

Karol NOWYSZ
Barbara SURMA
Stanisława STRZELECKA
ONPMP

Badania wysokooporowego arsenku galu

WSTĘP

Wysokooporowy arsenek galu znajduje głównie zastosowanie w mikroelektronice, gdzie stosowany jest jako materiał podłożowy dla wytwarzania warstw epitaksjalnych. Wymagany zakres oporności takiego materiału wynosi $10^3 - 10^6$ omcm. Możliwość szerokiego zastosowania tego materiału pociąga konieczność prowadzenia dokładnych badań jego własności. Badania te ze względu na właściwości wysokooporowego arsenku galu napotykają duże trudności i to jest przyczyną stosunkowo małej ilości publikacji dotyczących tego materiału.

Opisane badania dotyczą właściwości galwanomagnetycznych, elektrooptycznych i rekombinacyjnych arsenku galu domieszkowanego żelazem, chromem i tlenem.

W artykule przedstawiono wyniki badań zależności temperaturowej przewodnictwa i współczynnika Halla oraz czasu życia nośników prądu. Omówiono również niejednorodność oporności właściwej, absorpcję i fotoprzewodnictwo.

OTRZYMYWANIE WYSOKOOPOROWEGO GaAs

Materiał wysokooporowy o właściwościach zbliżonych do materiału samoistnego można uzyskać przez domieszkowanie GaAs pierwiastkami o głębokich poziomach energetycznych, a mianowicie: żelazem, chromem, tlenem, molibdenem, kobaltem, niklem. Domieszki te kompensują domieszki o płytkich poziomach donorowych i akceptorowych, przy czym występuje tutaj mechanizm samokompensacji. Półizolacyjny GaAs nie jest materiałem czystym, zawiera dużą ilość domieszek z głęboko leżącymi poziomami, które kompensują domieszki donorowe i akceptorowe o płytkich poziomach energetycznych. Istnieje kilka modeli wyjaśniających kompensację w GaAs [1,2]. Modelem wyjaśniającym w najbardziej ogólny sposób proces kompensacji jest model podany przez Blanc'a i Weisberg'a [2]. Zgodnie z tym modelem samokompensująca domieszka tworzy głębokie poziomy donorowe. Zakłada się, że oprócz głębokich poziomów donorowych /koncentracja N_t / w materiale istnieją donory płytkie /koncentracja N_d / i płytkie akceptory /koncentracja N_a . Jeśli $N_a > N_d$, wszystkie płytkie donory są skompensowane. Jeśli również $N_t > N_a - N_d$, to pozostałe akceptory są także skompensowane i poziom Fermiego leży w pobliżu głębokich poziomów donorowych. W rezultacie otrzymuje się wysokooporowy GaAs, niezależnie od koncentracji głębokich donorów.

Ze względu na dużą prężność par arsenu arsenek galu zazwyczaj otrzymuje się w komorach hermetycznych /np. kwarcowych/ lub pod osłoną topników. Domieszkowanie odbywa się przez wprowadzenie do stopionego związku stopu GaAs zawierającego materiał domieszkujący lub przez bezpośrednie wprowadzenie samej domieszki /w przypadku Fe i Cr/.

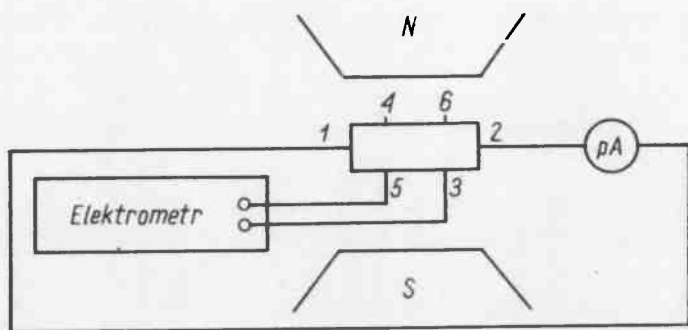
Domieszkowanie tlenem najczęściej odbywa się przez otrzymywanie monokrystalicznego arsenku galu w obecności tlenu.

WYNIKI EKSPERYMENTALNE

W pracy przeprowadzono pomiary parametrów GaAs, takich jak: przewodnictwo ; współczynnik Halla w funkcji temperatury, czasy życia nośników w funkcji temperatury, niejednorodność oporności właściwej, absorpcje i fotoprzewodnictwo domieszko-

Aparatura pomiarowa

Pomiar przewodnictwa i współczynnika Halla przeprowadzano na zestawie aparaturowym, którego schemat przedstawiony jest na rys. 1.



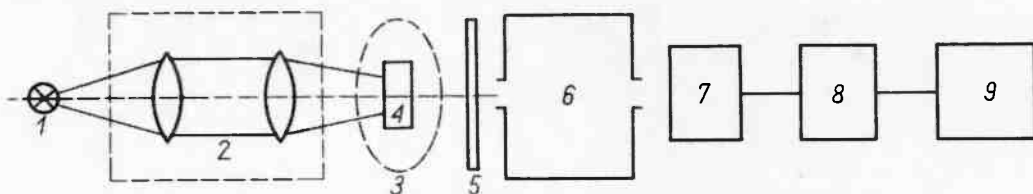
Rys. 1. Układ zestawieniowy aparatury do pomiaru przewodnictwa i współczynnika Halla

W skład aparatury wchodziły:

- elektromagnes z zasilaczem pozwalającym na płynną regulację pola w zakresie 0-2 Tesli,
- układ zasilający próbkę /zestaw baterii lub zasilacz stabilizowany/,
- układ pomiarowy prądu /pikoamperomierz firmy Keithley/ o zakresie pomiarowym $10^{-4} - 10^{-10}$ A lub układ kompensacyjny z oporem wzorcowym przy użyciu kompensatora firmy Tettex o zakresie pomiarowym $/10^{-7} - 1/$ V,
- układ do pomiaru napięcia /elektrometr typ 219 Unipan/0,1 - 300/ V, na którego wyjściu podłączono miliwoltomierz firmy Eaip typ G 325.

Czas życia nośników mierzono na zestawie aparaturowym typ ŻK-78 produkcji ZSRR, Metoda pomiaru polega na jednoczesnym pomiarze efektu fotomagnetycznego i fotoprzewodnictwa stacjonarnego. Pomiary wykonywano przy częstotliwości 270 Hz. Napięcie mierzono miliwoltomierzem selektywnym o czułości 0,1 μ V.

Niejednorodność oporności właściwej mierzono na podstawie efektu fotowoltaicznego, przy zastosowaniu lampy 500 W jako źródła światła i elektrometru jako źródła napięcia. Pomiar absorpcji przeprowadzono na zestawie aparaturowym przedstawionym schematycznie na rys. 2, przy zastosowaniu techniki porównawczej /sample - in-sample out/.

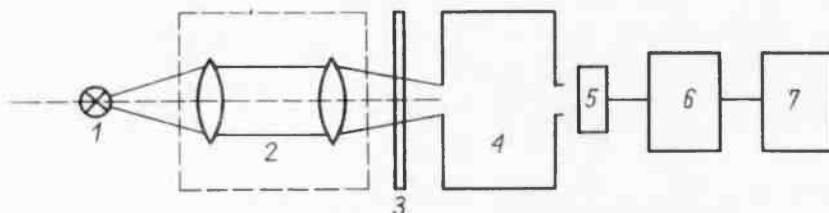


Rys. 2. Blokowy zestaw aparatury do pomiaru absorpcji

1 - źródło światła, 2 - układ optyczny, 3-4-próbka z kriostratem, 5- modulator, 6 - monochromator, 7 - detektor, 8 - mikrowoltomierz selektywny, 9 - mikrowoltomierz homodynowy

Próbki umieszczane były w kriostracie szklanym z okienkami z LiF, znajdującym się między źródłem światła a szczeliną wejściową monochromatora typu SPM-2 produkcji Zeissa. Układ soczewek ogniskował padającą wiązkę światła na badanej próbce. Na wyjściu monochromatora umieszczono detektor typ 615 V firmy Mullard połączony z miliwoltomierzem selektywnym typu 203 Unipan.

Fotoprzewodnictwo domieszkowe mierzono na zestawie, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Blokowy zestaw aparatury do pomiaru fotoprzewodnictwa

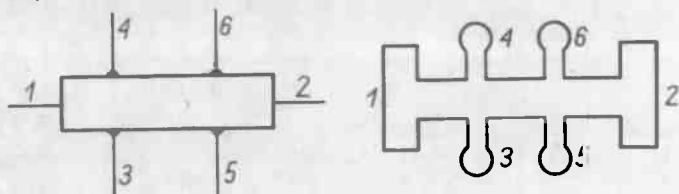
1 - źródło światła, 2 - układ optyczny, 3 - modulator, 4 - monochromator, 5 - próbka, 6 - mikrowoltomierz selektywny, 7 - mikrowoltomierz homodynowy

Ze względu na pokrywanie się przebiegów spektralnego rozkładu fotoprzewodnictwo i spektralnego rozkładu efektu fotowoltaicznego mierzony był spektralny rozkład efektu fotowoltaicznego. Źródłem promieniowania podczerwonego w stosowanym zakresie długości fal /0,7 - 2,5/ μm była lampa wolframowa 500 W, przy pomocy której uzyskiwano natężenie promieniowania podającego na próbkę $N = 3,6 \cdot 10^{13}$ kwantów/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ dla $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$ i $N = 1,53 \cdot 10^{14}$ kwantów/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ dla $\lambda = 1,45 \mu\text{m}$. Zdolność rozdzielcza układu dla długości fali $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$ wynosiła $0,0025 \mu\text{m}$ i dla $\lambda = 1,45 \mu\text{m}$ - $0,17 \mu\text{m}$.

Przygotowanie próbek

Do pomiarów elektrycznych przygotowywano próbki w postaci prostopadłościaków lub o innym profilu /rys. 4/. Do takich próbek poza kontaktami prądowymi znajdująca-

cy mi się na czołowych powierzchniach prostopadłościanów przygotowywano cztery kontakty na doprowadzenie elektrod pomiarowych napięcia przewodnictwa i napięcia Halla /schematycznie próbki przedstawiono na rys. 4/.



Rys. 4. Profil próbek używanych do pomiaru galwanomagnetycznych

Kontakty przygotowywano przez wtopienie indu w temperaturze 250 - 350°C w próżni $5 \cdot 10^{-5}$ Tr lub w atmosferze wodoru. Wszystkie kontakty miały liniowe charakterystyki prądowo-napięciowe w zakresie /77-400 K/ oraz w całym zakresie stosowanych napięć.

Próbki do badań optycznych wycinane były z monokryształów w płaszczyźnie /111/, a niektóre w płaszczyźnie /110/, prostopadle do kierunku wyciągania. Grubość płytek wynosiła około /1-1,5/ mm. Z krążków tych wycinano wzdłuż średnicy prostopadłościennie próbki o szerokości około 5 mm. Powierzchnie próbek po wycięciu były szlifowane na proszku alundowym o gradacji 0,5 μ m. Do pomiarów absorpcji używano próbki - głównie wycinane w płaszczyźnie /110/. Po obróbce mechanicznej próbki polerowano chemicznie trawiaczem polerującym 1 HF; 3HNO₃ i 2H₂O.

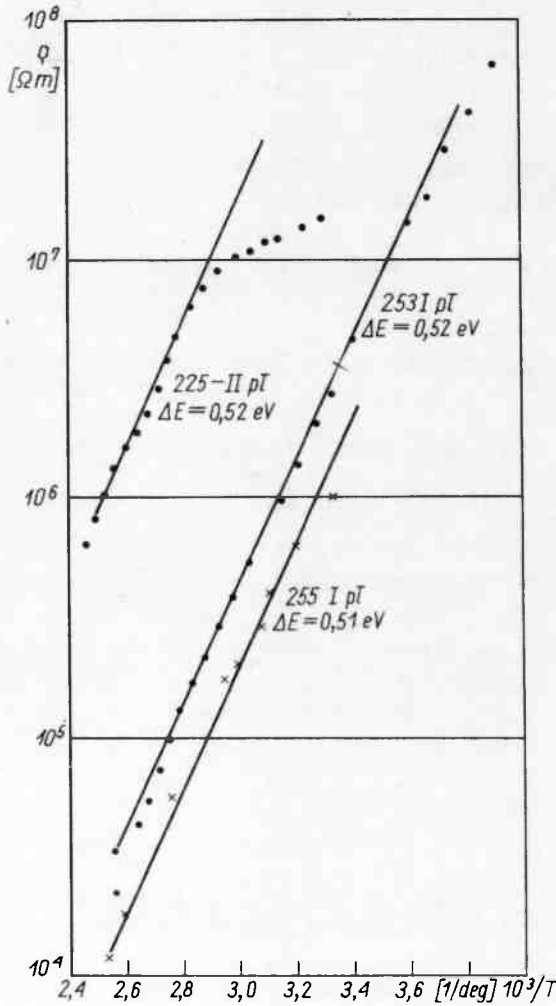
Omówienie wyników

Badania przeprowadzono na próbkach o oporności właściwej $\rho = /10^4 - 10^8/ \Omega$ cm, domieszkowanych żelazem, chromem, tlenem lub niedomieszkowanych. Wyniki niektórych spośród przeprowadzonych pomiarów zostały przedstawione w tabeli 1. Podane wielkości określono na podstawie pomiarów elektrycznych.

Tabela 1

Lp.	Numer próbki	Domieszka	Energia aktywacji domieszki od pasma wolencyjnego eV	Opór właściwy Ω cm	Koncentracja nośników cm^{-3}	Ruchliwość cm^2/Vs .
1	2	3	4	5	6	7
1	240	Fe	0,5	$6 \cdot 10^9$	-	-
2	248	Fe	0,51	$1,5 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^{11}$	70
3	253	Fe	0,52	$4 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{11}$	80
4	255/1	Fe	0,51	$2 \cdot 10^6$	$9 \cdot 10^{10}$	40
5	255/1	Fe	0,52	$2 \cdot 10^7$	-	-
6	262/1	Cr	0,63	$4 \cdot 10^7$	-	-
7	262/2	Cr	0,61	$6 \cdot 10^7$	-	-
8	263/1	Cr	0,57	$5 \cdot 10^8$	-	-
9	301/II	Cr	0,65	$1 \cdot 10^7$	-	-

1	2	3	4	5	6	7
10	304/1	Cr	0,61	$3 \cdot 10^7$	-	-
11	304/11	Cr	0,78	$5 \cdot 10^7$	-	-
12	315	Cr	0,75	$7 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^9$	650
13	400	O ₂	0,57	$2 \cdot 10^8$	-	-
14	313	bez domieszki	0,57	$1 \cdot 10^8$	-	-



Rys. 5. Oporność próbek GaAs domieszkowanych żelazem jako funkcja odwrotności temperatury

Dla wszystkich próbek domieszkowanych żelazem obserwuje się poziom energetyczny $/0,5 - 0,52/$ eV /rys. 5,6/ określony z pomiarów elektrycznych. Jest to w dobrej zgodności z danymi publikowanymi w literaturze [3,4,5,6,7,8,9]. Dla próbek domieszkowanych żelazem pomiary wykonywano w zakresie temperatur 250 - 400 K. W podanym zakresie temperatur wykonano również pomiary ruchliwości i koncentracji nośników prądu. Badane przez nas próbki były typu p, ruchliwość była rzędu $70 - 80$ $\text{cm}^2/\text{v}\cdot\text{s}$, praktycznie nie zmieniała się z temperaturą. Poziomu $0,37$ eV dla żadnej z badanych próbek nie zaobserwowano. Dla próbek domieszkowanych żelazem można oszacować koncentrację żelaza. Ponieważ koncentracja akceptorów większa jest od wypadkowej koncentracji płytkich donorów, koncentracja dziur dana jest zależnością:

$$p = \left[\frac{N_i}{N_d} - 1 \right] \left[\frac{N_V}{g_t} \right] \exp \left[-\frac{E_T}{kT} \right] \quad [1]$$

/przy $p = N_a - N_d$ i $p \ll N_d$ /

gdzie: N_t - koncentracja głębokiego akceptora

N_d - wypadkowa koncentracja płytkich donorów

N_V - gęstość stanów w pasmie walencyjnym

g_t - współczynnik degeneracji głębokiego poziomu akceptorowego

E_T - energia aktywacji głębokiego poziomu akceptorowego w temperaturze T

k - stała Boltzmanna

Na przykład dla próbki 248 /koncentracja płytkich donorów przed domieszkowaniem wynosiła $N_d = 10^{17}$ cm^{-3} / uzyskano $N_t = 2 \cdot 10^{17}$ cm^{-3} , przy czym $E_T = 0,52$ eV /rys. 6/.

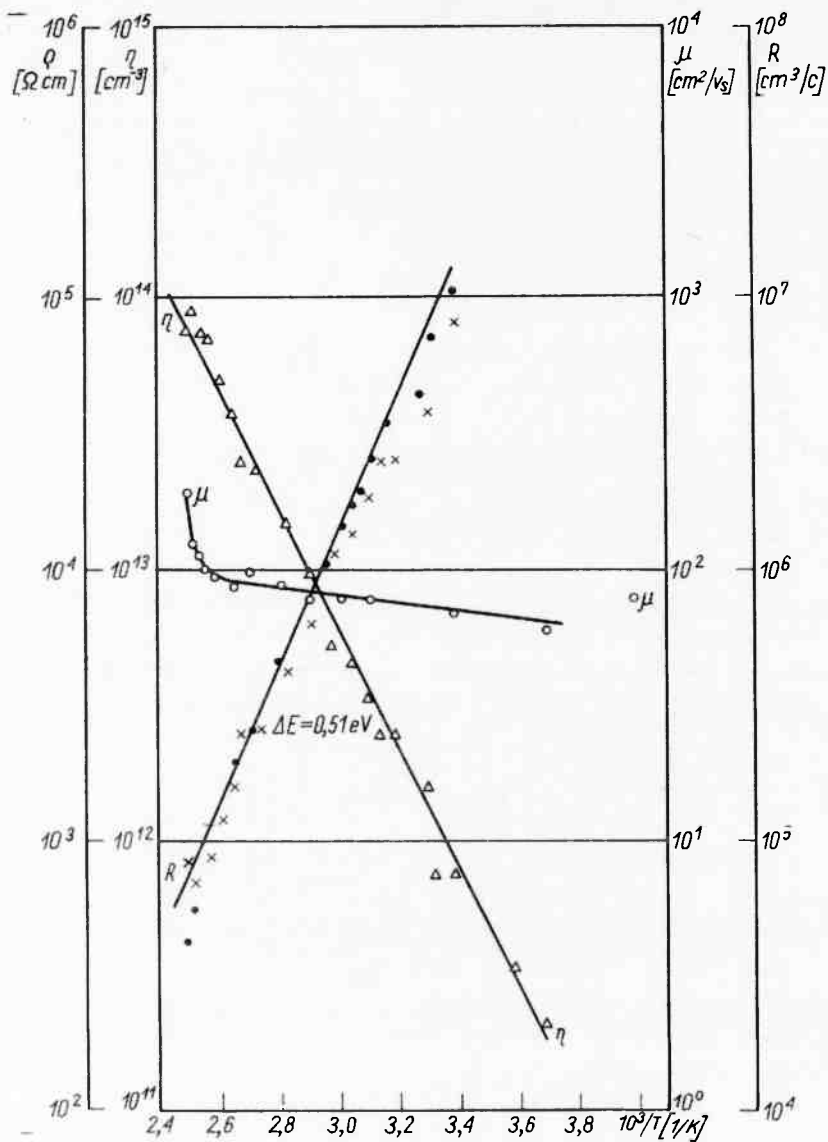
Jeżeli przyjmiemy koncentrację płytkich donorów $N_d = 10^{17}$ cm^{-3} , $g_t = 4$, $N_V = 8,8 \cdot 10^8$ cm^{-3} , $E_T = 0,52$ eV, $p = 2 \cdot 10^{12}$ cm^{-3} /np. dla próbki nr 248/, wówczas $N_t = /2 - 1,1/ \cdot 10^6 \exp. /-20,8/ \cdot 10^{17}$ cm^{-3} $N_i = 2 \cdot 10^{17}$ cm^{-3} .

Ze względu na przebieg spektralnego rozkładu fotoprzewodnictwa badane próbki GaAs domieszkowanego żelaza można podzielić na 3 grupy:

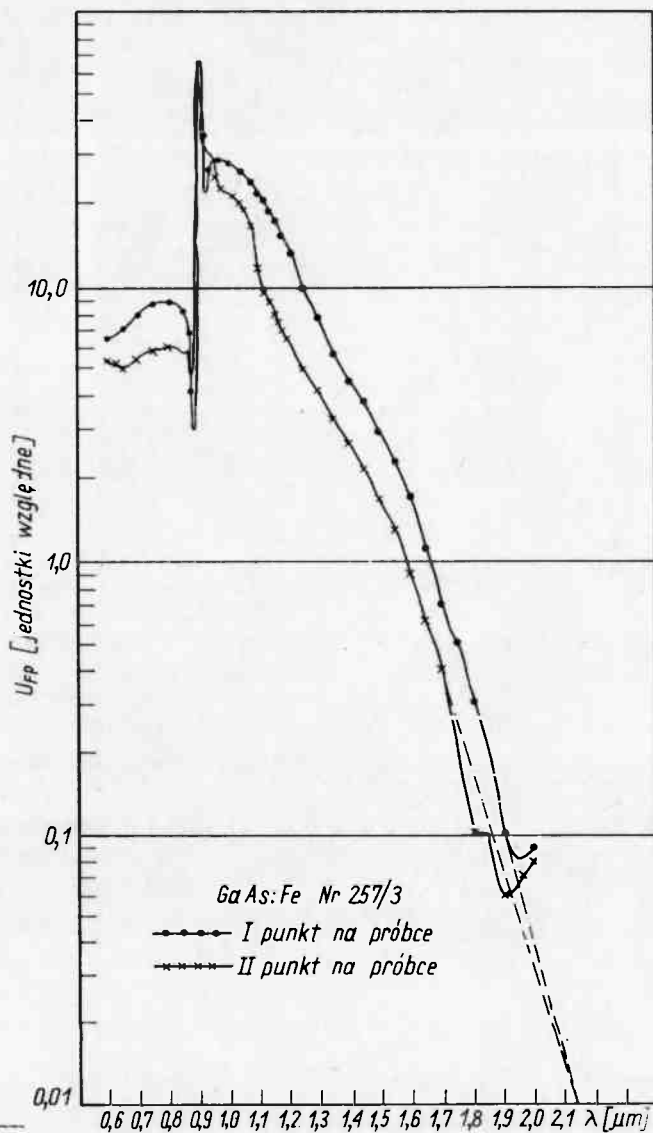
Grupę pierwszą charakteryzuje długi, wolno opadający, ciągnący się do $2 \mu\text{m}$ "ogon" fotoodpowiedzi. Typowe wykresy dla tej grupy przedstawiono na rys. 7 /próbka 253/II i 257/3/. Powtarzalność wyników dla każdej z tych próbek oświetlanej w dwóch różnych punktach jest, jak widać z wykresów, bardzo dobra. Poziom energetyczny wyznaczony przez ekstrapolację długofalowego odcinka krzywej wynosi $0,57$ eV, co jest w dobrej zgodności z danymi literaturowymi oraz z wynikami uzyskanymi z pomiarów elektrycznych, i wskazuje na występowanie przejść: pasmo walencyjne - poziom akceptorowy.

Do drugiej grupy można zaliczyć próbki o przebiegu fotoprzewodnictwa podobnym do wykresu dla próbki 248/I /rys. 8/. Krzywą tę charakteryzuje występowanie "płata" w obszarze energii $/1 - 0,95$ eV/. Porównując ten wynik z wynikami pracy [10] należy przypuszczać, że występowały tu przejścia z poziomu domieszkowanego położonego w odległości $0,5$ eV od pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa.

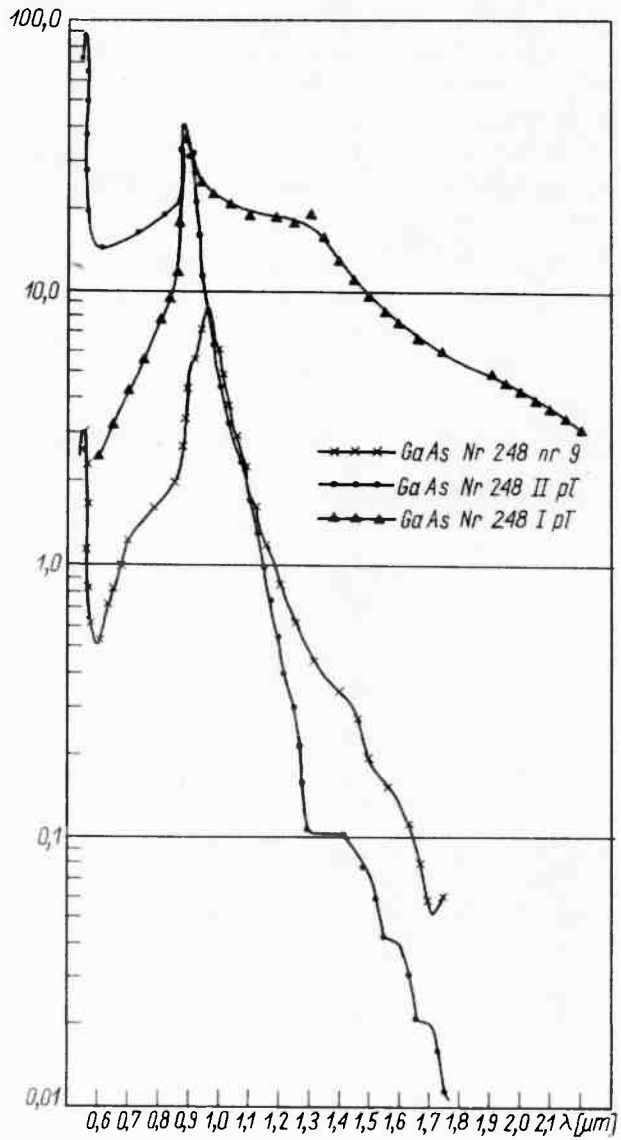
Trzecią grupę stanowią próbki, takie jak 248 nr 9 i 248/II pł. Dla próbek tych nie obserwowano w fotoprzewodnictwie domieszkowym nachylenia krzywej, które można by wiązać z poziomem żelazo. Występujący tu długofalowy "ogon" fotoprzewodnictwa z zaznaczającymi się zmiennymi nachyleniami można wytłumaczyć głębokim



Rys. 6. Koncentracja, oporność i ruchliwość dla próbek GaAs domieszkowanych żelazem jako funkcja odwrotności temperatury

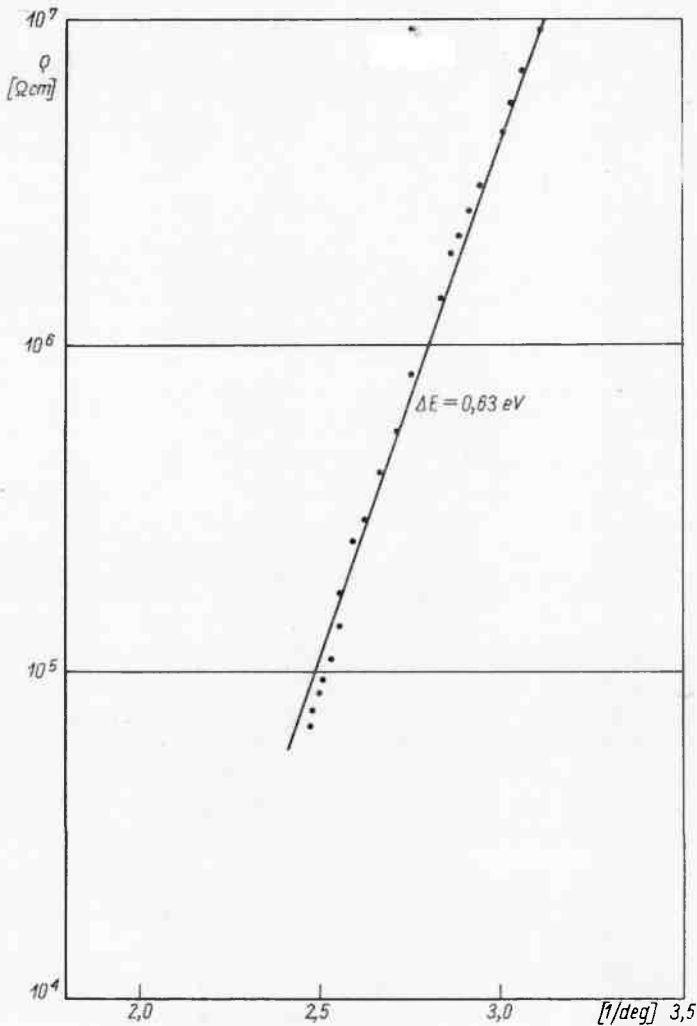


Rys. 7. Spektralny rozkład fotoprzewodnictwo dla próbek GaAs domieszkowanych żelazem



8. Spektralny rozkład fotoprzewodnictwa dla próbek GaAs domieszkowanych żelazem

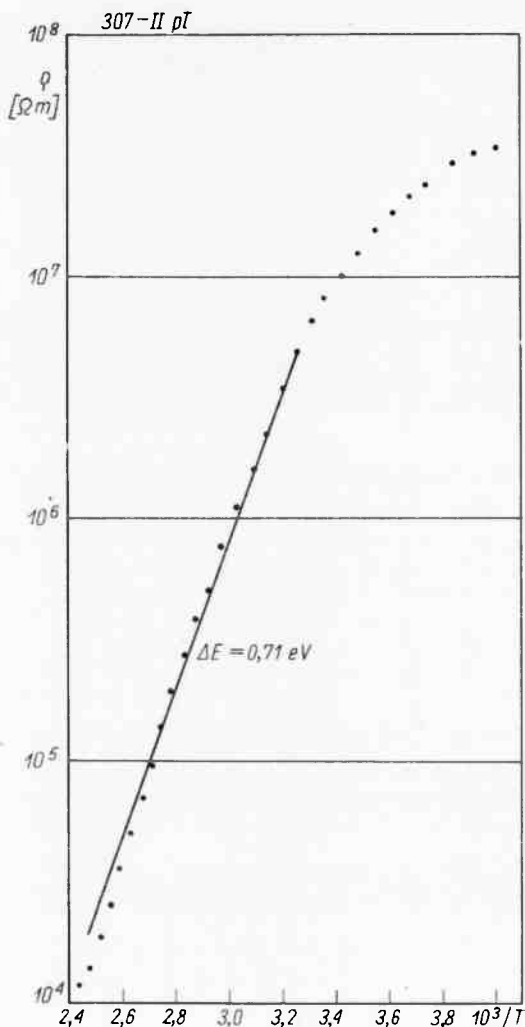
poziomem domieszkowym trudnym do zinterpretowania na podstawie danej krzywej /rys. 8/. Na rys. 9 przedstawione są temperaturowe zależności oporności dla próbek pochodzących z monokryształów domieszkowanych chromem. W całym zakresie badanych temperatur obserwuje się liniową zależność $\ln \rho = f / \frac{1}{T}$ /



Rys. 9. Oporność próbek GaAs typu "p" domieszkowanych chromem jako funkcja odwrotności temperatury

Zagięcie występujące na krzywych w obszarze niższych temperatur związane jest z faktem zwierania próbki przez opór wejściowy elektrometru $\sim 10^8 \Omega$. W tym obszarze opór próbki $R > R_{we}$. Próbki domieszkowane chromem można wyraźnie podzielić na dwie grupy, mianowicie: próbki wykazujące typ "p" - na podstawie pomiarów współczynnika Halla oraz pomiarów termonapięcia. Dla tej grupy próbek obserwuje się poziom energetyczny odległy o 0,63 eV od pasma walencyjnego /rys. 9/. Ruchliwość nośników jest rzędu $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Dla próbek grupy drugiej obserwuje się poziom energetyczny rzędu $0,7 - 0,75 \text{ eV}$ /rys. 10/. Z pomiarów współczynnika Halla wynika, że

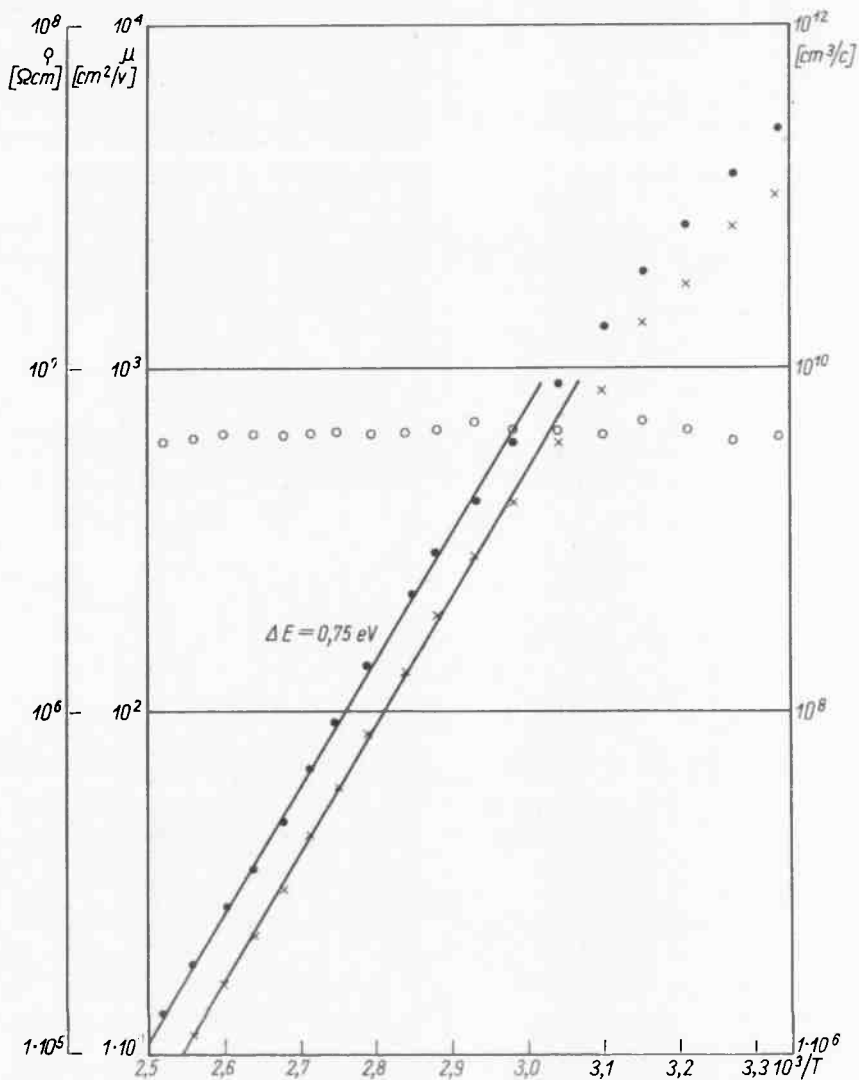
materiał jest typu "n". Ruchliwość nośników prądu jest rzędu $600 - 700/\text{cm}^2/\text{Vs}$. Dla obu rodzajów próbek ruchliwość nie zależy od temperatury w całym badanym zakresie temperatur.



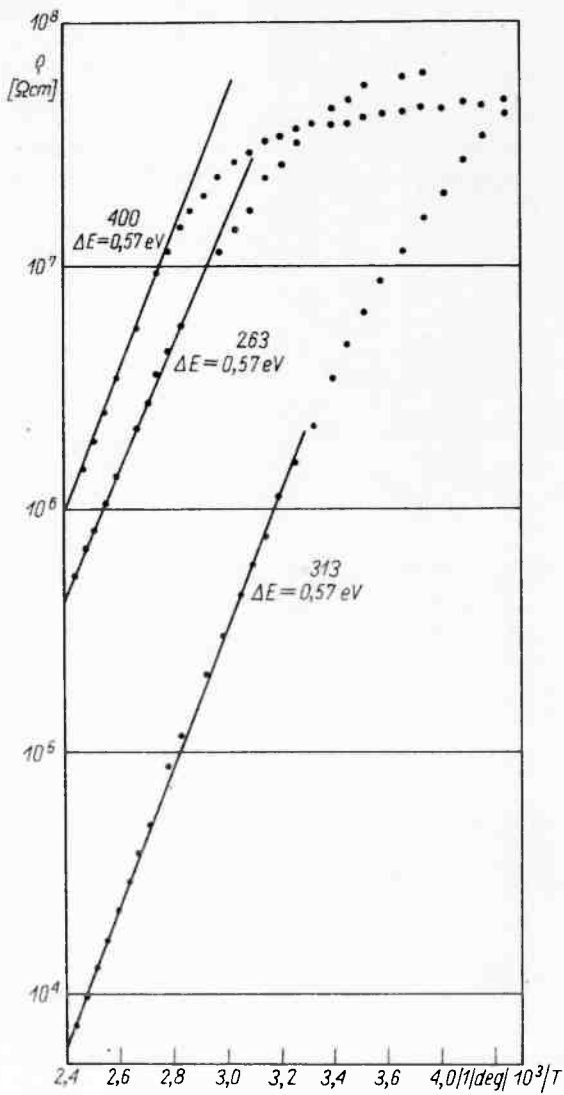
Rys. 10. Oporność próbek GaAs typu "n" domieszkowanych chromem jako funkcja odwrotności temperatury

Wartości te są w dobrej zgodności z danymi pochodzącymi z literatury [6,11] dla materiału typu "n" /rys. 11/.

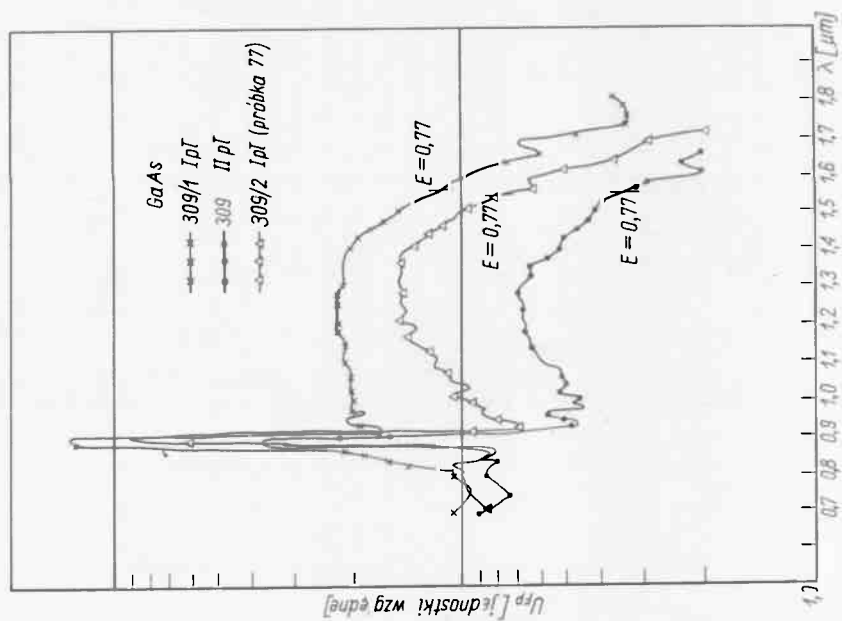
Wśród próbek domieszkowanych chromem wyjątek stanowi próbka nr 263. Jest to materiał o wyższej oporności $\rho > 10^8 \Omega \text{ cm}$ w temperaturze pokojowej. Z nachylenia prostej przedstawiającej temperaturową zależność oporności odczytuje się poziom energetyczny 0,57 eV. Taki sam poziom obserwuje się dla próbki celowo domieszkowanej tlenem /próbka nr 400 /rys. 12/ oraz dla próbki nr 313 nie zawierającej celowo wprowadzonej domieszki /rys. 12/. Prawdopodobnie dla próbek nr 263 i 313 nastąpiła kompensacja tlenem. Ze względu na zbyt wysoką oporność dla próbek tych nie można było zmierzyć ruchliwości i koncentracji nośników prądu.



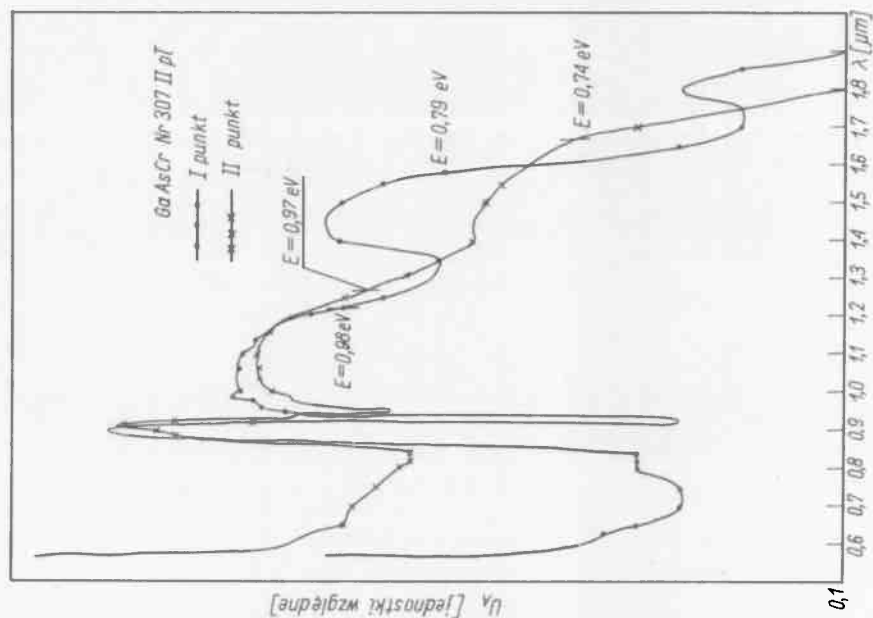
Rys. 11. Ruchliwość, oporność i współczynnik Halla dla próbek GaAs typu "n" domieszkowanych chromem jako funkcja odwrotności temperatury



Rys. 12. Oporność dla próbek GaAs niedomieszkowanych lub domieszkowanych tlen jako funkcją odwrotności temperatury



Rys. 13. Spektralny rozkład fotoprzewodnictwa dla próbek GaAs domieszkowanych chromem



Rys. 14. Spektralny rozkład fotoprzewodnictwa dla próbek GaAs domieszkowanych chromem

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów monokryształów domieszkowanych Cr i nie-domieszkowanych oszacowano wartość koncentracji wprowadzonego chromu; wynosi ona $N_{Cr} \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Pomiary spektralnego rozkładu fotoprzewodnictwa dla wybranych próbek arsenku galu domieszkowanego chromem przedstawiono na rys. 13 i 14. We wszystkich przypadkach obserwowano występowanie pików o energii 1,39 eV [6,12]. Wzrost fotoczułości w tym obszarze energii jest spowodowany wzrostem absorpcji związanej z przejściem elektronów do pasma przewodnictwa i dobrze pokrywa się z krawędzią absorpcji podstawowej w GaAs [12,13,14]. Dla energii fotonów mniejszych niż przerwa energetyczna absorpcji spada gwałtownie do wartości około 3 cm^{-1} przy 1,3 eV [4]. W tym obszarze zanika tworzenie się par elektron-dziura, co daje w wyniku szybki spadek fotoczułości. W obszarze niższych energii zaobserwowano dla wszystkich próbek pik w fotoodpowiedzi przy długości fali 1,45 /0,85 eV/ μm . Położenie tego pików dokładnie zgadza się z danymi uzyskanymi w szeregu prac publikowanych na temat badań fotoelektrycznych półizolacyjnego GaAs domieszkowanego chromem [4,6,12,] [14]. Wzmocnienie fotoprzewodnictwa zdefiniowane jako liczba fotonózników generowanych na ilość padających fotonów podana jest dla obu pików w tabelicy II. Jak widać z tabeli, można wyróżnić próbki o silnej fotoczułości w obszarze 1,45 μm , /0,85 eV/ dla których wzmocnienie fotoprzewodnictwa osiąga wartość wzmocnienia dla pików związanych z przejściami pasmo-pasmo /próbka nr 306/II/. W większości próbek wzmocnienie fotoprzewodnictwa dla pików przy 1,45 /0,85 eV/ μm było około 2 - 3 razy mniejsze.

Tabela II

Nr próbki	Wzmocnienie pików absorpcji pasmo-pasmo G_1	Fotowzmacniacze pików przy 1,45 μm G_2
307/I	605	55
307/II	14,0	3,6
309/I	145	23
309/2	98	15
309/3	210	-
309/II	40	5
306/II	13,5	12,8
263/II	46	-
262	72	40

Ocena energii jonizacji głębokiego poziomu domieszkowego w GaAs z pomiarów fotoprzewodnictwa jest bardzo trudna. Wynika to z braku teorii opisującej mechanizm zachowania się takiej domieszki w materiale, jak również z silnej kompensacji badanego materiału. W wyniku tego przebieg długofalowego progu fotoprzewodnictwa wykazuje indywidualne cechy dla poszczególnych próbek.

Różny charakter przebiegu długofalowego progu fotoprzewodnictwa domieszkowego uzyskiwany w naszych pomiarach uniemożliwił wybranie jednolitego kryterium określania energii jonizacji poziomów domieszkowych. Najodpowiedniejszym okazał się sposób określenia energii jonizacji podany w pracy [15]. Energie jonizacji poziomu domieszkowego związanego z chromem określona przy użyciu kryterium Mossa przedstawiona jest w tabelicy III, a jej wartości oznaczone są na krzywych pionowymi liniami.

Tabela III

Nr próbki	E_{iCr} eV	E_{ix} eV
307/1	0,81	-
307/II	0,79	0,98; 0,65
307/II	0,74	0,97
309/1	0,87	0,66
309/2	0,77	-
309/3	0,80	-
309/II	0,77	-

Wyznaczone z krzywych wartości energii aktywacji poziomu domieszkowego związanego z chromem zgadzają się z wynikami procy [15] i pomiarami hallowskimi i potwierdziłyby hipotezę, że występowanie pików o energii 0,87 eV związane jest z przejściami elektronów z domieszkowego poziomu chromu do pasma przewodnictwa. Dla niektórych próbek zaobserwowano występowanie dodatkowych pików. Energie jonizacji poziomów ewentualnie związanych z tymi pikami określone wg kryterium Mosso przedstawione są w tabeli III, w trzeciej kolumnie. Poziom o energii 0,98 eV mógłby być związany z defektami sieciowymi. Poziom taki obserwowany był również w pracach [16,3]. Przejście elektronów związane z tym poziomem, powodujące wzrost fotoczułości w obszarze 0,98 eV, widoczne są dla większości próbek bądź jako wyraźny pik /próbka nr 307/II/, bądź jako rozmycie krzywej fotoodpowiedzi. Poziom o energii 0,66 eV - 0,65 eV można wiązać z przejściami elektronów z pasma walencyjnego na poziom chromowy.

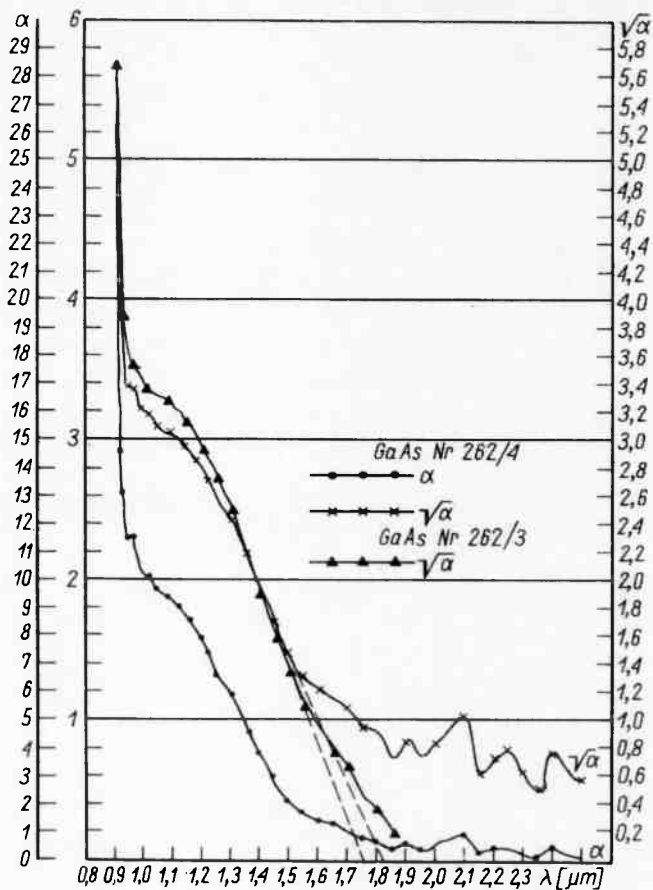
Dla kilku próbek GaAs domieszkowanego chromem przeprowadzono pomiary absorpcji w zakresie długości fal /0,7 - 2,5/ μm . Pomiary nie wypadają zadowalająco dla wszystkich próbek ze względu na trudności, jakie napotymano w przygotowaniach powierzchni do pomiaru. Niedoskonałe polerowanie mechaniczne lub też chemiczne /brak trawiacza polerującego obustronnie płytki GaAs cięte w płaszczyźnie /111/ powierzchni próbek wprowadziło błędy pomiarowe, co utrudniło interpretację wyników. Dla przebadanych próbek wyliczono współczynnik absorpcji α korzystając ze wzoru:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{1-R^4 + \sqrt{1-R^4 + 4T_r^2 R^2}}{2T}}{d}$$

gdzie R przyjęto 0,296, T_r - transmisja, d - grubość próbki w cm.

Dla próbek 262/4 i 262/3 mierzonych w temperaturze 300 K stwierdzono zależność $\alpha \sim (E - E_i)^2$. Wykreślając $\alpha^{1/2} = f(\lambda)$ otrzymano zależność liniową, z której przez ekstrapolację wyliczono poziom energetyczny 0,67 eV dla próbki 262/4 i 0,7 eV dla próbki 262/3, co zgadza się z poziomem energetycznym ohrumu określonym w procy [4] /rys. 15/. Korzystając z pracy [17], w której znaleziono doświadczalnie zależność współczynnika /dla $E = 1,1$ eV/ od koncentracji chromu, wyznaczono, że koncentracja chromu w próbce nr 262/4 wynosi $N_t = 3,2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, a w próbce nr 262/3 $N_t = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Do pomiaru czasu życia nośników prądu stosowano metodę opartą na zjawisku fotoprzewodnictwo i fotomagnetycznym [19].

Napięcie efektu fotomagnetycznego i fotoprzewodnictwo związane jest następująco z czasem życia nośników:



Rys. 15. Spektalny rozkład współczynnika absorpcji dla próbek GaAs domieszkowanych chromem

$$U_{FME} = \frac{g_0 (\mu_n + \mu_p)^{3/2} / e k T^{1/2} H_0 R}{c} \sqrt{\tau_{FME}}$$

$$\frac{J}{U_{FP}} = \frac{g_0 (\mu_n + \mu_p) / a \tau_{FP}}{1}$$

gdzie:

- e - ładunek elektronu,
- k - stała Boltzmana,
- T - temperatura,
- c - prędkość światła,
- g_0 - ilość generowanych par elektron-dziura w ciągu sekundy,
- H - natężenie pola magnetycznego,
- μ_p - ruchliwość dziur,

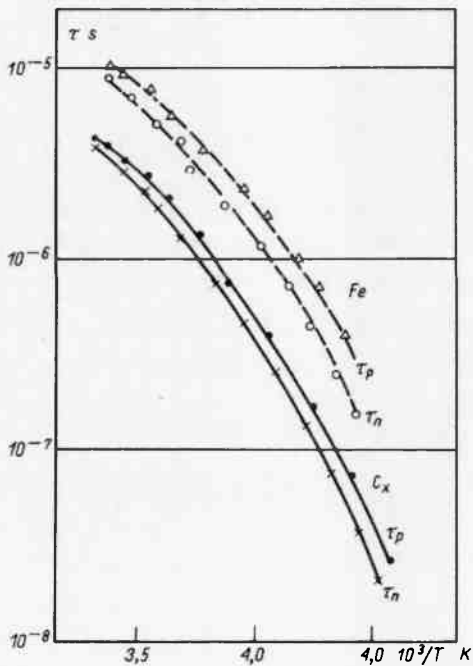
- μ - ruchliwość elektronów,
- R - całkowity opór próbki,
- l - długość próbki,
- o - szerokość próbki.

Wielkości τ_{FME} i τ_{FP} są powiązane z czasem życia elektronów τ_n i dziur τ_p następującymi zależnościami:

$$\tau_{FME} = \frac{\tau_n n^{-1} + \tau_p p^{-1}}{n^{-1} + p^{-1}}$$

$$\tau_{FP} = \frac{\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p}{\mu_n + \mu_p}$$

Jeżeli nośniki są intensywnie wychwytywane przez centra rekombinacyjne $\ll \mu_n \tau_n \gg \ll \mu_p \tau_p \gg$ $\tau_n n^{-1} \gg p p^{-1}$, to $\tau_{FME} = \tau_n$ (czyli $\tau_{FP} = \tau_p$). Przebiegi pomiarowe próbki były polerowane mechanicznie i chemicznie. Rekombinację powierzchniową ze względu na jej małą wartość w porównaniu z objętościową można było pominąć. Na małą rekombinację powierzchniową wskazują również badania fotoprzewodnictwa. /rys. 8, 13/. Próbki oświetlano modulowaną wiązką światła w zakresie długości fal 0,56 - 0,6 μm . Wiązkę światła wycinano przy pomocy filtrów optycznych produkcji Zeissa oraz wodnego roztworu Cu_2SO_4 .



Rys. 16. Czas życia elektronów i dziur dla próbek GaAs domieszkowanych żelazem i chromem jako funkcja odwrotności temperatury

Próbki domieszkowane chromem lub żelazem /oporność właściwa $10^5 - 10^8 \Omega \text{ cm}$ / charakteryzują się bardzo dużym sygnałem fotoprzewodnictwa/rzędu 10 mV /. Sygnały efektu fotomagnetycznego były znacznie mniejsze /rzędu kilku μV /, jednak były obserwowane w całym zakresie mierzonych temperatur. Pomiar fotoprzewodnictwa i efektu fotomagnetycznego przeprowadzono w zakresie temperatur /225 - 300 K/. Pomiarzy pozwoliły na wyznaczenie czasu życia elektronów i dziur. Na rys. 16 przedstawiono uzyskane wyniki.

Czasy życia dziur i elektronów dla arsenku galu /rys. 16/ domieszkowanego żelazem oraz chromem mało różnią się między sobą. Z obniżeniem temperatury w całym badanym zakresie temperatur obniżyły się czasy życia elektronów i dziur. Nieznaczne różnice między czasami życia elektronów i dziur oraz charakter ich zależności temperaturowej daje podstawę do przypuszczenia, że pułapkowanie nośników mniejszościowych jest znikome i że nośniki nadmiarowe rekombinują na głębokich poziomach uwarunkowanych domieszką żelaza lub chromu. Rekombinacja nośników odbywa się przez ten sam poziom domieszkowy, który określa koncentrację nośników w stanie równowagi termicznej. Wyznaczono przekrój czynny na wychwyt nośników. Wartość ta mało różni się dla chromu i dla żelaza i wynosi w temperaturze pokojowej około 10^{-17} cm^2 . Mała wartość przekroju czynnego charakterystyczna jest dla domieszek o głębokich poziomach w półprzewodnikach [18]. Na skutek nieznacznych przekrojów czynnych na wychwyt arsenku galu domieszkowany żelazem lub chromem w temperaturze pokojowej ma stosunkowo duże czasy życia nośników / $10^{-5} - 10^{-6} \text{ s}$ /.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych prób i badań wysokooporowego GaAs można wysunąć następujące wnioski:

Przeprowadzone badania temperaturowej zależności oporności współczynnika Halla w zakresie temperatur 350-400 K w GaAs domieszkowanym pozwoliły na wykrycie poziomów energetycznych związanych z żelazem, chromem i tlenem. Oszacowana z pomiarów elektrycznych koncentracja domieszki kompensującej jest rzędu $10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Dla wszystkich badanych próbek nie obserwuje się zmiany ruchliwości z temperaturą, co jest typowe dla materiału wysokooporowego. Ruchliwość dla materiału typu "p" było w przypadku domieszkowania żelazem $\mu = 70 - 80 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, domieszkowania chromem $10 - 20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, dla materiałów typu "n" domieszkowanych chromem $600 - 700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Podanie rozkładu widmowej zależności fotoprzewodnictwa pozwoliły na wykrycie głębokich poziomów energetycznych.

Pomiary rozkładu widmowego fotoprzewodnictwa wskazują na istnienie dodatkowych poziomów, związanych z domieszkami o głębokich poziomach energetycznych poza domieszkami wprowadzonymi celowo. Identyfikacja tych poziomów jest utrudniona ze względu na ich zbliżone energie jonizacji. Zagadnienie to wymaga dalszych szczegółowych badań.

Wysokooporowy arsenek galu domieszkowany żelazem lub chromem charakteryzuje się stosunkowo dżzymi czasami życia nośników $/10^{-5} - 10^{-6}$ s/. Wykonane badania pozwoliły stwierdzić, że żelazo i chrom tworzą w tym materiale centra rekombinacyjne nawet w niskich temperaturach. Wyznaczone przekroje czynne na wychwyt nośników prądu są zbliżone dla obu pierwiastków i w temperaturze pokojowej wynoszą około 10^{-17} cm².

Literatura

1. Allen J.W.: Nature, 187, 403, 1960.
2. Blanc J., Weisberg L.R.: Nature, 192, 155, 1960.
3. Blanc J., Bubø R.H., Weisberg L.R.: J.Phys.Chem.Solity 25, 225, 1964.
4. Cannel F.: Solid-State Electronics, 1, 97, 1960.
5. Allen G.A.: Brit. J.Appl. Phys. ser. 2, 1, 593, 1968.
6. Heisty R.W., Cronin G.R.: Proc 7th Int.Conf. on Phys. of Semicond. 1161, Paris Dunod 1964.
7. Heisty W.: Appl. Phys. Letters, 7, 8, 208, 1965.
8. Cronin G.R., Heisty R.W.: J.Electrochem. Society, 111, 874, 1964.
9. Broom R.F.: J.Appl. Phys., 38, 3483, 1967.
10. Struge M.F.: Phys. Rev., 127, 768, 1962.
11. Heath D.R. i inni: Brit. J.Appl. Phys. ser. 2, vol. 1, 1968.
12. Moss T.S.: Proc. Phys. Soc. /London/ B 62, 741, 1949, B-63.
13. Kornitow B.W. i inni: F.T.P. vol 5, 1144, 1971.
14. Jones C.E., Hilton A.R.: J.Electrochem. Soc., 113, 504, 1966.
15. Kałasznikow S.G.: Proc. Internat.Danf.Semic. Phys. Prague 241, 1960.
16. Михяновски Е.М. и другие: Физ. и Техн. Полупр., 5, 380, 1970.
17. Баженов В.К. и другие: Физ. и Техн. Полупр., 268, 1967.
18. Колозанова Н.М. и другие: Физ. и Техн. Полупр., 4, 134, 1970.
19. Равич Я.И.: Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение. Москва 1967.