

BADANIE ROZKŁADÓW WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNYCH I OPTYCZNYCH MONOKRYSTAŁÓW GaP STOSOWANYCH W OPTYCE PODCZERWIENI

Stanisława Strzelecka¹, Andrzej Hruban¹, Elżbieta Jurkiewicz-Wegner¹, Mirosław Piersa¹,
Wacław Orłowski¹, Aleksandra Mirowska¹

¹⁾ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa;
e-mail: stanisława.strzelecka@itme.edu.pl

Niedomieszkowane monokryształy GaP o niskiej koncentracji nośników $n \leq 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ stosowane są głównie na elementy optyczne pracujące w bliskiej podczerwieni w zakresie widmowym (1 - 8) μm oraz w dalekiej podczerwieni (100 - 200) μm . Elementy te mogą posiadać duże rozmiary Φ (2''-3''). Jednym z podstawowych wymagań dla monokryształów stosowanych na elementy optyczne jest duża jednorodność własności, których miernikiem może być transmitancja. Na wartość i jednorodność transmitancji mogą mieć wpływ takie czynniki jak poziom i rozkład koncentracji nośników prądu, gęstości dyslokacji i koncentracji centrów defektowych. W ramach obecnej pracy badano wpływ tych czynników. Stwierdzono, że istnieje jednoznaczna zależność transmitancji tylko od koncentracji nośników prądu. Empirycznie wyznaczono tę zależność dla zakresu koncentracji nośników $n = 10^{15} - 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ przy długości fali $\lambda = 3100 \text{ nm}$.

Słowa kluczowe: GaP, własności elektryczne, własności optyczne

1. WSTĘP

W chwili obecnej dużym zainteresowaniem cieszy się niedomieszkowany fosforek galu (GaP:nd) typu n o koncentracji nośników $n \leq 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, w tym także półizolacyjny SI GaP (Semi Insulating) o oporności $\rho \geq 10^7 \Omega\text{cm}$. Fosforek galu o wysokim stopniu czystości stosowany jest głównie na elementy optyczne w obszarze podczerwieni w zakresie widmowym (1 - 8) μm oraz w dalekiej podczerwieni (100 - 200) μm . Elementy te mogą posiadać duże rozmiary Φ (2'' - 3'') i jednym z podstawowych wymagań dla takiego materiału jest jednorodność transmitancji, przy niskiej koncentracji niekontrolowanych domieszek resztkowych oraz niskiej koncentracji centrów defektowych [1].

Głównymi domieszkami donorowymi w GaP są:

- krzem (Si) w podsieci galu (Si_{Ga}) – pierwiastek ten może być wprowadzany w procesach synte-

zy i monokryształizacji z użyciem tygli kwarcowych,

- siarka (S) głównie zawarta w fosforze jako zanieczyszczenie.

Domieszkami akceptorowymi są:

- węgiel (C) w podsieci fosforu (C_{P}) – źródłem zanieczyszczenia węglem są elementy grafitowe układów grzejnych stosowanych w technice krystalizacji Czochralskiego LEC
- cynk (Zn) zawarty w materiałach wsadowych (Ga) jako zanieczyszczenie.

W niedomieszkowanych kryształach GaP obserwuje się duże różnice koncentracji nośników między początkiem a końcem kryształu oraz na jego średnicy. Część początkowa jest niskooprowa o koncentracji nośników $n \leq 4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, natomiast część końcowa kryształów jest często półizolacyjna o rezystywności $\rho \geq 10^7 \Omega\text{cm}$. Na tak duże różnice koncentracji nakładają się dwa czynniki :

- segregacja domieszki (koncentracja krzemu – głównej domieszki donorowej maleje wzdłuż kryształu)
- generacja centrów defektowych, szczególnie centrów głębokich zależnych od warunków termicznych panujących w procesie wzrostu.

Dla materiału wysokooprowowego z pomiarów zmian rezystywności w funkcji temperatury określany jest poziom energetyczny o energii 1.1 eV. Według [2] poziom o takiej energii wiązany jest z centrami defektowymi P_{Ga} . Koncentracja tych centrów może być związana z nadmiarowymi atomami fosforu w krystalizowanej fazie ciekłej GaP. Obecność centrum defektowego o takiej energii obserwowana jest w widmach fotoluminescencji, DLTS i PITS. Wyżej wymienionymi metodami obserwowane są także centra o niższych energiach 0.24 ($\text{Si}_{\text{Ga}} - V_{\text{P}}$) oraz o energiach 1.6 eV ($P_{\text{Ga}} + V_{\text{P}}$ + płytki donor), 1.9 eV ($P_{\text{I}} + X$) [2] oraz niezidentyfikowane np. 0.28 eV [3 - 4], 0.77 eV – native defect [2].

Koncentracja centrów defektowych jest stosunkowo wysoka (10^{15} - 10^{16}) cm^{-3} i dla większości defektów zmienia się w sposób trudny do kontroli w warunkach technologicznych. Występowanie tych centrów powoduje niejednorodności własności fizycznych, które można zmniejszyć przez odpowiednią obróbkę termiczną.

Dotychczas jednorodność materiału określana była głównie z rozkładu parametrów elektrycznych na przekrojach kryształów. Są to badania żmudne i niszczące, wykonywane na próbkach wycinanych z płytek w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wzrostu.

Celem niniejszej pracy było opracowanie szybkiej i nieniszczącej metody oceny przydatności monokryształów GaP otrzymanych metodą LEC (*Liquid Encapsulated Czochralski*) do wytwarzania elementów optyki podczerwieni. Dla tego celu wybrano metodę pomiaru transmitancji w bliskiej podczerwieni w zakresie długości fal (1000 - 3300) nm. Jest to metoda szybka i może być wykonywana na płytkach przed ostatecznym polerowaniem.

2. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

2.1. Wybór materiału i rodzaj przeprowadzonych badań

Dla określenia czynników wpływających na zmiany transmitancji płytek pochodzących z różnych kryształów badano w nich rozkłady gęstości dyslokacji, koncentracji nośników, w niektórych przypadkach rozkłady głębokich centrów defektowych. Pomiar transmitancji wykonywano przy zastosowaniu spektrofotometru Cary 500 f-my Varian na płytkach dwustronnie polerowanych o grubości 1 - 3 mm wzdłuż średnicy płytek w kierunku prostopadłym do dużego ścienia bazowego (PF) o kierunku krystalograficznym [110], prostopadłym do małego ścienia bazowego (SF) – kierunku [110] oraz pod kątem 45° w stosunku do tego kierunku – kierunku [100]. Z płytek cienkich ($\leq 1\text{mm}$) wycinano paski prostopadłe do głównego ścienia bazowego (PF), które dzielono na kwadraty o wymiarach 6 x 6 mm. Na takich kwadratach wykonano pomiary parametrów Hall'a metodą van der Pauwa, koncentracji głębokich centrów i transmitancji. Parametry wybranych do badań kryształów przedstawione są w Tab. 1.

Tabela 1. Parametry kryształów wybranych do badań.
Table 1. Parameters of investigated GaP crystals.

Nr próbki	C [cm^{-3}]	ρ [Ωcm]	μ [cm^2/Vs]	n [cm^{-3}]	EPD [cm^{-2}]
107 Cr I	-	4.95×10^0	132	9.52×10^{15}	-
107 Cr II	-	2.31×10^{15}	22	1.23×10^3	-
117 nd I	<det	7.35×10^{-1}	162	5.22×10^{16}	3.5×10^4
117 nd II	<det	1.40×10^{11}	81	5.47×10^5	1.5×10^5
123 nd I	-	5.50×10^{-1}	153	7.39×10^{16}	3.7×10^4
123 nd II	<det	8.91×10^5	148	4.72×10^{10}	1.6×10^5
127 nd I	-	7.92×10^{-1}	154	5.12×10^{16}	3.1×10^4
127 nd II	8.32×10^{15}	4.09×10^4	142	1.07×10^{13}	-
146 nd I	-	2.92×10^{-1}	139	1.54×10^{17}	1.3×10^5
146 nd II	2.8×10^{15}	3.02×10^6	67	3.10×10^{10}	1.1×10^5
149 nd I	<det	5.46×10^{-1}	137	8.34×10^{16}	2.5×10^4
149 nd II	<det	1.42×10^0	145	3.02×10^{16}	3.0×10^4
151 nd I	<det	4.77×10^{-1}	153	8.53×10^{16}	-
151 nd II	<det	1.05×10^6	147	4.06×10^{16}	5×10^4

Cr- domieszka chromu,

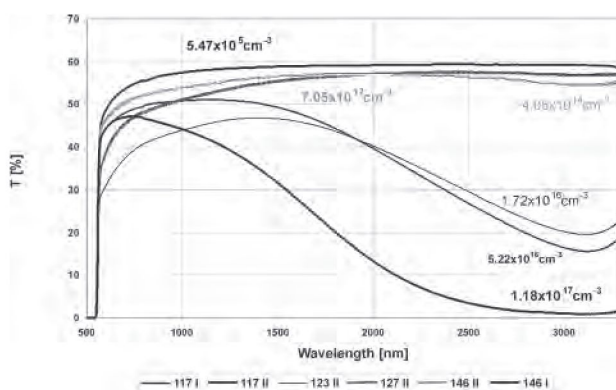
I – początek kryształu,

II – koniec kryształu,

< det. – poniżej granicy detekcji.

2.2. Pomiary transmitancji

Widma transmitancji w zakresie długości fal (500 – 3300) nm dla kryształów o koncentracji nośników $n = (1 \times 10^{17} - 5.5 \times 10^5) \text{cm}^{-3}$ przedstawione są na Rys. 1.

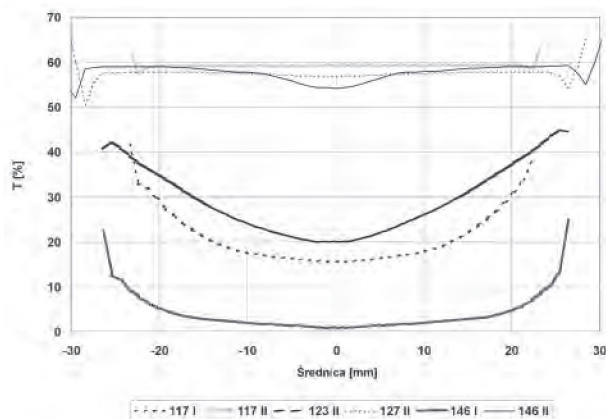


Rys. 1. Widma transmitancji płytek o różnej koncentracji nośników prądu.

Fig. 1. Transmittance of the GaP wafers with different carrier concentration.

Przy koncentracji nośników $n \leq 10^{15} \text{cm}^{-3}$ w zakresie widmowym (1000 – 3300) nm wartość transmitancji jest stała i wynosi (57 – 60%). Przy wyższych koncentracjach obserwuje się spadek transmitancji charakterystyczny dla absorpcji na

swobodnych nośnikach. Najniższą transmitancję obserwuje się na płytkach o koncentracji nośników $n \sim 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ przy długości fali $\lambda = 3100 \text{ nm}$. Dla takiej długości fali przeprowadzono pomiary transmitancji na średnicy płytek o różnej koncentracji nośników prądu (Rys. 2).



Rys. 2. Rozkład transmitancji dla długości fali $\lambda = 3100 \text{ nm}$ na średnicy wybranych płytek o różnej koncentracji nośników.

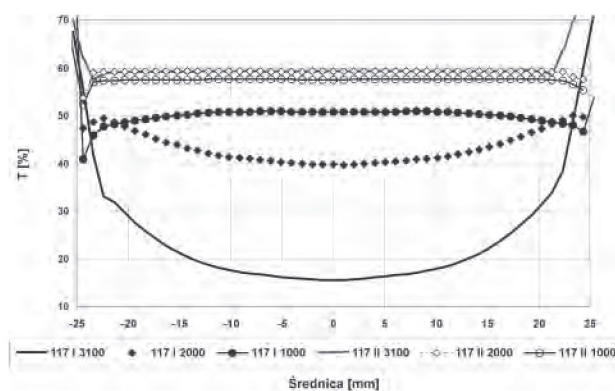
Fig. 2. Transmittance distribution ($\lambda = 3100 \text{ nm}$) along diameter of the wafers with different carrier concentration.

Dla płytek o najniższej koncentracji nośników (117 II) transmitancja jest stała na całej średnicy, na płytkach 127 II i 146 II w części środkowej obserwuje się spadek koncentracji w granicach 2.5 - 5.0%. Na płytkach o wyższych koncentracjach (117 I, 146 I, 123 II) najniższą transmitancję obserwuje się w części środkowej, a różnice w wartościach pomiędzy środkiem a brzegiem mierzonych płytek są w granicach 10 - 25% dla poszczególnych płytek.

Dla sprawdzenia, czy przy wybranej długości fali $\lambda = 3100 \text{ nm}$ występują największe różnice w wartościach transmitancji, na średnicy badanych kryształów przeprowadzono pomiary transmitancji dla innych długości: 1000 nm, 2000 nm i 3100 nm. Wybór długości fal związany jest z zakresem pracy elementów optycznych z GaP:nd. Przykładowe przebiegi transmitancji wzdłuż średnicy dla kryształu nr 117 przedstawione są na Rys. 3. Dla początkowej części tego kryształu największe różnice w wartościach transmitancji obserwuje się dla długości fali $\lambda = 3100 \text{ nm}$ i wynoszą one $\sim 20\%$.

Dla sprawdzenia przyczyn obserwowanych różnic w wartościach transmitancji na średnicy rozważano wpływ:

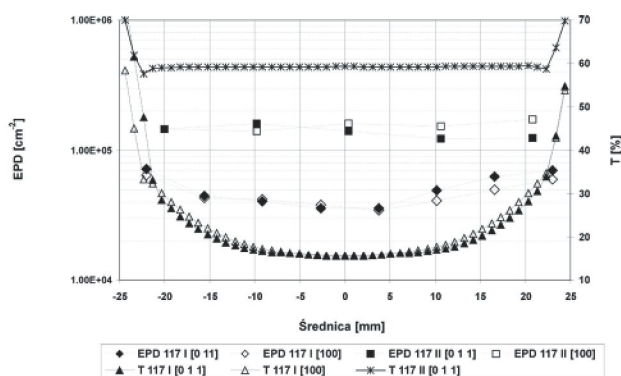
- rozkładów gęstości dyslokacji (EPD - *Etch Pits Density*) na średnicy. Fosforek galu wytwarzany techniką LEC charakteryzuje się stosunkowo wysoką gęstością dyslokacji. W katalogach



Rys. 3. Rozkład transmitancji wzdłuż średnicy płytek z kryształu 117 I (początek) i II (koniec) dla długości fali $\lambda = 3100 \text{ nm}$; $\lambda = 2000 \text{ nm}$; $\lambda = 1000 \text{ nm}$.

Fig. 3. Transmittance distribution along diameter of the crystal no 117 I (seed) and II (tail) at $\lambda = 3100 \text{ nm}$, $\lambda = 2000 \text{ nm}$; $\lambda = 1000 \text{ nm}$.

firm, które wytwarzają kryształy GaP tą techniką wartość gęstości dyslokacji wynosi $\text{EPD} \leq 2 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$. W badanych przez nas kryształach gęstość dyslokacji była w zakresie $(2 - 10) \times 10^4 \text{cm}^{-2}$. Kryształy o orientacji (100) posiadają charakterystyczny rozkład dyslokacji tzn. najniższą wartość obserwuje się wzdłuż kierunków [110], wyższą - wzdłuż [100]. Nie zaobserwowano różnicy w przebiegach transmitancji wzdłuż tych kierunków krystalograficznych. Przykładowe przebiegi dla kryształu nr 117 przedstawione są na Rys. 4. Dla płytki z początkowej części kryształu (117 I) najniższą gęstość dyslokacji obserwuje się w środkowej części płytki, podczas gdy w tym obszarze obserwowana jest najniższa transmitancja i najwyższa koncentracja nośników prądu. Świadczy to o tym, że wartość

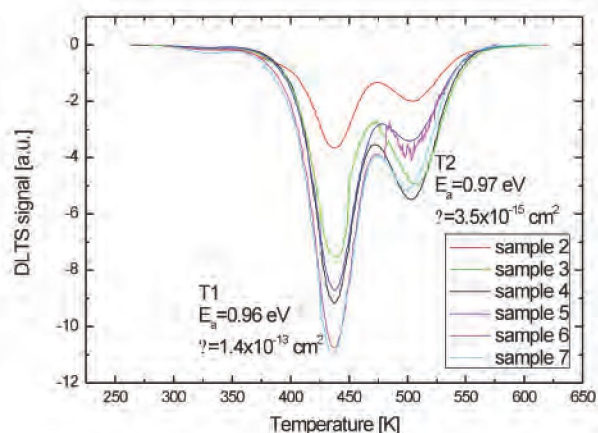


Rys. 4. Rozkłady gęstości dyslokacji i transmitancji na płytkach 117 I i II dla kierunków [011] i [100]. Pomiar transmitancji wykonano przy długości fali $\lambda = 3100 \text{ nm}$.

Fig. 4. Dislocation distribution in direction [011] and [100] on the wafers I and II from crystal no 117. Transmittance measurement made at $\lambda = 3100 \text{ nm}$.

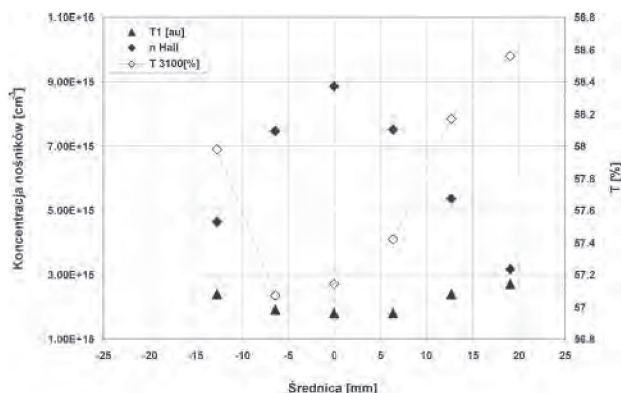
transmitancji związana jest głównie z absorpcją na swobodnych nośnikach, a nie z gęstością dyslokacji,

- rozkładów koncentracji głębokich centrów defektowych. Do oceny koncentracji głębokich centrów wykorzystano metodę DLTS jako jedyną ze znanych nam metod pozwalającą na określenie koncentracji głębokich centrów, ale tą metodą mogą być wykonywane pomiary tylko na próbkach o koncentracji nośników $n \geq 10^{14} \text{cm}^{-3}$. Pomiary wykonano na próbkach wyciętych wzdłuż średnicy, na których uprzednio wykonane były pomiary transmitancji i koncentracji nośników prądu. Przykładowe widmo DLTS otrzymane z pomiaru próbek wyciętych wzdłuż średnicy płytki przedstawione jest na Rys. 5. Widoczne są dwa piki odpowiadające głębokim poziomom o energii 0.96 eV i 0.97 eV. Głębokie poziomy o zbliżonej energii (0.98 – 1.1) eV określane są z temperaturowych pomiarów hallowskich półizolacyjnych kryształów GaP i przypisywane są defektowi typu P_{Ga} , co potwierdzają pomiary EPR [5]. Na Rys. 6 przedstawione jest porównanie rozkładu koncentracji nośników wzdłuż średnicy, koncentracji głębokich centrów oraz transmitancji. W obszarze środkowym płytki obserwuje się najniższą koncentrację głębokich centrów T1 o energii ~ 1 eV oraz najniższą wartość transmitancji. Jest to obszar, gdzie występuje najwyższa koncentracja nośników prądu,
- rozkładów koncentracji nośników prądu na średnicy płytek. Przykłady porównania rozkładów



Rys. 5. Widmo DLTS na próbkach uciętych wzdłuż średnicy płytki z kryształu GaP:nd. Amplituda widma jest wprost proporcjonalna do koncentracji głębokich poziomów.

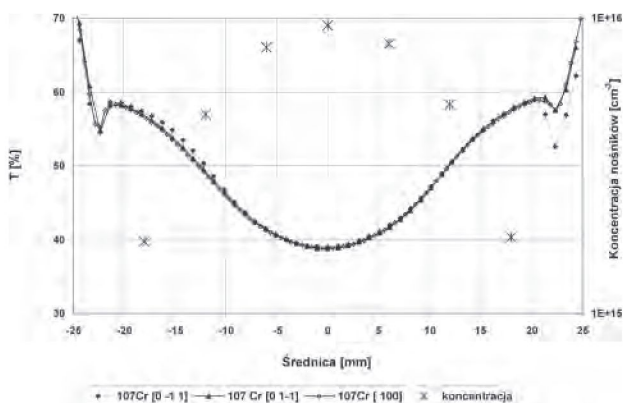
Fig. 5. DLTS spectra on the samples cut along diameter of GaP:nd crystal. Spectra amplitude is directly proportional to deep level concentration.



Rys. 6. Rozkład koncentracji głębokich poziomów uzyskanych z pomiarów DLTS (T1), transmitancji i koncentracji nośników wzdłuż średnicy płytki z kryształu GaP nr 151.

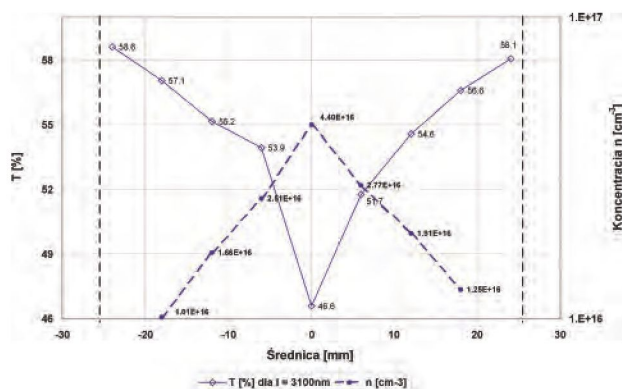
Fig. 6. Deep levels concentration distribution, transmittance and carrier concentration along wafer diameter of the crystal no 151.

transmitancji na średnicy płytki (*Film Scan*) dla różnych kierunków krystalograficznych i koncentracji nośników zmierzonej na próbkach wyciętych z płytek wzdłuż kierunku [110] przedstawione są na Rys. 7. Nie zaobserwowano różnic w wartościach transmitancji w zależności od kierunku krystalograficznego [110] i [100]. Dla wszystkich badanych kryształów obserwuje się bardzo wyraźną zależność między wartościami transmitancji a koncentracją nośników i czym wyższa jest koncentracja nośników tym niższa wartość transmitancji. Przy koncentracji nośników $(1 - 4) \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ transmitancja zmienia się w zakresie 46 - 59% (Rys. 8), natomiast przy koncentracji $(3 - 9) \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ zmiany transmitancji są w zakresie 57 - 59% (Rys. 9). Na podstawie przeprowadzonych badań otrzymano



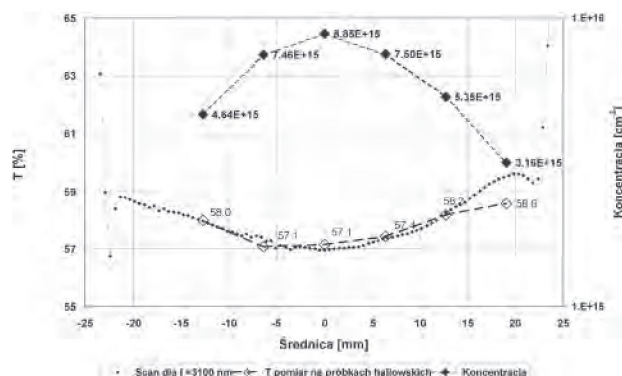
Rys. 7. Rozkład wartości transmitancji T ($\lambda = 3100$ nm) dla różnych kierunków krystalograficznych i koncentracji nośników na średnicy płytki GaP nr 107Cr.

Fig. 7. Transmittance value distribution T ($\lambda = 3100$ nm) in different crystallographic direction and carrier concentration on wafers from GaP:Cr crystal no. 107.



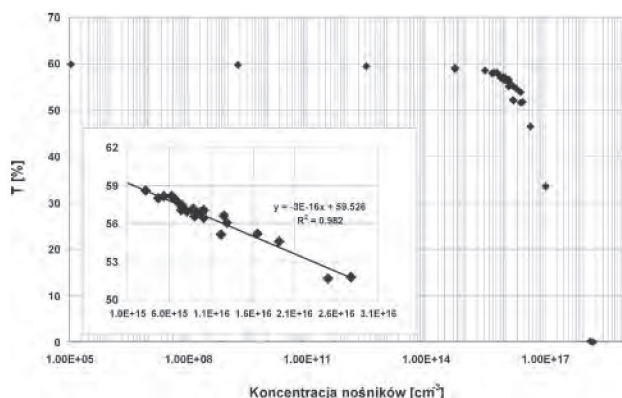
Rys. 8. Rozkład transmitancji i koncentracji nośników wzdłuż średnicy dla płytki GaP 149_48mm (pomiar transmitancji wykonano na kwadratach, na których mierzono parametry elektryczne).

Fig. 8. Transmittance and carrier concentration distribution along wafer diameter GaP 149_48 mm (transmittance measurements were made on square samples on which electrical measurements were performed).



Rys. 9. Rozkład transmitancji i koncentracji nośników wzdłuż średnicy dla płytki GaP 151 (pomiar wykonano na kwadratach, na których mierzono parametry elektryczne).

Fig. 9. Transmittance and carrier concentration distribution along wafer diameter GaP 151_7 (measured on square samples on which electrical measurements were performed).



Rys. 10. Zależność transmitancji przy długości fali $\lambda = 3100\text{nm}$ od koncentracji nośników.

Fig. 10. Transmittance versus carrier concentration dependence.

zależność wartości transmitancji od koncentracji nośników prądu (Rys. 10). Błąd pomiaru transmitancji wynosi $\sim \pm 0.5\%$.

Błąd pomiaru koncentracji nośników w obszarze $n < 10^9 \text{ cm}^{-3}$ wynosi $\sim 20\%$, przy $n > 10^9 \text{ cm}^{-3} \leq 10^{10}$. Wartość transmitancji jest stała w mierzonym zakresie widmowym ($T \sim 60\%$) dla koncentracji nośników $n = (10^5 - 10^{15}) \text{ cm}^{-3}$. Przy wyższych koncentracjach obserwuje się bardzo wyraźny spadek transmitancji np. przy $n = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, wartość transmitancji dla $\lambda = 3100 \text{ nm}$ wynosi $T \approx 30\%$. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono zależność $T = f(n)$ – transmitancja w funkcji koncentracji nośników, która umożliwia szybką ocenę niejednorodności koncentracji nośników na płytkach GaP:nd o koncentracji nośników $n = 1 \times 10^{15} - 5 \times 10^{16}$.

4. PODSUMOWANIE

Do oceny jednorodności rozkładu własności elektrycznych na średnicy i długości kryształów wybrano metodę pomiaru transmitancji. Jako czynniki wpływające na wartości transmitancji uwzględniono EPD, głębokie centra defektowe oraz koncentrację nośników prądu.

Nie zaobserwowano korelacji między rozkładami dyslokacji i transmitancją dla różnych kierunków krystalograficznych [110] i [100].

Istnieje trudność w ustaleniu ścisłej zależności między koncentracją głębokich centrów, a wartościami transmitancji. Związane jest to z faktem, że przy niższej koncentracji głębokich centrów, wyższa jest koncentracja nośników prądu.

Duże zmiany wartości transmitancji na średnicy płytek GaP:nd związane są głównie z rozkładem koncentracji nośników prądu. Wpływ innych, branych pod uwagę czynników jest nieznaczny.

Ustalono zależność $T = f(n)$ w zakresie koncentracji $n = 1 \times 10^{15} - 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. W tym zakresie koncentracji nośników możliwa jest szybka ocena niejednorodności. Przy koncentracji $n < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ wartość transmitancji jest stała.

Ocena jednorodności na przekrojach poprzecznych płytek jest bardzo ważna ze względu na ich zastosowanie na elementy optyczne. Jednocześnie metoda ta może być bardzo przydatna przy ocenie procesów technologicznych, gdzie rozkład koncentracji nośników (przebieg transmitancji na średnicy) może być wskazówką technologiczną o zmianach pól termicznych występujących w procesie wzrostu.

LITERATURA

- [1] Handbook wyd. Springer – Verlag
- [2] Yu T.J., Tanno T., Suto K., Nishizawa J.: Controlled vapor-pressure heat-treatment effect on deep levels in liquid – Encapsulated Czochralski - grown GaP crystals, *J. Electr. Mater.*, 31, 6, (2002)
- [3] Kühnel G., Siegel W., Ziegler E.: Electrical and photoelectrical properties of semi-insulating GaP, *Phys. Status. Sol. (a)*, 80, 159, (1983)
- [4] Skazochkin A.V., Krutogolov Yu K., Kunakin Yu I.: Nature of some electron traps in GaP, *Semicond. Sci. Technol.*, 10, (1995), 634-638
- [5] Strzelecka S., Hruban A., Orłowski W., Jurkiewicz-Wegner E., Piersa M., Dolecka H., Pawłowska M., Mirowska A., Budnik J., Rosołowska E., Roman G., Dalecki W.: Badanie niejednorodności rozkładu własności elektrycznych i strukturalnych niedomieszkowanych kryształów GaP - Sprawozdanie ITME, 2008

Składamy podziękowanie panu Michałowi Kozubalowi z Zakładu Z – 14 za wykonanie pomiarów koncentracji głębokich poziomów metodą DLTS.

INVESTIGATION OF SPATIAL DISTRIBUTIONS OF ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF GaP SINGLE CRYSTALS

Undoped GaP crystals with low carrier concentration $n \leq 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ are mainly used on optic elements working in near infrared (1 – 8) μm and far infrared (100 – 200) μm wave range. These elements can be large $\Phi = (2''-3'')$. High homogeneity of the properties responsible for transmittance value is one of the fundamental requirement for GaP crystals used on optical elements. Value and distribution of carrier concentration, etch pits density and concentration defect centers can influence on value and homogeneity of transmittance. In the present work these factors were investigated. Distinct transmittance dependence on carrier concentration was only confirmed. This dependence was empirically determined in concentration range $n = 10^{15} - 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ at wavelength $\lambda = 3100 \text{ nm}$.

Keywords: GaP, optical properties, electrical properties

WPLYW OBRÓBKI TERMICZNEJ NA WŁASNOŚCI NIEDOMIESZKOWANYCH MONOKRYSTAŁÓW GaP

Stanisława Strzelecka¹, Andrzej Hruban¹, Elżbieta Jurkiewicz-Wegner¹, Mirosław Piersa¹, Wacław Orłowski¹, Barbara Surma¹

¹Inżynieria Technologia Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa
e-mail: stanisława.strzelecka@itme.edu.pl

Zbadano wpływ procesów wygrzewania na własności niedomieszkowanych monokryształów fosforu galu (GaP) otrzymanych z wsadów o różnym składzie chemicznym: bliskim stechiometrii, z nadmiarem galu lub z nadmiarem fosforu, a także o różnej koncentracji węgla. Procesom wygrzewania poddano bloki monokryształów o grubości 10 – 20 mm oraz płytki o grubości ~ 700 μm . Określono warunki obróbki termicznej takie jak temperatura i czas wygrzewania oraz ciśnienie par fosforu w ampule pozwalające na otrzymanie materiału półizolującego. Stwierdzono, że w przypadku monokryształów GaP typu n o koncentracji nośników ładunku $n = (2 - 5) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ i koncentracji węgla $N_C \leq 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ w wyniku wygrzewania można otrzymać materiał półizolujący typu n. Przy koncentracji węgla $N_C \sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ otrzymywany jest materiał półizolujący typu p.

Słowa kluczowe: GaP, obróbka termiczna, materiał półizolujący, własności elektryczne

1. WSTĘP

W ostatnich latach obserwowane jest duże zainteresowanie niedomieszkowanym fosforem galu (GaP) ze względu na zastosowania w nowoczesnych przyrządach optoelektronicznych, diodach mocy, elementach optyki podczerwieni z możliwością pracy do 600°C. Dla zastosowań w optyce podczerwieni potrzebne są niedomieszkowane monokryształy