

Technologia wytwarzania terahercowych laserów kaskadowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono technologię wytwarzania terahercowych laserów kaskadowych z warstwami metalicznymi pełniącymi rolę płaszczy falowodów. Obszar aktywny tych laserów składa się z 228 powtórzeń modułu zbudowanego ze sprzężonych studni potencjału $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$. W pracy przedstawiono pełny cykl technologiczny wytwarzania lasera terahercowego, obejmujący osadzanie warstw metalicznych, łączenie obszarów aktywnych laserów z podłożem zastępczym, usuwanie podłoża i warstwy stopującej (warstwy AlAs zatrzymującej trawienie podłoża GaAs, pełniącej funkcję technologiczną podczas usuwania podłoża) i następnie formowanie falowodu grzbietowego. Według tego schematu technologicznego wykonano trzy serie laserów, w których zastosowano różne płaszcze metaliczne (5 nm Ti/ 300 nm Au; 5 nm Ti/ 300 nm Cu; 5 nm Ti/ 300 nm Ag). Uzyskane lasery charakteryzowały się gęstościami prądu progowego na poziomie $J_{th} \sim 1,2 \text{ kA/cm}^2$ oraz maksymalną temperaturą pracy $T_{max} = 140 \text{ K}$.

Abstract. In the paper, the fabrication of terahertz quantum cascade lasers equipped with metallic layers playing the role of waveguide claddings is presented. Its operation is based on 3-quantum-well (3QW) modules, where the GaAs QWs are separated by $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ barriers. The laser's active region is built by stacking the 228 modules. The scheme of processing of THz QCLs with metal – metal waveguides is shown, covering metal layer deposition, wafer bonding, removing of the substrate with etch stop layer (an AlAs layer used for terminating of the GaAs substrate etching, so playing the technological role during the substrate removal process). The fabrication of ridge structure is also presented. According to this scheme three series of the lasers were fabricated. The lasers with 5 nm Ti/ 300 nm Au, 5 nm Ti/ 300 nm Cu, 5 nm Ti/ 300 nm Ag as waveguide layers were made. The fabricated lasers have threshold current densities $J_{th} \sim 1.2 \text{ kA/cm}^2$ and the maximum operating temperature was $T_{max} = 140 \text{ K}$. (**Fabrication of terahertz quantum cascade lasers**).

Słowa kluczowe: promieniowanie terahercowe, lasery kaskadowe, technologia wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych
Keywords: terahertz radiation, quantum cascade lasers, semiconductor device fabrication technology

Wprowadzenie

Pasmo częstotliwości terahercowych znajduje zastosowanie w spektroskopii molekularnej, nieinwazyjnym obrazowaniu (co ma znaczenie np. dla celów medycznych, w naukach biologicznych, wojskowości i ochronie bezpieczeństwa publicznego) [1, 2] oraz w komunikacji bezprzewodowej wewnątrz budynków. Od 2002 roku wytwarzane są półprzewodnikowe monolityczne unipolarne źródła spójnego promieniowania terahercowego - lasery kaskadowe (THz QCLs) [3]. Lasery takie osiągają obecnie kilkudziesięciomiliwatowe moce optyczne w temperaturach rzędu kilku K, ich maksymalne temperatury działania wynoszą $\sim 200 \text{ K}$ [4]. Półprzewodnikowe lasery terahercowe charakteryzują się niezwykle małą wydajnością pompowania, co jest wynikiem wysokiej trudności w uzyskaniu inwersji obsadzeń. Poza zagadnieniem związanym z półprzewodnikowym obszarem czynnym, innym ważnym warunkiem uzyskania działającego terahercowego lasera kaskadowego jest wykonanie odpowiedniego, niskostratnego falowodu, co wiąże się m.in. z koniecznością dokonania właściwego doboru materiału płaszcza falowodu oraz metody i warunków jego wytwarzania. Dotychczas stosowane materiały płaszcza obejmują wysoko domieszkowany arsenek galu typu n, lub różnego rodzaju warstwy metaliczne. Jednak w przypadku GaAs następuje stosunkowo głębokie wnikanie promieniowania w warstwę płaszcza i w efekcie wysokie straty falowodowe. Natomiast właśnie dzięki zastosowaniu odpowiednich warstw metalicznych uzyskuje się stosunkowo dobre uwięzienie promieniowania i niższe straty falowodowe – jak pokazują obliczenia [5, 6] zależne od rodzaju metalu (metali) tworzącego płaszczyz. Dlatego też niezmiernie ważne jest odpowiednie opracowanie elementów technologii wytwarzania płaszcza (dobranie rodzaju metalu/metali i ich grubości oraz rodzaju zastosowanej technologii) w celu minimalizacji strat falowodowych a zarazem uzyskania odpowiednich właściwości elektrycznych. Kwestia wysokości strat falowodowych i ich redukcji jest jednym z

kluczowych zagadnień technologii laserów kaskadowych działających w pasmie terahercowym - mają one wyraźny, negatywny wpływ na kluczowe parametry działania tych laserów, takie jak natężenie prądu progowego i maksymalna temperatura pracy przyrządów [7].

Wytwarzanie terahercowych laserów kaskadowych

W ramach prac nad technologią wytwarzania terahercowych laserów kaskadowych wyznaczono na drodze teoretycznej wartości strat falowodowych dla laserów z różnymi płaszciami metalicznymi (Cu, Ag, Au, Pt, Ni, Ti, Ge, Ta) [5, 6] i dokonano wyboru najmniej stratnych konstrukcji (rodzajów metali oraz ich grubości) do zastosowania w technologii THz QCL.

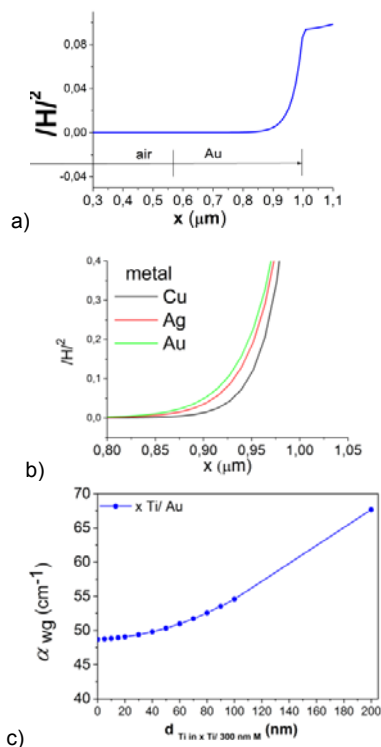
Dzięki opracowanemu modelowi teoretycznemu (współczynniki załamania obliczono na podstawie modelu Drudego – Lorentza), możliwe było wyznaczenie wpływu grubości i rodzaju warstw metalicznych (pełniących rolę płaszcza falowodu) na zjawisko wzmocnienia i straty falowodowe w terahercowym laserze kaskadowym [5, 6]. Straty falowodowe dla różnych falowodów metal-metal obliczono rozwiązując równanie Helmholtza metodą macierzy przejścia. W ramach prac wyznaczono teoretycznie profil kwadratu modułu wektora natężenia pola magnetycznego, profil zespolonego współczynnika załamania w strukturach THz QCL [5, 6].

Tabela 1. Współczynniki załamania dla różnych warstw metalicznych i straty falowodowe dla laserów terahercowych ($\nu \sim 3 \text{ THz}$) $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$ [5]

Metal	\tilde{n}_{metal}	$\alpha_{wg} (\text{cm}^{-1})$
Cu	$227.6 + i 340.2$	44.87
Ag	$204.6 + i 264.1$	47.49
Au	$188.3 + i 237.4$	48.69
Ni	$123.0 + i 157.2$	54.43
Pt	$113.8 + i 132.4$	57.92
Ti	$57.4 + i 65.9$	78.10

W tabeli 1 zaprezentowano zbiór wyników teoretycznych - współczynniki załamania oraz strat falowodowe dla laserów, dla których założono istnienie nieskończone grubych warstw metalicznych tworzących płaszcze falowodowe.

Na podstawie przeprowadzonych prac teoretycznych stwierdzono występowanie zależności pomiędzy głębokością wnikania promieniowania laserowego w głąb metalu - stopniem ograniczenia promieniowania w falowodzie - (rys.1 a, b) a wysokością strat falowodowych w laserach (tab.1). Na tej podstawie stwierdzono, iż teoretycznie najniższych strat falowodowych można się spodziewać dla laserów z płaszczem falowodu wykonanym z warstw miedzi. Jednak stosunkowo obiecujące wydają się również wyniki dla warstw srebrnych oraz złotych. Określono minimalną grubość płaszcza metalicznego w technologii terahercowych laserów kaskadowych $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$. Obliczono, iż zastosowanie 200 nm warstwy płaszcza metalicznego jest już wystarczające dla uwięzienia promieniowania w strukturze lasera terahercowego $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$. Jednak ze względów technologicznych w przedstawionym eksperymencie zastosowano warstwy metali o grubości wynoszącej 300 nm, chodzi tu o łatwość wykonywania połączeń obszaru aktywnego z podłożem zastępczym.

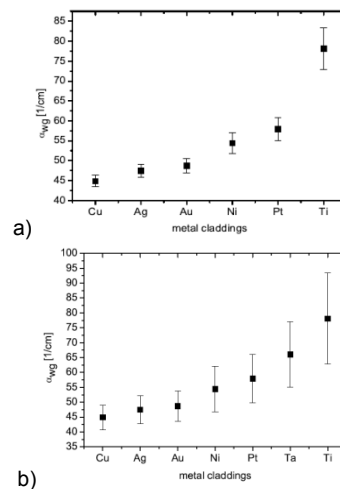


Rys.1. Profil pola ($|H|^2$) dla płaszcza złotego na strukturze lasera $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$ (a). Fragment profilu $|H|^2$ dla płaszcza Au, Ag, Cu na strukturze lasera $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$ (różna głębokość wnikania pola w płaszcze metaliczne) (b) oraz zależność strat falowodowych od grubości warstwy Ti w płaszczu Ti/Au na strukturze lasera $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$ (c) [5]

Stosowanie w technologii półprzewodników AIIIIV warstw Au, Ag, Cu wymaga użycia warstwy barierowej blokującej proces dyfuzji tych metali w materiał półprzewodnikowy [8, 9]. Dobrym materiałem do tego celu są warstwy tytanu. Z drugiej strony na podstawie wyników modelowania stwierdzono, że materiał ten jako warstwa leżąca bezpośrednio na półprzewodniku jest powodem dużych strat falowodowych (tab.1). Dlatego też wyznaczono teoretycznie zależność strat falowodowych od grubości warstwy Ti w płaszczu Ti/Au na strukturze lasera

$Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$ (rys.1c). Biorąc pod uwagę wyniki tych obliczeń optymalna grubość bariery dyfuzyjnej Ti nie przekracza 30 nm [5, 7].

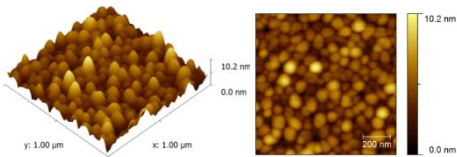
W ramach prac teoretycznych przeprowadzono rachunek błędów (rys.2) - obliczając możliwe rozbieżności strat falowodowych przy założeniu różnego stopnia rozbieżności dla wartości części rzeczywistej i urojonej współczynnika załamania metalu [6].



Rys.2. Rachunek błędów przeprowadzony dla wyznaczonych strat falowodowych (α_{wg}) dla różnych niedokładności dla wartości części rzeczywistej i urojonej współczynnika załamania metalu $\delta n(ME)R$, $\delta n(ME)I = \pm 10\%$ (a) oraz $\delta n(ME)R$, $\delta n(ME)I = \pm 25\%$ (b) [6]

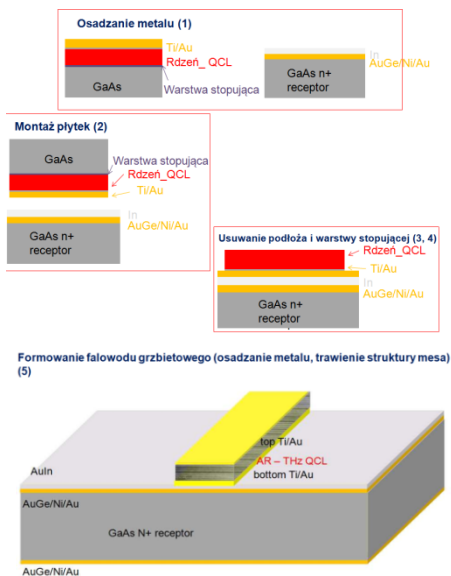
Motywacją dla takiego podejścia było stwierdzenie dużych - co najmniej kilkadziesiąt procent - rozbieżności dla podawanych w literaturze teoretycznych i eksperymentalnych wartości współczynników załamania metali. Są one wynikiem m.in. trudności pomiarowych, jak i trudno kontrolowalnych zjawisk fizycznych (np. dyfuzji) towarzyszących procesom technologicznym (wytwarzania warstw płaszcza i montażu laserów). Obliczono, że warunkiem możliwości teoretycznego ustalenia tego, które z metali są najbardziej obiecujące w charakterze materiału płaszcza, niezbędne jest zminimalizowanie niepewności wartości współczynników załamania do ok. $\pm 10\%$ wartości. Należy podkreślić, że poza kwestią strat falowodowych optymalizacją warstw metalicznych dla laserów obejmuje także zagadnienia formowania kontaktów, odprowadzania ciepła, możliwej dyfuzji i mieszania pierwiastków [6].

W ramach prac nad laserami THz opracowano technologię wytwarzania ciągłej warstwy tytanu o grubości równiej 5 nm [7]. Przeprowadzono systematyczne badania nad technologią wytwarzania warstw metalicznych, ich celem było dobranie odpowiednich warunków osadzania (ciśnienia i mocy generatora) oraz temperatury krytycznej procesów technologicznych (wygrzewanie w celu uformowania kontaktów oraz łączenie płytek). Z zastosowaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej zbadano morfologię powierzchni międzyfazowych dla struktur $GaAs(100)/5\text{ nmTi}/300\text{ nm Au}$ wygrzewanych w zakresie temperatur $250^\circ C < T < 560^\circ C$ i na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż podczas wygrzewania do $T = 405^\circ C$ warstwa Ti jest ciągła [7]. Jako metodę charakteryzacji powierzchni stosowano również mikroskopię sił atomowych i obserwowana topografia powierzchni również była kryterium selekcji właściwych warunków osadzania warstw metalicznych. Wybrano takie warunki, w których osadzone warstwy metaliczne charakteryzowały się najniższą chropowatością. Przykładowe obrazy AFM zaprezentowano na rysunku 3.



Rys.3. Obrazy AFM dla struktury GaAs (100)/ 5nmTi/300nm Au osadzone metodą rozpylania magnetonowego ($P = 50 \text{ W}$, $p = 5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$). Parametr RMS wynosił 1,43

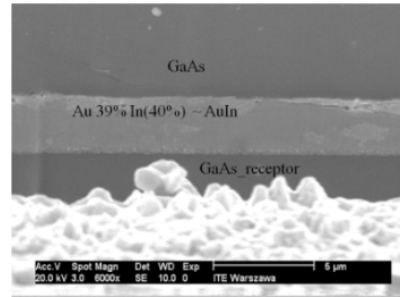
Pełny cykl technologiczny lasera terahercowego AlGaAs/GaAs z płaszczem metalicznym obejmuje [7, 10]: osadzenie warstw metalicznych, łączenie obszarów aktywnych laserów z podłożem zastępczym, usuwanie podłoża i warstwy stopującej (warstwy AlAs zatrzymującej trawienie podłoża GaAs, pełniącej funkcję technologiczną podczas usuwania podłoża) i następnie formowanie falowodu grzbietowego (rys.4). Opracowano technologię formowania falowodu grzbietowego zarówno z zastosowaniem trawienia w roztworach wodnych jak i w plazmie. W przypadku naszego lasera głębokość trawienia wynosi $\sim 10 \mu\text{m}$, co jest związane z sumaryczną grubością warstw epitaksjalnych obszaru aktywnego - szczegółowe dane dotyczące konstrukcji struktury przedstawiono w pracach [7, 10].



Rys.4. Cykl technologiczny lasera terahercowego z falowodem metalicznym

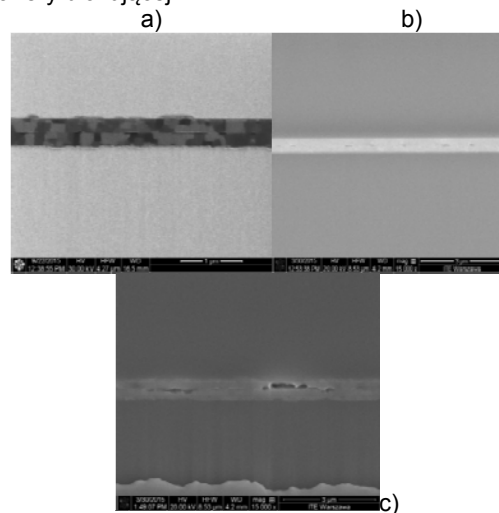
Bardzo ważnym zagadnieniem w technologii tego typu przyrządów jest opracowanie łączenia laserowych obszarów aktywnych z podłożami zastępczymi. W pierwszej kolejności przetestowano zastosowanie indu w charakterze lutowni [7]. Wykonano tu systematyczne badania z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej. W celu określenia składu tworzących się faz metalicznych zastosowano

mikroanalizę rentgenowską. W wyniku prac uzyskano stabilne połączenie za pomocą stopu AuIn (rys.5).



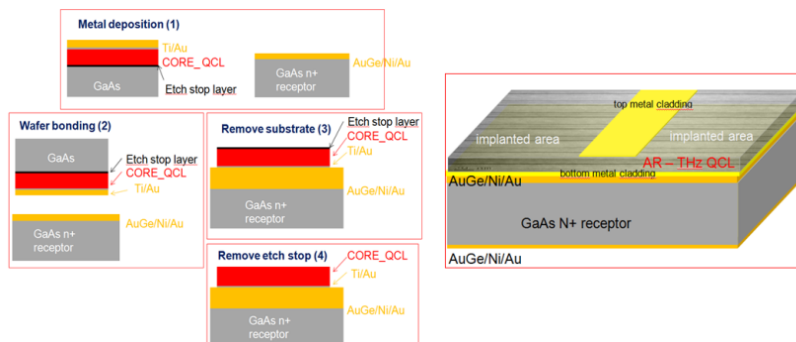
Rys.5. Zdjęcie ze skaningowego mikroskopu elektronowego obrazujące połączenie struktury testowej GaAs/ Au (imitującej obszar aktywny lasera z płaszczem Au) z podłożem zastępczym, uzyskane w ramach testu z lutem indowym [7]

W kolejnym etapie opracowano bezpośredni montaż płytek pokrytych warstwami Au (rys.6a), Ag (rys.6b), Cu (rys.6c), gdzie we wszystkich przypadkach osadzona bezpośrednio na półprzewodniku 5 nm warstwa Ti pełniła rolę bariery blokującej.



Rys.6. Zdjęcia ze skaningowego mikroskopu elektronowego obrazujące połączenia struktury testowej (imitującej obszar aktywny lasera) z podłożem zastępczym, uzyskane w ramach testów bez lutu indowego w konfiguracjach łączenia: Au-Au (a), Ag-Ag (b), Cu-Cu (c)

Aktualnie trwają prace nad nowym schematem technologicznym, w którym ograniczenie prądowe będzie wykonane metodą implantacji protonów (rys.7).

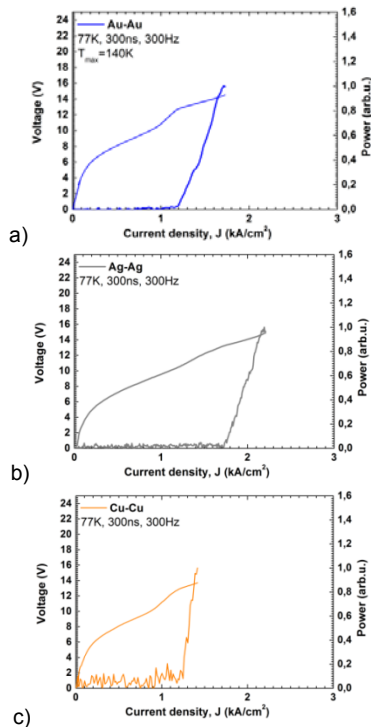


Rys.7. Cykl technologiczny lasera terahercowego, w którym ograniczenie prądu przeprowadzone jest metodą implantacji protonów

W przedstawionym rozwiązaniu nie będzie konieczności trawienia masy.

Parametry laserów terahercowych

Wykonano lasery z różnymi płaszczykami metalicznymi (5 nm Ti/300 nm Au, 5 nm Ti/300 nm Ag, 5 nm Ti/300 nm Cu). Lasery były wykonane w konstrukcji paskowej (mesę formowano w roztworze $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ (1:1:1)). Na rysunku 8 przedstawiono charakterystyki elektrooptyczne dla wykonanych laserów, zmierzone w trybie zasilania impulsowego w temperaturze ciekłego azotu.



Rys.8. Charakterystyki elektrooptyczne dla laserów z płaszczykami metalicznymi: Ti/Au-Ti/Au (a), Ti/Ag-Ti/Ag (b), Ti/Cu – Ti/Cu (c)

Najlepsze parametry, tj. najniższą gęstość prądu progowego $J_{th} \sim 1,2 \text{ kA/cm}^2$ oraz maksymalną temperaturę pracy $T_{max} = 140 \text{ K}$ uzyskano dla laserów z płaszczykami falowodowymi 5 nm Ti/300 nm Au.

Podsumowanie

Zaprezentowano technologię wytwarzania terahercowych laserów kaskadowych $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$ z falowodami metalicznymi o płaszczykach Ti/Cu, Ti/Ag oraz Ti/Au. Wyboru konstrukcji płaszczyki falowodów dokonano na podstawie badań teoretyczno-eksperymentalnych. Na drodze teoretycznej wyznaczono straty falowodowe dla laserów THz o różnych płaszczykach metalicznych (Cu, Ag,

Au, Pt, Ni, Ti, Ge, Ta) korzystając z teoretycznie wyznaczonych współczynników załamania dla metali w zakresie terahercowym (3 THz). Na podstawie rachunku błędów uwzględniającego niepewność wartości współczynników załamania tych metali przeprowadzono dyskusję dotyczącą wyboru materiałów zapewniających minimalizację strat falowodowych. Uwzględniając wskazówki teoretyczne opracowano również tytanową warstwę blokującą dyfuzję Au, Ag i Cu do obszaru półprzewodnika. Przedstawiono lasery generujące promieniowanie THz o gęstościach prądów progowych $< 2 \text{ kA/cm}^2$ i maksymalnych temperaturach pracy 140 K.

Praca była finansowana z projektów nr 2011/03/D/ST7/03146 oraz 2012/07/D/ST7/02568 finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki oraz z projektu na współpracę międzynarodową nr 1/POLTUR-1/2016 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Autorzy: dr inż. Anna Szerling¹, dr hab. Kamil Kosiel¹, E-mail: kkosiel68@gmail.com, dr inż. Michał Szymański², mgr inż. Piotr Prokaryn¹, dr inż. Mariusz Płuska¹, dr Artur Trajnerowicz¹, dr Maciej Sakowicz¹, dr inż. Piotr Karbownik¹, prof. dr Zbigniew Wasilewski¹, mgr inż. Krystyna Gołaszewska¹, mgr Maciej Kozubał¹, mgr inż. Renata Kruszka¹

¹ Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

² Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

LITERATURA

- [1] Hübers H.-W. et al., *Appl. Phys. Lett.* 89(6) (2006), 061115
- [2] Kumar S. et al., *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 14(2) (2008), 333–344
- [3] Köhler R. et al., *Nature*, 417 (2002), 156-159
- [4] Kumar S. et al., *Nature Physics*, 7 (2011), 166-171
- [5] Szymański M., Szerling A., Kosiel K., *Optical and Quantum Electronics*, vol. 47 (2015), nr. 4, 843-849
- [6] Szymański M., Szerling A., Kosiel K., Płuska M., *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(27) (2016), 275102
- [7] Szerling A. et al., *Journal of Nanophotonics*, 9(1) (2015), 093079-093079
- [8] Piotrowska A., Kontakty omowe na bazie złota do związków półprzewodnikowych III-V, rozprawa habilitacyjna
- [9] Piotrowska A., Kaminska E., Guziewicz M., Kwiatkowski S., Turos A., Dual Role of Tin Reaction Barrier in Gold-Based Metallization to GaAs. In *MRS Proceedings* (Vol. 300, p. 219). Cambridge University Press, 1993
- [10] Szerling A., Kosiel K., Prokaryn P., Szymański M., Trajnerowicz A., Sakowicz M., Karbownik P., Płuska M., Walczakowski M., Pałka N.: rozdział pt. AlGaAs/GaAs Terahertz Quantum Cascade Laser with Gold-Based Metal - Metal Waveguide, 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