



Detektory podczerwieni z supersieci II rodzaju układu InAs/GaInSb

WALDEMAR GAWRON, ANTONI ROGALSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Fizyki Technicznej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Artykuł przedstawia stan rozwoju nowej generacji detektorów podczerwieni — fotodiod z supersieci II rodzaju ze związków InAs/GaInSb. O ich fundamentalnych właściwościach decydują kwantowe efekty rozmiarowe. Ta nowa tematyka badawcza została podjęta w VIGO System S.A. w ramach realizacji zadania nr 3 programu zamawianego PBZ-MNiSW 02/I/2007. Celem tego zadania jest opracowanie i zbadanie właściwości fotodiod detektorów podczerwieni na bazie supersieci. Podstawę do konstrukcji fotodiod będą stanowić struktury z supersieci II rodzaju z InAs/InGaSb, wykonane w ramach zadania nr 2 PBZ-MNiSW 02/I/2007 realizowanego równolegle w Instytucie Technologii Elektronowej.

Słowa kluczowe: detektory podczerwieni, kwantowe efekty rozmiarowe, supersieci II rodzaju z InAs/GaInSb

Symbole UKD: 535-15

1. Wstęp

Obecnie czołową pozycję wśród materiałów do konstrukcji detektorów promieniowania podczerwonego zajmuje tellurek kadmowo-rtęciowy, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (HgCdTe). Jest on unikalnym materiałem, którego właściwości umożliwiają konstrukcję detektorów optymalizowanych dla dowolnej długości fali w zakresie bliskiej, średniej i dalekiej podczerwieni [1-5]. Wynika to między innymi z wielu zalet tego materiału. Najważniejsze z nich to:

- przestrajalność przerwy zabronionej w szerokim zakresie,
- znikoma zależność stałej sieciowej od składu x , co umożliwia otrzymywanie heterostruktur o złożonej architekturze,

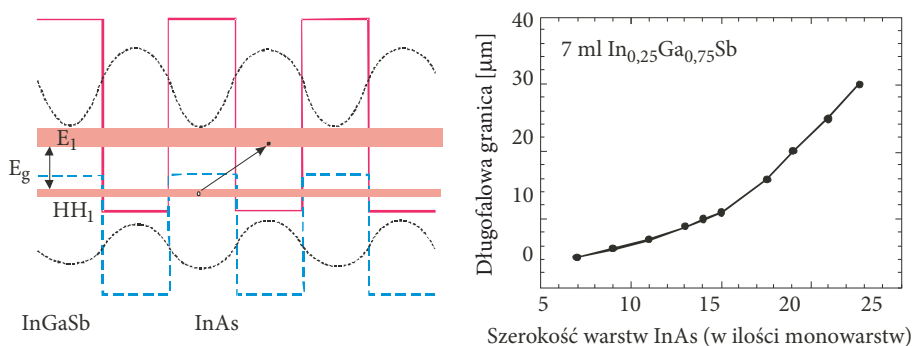
- wysoki współczynnik absorpcji promieniowania,
- duża ruchliwość nośników,
- stosunkowo niska generacja termiczna nośników,
- niska wartość stałej dielektrycznej, co zapewnia dużą szybkość odpowiedzi detektorów,
- współczynnik rozszerzalności termicznej dopasowany do krzemu, co umożliwia konstrukcję hybrydowych matryc detektorów.

Jednak mimo tych niewątpliwych zalet tellurek kadmowo-rtęciowy jest materiałem najbardziej trudnym technologicznie spośród półprzewodników szeroko stosowanych. Jednym z największych problemów technologii HgCdTe jest niska stabilność właściwości tego materiału. Wynika ona z niskiej energii wiązania Hg-Te, co w szczególności skutkuje łatwym odparowaniem Hg i HgTe z roztworu oraz tworzeniem luk w podsieci metalu. Wynikająca z tego niestabilność sieciowa i powierzchniowa związku powoduje przyspieszoną degradację detektorów podczerwieni konstruowanych z HgCdTe. Należy podkreślić, że problem ten ujawnia się szczególnie w wąskoprzerwowym HgCdTe o dużej zawartości HgTe (długofalowy zakres widmowy). Ponadto okazuje się, że małe fluktuacje składu $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ powodują duże fluktuacje w długofalowej granicy czułości, co w konsekwencji powoduje duże trudności w uzyskiwaniu jednorodnych macierzy detektorów szczególnie w długofalowym zakresie widma podczerwieni, 12-16 μm . Z kolei niejednorodności składu są przyczyną niskiej rozdzielczości temperaturowej macierzy.

Związki półprzewodnikowe $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, ze względu na większy udział wiązania kowalencyjnego, charakteryzują się większą trwałością wiązań w porównaniu z związkami grupy $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. Z tego też powodu od dłuższego czasu wśród związków grupy $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ poszukiwano odpowiedniego półprzewodnika do detekcji promieniowania podczerwonego szczególnie w długofalowym zakresie widma podczerwieni. Z grupy tych związków najbardziej perspektywnym nowym materiałem do konstrukcji detektorów podczerwieni są supersieci z naprężeniami (w języku angielskim zwanymi *strained layer superlattices* — SLSs) układu InAs/Ga_{1-x}In_xSb, na co po raz pierwszy wskazali Smith i Mailhiot w 1987 roku [6].

W II rodzaju supersieci mamy nietypową sytuację, ponieważ dno pasma przewodnictwa warstw InAs położone jest poniżej wierzchołka pasma walencyjnego warstw InGaSb, co pokazano na rysunku 1. Takie ułożenie pasm pozwala zarówno na formowanie struktury pasmowej półmetal (w przypadku warstw InAs i GaInSb o większej grubości), jak i struktury pasmowej półprzewodnika o wąskiej przerwie energetycznej (w przypadku cienkich warstw). W supersieci elektrony są głównie zlokalizowane w warstwach InAs, podczas gdy dziury — w warstwach GaInSb. Taka separacja nośników wpływa na dławienie mechanizmu rekombinacji Augera, co w konsekwencji ma wpływ na zwiększenie czasu życia nośników. Przerwa energetyczna supersieci jest określona odległością energetyczną pomiędzy mini-

pasmem elektronów E_1 a pierwszym minipasmem ciężkich dziur HH_1 w środku strefy Brillouina. Przerwa energetyczna może być zmieniana w zakresie od zera do około 250 meV. Na rysunku 1 pokazano przykładowy zakres przestrajania przerwy energetycznej.



Rys. 1. Supersieć InAs/GaInSb z naprężeniami: (a) struktura pasmowa supersieci; (b) zależność długofalowej granicy czułości od grubości warstw InAs [7]

Pod pewnymi względami właściwości fizyczne supersieci są bardziej optymalne w konstrukcji detektorów niż właściwości HgCdTe. Współczynniki pochłaniania tych supersieci są porównywalne do mierzonych w HgCdTe. Masa efektywna elektronów w supersieci jest większa niż w HgCdTe, co ogranicza składową prądu tunelowego w fotodiodach. Budowa struktury pasmowej supersieci umożliwia bardziej efektywne dławienie rekombinacji Augera nośników, co w konsekwencji wpływa na zwiększenie czasu życia nośników i polepszenie osiągnięć fotodiod (wydajności kwantowej, iloczynu R_0A).

Obecnie stan zaawansowania technologii supersieci na świecie pozwala na skonstruowanie fotodiod z InAs/GaInSb o parametrach porównywalnych z używanymi dla fotodiod z HgCdTe. Z supersieci InAs/GaInSb można również konstruować wielospektralne macierze detektorów. Ten nowy typ detektorów przyjęto nazywać trzecią generacją detektorów podczerwieni. Oczekuje się w szczególności, że fotodiody z II rodzaju supersieci będą stosowane w wielospektralnych macierzach pracujących w dalszej podczerwieni, gdzie są duże trudności z uzyskaniem jednorodnego materiału z HgCdTe. Większa jednorodność składu supersieci może rozstrzygnąć o ich znaczeniu w tym zakresie widmowym. Dodatkową korzyścią z zastosowania supersieci jest wyeliminowanie szkodliwych dla zdrowia metali ciężkich Hg i Cd.

Pewnym ograniczeniem w technologii fotodiod z InAs/GaInSb, a w szczególności macierzy detektorów, są podłoża. Handlowo dostępne są niedomieszkowane podłoża z GaSb typu p i domieszkowane tellurem typu n, jednak o wysokiej

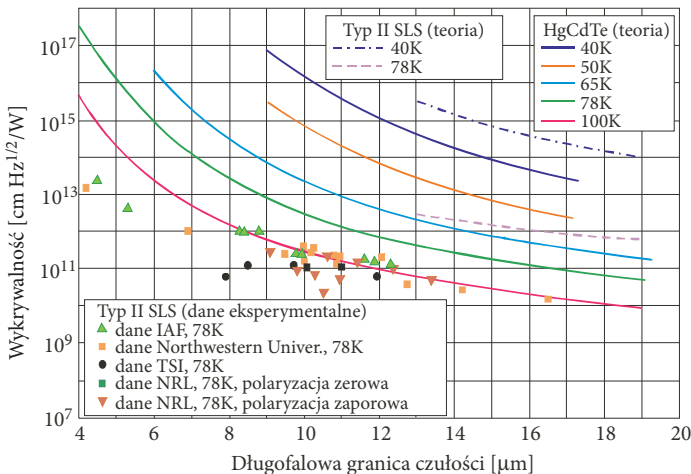
koncentracji nośników. Podłoża GaSb są ścieniane do grubości poniżej 25 μm , w celu uzyskania dobrej transmisji promieniowania wymaganej przy oświetlaniu fotodiod od tyłu.

Technologia otrzymywania supersieci InAs/GaInSb jest we wstępnej fazie rozwoju. Główne trudności związane są z dopracowaniem technologii ich otrzymywania, *processingiem* detektorów, przygotowaniem podłoży do epitaksji i pasywacją detektorów. Jednak potencjalne znaczenie supersieci InAs/GaInSb jest duże, co w przyszłości może spowodować dominację tego związku w konstrukcji detektorów podczerwieni, szczególnie w zakresie dalszej podczerwieni. Należy również zaznaczyć, że detektory z supersieci InAs/GaInSb z powodzeniem mogą być stosowane w produkcji niechłodzonych detektorów podczerwieni [8].

2. Fotodiody z supersieci II rodzaju

Jak już wspomniano, w 1987 roku Smith i Mailhiot [6] wskazali, że najbardziej perspektywicznym nowym materiałem do konstrukcji detektorów podczerwieni są supersieci z naprężeniami układu InAs/Ga_{1-x}In_xSb. Teoretyczne oszacowania wskazują, że wykrywalności fotodiod z supersieci InAs/GaInSb mogą być porównywalne do osiągniętych dla fotodiod z HgCdTe, a nawet większe od nich [8].

Rysunek 2 porównuje wykrywalności fotodiod z II rodzaju supersieci z odpowiednimi wykrywalnościami dla fotodiod P-na-n z HgCdTe, w funkcji długofalowej



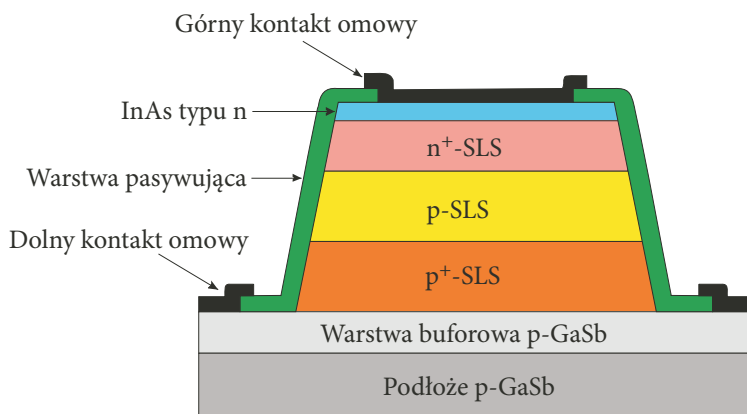
Rys. 2. Zależność wykrywalności od długofalowej granicy czułości dla fotodiod z supersieci II rodzaju i fotodiod P-na-n z HgCdTe. Obliczenia teoretyczne zaznaczono liniami ciągłymi i przerywanymi. Dane eksperymentalne zebrano z kilku prac dla fotodiod z supersieci pracujących w 77 K [9]

granicy czułości. Dane eksperymentalne dla supersieci dotyczą pracy w temperaturze 78 K. Liniami ciągłymi przedstawiono teoretycznie obliczone granice wykrywalności termicznej, przyjmując jednowymiarowy model dyfuzyjny diody z dominującym wpływem obszaru aktywnego fotodiod z czasem życia określonym procesami rekombinacji radiacyjnej i rekombinacji Augera. Przyjęto koncentrację donorów w obszarze aktywnym o grubości 10 μm równą $N_d = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ i wydajność kwantową 60%. Jak widać z rysunku 2, teoretyczna granica wykrywalności dla fotodiod z supersieci jest wyższa niż dla fotodiod HgCdTe.

Pierwszą fotodiodę na bazie supersieci z InAs/GaInSb na 10,6 μm przedstawił Johnson i inni [10]. Obecnie stan zaawansowania technologii supersieci na świecie pozwala na skonstruowanie fotodiod z InAs/GaInSb o osiągniętych porównywalnych z uzyskiwanymi dla fotodiod z HgCdTe [11-17].

Typowe fotodiody z supersieci II rodzaju to struktury p-i-n z niedomieszkowanym obszarem aktywnym umieszczonym między dwoma obszarami wysoko domieszkowanymi. Przekrój poprzeczny fotodiody mesa przedstawiony jest na rysunku 3. Struktury fotodiod najczęściej osadzone są metodą MBE w temperaturze około 400°C na niedomieszkowanych dwucalowych podłożach GaSb o orientacji (001). Początkowo osadzana jest warstwa buforowa GaSb typu p o wysokiej koncentracji (10^{18} cm^{-3}), a następnie warstwa typu p domieszkowana berylem o koncentracji 10^{17} cm^{-3} . Grubość obszaru niedomieszkowanego (obszar aktywny) wynosi około 2 μm . Górna warstwa supersieci typu n jest domieszkowana krzemem do poziomu koncentracji około 10^{18} cm^{-3} . Górny obszar przykontaktowy InAs typu n o typowej grubości około 0,5 μm jest także domieszkowany krzemem ($n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

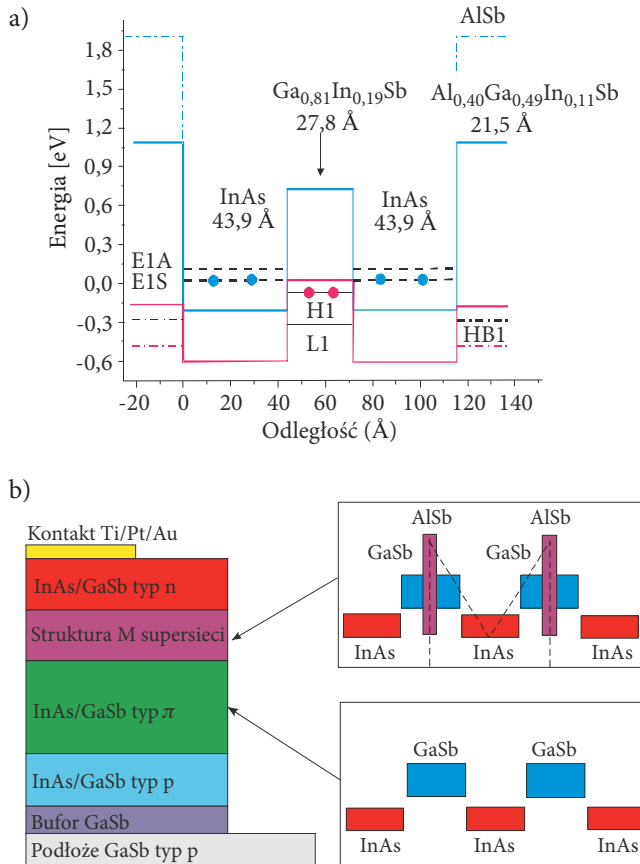
Fotodiody zarówno zakresu średniej, jak i dalekiej podczerwieni wykonane są najczęściej z binarnych supersieci InAs/GaSb. Jednak optymalizacja architektury fotodiod z supersieci jest nadal otwartą kwestią. Właściwości fotodiod zależą za-



Rys. 3. Przekrój typowej fotodiody mesa z supersieci II rodzaju

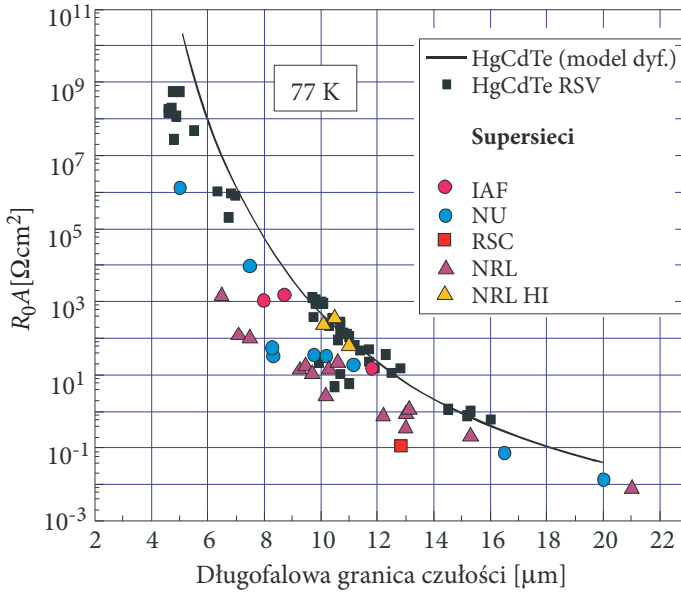
równy od składu warstw supersieci, ich struktury, jak i od grubości. Proponowane są nowe modyfikacje tych struktur. Dla przykładu, na rysunku 4 pokazano tzw. strukturę „W” i strukturę „M”. Aifer i współpracownicy [15] zaproponowali strukturę „W” uprzednio stosowaną w konstrukcji laserów zakresu średniej podczerwieni, w której w miejsce barier AlSb wprowadzono bariery z AlGaInSb. W takiej strukturze elektrony są zlokalizowane po obu stronach studni InGaSb dla dziur, przez co zwiększa się współczynnik absorpcji. Z kolei w strukturze „M” wprowadzono barierę AlSb blokującą oddziaływanie elektronów z dwu sąsiadujących studni InAs [16]. W efekcie zredukowano prąd ciemny i uzyskano rekordowe wartości iloczynu R_0A , większe niż dla fotodiod z HgCdTe.

Na rysunku 5 porównano zależność iloczynu R_0A od długofalowej granicy czułości fotodiod z supersieci InAs/GaInSb z odpowiednimi danymi (teoretyczny-



Rys. 4. Schematy modyfikacji struktur pasmowych supersieci II rodzaju: (a) struktura „W” [15] i (b) struktura „M” [16]

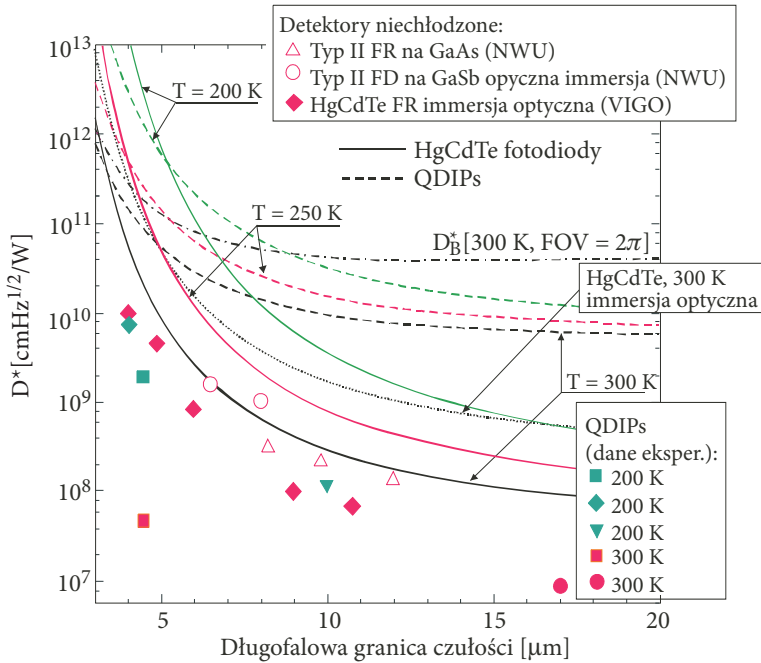
mi i eksperymentalnymi) dla fotodiod z HgCdTe, w funkcji długofalowej granicy czułości [17]. Linia ciągłą znaczone wartości teoretyczną R_0A według modelu dyfuzyjnego dla fotodiod z HgCdTe z aktywnym obszarem typu p. Widzimy, że wartości eksperymentalne dla fotodiod z supersieci są porównywalne dla tych otrzymywanych dla fotodiod z HgCdTe.



Rys. 5. Zależność iloczynu R_0A dla fotodiod z supersieci InAs/GaInSb w funkcji długofalowej granicy czułości porównany z teoretycznymi i doświadczalnymi wynikami dla fotodiod z HgCdTe w 77 K [18]

II typ supersieci z InAs/GaInSb jest również atrakcyjnym materiałem do konstrukcji długofalowych detektorów podczerwieni pracujących w temperaturach zbliżonych do temperatury pokojowej. Na rysunku 6 porównano obliczone teoretycznie wykrywalności dla fotodiod z HgCdTe i detektorów z kropek kwantowych (w języku angielskim zwanych *quantum dot infrared photodetectors* — QDIPs) z danymi eksperymentalnymi zebranych z wielu prac innych autorów. Obliczenia dla HgCdTe przeprowadzono, przyjmując optymalne domieszkowanie obszaru aktywnego detektora. Dane eksperymentalne dla HgCdTe stanowią dostępne komercyjnie detektory produkowane przez VIGO System S.A. Natomiast dane eksperymentalne dla detektorów II rodzaju supersieci zmierzone były w Center for Quantum Devices, Northwestern University. Dla porównania zaznaczono również dane eksperymentalne dla detektorów z kropek kwantowych pracujących w podwyższonych temperaturach. Widzimy, że osiągi detektorów z supersieci są porównywalne z osiąganymi detektorów z HgCdTe produkowanymi przez VIGO System S.A.

3. Podsumowanie



Rys. 6. Teoretycznie obliczono wykrywalność detektorów z HgCdTe w funkcji długości fali dla temperatur 200, 250 i 300 K. Dla porównania zebrano również dane eksperymentalne dla detektorów z HgCdTe (minimalne gwarantowane wartości z katalogu firmy VIGO System S.A. [19]), z II rodzaju supersieci (Center for Quantum Devices, Northwestern University [20]) i dla detektorów z kropek kwantowych (wg danych z kilku prac [8])

Technologia otrzymywania supersieci InAs/GaInSb jest jeszcze we wstępnej fazie rozwoju. Główne trudności związane są z dopracowaniem technologii ich otrzymywania, processingiem detektorów, przygotowaniem podłoży do epitaksji i pasywacją. Praktycznym wykorzystaniem supersieci II rodzaju do konstrukcji detektorów promieniowania podczerwonego nikt się jeszcze do tej pory w Polsce nie zajmował. Znane są natomiast prace teoretyczne na temat wykorzystania supersieci II rodzaju do konstrukcji detektorów promieniowania podczerwonego głównie A. Rogalskiego i innych [5, 8, 14, 21-23].

W ramach tego projektu zamawianego przewiduje się opracowanie technologii otrzymywania supersieci II rodzaju i zademonstrowanie dobrej jakości fotodiod wykonanych z tych supersieci. Oczekuje się, że w przyszłości ta nowa generacja detektorów będzie również rozwijana w celu utrzymania pozycji w świecie polskiej

specjalności w zakresie produkcji niechłodzonych fotodetektorów pracujących w długofalowym zakresie widma podczerwieni.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy zamawiany PBZ — MNiSW 02/I/2007.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.05.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] J. PIOTROWSKI, A. ROGALSKI, *Półprzewodnikowe detektory promieniowania podczerwonego*, WNT, Warszawa, 1984.
- [2] J. PIOTROWSKI, W. GALUS, M. GRUDZIEN, *Near room-temperature IR photo-detectors*, *Infrared Phys.*, 31, 1991, 1-48.
- [3] J. PIOTROWSKI, *Hg_{1-x}Cd_xTe infrared photodetectors*, in *Infrared Photon Detectors*, ed. by A. Rogalski, SPIE Press, Bellingham, 1995, 391-494.
- [4] A. ROGALSKI, K. ADAMIEC, J. RUTKOWSKI, *Narrow-Gap Semiconductor Photodiodes*, SPIE Press, Bellingham, 2000.
- [5] J. PIOTROWSKI, A. ROGALSKI, *High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors*, SPIE Press, Bellingham, 2007.
- [6] D. L. SMITH, C. MAILHIOT, *Proposal for strained type II superlattice infrared detectors*, *J. Appl. Phys.*, 62, 1987, 2545.
- [7] G. J. BROWN, F. SZMULOWICZ, K. MAHALINGAM, S. HOUSTON, Y. WEI, A. GON, M. RAZEGHI, *Recent advances in InAs/GaSb superlattices for very long wavelength infrared detection*, *Proc. SPIE*, 4999, 2003, 457-466.
- [8] A. ROGALSKI, *New material systems for third generation infrared photodetectors*, *Opto-Electron. Rev.*, 16, 2008, 458-482.
- [9] J. BAJAJ, G. SULLIVAN, D. LEE, E. AIFER, M. RAZEGHI, *Comparison of type-II superlattice and HgCdTe infrared detector technologies*, *Proc. SPIE* 6542, 65420B, 2007.
- [10] J. L. JOHNSON, L. A. SAMOSKA, A. C. GOSSARD, J. L. MERZ, M. D. JACK, G. H. CHAPMAN, B. A. BAUMGRATZ, K. KOSAI, S. M. JOHNSON, *Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice in heterojunctions with GaSb*, *J. Appl. Phys.*, 80, 1996, 1116-1127.
- [11] W. CABANSKI, K. EBERHARDT, W. RODE, J. WENDLER, J. ZIEGLER, J. FLEISSNER, F. FUCHS, R. REHM, J. SCHMITZ, H. SCHNEIDER, M. WALTHER, *3rd gen focal plane array IR detection modules and applications*, *Proc. SPIE*, 5406, 2005, 184-192.
- [12] R. REHM, M. WALTHER, J. SCHMITZ, J. FLEISSNER, F. FUCHS, W. CABANSKI, J. ZIEGLER, *InAs/(GaIn)Sb short-period superlattices for focal plane arrays*, *Proc. SPIE*, 5783, 2005, 123-130.
- [13] R. REHM, M. WALTHER, J. SCHMITZ, J. FLEISSNER, F. FUCHS, J. ZIEGLER, W. CABANSKI, *InAs/GaSb superlattice focal plane arrays for high-resolution thermal imaging*, *Opto-Electron. Rev.*, 14, 2006, 283-296.
- [14] A. ROGALSKI, P. MARTYNIUK, *InAs/GaInSb superlattices as a promising material system for third generation infrared detectors*, *Infrared Physics & Technol.*, 48, 2006, 39-52.

- [15] E. H. AIFER, J. G. TISCHLER, J. H. WARNER, I. VURGAFTMAN, W. W. BEWLEY, J. R. MEYER, C. L. CANEDY, E. M. JACKSON, *W-Structured type-II superlattice long-wave infrared photodiodes with high quantum efficiency*, Appl. Phys. Lett., 89, 2006, 053510.
- [16] B.-M. NGUYEN, D. HOFFMAN, P.-Y. DELAUNAY, M. RAZEGHI, *Dark current suppression in type II InAs/GaSb superlattice long wavelength infrared photodiodes with M-structure barrier*, Appl. Phys. Lett., 91, 2007, 163511.
- [17] P.-Y. DELAUNAY, B. M. NGUYEN, D. HOFFMAN, M. RAZEGHI, *High-performance focal plane array based on InAs-GaSb superlattices with a 10- μ m cutoff wavelength*, IEEE J. Quant. Electron., 44, 2008, 462-467.
- [18] C. L. CANEDY, H. AIFER, I. VURGAFTMAN, J. G. TISCHLER, J. R. MEYER, J. H. WARNER, E. M. JACKSON, *Antimonide type-II W photodiodes with long-wave infrared R_0A comparable to HgCdTe*, J. Electron. Mater., 36, 2007, 852-856.
- [19] <http://www.vigo.com.pl>
- [20] <http://cqdeecs.northwestern.edu/research/type2.php>
- [21] A. ROGALSKI, *Competitive technologies for third generation infrared photon detectors*, Opto-Electron. Rev., 14, 2006, 87-101.
- [22] A. ROGALSKI, *Material consideration for third generation infrared photon detectors*, Infrared Phys. & Technol., 50, 2007, 240-252.
- [23] A. ROGALSKI, J. ANTOSZEWSKI, L. FARAONE, *Third-generation infrared photodetector arrays*, J. Appl. Phys., 105, 2009.

W. GAWRON, A. ROGALSKI

Type-II InAs/GaInSb superlattices for infrared photodetectors

Abstract. This article presents state of the art of new generation of infrared detectors based on low dimensional solids — type II InAs/GaSb superlattices for photovoltaic detectors. This new scientific program has been undertaken in VIGO System S.A. owing to realization of grant 3 PBZ-MNiSW 02/I/2007 supported by the Polish Ministry of Science and Higher Education.

Keywords: infrared detectors, low dimensional solids, type II InAs/GaInSb superlattices

Universal Decimal Classification: 535-15