($\lambda \sim 16 \mu\text{m}$) użyłam struktur $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, których zasada działania oparta jest na konstrukcji typu *bound-to-continuum* i pierwotnie została zaproponowana przez Rochat'a i współpracowników [9] (rys. 8, [H7]). Struktura była osadzana na podłożu InP metodą epitaksji z wiązek molekularnych z zastosowaniem źródła gazowego (ang. *gas-source molecular-beam epitaxy*) przez prof. Stevena Slivkena (Center of Quantum Devices (CQD), Northwestern University, USA). Obszar aktywny lasera składający się z 45 modułów, z których każdy jest zbudowany z warstw $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$, wbudowany jest w obszar dielektrycznego falowodu optycznego, w którym powietrze pełni rolę górnego płaszczka. Promieniowanie z zakresu dalekiej podczerwieni jest silnie absorbowane przez swobodne nośniki, dlatego też w tym przypadku falowód plazmonowy nie byłby efektywny. Falowód składa się z dwóch nisko domieszkowanych krzemem (Si) warstw InGaAs (domieszkowanie na poziomie $n=6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), położonych poniżej i powyżej obszaru aktywnego, których grubości wynoszą odpowiednio 600 nm oraz 1750 nm. Zasilanie elektryczne jest możliwe dzięki osadzonej na górze struktury epitaksjalnej wysokodomieszkowanej warstwie podkontaktowej InGaAs ($n=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) o grubości 600 nm [H7].



Rys. 8. Schemat struktury laserowej [H7].

H7 “High peak power 16 μm InP-related quantum cascade laser”, Szerling A., Slivken S., Razeghi M., *Opto-Electronics Review*, vol. 25, pp. 205–208, (2017)

W pracy [H7] przedstawiono pełny **rozwój technologii wytwarzania laserów $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$ QCL emitujących promieniowanie w zakresie dalekiej podczerwieni - FIR ($\lambda \sim 16 \mu\text{m}$) oraz dalszą optymalizację ich konstrukcji oraz warunków wytwarzania, ze szczególnym naciskiem położonym na zwiększenie mocy generowanej przez laser.** *Processing* tego typu laserów był opracowywany przeze mnie podczas mojego stażu w Center for Quantum Devices (CQD, Northwestern University, USA) od podstaw, stając się **platformą technologiczną dla technologii wytwarzania przyrządów zapewniającej uzyskanie działających laserów**, gotowej do dalszej poprawy/ulepszenia.

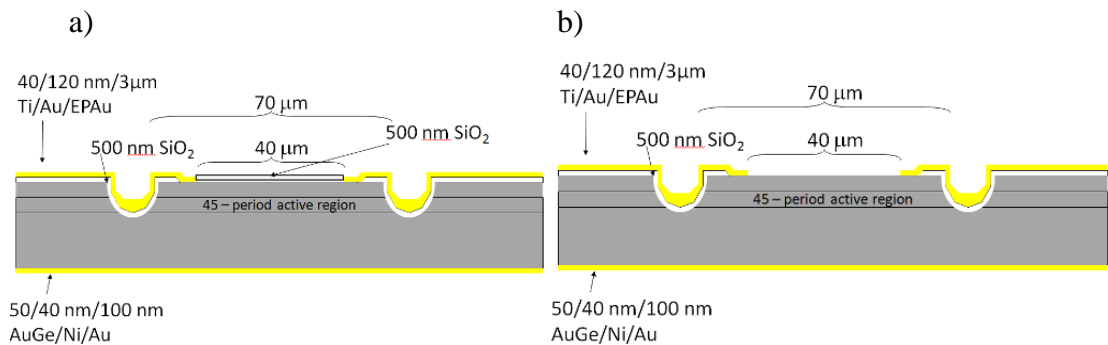
Opisana standardowa technologia wytwarzania obejmuje:

- formowanie falowodu grzbietowego, które zawiera procesy fotolitografii oraz trawienia masy w roztworach,
- wytwarzanie izolacji dielektrycznej poprzez procesy osadzania warstw dielektrycznych metodą PECVD, procesy fotolitografii oraz otwieranie okna pod kontakt omowy w dielektryku na grzbiecie falowodu metodą trawienia plazmowego,
- formowanie górnego kontaktu omowego, które obejmuje procesy fotolitografii, procesy osadzania metodą naporowania, proces lift-off oraz wygrzewanie kontaktu metodą RTA (ang. *rapid thermal annealing*)
- mechaniczne pocienianie podłoża lasera QCL do około 100 μm ,
- formowanie dolnego kontaktu omowego,
- łamanie płytki na pojedyncze lasery,
- montaż laserów na miedziane chłodnice.

Następnie, traktując jako punkt wyjścia tę standardową platformę technologiczną, przeprowadziłam dalszą **optymalizację technologii, zmieniając konstrukcję laserową (poprzez usunięcie warstwy izolacji dielektrycznej – SiO_2 z wybranych obszarów falowodu grzbietowego)** i odpowiednie dostosowanie warunków wytwarzania laserów dla nowego rozwiązania konstrukcyjnego. Dzięki temu **możliwe było ograniczenie absorpcyjnych strat falowodowych i jednocześnie poprawienie możliwości odprowadzania ciepła z obszaru aktywnego lasera.** W wyniku zastosowania nowej konstrukcji nastąpił **wzrost mocy optycznej** generowanej przez laser, poza tym według mojej najlepszej wiedzy te maksymalne moce optyczne generowane przez laser są **aktualnym rekordem światowym** dla laserów emitujących promieniowanie z zakresu dalekiej podczerwieni i o takiej konstrukcji obszaru aktywnego.

Kolejnym wartościowym rezultatem optymalizacji technologii osiągniętym w tej pracy było uzyskanie laserów generujących **promieniowanie o dwóch długościach fali** – zamiast generowania promieniowania pojedynczej długości fali, które jest charakterystyczne dla laserów o standardowej/pierwotnej konstrukcji. Poszerza to zakres emitowanych długości fal i może być użyteczne w spektroskopii.

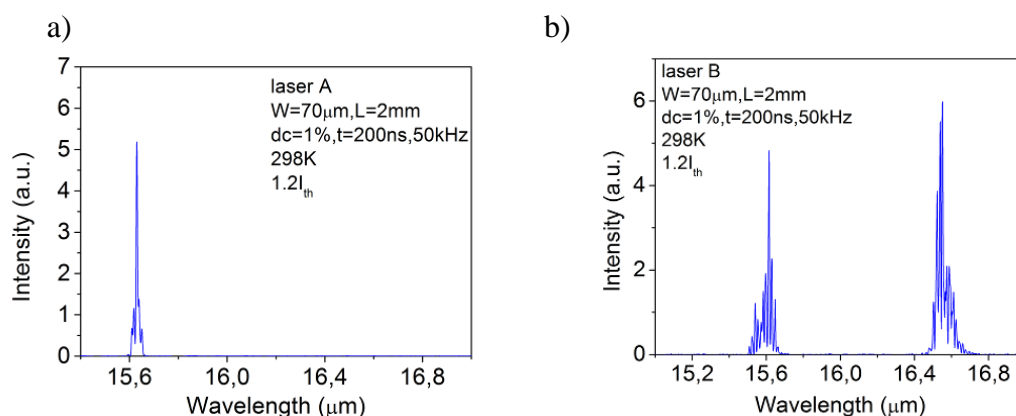
Zgodnie z powyżej przedstawionym schematem technologicznym wytworzono i scharakteryzowano dwa typy laserów emitujących promieniowanie wielomodowe o długości fali $\sim 16 \mu\text{m}$: lasery, w których na górze falowodu grzbietowego pozostawiono warstwę SiO_2 (laser A) i lasery, w których usunięto warstwę SiO_2 z góry falowodu grzbietowego (laser B) (rys. 9) [H7].



Rys. 9. Schematy laserów A (a) i B (b), w obu laserach szerokość paska wynosiła $W = 70 \mu\text{m}$. [H7].

Szczegóły dotyczące *processingu* tych laserów zaprezentowano w pracy [H7]. Przeprowadzono serię pomiarów charakterystyk elektro – optycznych i widmowych dla wykonanych laserów, pomiary przeprowadzono dla długości impulsów z zakresu od 100 ns do 300 ns i współczynników wypełnienia z zakresu 0,5 – 1,8%. Lasery B, w porównaniu z laserami A charakteryzowały się lepszymi parametrami (niższymi gęstościami prądu progowego, wyższą mocą optyczną i sprawnością kwantową). Wyniki były powtarzalne dla serii laserów [H7].

Uważamy, że prawdopodobnym powodem obserwowanego na charakterystyce elektro – optycznej lasera A (np. rys. 3 w pracy [H7]) efektu *roll-over* jest przegrzanie się obszaru aktywnego lasera A (ang. *thermal roll-over*). Należy tu wspomnieć, że ten sam efekt można zaobserwować dla laserów B, tylko zasilanych z wyższym współczynnikiem wypełnienia (np. rys. 5c w pracy [H7]). Jednakże, bierzemy również pod uwagę, że niższa sprawność kwantowa laserów A może być spowodowana wyższymi stratami optycznymi dla laserów z warstwą SiO_2 na górze falowodu grzbietowego. Jest to tym bardziej prawdopodobne, gdyż dla laserów A nie obserwowano emisji na dwóch długościach fali (przykład przedstawiono na rys. 10 a), podczas gdy dla laserów B zawsze obserwowano emisję na dwóch długościach fali. Widmo lasera B składa się z dwóch grup modów emitujących jednocześnie promieniowanie o długości fali $15,6 \mu\text{m}$ (641 cm^{-1}) oraz $\lambda \sim 16,6 \mu\text{m}$ (602 cm^{-1}). Na rys. 10b przedstawiono przykładowe widmo dla lasera B. Maksyma widm obserwowane w charakterystyce lasera B są oddzielone o $\sim 39 \text{ cm}^{-1}$, ponieważ krzywa wzmocnienia jest bardzo szeroka, tj. większa niż 40 cm^{-1} [9].



Rys. 10. Charakterystyki widmowe lasera A (a) oraz lasera B (b) [H7].

Znanym jest fakt, że warstwy izolujące SiO₂ powodują wzrost strat promieniowania przy generowaniu promieniowania z zakresu dalszej podczerwieni ($\lambda > 13 \mu\text{m}$) [22]. Dlatego też, brak generowania przez laser z warstwą SiO₂ na górze falowodu tylko jednej długości fali wyjaśniamy jako rezultat absorpcji, która występuje w warstwie dielektrycznej SiO₂ wykonanej przez nas. Jednocześnie w kilku pracach można znaleźć informację, że kształt widma absorpcji dla konkretnej warstwy SiO₂ będzie zależał od warunków jej wykonania [23-25]. W naszej pracy przedstawiliśmy hipotezę, że w naszym przypadku warstwa SiO₂ wykazuje większą absorpcję dla długości fali $\sim 16,6 \mu\text{m}$ niż dla długości fali $\sim 15,6 \mu\text{m}$, co dla laserów A powoduje całkowite wygaszenie modów o długości fali $\sim 16,6 \mu\text{m}$. Mody te są wciąż widoczne w przypadku laserów B pozbawionych warstwy dielektrycznej na szczycie falowodu grzbietowego.

Podsumowując, zaprezentowano **lasery na podłożach InP emitujące promieniowanie o długości fali $\sim 16 \mu\text{m}$. Lasery charakteryzowały się następującymi parametrami: temperatura maksymalna pracy laserów $T_{\text{max}} = 373 \text{ K}$, moc optyczna $P = 720 \text{ mW}$ (pomiar dla 303 K), średnia moc optyczna $P_{\text{av}} = 4,8 \text{ mW}$ (pomiar dla 303 K), temperatura charakterystyczna $T_0 = 272 \text{ K}$. Ponadto, zaobserwowano emisję dla dwóch długości fali jednocześnie: $\lambda \sim 15,6 \mu\text{m}$ (641 cm^{-1}) oraz $\lambda \sim 16,6 \mu\text{m}$ (602 cm^{-1}), ale tylko dla laserów bez warstwy dielektrycznej na szczycie falowodu grzbietowego.**

Lasery, w których usunięto warstwę SiO₂ z góry falowodu grzbietowego charakteryzowały się $\sim 15\%$ niższym prądem progowym niż te z warstwą dielektryczną. Średnia moc optyczna dla laserów z warstwą SiO₂ wynosiła tylko $\sim 3,6 \text{ mW}$, podczas gdy dla laserów bez tej warstwy była prawie dwukrotnie wyższa (pomiar wykonano dla 298 K). Uważamy, że to polepszenie parametrów laserów jest spowodowane zmianami *procesingu* przyrządowego. Naszym zdaniem, **kluczowe okazało się usunięcie warstw SiO₂ z góry falowodu grzbietowego. To usunięcie warstwy dielektrycznej prawdopodobnie spowodowało łatwiejsze odprowadzanie ciepła z obszaru aktywnego, co wcześniej było blokowane przez warstwę SiO₂ oraz/lub zredukowanie strat absorpcyjnych generowanych w laserach przez obecność warstwy tlenku.**

2.3. Terahercowe lasery kaskadowe [H8-H10]

Do wytwarzania laserów emitujących promieniowanie z zakresu THz ($\lambda \sim 100 \mu\text{m}$, tj. $\nu \sim 3 \text{ THz}$) użyłam struktur $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As} / \text{GaAs}$ QCL (rys.11) opracowanych i osadzonych metodą epitaksji z wiązek molekularnych przez: dr hab. Kamila Kosiela (Instytut Technologii Elektronowej, Poland) [H8-H10] oraz prof. Zbigniewa (Zbigo) Wasilewskiego (University of Waterloo, Kanada) [H8] (fig. 11).

Thickness	Material	Doping	Reps.
1000 Å	GaAs: Si n+	$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	
41 Å	$\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$	nd	
160 Å	GaAs: Si	$3 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ (w 50 Å in the middle QW)	
43 Å	$\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$	nd	x228
89 Å	GaAs	nd	
24,6 Å	$\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$	nd	
81,5 Å	GaAs	nd	
41 Å	$\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$	nd	
160 Å	GaAs: Si	$3 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ (w 50 Å in the middle QW)	
43 Å	$\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$	nd	
1000 Å	GaAs: Si n+	$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	

Rys. 11. Przykładowy schemat sekwencji warstw w strukturze epitaksyjnej THz QCL

Ich działanie oparte jest na konstrukcji składającej się z modułów zbudowanych z 3 studni kwantowych (3QW), w których przykładowe grubości warstw wynoszą **4.3**, **8.9**, **2.46**, **8.15**, **4.1**, **16** (wymiar są podane w nm), gdzie studnia kwantowa (QW) z GaAs jest oddzielona barierami zbudowanymi z warstw $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ (zapisane pogrubioną czcionką w powyższym tekście). Tylko obszar o grubości 5 nm wbudowany w środek studni fononowej (ang. *phonon well*) o grubości 16 nm został jednorodnie domieszkowany krzemem (Si) na typ n (poziom domieszkowania wynosił $3 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$). Obszar aktywny laserów składał się z 228 powtórzeń wyżej opisanego modułu.

Prace badawcze nad *processingiem* laserów THz QCL obejmowały

- opracowanie technologii wytwarzania laserów $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu terahercowego, THz ($\nu \sim 3 \text{ THz}$, co odpowiada $\lambda \sim 100 \mu\text{m}$) [H8, H9, H10].

H8 “Processing of AlGaAs/GaAs Quantum-Cascade Structures for Terahertz Laser”, Szerling A., Kosiel K., Szymański M., Wasilewski Z., Gołaszewska K., Łaszcz A., Płuska M., Trajnerowicz A., Sakowicz M., Walczakowski M., Pałka N., Jakiela R., Piotrowska A., *Journal of Nanophotonics*, vol. 9, nr. 1, pp. 093079-1-17 (2015)

W pracy [H8] przedstawiono **rozwój standardowej technologii wytwarzania laserów $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie z zakresu terahercowego ($\nu \sim 3$ THz, co odpowiada $\lambda \sim 100$ μm)**. Wynikiem opisywanych badań technologicznych jest uzyskanie **platformy technologicznej dla technologii wytwarzania przyrządów, dzięki której możliwe jest uzyskanie działających laserów**, gotowej do dalszych udoskonaleń/zmian. W istocie wspomniana **platforma technologiczna została opracowana dla pewnego zakresu podobnych konstrukcji struktur epitaksjalnych** opartych na obszarze aktywnym złożonym w przybliżeniu z samych warstw $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$, i zaprojektowanym dla emisji $\nu \sim 3$ THz. Struktury te mogą jednak różnić się niektórymi parametrami działania (takimi jak: maksymalna temperatura pracy, gęstość prądu progowego, itd.), co wiąże się nierozłącznie ze szczegółami epitaksji tych struktur.

Standardowy *processing* laserów THz QCL zawiera następujące etapy:

- formowanie dolnego płaszcza falowodu (Ti/Au) i wytworzenie receptora, metodą magnetronowego rozpylania katodowego,
- osadzanie indu na podłożu zastępczym,
- łączenie płytek metodą *wafer bonding* (Au-In),
- pocienianie mechaniczne podłoża lasera kaskadowego QCL do ok. 50-70 μm , następnie całkowite jego usunięcie metodą selektywnego trawienia, w kolejnym kroku wykonuje się selektywne trawienie warstwy stopującej,
- formowanie falowodu grzbietowego, które zawiera procesy fotolitografii i trawienia w roztworach,
- na końcu wytworzenie górnego płaszcza falowodu (Ti/Au), które składa się z procesów fotolitografii, magnetronowego rozpylania katodowego oraz procesu lift-off [H8].

Jak wspomniano powyżej, **standardowy *processing* zawiera w szczególności wytwarzanie płaszczy falowodów opartych na Au oraz proces łączenia receptora z obszarem aktywnym z użyciem In, tworząc stop Au-In**.

Kluczowym zagadnieniem podczas opracowywania technologii było to, że **metaliczne struktury osadzone na obu stronach rdzenia falowodu (tj. na obu stronach wielowarstwowej struktury półprzewodnikowej), muszą pełnić rolę termicznie stabilnych i niskorezystywnych kontaktów elektrycznych i w tym samym czasie muszą być metalicznymi płaszciami niskostratnych falowodów dla laserów terahercowych. Te dwie funkcje – elektryczna i optyczna – były opracowywane i optymalizowane razem, w ścisłej wzajemnej zależności**.

W tamtym czasie, opisana standardowa technologia *processingu* THz laserów kaskadowych **opracowana była w Polsce po raz pierwszy**.

Na wstępie wykonano badania teoretyczne, które dostarczyły wartościowych prognoz dotyczących kwestii strat falowodowych w laserach THz QCL.

Poza zaprezentowaniem pomyślnie **działających laserów wyposażonych w płaszcz** falowodowe wykonane **ze złota**, w pracy zaprezentowaliśmy również **wstępne eksperymenty dotyczące technologii formowania płaszczu opartych na miedzi (Cu) dla laserów $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ THz QCL**. Według wstępnych badań teoretycznych straty falowodowe w laserach, w których zastosowano płaszcz falowodów oparte na miedzi powinny być niższe niż te wykonane ze złota.

W pierwszej kolejności wykonaliśmy badania teoretyczne dla wybranych warstw metalicznych, które mogłyby pełnić rolę płaszczu falowodów w laserach THz QCL [H8, 45]. Z naszych rozważań teoretycznych można wnioskować, że głębokość penetracji promieniowania terahercowego w warstwy metaliczne (Au, Ag, Cu) powinna być mniejsza niż 100 nm [H8]. Dlatego też, wygląda na to iż nie ma konieczności osadzania grubszych warstw złota niż 300 nm jako warstw płaszczu falowodów. Zaobserwowano zależność pomiędzy stopniem uwięzienia modu a stratami falowodowymi [H8]. Im więcej pola wnika w płaszcz falowodu, tym większe straty falowodowe są obserwowane. Zastosowanie przekładki tytanowej (Ti) jest niezbędne z technologicznego punktu widzenia, gdyż pomaga to zwiększyć adhezję Au do GaAs, ale również powstrzymuje dyfuzję złota w obszar aktywny lasera, co zapobiega degradacji przyrządu [61,62]. Sprawdzone teoretycznie wpływ grubości warstwy barierowej Ti na straty optyczne lasera THz QCL. Wyniki teoretyczne pokazują, że zastosowanie warstwy Ti o maksymalnej grubości 30 nm, jako warstwy oddzielającej półprzewodnikowy rdzeń falowodu od Au, Ag czy Cu nie wpływa znacznie na straty falowodowe w laserach THz QCL [H8, H10].

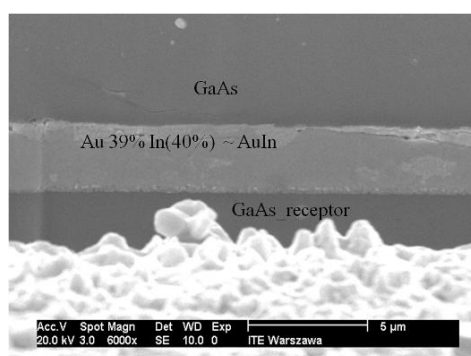
Szczegóły opracowanego standardowego *processingu* zaprezentowano w pracy [H8], gdzie wśród wielu są informacje dotyczące: usuwania podłoża i warstwy stopującej, formowania mesy – falowodu grzbietowego (gdzie szczególny nacisk położono na uzyskanie ścian bocznych mesy charakteryzujących się wysoką gładkością). W pracy przedstawiono technologiczny rozwój laserów $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ THz QCL, gdzie szczególnie ważne były prace nad metalicznymi płaszczami falowodów oraz łączeniem podłoża zastępczego (receptora) z rdzeniem falowodu lasera. Zagadnienie związane z łączeniem podłoża ma ogromny wpływ na parametry laserów i jest ściśle związane z rodzajem metalicznego płaszczu.

Prace technologiczne rozpoczęliśmy od prac nad wytwarzaniem laserów THz QCL ze złotymi płaszczami. Co ważne, formowanie płaszczu opartych na złocie jest mniej wymagające niż technologia płaszczu opartych na miedzi, dla których pojawia się problem utleniania. Zastosowano układ Ti/Au, z powodu konieczności użycia warstwy barierowej pomiędzy półprzewodnikowym rdzeniem falowodu a złotym płaszczem w celu zablokowania dyfuzji złota do obszaru aktywnego lasera. Wspomniany proces dyfuzji może być szkodliwy i doprowadzić do zwarcia. Kolejnym ważnym zagadnieniem poruszonym w pracy była technologia łączenia podłoża (ang. *wafer bonding*), tzn. łączenia obszaru aktywnego

z podłożem zastępczym GaAs n+. Nasze obszerne, szczegółowe badania obejmowały prace nad wpływem parametrów technologicznych, takich jak temperatury procesów technologicznych, czasy trwania procesów i grubości warstw metalicznych na właściwości uzyskanych struktur testowych [H8]. Do charakteryzacji wykonanych płaszczy metalicznych użyto różnorodnych metod (metody elektryczne, TEM, SEM, AFM oraz transmisja w zakresie THz). Wiele struktur testowych było zbadanych eksperymentalnie, szczegóły opisane zostały w pracy [H8]. W ramach pracy nad *processingiem* laserów THz QCL z płaszczy Ti/Au określono temperaturę krytyczną (400°C), jest to maksymalna temperatura, którą można stosować podczas procesów technologicznych.

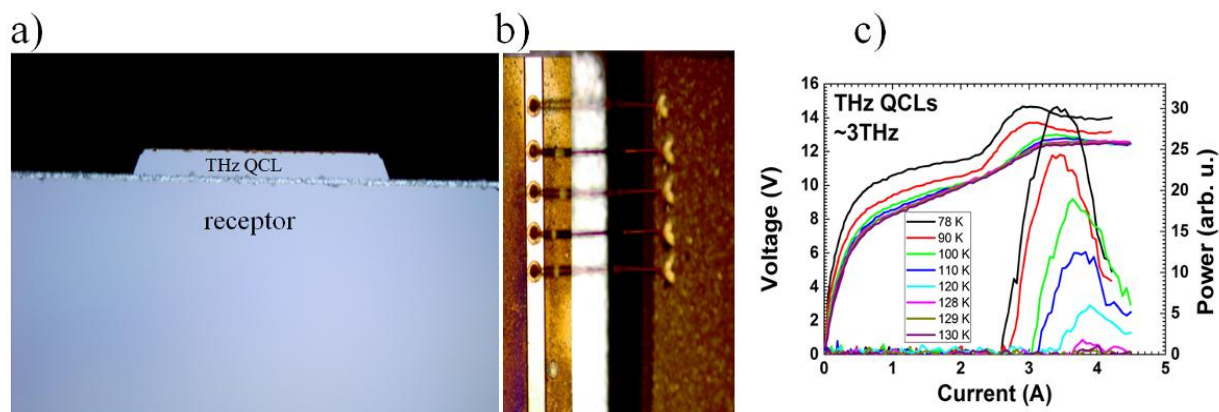
Na podstawie prac badawczych zaprezentowanych w pracy [H8] określono warunki wytwarzania płaszczy Ti/Au konieczne do formowania niezawodnych metalicznych płaszczy falowodowych i jednocześnie niskorezystywnych, stabilnych kontaktów elektrycznych. Do wytworzenia falowodu metal-metal dla lasera kaskadowego AlGaAs/GaAs zastosowano układ złożony z 5 nm barierowych warstw Ti i 300 nm warstw Au i wygrzany w temperaturze 400°C .

Kolejnym krytycznym elementem *processingu* laserów THz QCL jest proces łączenia podłoży. Takie połączenie pomiędzy obszarem aktywnym lasera a podłożem zastępczym musi być stabilne długoterminowo, zarówno jeśli chodzi o wytrzymałość mechaniczną jak i o kontakt elektryczny. Łączenie płytek odbywa się wtedy, gdy obszar aktywny lasera jest pokryty warstwami metalicznym (Ti/Au) i tą stroną wykonuje się łączenie z podłożem zastępczym, które również pokryte jest warstwami metalicznymi. Najczęściej wykonuje się łączenia płytek z zastosowaniem indu, który jest osadzony na podłożu zastępczym - GaAs:Si z uformowanym kontaktem omowym (technologia kontaktu została dokładnie opisana w pracy [H2]) z dodatkową grubą warstwą złota. Ta dodatkowa warstwa złota konieczna jest, aby został uformowany stop Au-In. Przeprowadzono szereg eksperymentów dotyczących montażu Au-In, szczegóły są opisane w pracy [H8]. Końcowy wynik tych testów przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Zdjęcie ze skaningowego mikroskopu elektronowego przedstawiające efekt procesu łączenia obszaru aktywnego z podłożem zastępczym. Szczegóły przedstawiono w pracy [H8].

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów [H8] wybrano optymalne warunki wytwarzania laserów THz QCL.



Rys. 13. Laser AlGaAs/GaAs THz QCL (a) (b), charakterystyki elektro – optyczne uzyskanych laserów, zmierzone w różnych temperaturach pracy [H8].

Wytworzone lasery zmontowano warstwami epitaksjalnymi do góry na miedzianych chłodnicach i następnie wykonano połączenia drutowe (rys. 13 a, b). **Maksymalna temperatura pracy wynosi 130 K** (rys. 13 c). **Gęstości prądów progowych wynoszą ok 1 kA/cm² w temperaturze 77 K i 1,5 kA/cm² w temperaturze 130 K.**

Nasze prace nad zagadnieniami technologicznymi pozwoliły określić **maksymalną temperaturę, tj. 400⁰C, która może być stosowana podczas procesów technologicznych w *processingu* laserów THz QCL.**

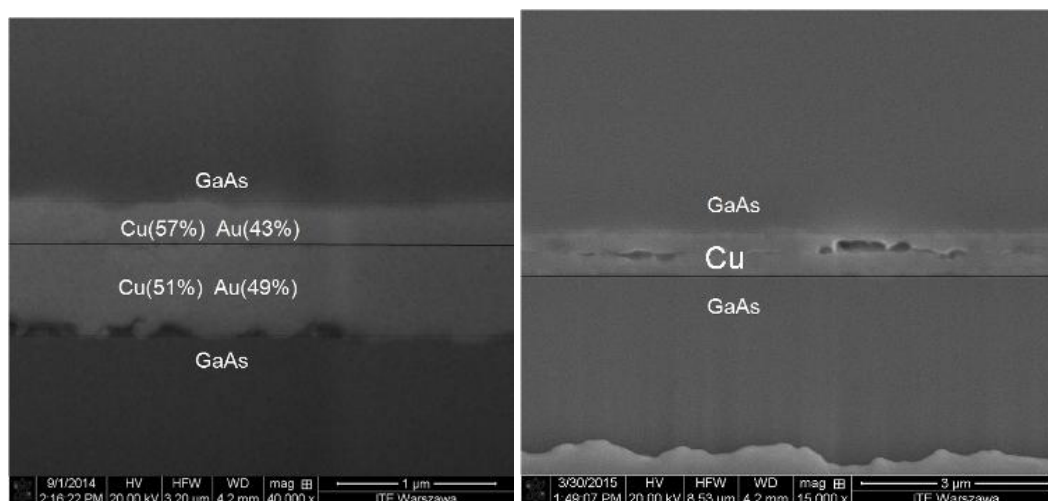
Obliczenia teoretyczne wskazują, iż straty falowodowe dla laserów z płaszczami miedzianymi są mniejsze niż te, w których zastosowano płaszcze złote. Dlatego też, przeprowadziliśmy badania nad płaszczami opartymi na miedzi [H8]. I w tym przypadku, konieczne jest zastosowanie warstwy barierowej, np. 5 nm Ti, która nie powinna zwiększyć strat falowodowych. Jeśli chodzi o prace eksperymentalne, przebadano wiele struktur testowych, szczegóły opisano w pracy [H8]. Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że wykonanie płaszczy opartych na miedzi może się okazać bardzo wymagającym zadaniem, jeśli struktury końcowe mają być stabilne termicznie i jednocześnie pełnić rolę kontaktu omowego [H8].

H9 “A Study of Different Metals Employed in Metal-Metal Waveguides for Terahertz Quantum Cascade Lasers”, Szymański M., Szerling A., Kosiel K., Płuska M., *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 49, pp. 275102 (7pp.) (2016)

W kolejnej pracy [H9] **teoretycznie oszacowano wpływ różnych typów metalicznych płaszczy na parametry lasera $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ THz QCL (głównie na jego straty falowodowe), wnikliwie przedstawiono** znaczenie i praktyczną wartość takich rozważań i **stworzono w szerokim zakresie wytyczne dla technologii. Konkretnie zagadnienia i dane technologiczne** – takie jak np., kwestia interdyfuzji wewnątrz wielowarstwowych struktur metalicznych, utworzonych w wyniku łączenia podłoży – będące podstawą prezentowanych rozważań i dyskusji teoretycznych **pochoǳiły w pełni z opracowywanej przeze mnie technologii.**

W pracy [H9] przedyskutowaliśmy możliwości ulepszenia płaszczy metalicznych projektowanych dla laserów THz QCL poprzez obniżenie ich strat falowodowych. Sednem naszej pracy było przeprowadzenie rachunku błędu dla obliczanych strat falowodowych. Zaobserwowaliśmy, iż dane wyjściowe takie jak współczynniki załamania w zakresie THz są poznane z niewystarczającą dokładnością. Aby to udowodnić dokonaliśmy porównania wielu wyników pomiarowych i teoretycznych prezentowanych w literaturze. Dodatkowo zwróciliśmy uwagę na fakt, że właściwości optyczne materiałów są zależne od temperatury, która zmienia się w obszarze działającego przyrządu [H9]. Przedstawiliśmy też nasze wyniki otrzymane w ramach skaningowej mikroskopii elektronowej, wskazujące na niedoskonałość rzeczywistych powierzchni międzyfazowych metal-półprzewodnik i metal-metal. W sąsiadujących obszarach następuje mieszanie składników, będące powodem zakłóceń rozkładu przestrzennego współczynnika załamania. Nasza analiza błędu pokazała, że współczesna skończona dokładność danych dotyczących współczynnika załamania ($\pm 37\%$, jako najlepszy wynik podawany w literaturze) sprawia, że kwestia możliwości optymalizacji rozważanych falowodów pozostaje niejednoznaczna. Zgodnie z naszymi obliczeniami niezbędne jest tu uzyskanie precyzji określenia wartości współczynnika załamania około $\pm 10\%$ [H9].

Na rys. 14 przedstawiono zdjęcie ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) pokazujące mieszanie się składników blisko międzypowierzchni półprzewodnik – metal i metal – metal tworzących połączenie [H9].



Rys. 14. Zdjęcia SEM międzypowierzchni struktur testowych GaAs/5 nmTi/300 nmCu/300 nmAu/5 nmTi/GaAs (po lewej stronie) oraz GaAs/5 nmTi/600 nmCu/5 nmTi/GaAs (po prawej stronie). Skład został zmierzony metodą mikroanalizy EDS (ang. *energy-dispersive x-ray spectroscopy*) [H9].

Tytan o grubości 5 nm położony na GaAs (rys. 14) jest warstwą barierową, chroniącą półprzewodnik przed wdyfundowaniem w głąb składników metalicznych.

Jak już wspomniano wyżej, łączenie obszaru aktywnego lasera z podłożem zastępczym (receptorem) jest kolejnym procesem technologicznym, podczas którego łatwo może dojść do interdyfuzji składników, a to może powodować niezamierzone zmiany w strukturze płaszcza falowodu. Modelem powszechnie stosowanym do obliczeń związanych z właściwościami falowodu THz lasera kaskadowego, np. strat falowodowych, jest model planarny, w którym wszystkie warstwy tworzące falowód mają jednoznacznie określone jednorodne grubości i współczynniki załamania. Co za tym idzie, powierzchnie międzyfazowe są ostre (warstwy mają dobrze określone granice) [H9]. Jednak w rzeczywistych strukturach zazwyczaj występują procesy interdyfuzji składników. Generalnie są one związane z jednoczesnym transportem różnych rodzajów atomów przez powierzchnie międzyfazowe metal-,metal a nawet metal-półprzewodnik [H8, H9]. Intensywność procesów interdyfuzji silnie zależy od warunków zastosowanych podczas krytycznych procesów technologicznych (takich jak formowanie płaszczy falowodów oraz łączenia obszaru aktywnego lasera z podłożem zastępczym) [H8]. Powyżej i w pracy [H8], przedstawiono, że temperatura wygrzewania struktur z płaszczy metalicznymi jest parametrem krytycznym. Z powodu zbyt wysokich temperatur wygrzewania zastosowanych podczas formowania płaszczy falowodów tworzą się ziarna złota, które wrastają w strukturę półprzewodnikową. **Jednakże, należy tu podkreślić, że nawet przy stosowaniu bezpiecznych temperatur podczas *processingu* nadal obserwowane są niewielkie efekty interdyfuzji składników w obszarze płaszczy falowodów [H9].** Interdyfuzja obserwowana jest szczególnie w obszarze od kilku do kilkunastu nanometrów na międzypowierzchni półprzewodnik – metal. **Zapewne wpływa to na rozkład współczynników załamania w tym obszarze. Biorąc pod uwagę głębokość wnikania promieniowania THz w metale, która jest w podobnym zakresie grubości, ta**

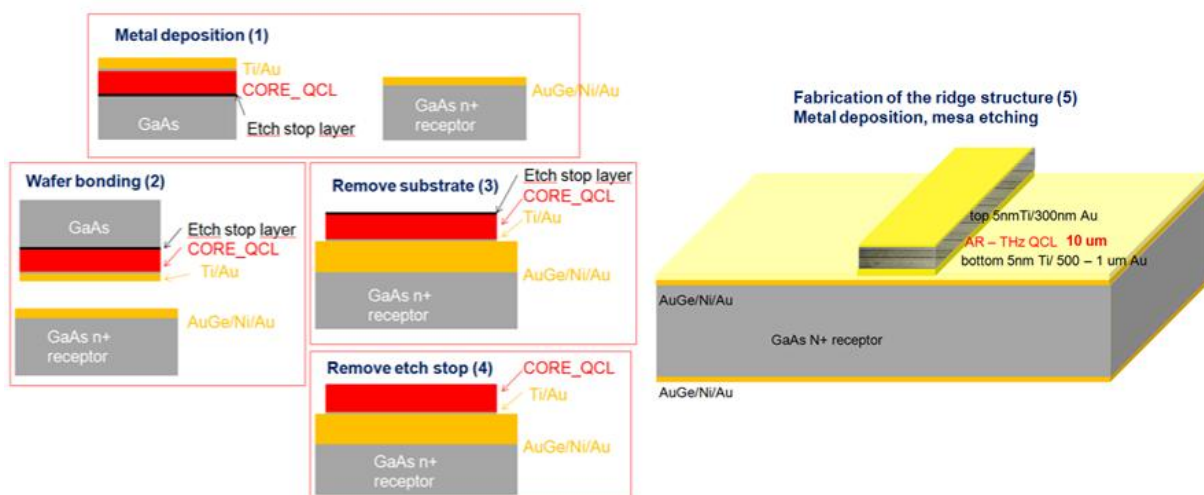
interdyfuzja musi wpływać na parametry falowodów, a raczej na ich straty, co powinno być brane pod uwagę podczas prac teoretycznych [H9].

H10 “AlGaAs/GaAs Terahertz Quantum Cascade Laser with Gold-Based Metal - Metal Waveguide”, Szerling A., Kosiel K., Prokaryn P., Szymański M., Trajnerowicz A., Sakowicz M., Karbownik P., Płuska M., Walczakowski M., Pałka N., M.F. Pereira, O. Shulika (eds.), *THz for CBRN and Explosives Detection and Diagnosis*, NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, Springer, (2017) DOI 10.1007/978-94-024-1093-8_17

W kolejnej pracy [H10] zaprezentowaliśmy szczegółowe badania laserów $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ THz QCL, których *processing* oparty jest na standardowym schemacie wytwarzania (opisanym w pracy [H8]), jednakże zawiera znaczącą modyfikację procesu łączenia obszaru aktywnego lasera z podłożem zastępczym. Ta bardzo ważna zmiana polega na zastosowaniu **montażu typu Au-Au**, zamiast wcześniej prezentowanego montażu opartego na wytworzeniu stopu Au-In, w ten sposób wyeliminowano ind z technologii laserów THz QCL. Wynikiem opisanych badań technologicznych było otrzymanie/ewaluacja **optymalnych warunków procesu montażu Au-Au (złoto do złota)**, w szczególności w odniesieniu do profilu temperatury zastosowanego podczas procesu montażu, **ze szczególnym uwzględnieniem szczelności wykonanego połączenia i jego stabilności termicznej.**

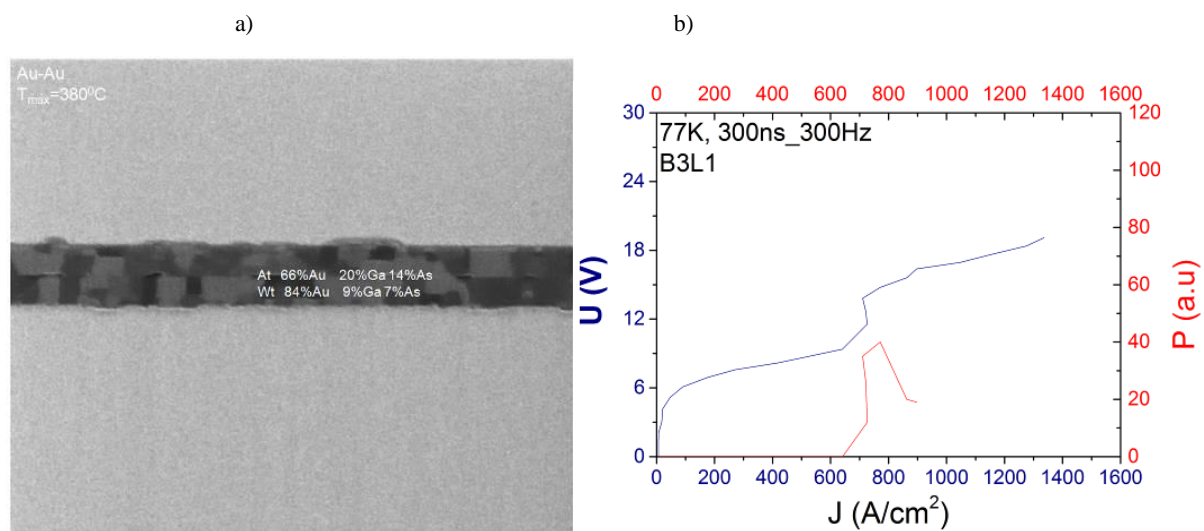
W późniejszym czasie okazało się, że ta zmiana technologiczna, aczkolwiek odnosząca się do procesu montażu obszaru aktywnego z podłożem zastępczym, miała pozytywny wpływ na czystość i parametry złotego płaszcza falowodu [63,64]. Mianowicie, **pozwoliło to wyeliminować problem związany z interdyfuzją składników pojawiającą się podczas montażu Au-In w obszarze płaszcza falowodu, a tym samym prawdopodobnie wpłynęło to na ograniczenie strat falowodowych.** W kolejnych etapach pracy doprowadziło to do **zwiększenia maksymalnej temperatury pracy lasera [63,63].**

Lasery wytworzono w konfiguracji Au-Au (jako przyrządy z falowodem Au-Au), montowane na podłożu zastępczym (receptorze) GaAs na zasadzie połączenia dwóch powierzchni złotych (montaż złoto do złota), według schematu zaprezentowanego na rys. 15. Jak już wspomniano, oznacza to, że montaż receptora z obszarem aktywnym lasera został wykonany bez użycia indu.



Rys. 15. Schemat *processingu* lasera THz QCL z płaszczami falowodowymi zbudowanymi z czystego złota [H10]

Wyselekcjonowane parametry do wytwarzania płaszczy zbudowanych z Ti/Au umożliwiły wykonanie niskorezystywnych i stabilnych kontaktów. Następnie wykonano połączenie obszaru aktywnego lasera z podłożem zastępczym. Montaż Au-Au został wykonany w zakresie temperatur $350^{\circ}\text{C} - 380^{\circ}\text{C}$ [H10]. Przykład zmontowanej w ten sposób struktury przedstawiono na rys. 16a. Po wykonaniu tego połączenia przeprowadzono dalsze etapy *processingu*. Szczegóły opisano w pracy [H10]. Wykonano falowody grzbietowe, których szerokości (W) wynosiły $50 - 160 \mu\text{m}$, a długości rezonatorów (L) były równe $1,8 \text{ mm}$.



Rys. 16. Zdjęcie SEM otrzymanego połączenia struktur testowych GaAs/5nmTi/300nmAu i Au 300nm/Ti 5nm/GaAs (a) oraz charakterystyka elektro – optyczna lasera $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ THz QCL (b) [H10]

Lasery zmontowano na chłodnicach miedzianych w konfiguracji falowodem grzbietowym do góry, a następnie wykonano połączenia drutowe. Przyrządy zostały zmierzone w trybie

pracy impulsowej w kriostacie przy zastosowaniu impulsów o długości 100-300 ns i częstotliwości z zakresu 300-1000Hz. Gęstości prądów progowych wynosiły ok 650 A/cm^2 (pomiar wykonany w temperaturze 77K) (rys. 16b).

Podsumowując opis badań nad technologią wytwarzania laserów $\sim 3 \text{ THz}$ (emitujących falę o długości $\sim 100 \mu\text{m}$) $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL [H8-H10], opracowano zoptymalizowany schemat *processingu* przyrządowego. Jest to wynik kompleksowych badań nad zmniejszeniem strat falowodowych, przy jednoczesnym zapewnieniu dobrej jakości kontaktów elektrycznych i skutecznego odprowadzania ciepła. **Maksymalna temperatura pracy wytworzonych laserów THz QCL zaprezentowanych w opisie osiągnięcia wyniosła 130K, a ich gęstości prądów progowych w temperaturze 77 K wynosiły $J_{\text{th}} \sim 1 \text{ kA/cm}^2$.**

Aktualnie prowadzone prace, których elementy zostały wspomniane w publikacjach [H8-H10], obejmują zastosowanie do wytworzenia niskostratnych płaszczy falowodowych metali innych niż złoto, jednak równie obiecujących (np. miedź).

3. Podsumowanie osiągnięcia [H1÷H10]

Zaprezentowane w osiągnięciu prace koncentrują się na badaniach nad *processingiem* laserów kaskadowych i dalszym zwiększeniem funkcjonalności laserów poprzez optymalizację technologii ich wytwarzania, taką jak zmiany konstrukcji przyrządu i/lub warunków wytwarzania laserów.

Najważniejsze osiągnięcia to:

- Zaprojektowanie konstrukcji przyrządów oraz schematu *processingu* dla powtarzalnej i odtwarzalnej technologii wytwarzania laserów emitujących promieniowanie z zakresu MIR, FIR i THz
- Wytworzenie laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL bez pokryć wysokoodbiciowych emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$, których maksymalna temperatura pracy wynosiła 262 K. Moc optyczna generowana przez lasery przekraczała 1 W w temperaturze 77 K, gęstość prądu progowego wynosiła ok. $7 \text{ kA}/\text{cm}^2$, a sprawność kwantowa przekraczała 0,6 W/A
- Opracowano technologię pokryć wysokoodbiciowych dla laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$, co umożliwiło dalszy wzrost temperatury pracy laserów, aż do temperatury pokojowej. Lasery te charakteryzowały się prądami progowymi niższymi o ponad 30%, w porównaniu z laserami bez pokryć, przy tej samej mocy optycznej. Moc optyczna, zmierzona w temperaturze pokojowej wynosiła $\sim 12 \text{ mW}$, a gęstość prądu progowego $\sim 20 \text{ kA}/\text{cm}^2$
- Opracowano warunki wytwarzania siatek braggowskich dla jednomodowych laserów $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$.
- Wykonano lasery jednomodowe $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujące promieniowanie o długości fali $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$. Długość fali emitowanej przez laser jest przestrajalna z szybkością $\sim 1 \text{ nm}/\text{K}$ w zakresie temperatur pracy przyrządu 77-120 K, a liczba falowa jest przestrajalna z szybkością $1,1 \text{ cm}^{-1}/100 \text{ ns}$ przy spadku szerokości impulsu laserowego w zakresie od 300 ns do 200 ns. Dla laserów z identycznym okresem siatki, ale z różną szerokością falowodów grzbietowych długość fali emitowanej przez laser przesuwana się do niższych wartości dla węższych falowodów – dla laserów o szerokości paska $W = 25 \mu\text{m}$ i $W = 15 \mu\text{m}$ następuje przestrojenie z $\lambda \sim 10,12 \mu\text{m}$ do $10,06 \mu\text{m}$.
- Zaprezentowano nową konstrukcję lasera $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL z falowodem plazmonowym, w którym izolacja elektryczna została wykonana poprzez głęboką ($6,5 \mu\text{m}$) implantację protonów. W przedstawionej konstrukcji nie był formowany falowód grzbietowy
- Wykonano lasery na podłożach InP emitujące promieniowanie o długości fali $\sim 16 \mu\text{m}$. Temperatura maksymalna pracy tych laserów wynosiła 373 K, moc optyczna wynosiła 720 mW (pomiar dla 303 K), średnia moc optyczna wynosiła 4,8 mW (pomiar dla 303 K), a temperatura charakterystyczna (T_0) wynosiła 272K. Ponadto, zaobserwowano emisję dla dwóch długości fali jednocześnie: $\lambda \sim 15,6 \mu\text{m}$ (641 cm^{-1}) oraz $\lambda \sim 16,6 \mu\text{m}$ (602 cm^{-1}), ale tylko dla laserów bez warstwy dielektrycznej na szczycie falowodu grzbietowego.
- Wykonano lasery THz $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{GaAs}$ QCL emitujące promieniowanie o długości fali $\lambda \sim 100 \mu\text{m}$. Maksymalna temperatura pracy wytworzonych laserów THz QCL zaprezentowanych w osiągnięciu wyniosła 130K, a ich gęstości prądów progowych w temperaturze 77 K wynosiły $J_{\text{th}} \sim 1 \text{ kA}/\text{cm}^2$.

Literatura:

- [1] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson and A. Y. Cho, *Science*, 264 (1994) 553
- [2] H. Page, C. Becker, A. Robertson, G. Glastre, V. Ortiz, C. Sirtori, *Appl. Phys. Lett.*, 78 (2001) 3529
- [3] M. Razeghi i in. *Opt. Express*, 23, 8462-8475 (2015)
- [4] Y. Bai, S. Slivken, S. R. Darvish, M. Razeghi, *Applied Physics Letters*, 93(2) (2008)
- [5] M. Razeghi, N. Bandyopadhyay, Y. Bai, Q. Lu, S. Slivken, *Opt. Mater. Express*, 3, 1872-1884 (2013)
- [6] Q. Y. Lu, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Y. Bai, M. Razeghi, *Applied Physics Letters*, 99(13), 131106 (2011)
- [7] Q. Y. Lu, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Y. Bai, M. Razeghi, *Applied Physics Letters*, 101(25), 251121 (2012)
- [8] Q. Lu, M. Razeghi, *Photonics*, 3, 3, 42 (2016)
- [9] M. Rochat, D. Hofstetter, M. Beck, J. Faist, *Applied Physics Letters*, 79, 4271-4273, (2001)
- [10] Kosiel K., et al., *Nato Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*, Springer, 2011, pp. 91-100.
- [11] A. Kosterev, G. Wysocki, Y. Bakhirkin, S. So, R. Lewicki, M. Fraser, F. Tittel, R.F. Curl, *Appl. Phys. B* 90, (2008), 165
- [12] Kosiel K., et al., 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2011
- [13] B. W. M. Moeskops, H. Naus, S.M. Cristescu, F.J.M. Harren, *Appl. Phys. B* 82, (2006), 649
- [14] M. I. Tihov, *Chemical sensors based on DFB quantum cascade laser for environmental monitoring*, (2003)
- [15] C. Sirtori, H. Page, C. Becker, V. Ortiz, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, (2002), 547
- [16] C. Sirtori, *GaAs Quantum Cascade Lasers: Fundamentals and Performance*. EDP Sciences, 2002
- [17] K. Kosiel, et. Al., *Microelectronics Journal*, 40 (2009) 565
- [18] K. Kosiel, et. Al., *Photonics Lett. Poland*, 1(2009) 16
- [19] S. Höfling, R. Kallweit, J. Seufert, J. Koeth, J. P. Reithmaier, A. Forchel, *Journal of Crystal Growth*, 278, (2005), 775
- [20] S. Höfling, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 88 (2006) 251109
- [21] F. Toor, D. L. Sivco, H. E. Liu, C. F. Gmachl, *Appl. Phys. Lett.*, 93 (2008) pp. 031104-1-031104-3
- [22] X. Huang, Y. Chiu, W. O. Charles, C. Gmachl, *Optics Express*, 20(3), 2539-2547 (2012)
- [23] C. E. Viana, A. N. R. da Silva, N. I. Morimoto, O. Bonnaud, *Braz. J. Phys.*, 31(2) São Paulo (2001)
- [24] S.C. Deschmukh and E.S. Aydil, *J. Vac. Sc. Technol. B*, 14 738 (1996)
- [25] S. K. Ray, C.K. Maiti, S.K. Lahiri, N.B. Chafrabarti, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 10, 1139 (1992)
- [26] S. Slivken, *private communication*
- [27] H. Page, S. Dhillon, M. Calligaro, V. Ortiz, C. Sirtori, *Electronics Letters*, 39 (2003), 1053
- [28] H. Page, A. Robertson, C. Sirtori, C. Becker, G. Glastre, J. Nagle, *IEEE Photonics Technology Letters*, 13, (2001), 556
- [29] H. Page, S. Dhillon, M. Calligaro, C. Becker, V. Ortiz, C. Sirtori, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 40, (2004), 665
- [30] Hung-Cheng Lin, et al., *IEEE Transactions On Electron Devices* 50(4), 2003, Pp. 880-885
- [31] Murakami M., *Science and Technology of Advanced Materials* 3, 2002, pp. 1-27
- [32] Heiblum M., Nathan M.I., Chang C.A., *Solid-State Electronics* 25(3), 1982, Pp. 185-195
- [33] Aina O., Katz W., Baliga B.J., Rose K., *Journal Of Applied Physics* 53(1), 1982, Pp. 777-780
- [34] Shin Y-C., Murakami M., Wilkie E. L., Callegari A. C., *Journal of Applied Physics* 62, 1987, pp. 582-590.
- [35] Vidimari F., *Electronics Letters* 15, 1979, pp. 674-675.
- [36] Faist, J., et. Al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38(6), 533-546 (2002)
- [37] Gmachl, C., et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38(6), 569-581 (2002)
- [38] Hofstetter, D., Faist, J., Beck, M., Müller, A., Oesterle, U., *Applied Physics Letters*, 75(5), 665-667 (1999)
- [39] Fuchs, P., Friedl, J., Höfling, S., Koeth, J., Forchel, A., Worschech, L., Kamp, M., *Optics Express*, 20(4), 3890-3897 (2012)
- [40] Gmachl, C., et al., *IEEE Circuits Devices Mag.*, 16, 10-18 (2000)
- [41] Colombelli, R., et al., *Applied Physics Letters*, 78(18), 2620-2622 (2001)
- [42] A. N. Baranov, M. Bahriz, R. Teissier, *Optics Express*, 24(16), 18799-18806 (2016)
- [43] M. S. Vitiello, G. Scalari, B. Williams, P. De Natale, *Optics Express*, 23(4), 5167-5182 (2015)
- [44] Fathololoumi S., et al., *Optics Express*, 20(4), 3866-3876, (2012)
- [45] Szymański M., Szerling A., Kosiel K., *Optical and Quantum Electronics*, (2014) [doi: 10.1007/s11082-014-0007-z]
- [46] M. Belkin, et.al., *Opt. Express* 16, 3242-3248, (2008)
- [47] Fathololoumi S., et al., *Semicond. Sci. Technol.*, 26, 1-5. (2011)
- [48] Williams B. S., Kumar S., Callebaut H., Hu Q., Reno J. L., *Applied Physics Letters*, 83(11), 2124-2126, (2003)
- [49] Walther C., Scalari G., Faist J., Beere H., Ritchie D., *Applied Physics Letters*, 89(23), 231121-231121, (2006)
- [50] Williams B. S., et. Al., *Proc. SPIE* 5738, Novel In-Plane Semiconductor Lasers IV, 170-179, (2005)
- [51] Williams B., Kumar S., Hu Q., Reno J., *Optics Express*, 13, 3331-3339, (2005)
- [52] Kosiel, K., et al., *Microelectronics Journal*, 40, 565-569 (2009)
- [53] Kosiel K et al. 2009, *Photonics Lett. Poland* 1 16-18
- [54] Kosiel, K., et al., *Photonics Letters of Poland*, 3(2), 55-57 (2011)
- [55] Wasiak M., – private communication,
- [56] Zhang, W., et. al., *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(38), 385103 (2010)
- [57] Bousseksou, A., et. al., *Applied Physics Letters*, 95(9), 091105 (2009)
- [58] Schrenk, W., Finger, N., Gianordoli, S., Hvozdar, L., Strasser, G., Gornik, E., *Applied Physics Letters*, 76(3), 253-255 (2000)
- [59] Karbownik, P., et al., *Optical and Quantum Electronics*, 47(4), 893-899 (2015)
- [60] Ziegler J F, et al., 2010 *SRIM Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.* 268 1818-1823
- [61] A. Piotrowska, *Kontakty omowe na bazie złota do związków półprzewodnikowych III-V, rozprawa habilitacyjna*
- [62] Piotrowska A., et. al., In *MRS Proceedings* (Vol. 300, p. 219). Cambridge University Press, 1993
- [63] Szerling A., et. al., “A study of wafer bonding technology for terahertz quantum cascade lasers”, *article in preparation*
- [64] Szerling A., et al., “Technologia wytwarzania terahercowych laserów kaskadowych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 8/2017, str. 50 – 53

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

Od początku mojej pracy naukowej skupiłam się na technologii wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych, głównie optoelektronicznych i elektronicznych.

Przed uzyskaniem stopnia doktora, w 2002 roku rozpoczęłam pracę w Instytucie Technologii Elektronowej, gdzie pracowałam nad charakteryzacją bipolarnych laserów półprzewodnikowych emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda \sim 980$ nm. Moim głównym zadaniem było badanie zjawisk degradacji tych laserów oraz analiza wpływu pokryć antyodbiciowych i wysokoodbiciowych na podstawowe parametry laserów.

Podczas prac nad moim doktoratem, zajmowałam się nad technologią wytwarzania bipolarnych laserów półprzewodnikowych. Celem badań prowadzonych do 2008 roku (czyli do momentu uzyskania stopnia doktora) był rozwój *processingu* bipolarnych laserów emitujących promieniowanie o długości fali $\lambda \sim 980$ nm oraz optymalizacja kolejnych etapów technologicznych. Wśród wielu wyzwań, konieczne było opracowanie trawienia mesy oraz wytwarzanie pokryć dielektrycznych. W wyniku tych prac uzyskano lasery pracujące w temperaturze pokojowej z bardzo dobrymi parametrami, tj. niskimi gęstościami prądu progowego $J_{th} < 200$ A/cm², wysoką temperaturą charakterystyczną $T_0 > 150^{\circ}\text{C}$, sprawnością kwantową $\eta_S > 0,5$ W/A. Lasery te pracowały w modzie fali ciągłej przez ponad 1000h w temperaturze pokojowej. Wyniki uzyskane w ramach tych prac zostały umieszczone w mojej pracy doktorskiej, która została wyróżniona przez Radę Naukową ITE.

Od 2008 roku moim głównym zadaniem była praca nad *processingiem* laserów kaskadowych. Celem tych badań było zwiększenie funkcjonalności opracowywanych przyrządów.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w wrześniu 2008 roku, poza pracami opisanymi szczegółowo w sekcji 4, byłam zaangażowana w następujące tematy badawcze: technologię przyrządów opartych na bazie GaN dla elektroniki wysokich częstotliwości/wysokiej mocy/wysokotemperaturowej oraz w technologię formowania siatek podfalowych dla laserów VCSEL.

Azotek galu (GaN) jest dobrym materiałem dla przyrządów nowej generacji dla elektroniki wysokich częstotliwości/wysokiej mocy/ wysokiej temperatury, ze względu na swoją szeroką przerwę energetyczną, stabilność chemiczną oraz wysokie ruchliwości nośników w strukturach z dwuwymiarowym gazem elektronowym. Zakład Mikro i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych, w którym pracuję od 2014 roku, od lat zaangażowany jest w prace nad technologią wytwarzania przyrządów opartych na bazie GaN. Od 2015 roku jednym z moich głównych zadań badawczych były prace nad obróbką technologiczną tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN na podłożach z GaN i na podłożach Si [załącznik 3 II. B3]. W latach 2015 – 2016 byłam zaangażowana w wykonanie kilku partii wyżej wymienionych tranzystorów [załącznik 3 II: L16, L17, LII59]. W 2016 roku byłam

jednym ze Współautorów przygotowujących pełną dokumentację technologiczną dla tranzystorów AlGaIn/GaN HEMT na podłożu krzemowym [załącznik 3 II. B3] oraz diod elektroluminescencyjnych GaN [załącznik 3 II. B4].

Jeśli chodzi o siatki podfalone dla laserów VCSEL, moim celem było znalezienie odpowiednich warunków trawienia siatek w GaAs. Praca ta była wykonywana we współpracy z Instytutem Fizyki Politechniki Łódzkiej (rozpoczęta w 2014 roku). W ramach naszej współpracy, wykonałam siatki podfalone na podłożach (100) GaAs w celu weryfikacji modelu teoretycznego. Wymiar krytyczny siatek ($h= 1,1 \mu\text{m}$, $L= 4,0 \mu\text{m}$) umożliwił mi zastosowanie standardowej fotolitografii i trawienia plazmowego z zastosowaniem plazmy chlorowej (ang. *Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching, ICP RIE*) [załącznik 3 II: A33, L6, L14, L15, LII61, E32, E33].

Mój indeks Hirsch'a wynosi 6 (źródło: Web of Science, 14.09.2017), ilość cytowań bez autocytowań wynosi 121 [załącznik 7]. Jestem autorem lub współautorem ponad 100 wystąpień konferencyjnych – krajowych i zagranicznych, w tym 6 wykładów zaproszonych jako pierwszy autor (w tym 4 wystąpienia na konferencjach międzynarodowych) [załącznik 3 II: L1-L17; LII1-LII63; załącznik 4: B1-B69]. Innowacyjny charakter mojej pracy został potwierdzony przez uzyskanie 4 Polskich patentów (2 wzory użytkowe, 2 patenty [załącznik 3 part II: C1-C4]) oraz 2 zgłoszeń patentowych (2 wzory użytkowe, [załącznik 3 II: C5-C6]). Szczegółowe zestawienie moich wystąpień konferencyjnych, publikacji oraz zgłoszeń patentowych przedstawione jest w załącznikach 3 i 4.

Od 01.10.2014 do 01.12.2014 odbyłam **staż podoktorski** w Center for Quantum Devices (CQD) w Northwestern University (USA), w grupie Profesor Manijeh Razeghi. Byłam zaangażowana w technologię wytwarzania laserów kaskadowych emitujących promieniowanie z zakresu FIR.

Jestem beneficjentem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, dzięki czemu uczestniczyłam w stażach organizowanych przez Centrum w ramach programu „Wsparcie zarządzania infrastrukturą badawczą” (ang. *“Support of management of the research infrastructure of beneficiaries”*, SIMS). Od **17.02.2014** do **28.02.2014** odbyłam staże w:

- Fraunhofer Institute for Cell Therapy and Immunology IZI; Lipsk, Niemcy
- Fraunhofer MOEZ; Lipsk, Niemcy
- Max – Planck – Institute of Molecular Cell Biology and Genetics; Drezno, Niemcy
- Technische Universität Dresden – The Institute of Lightweight Engineering and Polymer Technology (ILK); Center for Information Services and High Performance Computing (ZIH); Drezno, Niemcy

Oraz od **10.03.2014** do **21.03.2014** w:

- IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, USA.

(Central Scientific Services Microfabrication Labs and IBM Microelectronics Research Lab)

Pełniłam/pełnię funkcję **kierownika** w 3 projektach naukowych:

2012-2015 – „L4S – Jednomodowe lasery kaskadowe do zastosowań w spektroskopii molekularnej” (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Program: Lider)

2012-2016 – „ TERAMY - Badania nad układami metal-półprzewodnik oraz ich zastosowaniem w inżynierii falowodów plazmonowych dla laserów kaskadowych emitujących promieniowanie z terahercowego zakresu częstotliwości” (Narodowe Centrum Nauki, Program: Sonata)

2016-2019 – “ETERA - Elevated Temperature Quantum Cascade Lasers for Terahertz Applications” (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju; współpraca dwustronna polsko - turecka)

Poza tym, byłam zaangażowana w 7 projektach naukowo – badawczych jako wykonawca (załącznik 3 i 4).

Podczas mojej pracy naukowej współpracowałam z wieloma Pracownikami Naukowo – Badawczymi spoza Instytutu Technologii Elektronowej, wśród nich można wymienić:

- Prof. Zbigniew (Zbig) Wasilewski, University of Waterloo, Kanada
- Prof. Steven Slivken, Prof. Manijeh Razeghi, Center of Quantum Devices (CQD), Northwestern University, USA
- Dr Lutfi Ozyuzer, dr Gulnur Aygun, Izmir Institute of Technology, Turcja
- Dr hab. inż. Norbert Pałka, mgr inż. Michał Walczakowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Polska
- Dr hab. Tomasz Czyszanowski, dr inż. Maciej Kuc, mgr inż Marcin Gębski, Politechnika Łódzka, Polska
- Dr Michał Szymański, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Polska
- Dr Rafał Jakiela, Instytut Fizyki PAN, Polska
- Dr Marcin Motyka, Politechnika Wroclawska, Polska

Od 30.06.2008 jestem członkiem **Rady Naukowej ITE**, a od 02.09.2013 członkiem Komisji Dyscyplinarnej w ITE.

W maju 2016 roku pełniłam funkcję **członka Komisji ds. oceny rozprawy doktorskiej** powołanej przez Radę Naukową *Faculty of Science (Lund University)*. Komisja miała na celu ocenę publicznej obrony rozprawy doktorskiej Martina Frackie’go (promotor: prof. dr

Andreas Wacker, praca doktorska pt.: „Modeling Quantum Cascade Lasers”). Obrona odbyła się w Lund University w Lund w Szwecji.

Poza naukowymi zadaniami, byłam również zaangażowana w wiele działań mających na celu modernizację laboratoriów technologicznych. W szczególności, w 2010 roku Laboratorium Wytwarzania Przyrządów Fotonicznych, którym kierowałam przeszło gruntowną modernizację finansowaną z Programu POIG (POIG.02.02.00-00-004/08). **Stale i aktywnie uczestniczyłam w projektowaniu i nadzorowaniu nowoczesnego laboratorium technologicznego** (klasa czystości 100 i 1000). Byłam również odpowiedzialna za przygotowanie specyfikacji technicznej dla wielu urządzeń technologicznych, takich jak: urządzenie do naświetlania, urządzenie do osadzania, urządzenie do trawienia reaktywnego, urządzenia do montażu i innych urządzeń, które stały się wyposażeniem Laboratorium Technologii Wytwarzania Przyrządów Fotonicznych.

W latach 2015 – 2016 byłam zaangażowana w działania mające na celu zakup urządzeń technologicznych w Zakładzie Mikro- i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych, ITE. W szczególności, byłam odpowiedzialna za przygotowanie wymogów technicznych dla zakupów aparaturowych dla laboratorium litografii (urządzenie do elektronolitografii oraz urządzenie do naświetlania w głębokim nadfiolecie).

Po uzyskaniu stopnia doktorskiego rozpoczęłam równocześnie działalność popularyzującą naukę i technologię, jak również działania związane z opieką nad stażystami, doktorantami i studentami oraz szkoleniem studentów studiów magisterskich (załącznik 4).

W najbliższej przyszłości planuję kontynuować prace naukowo – badawcze w projekcie “Elevated Temperature Quantum Cascade Lasers for Terahertz Applications” i rozpocząć projekt pt. „Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużych mocy i wysokich częstotliwości” (projekt będzie finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w ramach programu TECHMATSTRATEG, Liderem jest Politechnika Warszawska), w którym będę pełnił rolę kierownika zadania nr 3, pt. „Technologie i materiały do wytwarzania lateralnych tranzystorów wysokonapięciowych AlGaIn/GaN/Si HEMT”.

Anna Szerling