

Monokryształy SI GaAs o orientacji [310] jako materiał na podłoża do osadzania warstw epitaksjalnych

Andrzej Hruban, Waclaw Orłowski, Stanisława Strzelecka, Mirosław Piersa,
Elżbieta Jurkiewicz-Wegner, Aleksandra Mirowska, Anna Rojek

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa;
e-mail: andrzej.hruban@itme.edu.pl

Streszczenie: Celem pracy było dowiedzenie warunków otrzymywania półizolacyjnych monokryształów arsenku galu (SI-GaAs) o orientacji [310] i średnicy 2'' i 3''. Synteza i monokryształizacja przebiegała pod wysokim ciśnieniem metodą LEC (*Liquid Encapsulated Czochralski*). Dobrano warunki termiczne i technologiczne pozwalające otrzymywać monokryształy o średnicy 2'' i 3'' i ciężarze odpowiednio 2000 g i 3000 g. Monokryształy posiadały wysokie parametry elektryczne (ρ , μ) - typowe dla monokryształów półizolacyjnych o wysokim stopniu czystości. Gęstość dyslokacji kryształów [310] była o (0,5 - 1,5) rzędu niższa w porównaniu z kryształami o orientacji [100]. Warstwy epitaksjalne osadzone na podłożach o orientacji [310] wykazały lepszą morfologię powierzchni w porównaniu z osadzonymi na podłożu [100].

Słowa kluczowe: SI GaAs, arsenek galu, metoda Czochralskiego, LEC, orientacja

[310]-oriented SI GaAs single crystals as material for epitaxial substrates

Abstract: The subject matter of this research work included the synthesis and growth conditions of [310]-oriented SI GaAs (semi-insulating gallium arsenide) crystals 2'' or 3'' in diameter. High pressure processes were applied for the synthesis and growth of LEC crystals. Thermal conditions and process parameters were determined to obtain single crystals 2'' and 3'' in dia, 2000 g and 3000 g in weight, respectively. They had high electrical parameters (ρ , μ), characteristic of semi-insulating high purity GaAs. Dislocation density (EPD) of [310]-oriented crystals was (0.5 - 1.5) orders of magnitude lower than in the case of the [100]-orientation. Epitaxial layers grown on [310]-oriented substrates exhibited better surface morphology than those deposited on [100]-oriented substrates.

Key words: SI GaAs, gallium arsenide, Czochralski method, LEC, orientation

1. Wstęp

Standardowymi orientacjami płytek stosowanych na przyrządy optoelektroniczne i mikrofalowe są orientacje (100), (111) i (110). W ostatnich latach obserwuje się zainteresowanie monokryształami i płytkami SI GaAs o orientacjach takich jak (112), (311), (411), (310). Zastosowanie płytek o takich orientacjach związane jest z:

- stosowaną techniką epitaksji (MOCVD, MBE),
- poprawą jakości struktury warstw heteroepitaksjalnych,
- zwiększeniem wydajności struktur np. lasery,
- zwiększeniem czułości np. struktury detektorowe.

W wymienionych zastosowaniach bardzo istotnymi są zarówno gęstość dyslokacji, jak i morfologia powierzchni osadzanych warstw.

Dyslokacje wychodzące na powierzchnię płytki podłożowej (ujawniane np. przez trawienie) przechodzą do warstw epitaksjalnych osadzanych na takiej powierzchni. Degradują one własności przyrządów (lasery, detektory). Dlatego poszukuje się takich orientacji powierzchni płytek, przy których dyslokacje wychodzące posiadają możliwie najniższą gęstość. Jedną z niestandardowych orientacji jest orientacja (310).

Obok spełnienia kryterium obniżonej gęstości dyslokacji wymaga się aby morfologia powierzchni warstwy wzrastającej na płycie posiadała jak najmniejszą falistość i mikrochropowatość.

Celem niniejszych badań było opracowanie warunków otrzymywania monokryształów SI GaAs o orientacji [310] i średnicy 2'' i 3''. Przeprowadzono badania porównawcze własności elektrycznych i strukturalnych monokryształów i płytek o tej orientacji z monokryształami o standardowej orientacji [100]. Porównano również morfologię powierzchni warstw epitaksjalnych GaAs/GaAs osadzonych na podłożach o orientacji (310) i (100).

2. Część doświadczalna

Monokryształy SI GaAs o orientacji [310] i średnicy 2'' i 3'' zostały wytworzone techniką LEC (*Liquid Encapsulated Czochralski*) w urządzeniu Czochralskiego Galaxy Mark IV wyposażonym w komorę ciśnieniową umożliwiającą procesy krystalizacji pod ciśnieniem do 100 atm. Syntezę GaAs prowadzono metodą „*in situ*”, tzn. bezpośredniego stapiania składników pod osłoną warstwy hermetyzującej B₂O₃ pod ciśnieniem Ar [1 - 2]. Zarodzie o orientacji [310] wycinano z kryształów SI GaAs o orientacji [100].

W wyniku przeprowadzonych badań opracowano warunki termiczne i technologiczne umożliwiające powtarzalne otrzymywanie monokryształów o średnicy 2'' i 3''. Na Rys. 1 przedstawiony jest widok kryształu o długości ~ 12 cm.

Badaniom podlegały monokryształy o średnicy Φ 2'' i 3'' po etapie standardowej obróbki termicznej, której celem była poprawa parametrów elektrycznych i ujednorodnienie własności w objętości kryształu [1 - 3]. Parametry elektryczne (ρ , μ , n) określano z pomiarów przewodnictwa i efektu Halla w temperaturze 300K [3].

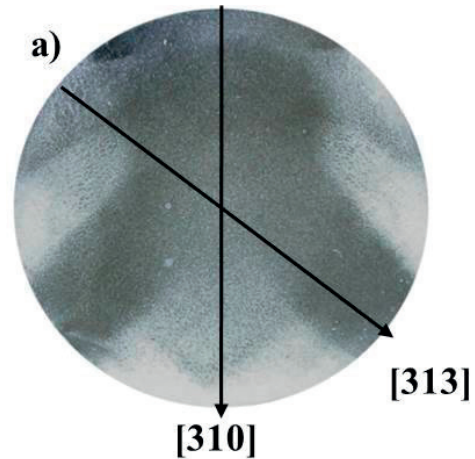
Miernikiem jakości strukturalnej kryształów SI GaAs jest gęstość dyslokacji. Międzynarodowe normy ASTM i DIN podają metodykę ujawniania i obliczania gęstości dyslokacji w monokryształach i płytkach Ga As o orientacji [111] i [100] [4 - 5]. Brak jest takich procedur dla innych orientacji, w tym także dla [310], stąd koniecznym było sprawdzenie i wybór odczynników ujawniających dyslokacje na płaszczyznach (310) oraz opracowanie metodyki ich obliczania.

W celu ujawnienia dyslokacji na płytkach o orientacji (310) przeprowadzono próby wykorzystując różne mieszanki chemiczne stosowane do ujawniania dyslokacji na niskowskaźnikowych płaszczyznach krystalograficznych (szczególnie zalecanych w normach ASTM i DIN dla płaszczyzn (100) i (111) [4 - 5]). Stosowanie procedur ujawniania dyslokacji na płaszczyznach (111) (trawienie w mieszance 1 cz. H_2O + 5 cz. H_2SO_4 + 1 cz. H_2O_2) nie dało pozytywnego wyniku. Nie uzyskano figur trawienia, które odpowiadałyby dyslokacjom. Uzyskano tylko obustronne polerowanie powierzchni płytek (310). Podobny efekt obserwowano po trawieniu w roztworze 2% Br w metanolu. Obydwie mieszanki umożliwiają usunięcie warstwy uszkodzonej, a równocześnie ujawnienie dyslokacyjnych jamek trawienia na płaszczyznach (111)A^{III} tj. (111)Ga. Dla płytek o orientacji (310) były one mieszankami polerującymi. Wykonano również próby trawienia tzw. odczynnikami AB [6] służącym do ujawniania dyslokacji na niskowskaźnikowych płaszczyznach różnych związków



Rys. 1. Widok kryształu SI GaAs o średnicy ~ 3'' i orientacji [310].

Fig. 1. Image of a [310]-oriented SI GaAs crystal 3'' in dia.



Rys. 2. Makroskopowy obraz struktury dyslokacyjnej monokryształu SI GaAs o średnicy 2'' i orientacji [310]; jasne pola – obszary o wyższej gęstości dyslokacji.

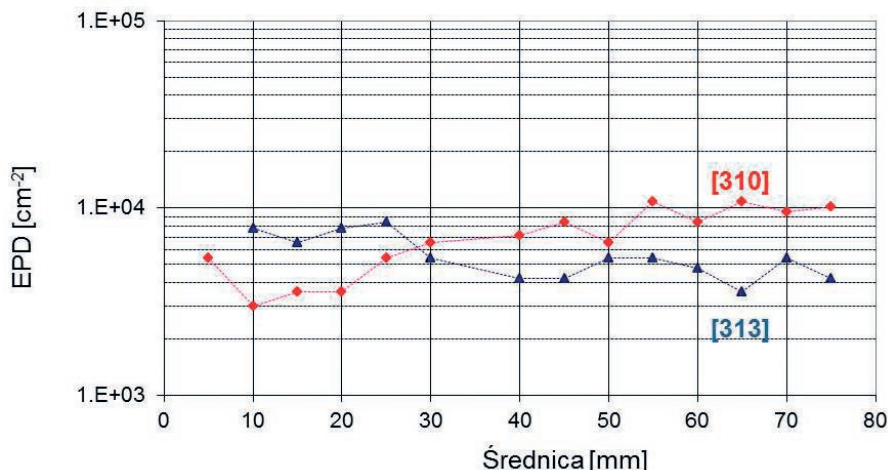
Fig. 2. Macroscopic dislocation structure of a [310]-oriented SI GaAs crystal 2'' in dia: a) macroscopic structure; bright fields – areas with higher dislocation density.

A^{III}B^V. Zgodnie z możliwościami tego odczynnika uzyskiwano obrazy nieregularnych wzniesień o różnej długości. Obrazy te ujawniają ogólny rozkład dyslokacji, ale w formie nie nadającej się do oceny ich gęstości.

Najlepsze wyniki (jamki trawienia o prawidłowym kształcie) uzyskano stosując procedury do ujawniania dyslokacji na płaszczyznach (100) wg normy ASTM dla tej orientacji [3] tzn. trawienie w roztopionym KOH. Pewnym uzasadnieniem tych wyników może być analiza kątów między rozważanymi płaszczyznami krystalograficznymi; kąt między płaszczyzną (310) a (111) wynosi 43°05', a między płaszczyzną (310) a (100) wynosi tylko 18°26'.

Po zastosowaniu procedury trawienia w stopionym KOH uzyskuje się zdeformowane jamki trawienia z ostrzejszym obrazem jednego z wierzchołków powstającym w wyniku anizotropii trawienia różnych płaszczyzn {111} w związkach A^{III}B^V.

Obraz makroskopowy rozkładu gęstości dyslokacji dla



Rys. 3. Rozkład gęstości dyslokacji w kryształach o średnicy 3" na płaszczyźnie (310) wzdłuż kierunków [310] i [313].

Fig. 3. EPD distribution in a 3" crystal on the (310) surface in the [310] and [313] directions.

monokryształu o orientacji [310] pokazuje Rys. 2. Widać na nim charakterystyczną linię symetrii, która jest kierunkiem [310]. Bardziej równomierny rozkład dyslokacji obserwuje się w kierunku [313] odchylonym od kierunku [310] o $\sim 45^\circ$.

Przykładowy rozkład gęstości dyslokacji na tych kierunkach w kryształach o średnicy 3" przedstawia Rys. 3.

2. Omówienie wyników badań

W Tabelach 1 - 2 przedstawiono wyniki badań parametrów elektrycznych i strukturalnych otrzymanych monokryształów SI GaAs [310].

Monokryształy o średnicy 2" i 3" były otrzymywane z materiałów wsadowych (As i Ga) o czystości 7N. Przy odpowiedniej procedurze technologicznej umożliwiło to uzyskanie bardzo dobrych parametrów elektrycznych, rezystywność $\rho = (2,5 \times 10^7 - 2,3 \times 10^8) \Omega\text{cm}$, ruchliwość μ w zakresie (5000 - 6575) cm^2/Vs . Gęstość dyslokacji

była na poziomie $\text{EPD} = 1,4 \times 10^3 - 3,1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$.

Właściwości elektryczne tych monokryształów są podobne jak monokryształów SI GaAs o orientacji [100]. Jest to oczywiste, ponieważ orientacja krystalograficzna nie powinna mieć wpływu na parametry elektryczne, o których decydują poziom czystości i mechanizmy kompensacji w kryształach. Obserwuje się znaczne różnice w poziomie gęstości dyslokacji w monokryształach o orientacji [310] i [100]. Gęstość dyslokacji ujawnionych na płytkach z monokryształów o orientacji [310] jest od kilku do kilkunastu razy niższa w porównaniu z poziomem dyslokacji w monokryształach o orientacji [100]. Porównanie parametrów monokryształów o orientacji [310] i [100] przedstawione jest w Tab. 3, gdzie podane są typowe przedziały wartości parametrów.

Dla wyjaśnienia różnic w gęstości dyslokacji w kryształach [310] i [100] przeprowadzono badania struktury dyslokacyjnej na płytkach o orientacji (310) i (100). W tym celu z monokryształu o orientacji [310] wycięto płytkę o orientacji (100). Na płytce o orientacji (310)

Lp	Nr kryształu	Pł.	Rezystywność [Wcm]	Ruchliwość [cm^2/Vs]	Koncentracja [cm^{-3}]	EPD [cm^{-2}]
1.	2343	I	$7,7 \times 10^7$	5200	$1,6 \times 10^7$	$5,1 \times 10^3$
		II	$2,5 \times 10^7$	5650	$4,6 \times 10^7$	$1,3 \times 10^4$
2.	2344	I	$1,9 \times 10^8$	5210	$6,2 \times 10^6$	$2,3 \times 10^4$
		II	$9,7 \times 10^7$	5370	$1,2 \times 10^7$	$3,3 \times 10^4$
3.	2345	I	$7,0 \times 10^7$	6550	$1,4 \times 10^7$	$2,0 \times 10^4$
		II	$7,9 \times 10^7$	6310	$1,2 \times 10^7$	$2,7 \times 10^4$
4.	2347	I	$5,7 \times 10^7$	6060	$1,8 \times 10^7$	$8,1 \times 10^3$
		II	$8,7 \times 10^7$	5850	$1,2 \times 10^7$	$6,2 \times 10^3$
5.	2348	I	$1,1 \times 10^8$	5700	$1,0 \times 10^7$	$1,6 \times 10^3$
		II	$8,8 \times 10^7$	5920	$1,2 \times 10^7$	$1,6 \times 10^3$

Tab. 1. Parametry elektryczne i strukturalne monokryształów SI GaAs o orientacji [310] i średnicy 2".

Tab. 1. Electrical and structural parameters of [310]-oriented SI GaAs crystals 2" in dia.

gęstość dyslokacji była na poziomie $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$. Na odsłoniętej powierzchni płytki o orientacji (100) gęstość dyslokacji wynosiła $2,3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$. Obraz struktury dyslokacyjnej (kształtu jamek trawienia) na płytce o orientacji (310) z tego kryształu przedstawiony jest na Rys. 4. Obraz dyslokacji na płaszczyźnie (100) odsłoniętej z kryształu o orientacji [310] przedstawia Rys. 5.

Przeprowadzony eksperyment wskazuje, że przy orientacji kryształu [310] tylko pewna część dyslokacji wychodzi na jego powierzchnię (310). Ma to istotne znaczenie, dając możliwość wzrostu warstw epitaksjalnych o niskiej gęstości dyslokacji.

Porównanie kształtu jamek trawienia na płytkach o orientacji (100), (110) i (310) wskazuje na zmianę ich kształtu w zależności od orientacji. Wydłużają się one na skutek różnej szybkości trawienia płaszczyzn (111). Na Rys. 6 przedstawiono obraz struktury dyslokacyjnej na płytce wyciętej z kryształu o orientacji (110). Przy tej orientacji wydłużenie jamek trawienia jest mniejsze w porównaniu do orientacji (310). Najbardziej wydłużone są jamki dyslokacyjne na płytkach o orientacji (310) (Rys. 4).

Lp	Nr kryształu	PI	Rezystywność [Wcm]	Ruchliwość [cm^2/Vs]	Koncentracja [cm^{-3}]	EPD [cm^{-2}]
1.	2307	I	$2,3 \times 10^8$	5000	5×10^6	$3,1 \times 10^4$
		II	$1,0 \times 10^8$	5750	$1,0 \times 10^7$	$1,6 \times 10^4$
2.	2308	I	$8,7 \times 10^7$	5300	$1,3 \times 10^7$	$1,4 \times 10^3$
		II	$7,3 \times 10^7$	6575	$3,8 \times 10^7$	$2,5 \times 10^3$
3.	2336	I	$5,4 \times 10^7$	5580	$2,0 \times 10^7$	$1,2 \times 10^4$
		II	$5,8 \times 10^7$	5570	$1,9 \times 10^7$	$7,3 \times 10^3$
4.	2349	I	$1,6 \times 10^8$	5730	$6,9 \times 10^6$	$1,5 \times 10^4$
		II	$1,3 \times 10^8$	5970	$8,5 \times 10^6$	$1,3 \times 10^4$

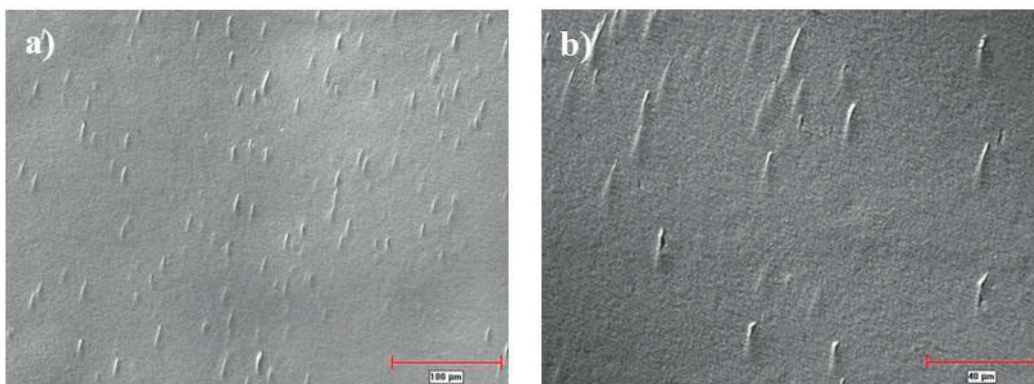
Tab. 2. Parametry elektryczne i strukturalne monokryształów SI GaAs o orientacji [310] i średnicy 3".

Tab. 2. Electrical and structural parameters of [310]-oriented SI GaAs single crystals 3" in dia.

Średnica 2"	Średnica 3"
<p>orientacja [310] rezystywność $(1 - 20) \times 10^7 \Omega\text{cm}$ ruchliwość $(5000 - 6500) \text{ cm}^2/\text{Vs}$ EPD: $(1,6 \times 10^3 - 3,3 \times 10^4) \text{ cm}^{-2}$</p>	<p>orientacja [310] rezystywność $(1 - 20) \times 10^7 \Omega\text{cm}$ ruchliwość $(5000 - 6500) \text{ cm}^2/\text{Vs}$ EPD: $(1,4 \times 10^3 - 3,1 \times 10^4) \text{ cm}^{-2}$</p>
<p>orientacja [100] rezystywność $(1 - 20) \times 10^7 \Omega\text{cm}$ ruchliwość $(5000 - 6500) \text{ cm}^2/\text{Vs}$ EPD: $(5 - 10) \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$</p>	<p>orientacja [100] rezystywność $(1 - 20) \times 10^7 \Omega\text{cm}$ ruchliwość $(5000 - 6500) \text{ cm}^2/\text{Vs}$ EPD: $\sim 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$</p>

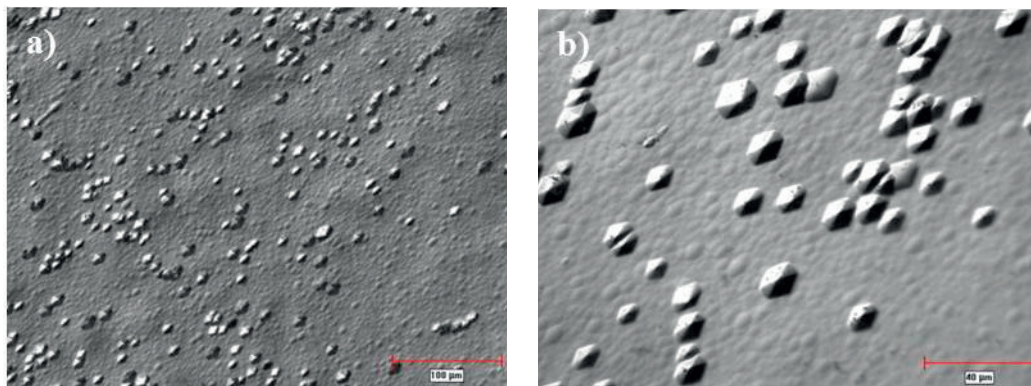
Tab. 3. Porównanie parametrów monokryształów SI GaAs o orientacji [310] i [100].

Tab. 3. Comparison of parameters of [310]- and [100]-oriented SI GaAs single crystals.

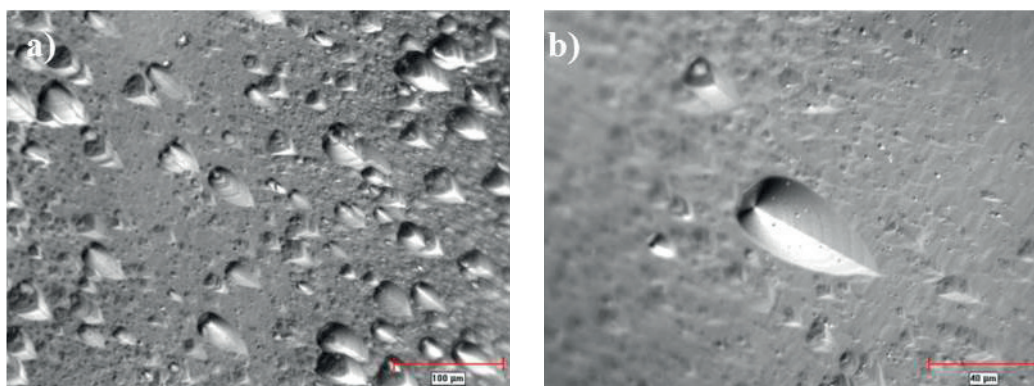


Rys. 4. Struktura dyslokacyjna monokryształu SI GaAs o średnicy 3" i orientacji [310]; powiększenie 200x(a) i 500x(b).

Fig. 4. Dislocation structure of a [310]-oriented SI GaAs single crystal 3" in dia; enlargement 200x(a) and 500x(b).



Rys. 5. Struktura dyslokacyjna na płaszczyźnie (100) odsłoniętej z kryształu o orientacji [310]; powiększenie 200x(a) i 500x(b).
Fig. 5. Dislocation structure on the uncovered (100) surface on a [310]-oriented crystal; 200x(a) and 500x(b) enlargement.



Rys. 6. Struktura dyslokacyjna monokryształów SI GaAs o orientacji (110); powiększenie 200x(a) i 500x(b).
Fig. 6. Dislocation structure of (110)-oriented SI GaAs wafers; 200x(a) and 500x(b) enlargement.

3. Badania aplikacyjne - osadzanie warstw epitaksjalnych

Celem badania było porównanie struktury powierzchni warstw epitaksjalnych GaAs osadzanych na płytkach podłożowych SI GaAs o orientacji (100) i (310). Warstwy osadzano metodą MOCVD, w jednym procesie epitaksji na ułożonych obok siebie płytkach GaAs o orientacji (100) i (310). Parametry procesu były standardowe takie jakie stosuje się dla wzrostu warstw GaAs na podłożach (100). Badania gładkości (profilu) tych powierzchni przeprowadzono na precyzyjnym profilometrze optycznym Contour GTK-1.

Obserwacja wizualna powierzchni warstw epitaksjalnych wykazywała, że na obydwu podłożach uzyskano powierzchnię lustrzaną. Na ogólnym obrazie powierzchni z profilometru optycznego warstwy osadzonej na podłożu o orientacji (100) obserwuje się strukturę falistą (Rys. 7) z falami ułożonymi równolegle.

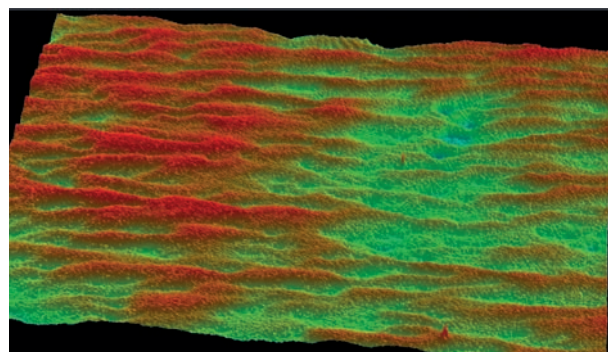
Pomiary profilu powierzchni tych warstw Rys. (8 - 9) wykazują mikrochropowatość 2 - 5 nm i falistość max. 12 nm.

Obraz ogólny powierzchni warstwy osadzonej na podłożu o orientacji (310) przedstawia Rys. 10.

W porównaniu do warstwy osadzonej na podłożu o orientacji (100) jest to powierzchnia gładka bez wi-

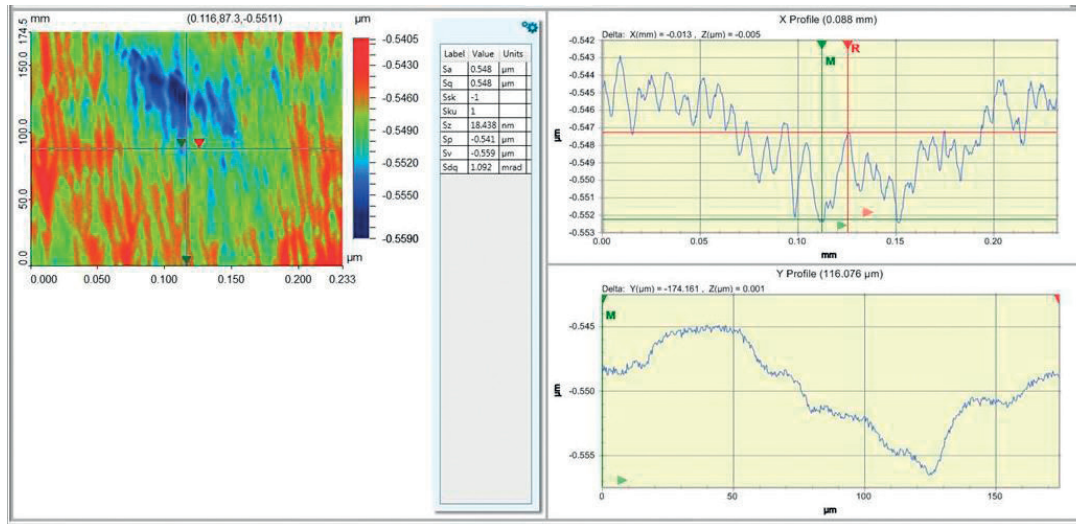
docznej struktury falistej. Pomiary przeprowadzone na profilometrze wykazały mikrochropowatość na poziomie 0,7 - 2 nm i falistość ~ 3 nm (Rys. 11 - 12).

Powyższe obserwacje wskazują, że powierzchnia warstwy epitaksjalnej osadzonej na podłożu (310) charakteryzuje się mniejszą chropowatością i falistością w porównaniu z warstwą osadzoną na podłożu (100) pomimo, że warunki wzrostu epitaksjalnego były optymalne dla tej drugiej orientacji.



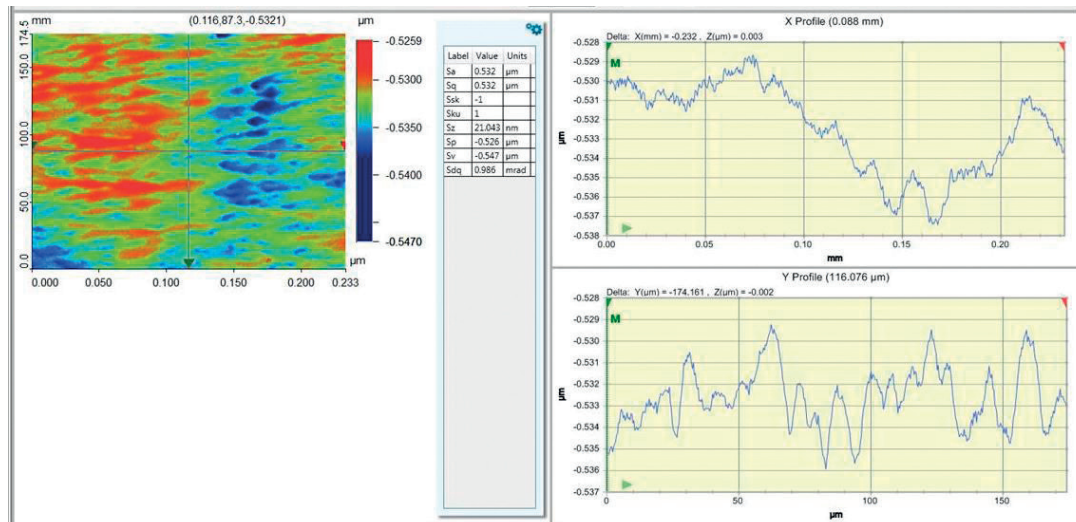
Rys. 7. Obraz powierzchni z profilometru optycznego Contour GTK-1 warstwy epitaksjalnej GaAs osadzonej na podłożu SI GaAs o orientacji (100).

Fig. 7. GaAs epitaxial layer deposited on a (100)-oriented SI GaAs substrate. View from the Contour GTK-1 optical profilometer.



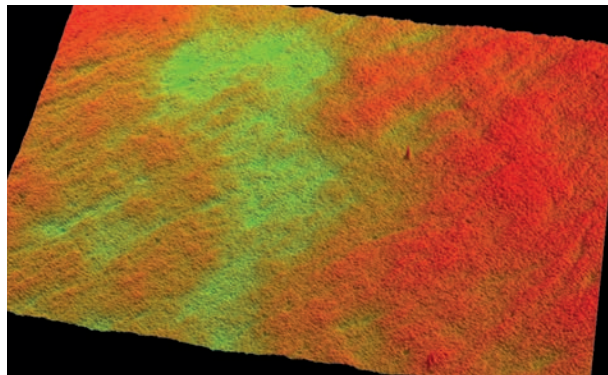
Rys. 8. Profil powierzchni warstwy osadzonej na podłożu o orientacji (100); powierzchnia pomiaru 233 μm x 175 μm; chropowatość w kierunku x = 5 nm, w kierunku y = 1 nm; falistość ~ 12 nm. Linie pomiaru zaznaczone na rysunku.

Fig. 8. Profile of the surface of an epitaxial layer on a (100)-oriented substrate; measurement area 233 μm x 175 μm; roughness in the x direction x = 5 nm, in the y direction y = 1 nm; warp ~ 12 nm.



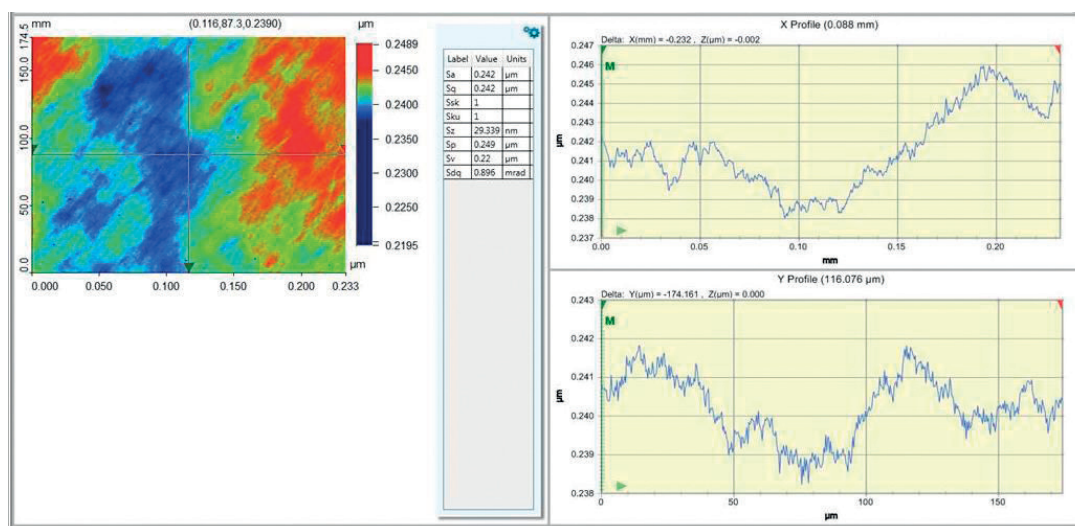
Rys. 9. Profil powierzchni warstwy osadzonej na podłożu o orientacji (100) – pomiar na płytce z Rys. 7 wykonany w kierunku prostopadłym w stosunku do przedstawionego na Rys. 8; chropowatość w kierunku x = 3 nm, w kierunku y = 2 nm; falistość ~ 8 nm. Linie pomiaru zaznaczone na rysunku.

Fig. 9. Profile of the surface of an epitaxial layer on a (100)-oriented substrate – measurement on the wafer from Fig. 7 in the direction perpendicular to the one presented in Fig. 8; roughness in the x direction x = 3 nm, in the y direction y = 2 nm; warp ~ 8 nm.



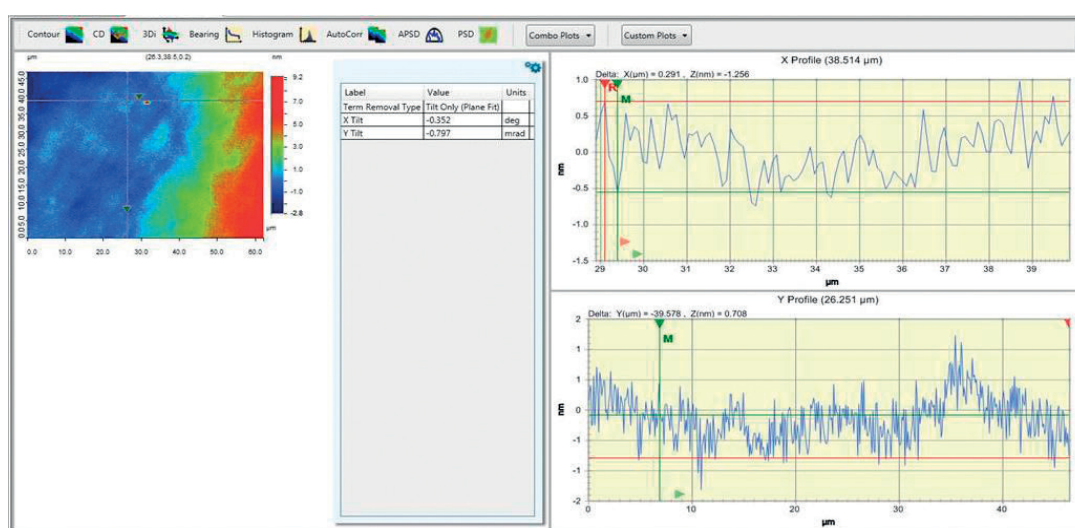
Rys. 10. Obraz powierzchni z profilometru optycznego Contour GTK-1 warstwy epitaksjalnej GaAs osadzonej na podłożu SI GaAs o orientacji (310).

Fig. 10. Surface of a GaAs epitaxial layer deposited on a (310) SI GaAs substrate. View from the Contour GTK-1 optical profilometer.



Rys. 11. Profil powierzchni warstwy osadzonej na podłożu o orientacji (310); powierzchnia pomiaru 233 μm x 175 μm; chropowatość w kierunku x = 2 nm, w kierunku y < 1 nm; falistość ~ 3 nm. Linie pomiaru zaznaczone na rysunku.

Fig. 11. Profile of the surface of an epitaxial layer grown on a (310)-oriented substrate; measurement area 233 μm x 175 μm; roughness in the x direction x = 2 nm, in the y direction y < 1 nm; warp ~ 3 nm.



Rys. 12. Profil innego obszaru powierzchni warstwy osadzonej na podłożu o orientacji (310); powierzchnia pomiaru 62 μm x 47 μm; chropowatość w kierunku x = 1,256 nm, w kierunku y = 0,708 nm. Linie pomiaru zaznaczone na rysunku.

Fig. 12. Profile of different area of the epitaxial layer grown on a (310)-oriented substrate; measurement area 62 μm x 47 μm; roughness in the x direction x = 1.256 nm, in the y direction y = 0.708 nm.

4. Podsumowanie

Poszukiwania optymalnych podłoży z SI GaAs dla wzrostu warstw homo- i heteroepitaksjalnych idą w kierunku uzyskania materiału o możliwie niskiej gęstości dyslokacji oraz zapewniających dużą gładkość powierzchni rosnących warstw. Spełnienie tych warunków jest trudne do osiągnięcia, nawet przy zachowaniu dobrych parametrów elektrycznych i niskiej gęstości defektów punktowych. Stąd próby zastosowania podłoży o orientacji krystalograficznej różnej od standardowej [111] i [100].

W otrzymanych przez nas kryształach SI GaAs

o orientacji [310] obserwuje się niską gęstość dyslokacji (kilka do kilkunastu razy niższą w stosunku do kryształów o orientacji [100]), przy wysokiej rezystywności $\rho > 10^7 \Omega \text{cm}$ i ruchliwości nośników $\mu = 5000 - 6500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Interesujący jest stosunkowo mały wpływ średnicy kryształów na wzrost gęstości dyslokacji.

Porównania wskazują na większą gładkość powierzchni warstw GaAs osadzanych na podłożu o orientacji (310) w stosunku do warstwy osadzonej w tym samym procesie na podłożu o orientacji (100). Wynika stąd, że podłoża o orientacji (310) dają szansę uzyskiwania struktur epitaksjalnych o wyższej jakości.

Literatura

- [1] Obróbka termiczna monokryształów SI-GaAs o niskiej koncentracji płytkich domieszek reszkowych, Sprawozdanie ITME z pracy statutowej
- [2] Hruban A., Orłowski W., Mirowska A., Strzelecka S., Piersa M., Jurkiewicz - Wegner E., Materna A., Dalecki W.: Zintegrowany proces otrzymywania monokryształów SI GaAs metodą Czochralskiego z hermetyzacją cieczową, *Materiały Elektroniczne*, 2012, 40, nr 3, 38 - 46
- [3] Monokryształy SI GaAs o wysokiej ruchliwości nośników prądu, Sprawozdanie ITME z pracy statutowej
- [4] ASTM F 1404 - 92 Test method for crystallographic perfection of gallium arsenide by molten potassium hydroxide (KOH) Etch Technique; 1992
- [5] DIN 50454, Part 1, Testing materials for semiconductor technology: determination of dislocation etch pit density in materials of III-V compounds semiconductors; gallium arsenide
- [6] Abrahams M. S., Buichi C. J.: Etching of dislocations on the low-index faces of GaAs, *J. Appl. Phys.*, 1965, 36, 2855