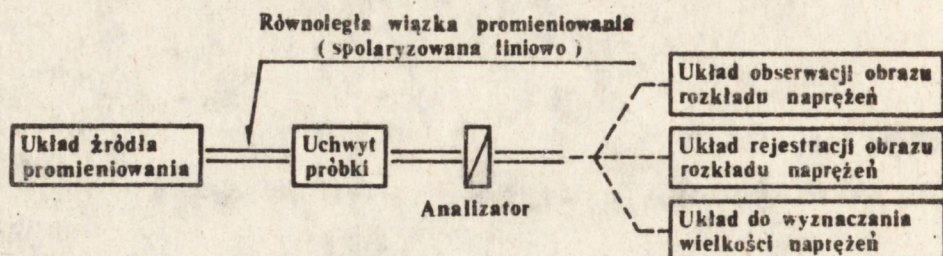


Układ polaryskopu optycznego do badań naprężeń w materiałach półprzewodnikowych

Procesowi krystalizacji materiału półprzewodnikowego towarzyszy występowanie gradientów temperatury, zarówno wewnątrz kryształu jak również na granicy faz oraz ośrodka otaczającego kryształ. W wyniku działania tych gradientów w kryształach występują naprężenia termiczne, wywołujące sprężyste lub plastyczne odkształcenia sieci kryształu. Znaczna część tych naprężeń zostaje "zamrożona" w kryształach po jego ostudzeniu w postaci elektrycznych odkształceń sieci oraz pól odkształceń wokół defektów struktury krystalicznej. Istnieją przesłanki wskazujące, że naprężenia, które powstają w procesie krystalizacji materiału półprzewodnikowego mogą zmniejszać jego wytrzymałość mechaniczną, co objawia się nadmiernym pękaniem materiału, zwłaszcza w procesach obróbki mechanicznej. Istnieją również przesłanki wskazujące, iż naprężenia powstające kolejno w procesach krystalizacji, obróbki mechanicznej materiału półprzewodnikowego oraz technologii wytwarzania przyrządu półprzewodnikowego, wpływają niekorzystnie na parametry przyrządów półprzewodnikowych. Znajomość charakteru, wielkości oraz rozkładu naprężeń w materiałach półprzewodnikowych jest niezbędna dla optymalizacji wymienionych procesów technologicznych [1]. Do badań naprężeń w materiałach bądź przyrządach półprzewodnikowych stosuje się najczęściej metody elastooptyczne [np. 2] lub rentgenowskie [np. 3]. Podstawę metod elastooptycznych stanowi zjawisko dwójłomności wymuszonej mechanicznie [4], występujące w kryształach poddanych działaniu naprężenia. Podstawowym

przyrządem służącym do badań naprężeń w materiałach jest polaryskop liniowy. Pod pojęciem badań naprężeń rozumie się określanie charakteru naprężeń, obserwację i rejestrację obrazu rozkładu naprężeń oraz wyznaczenie bezwzględnych wielkości naprężeń.

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy układu polaryskopu liniowego.

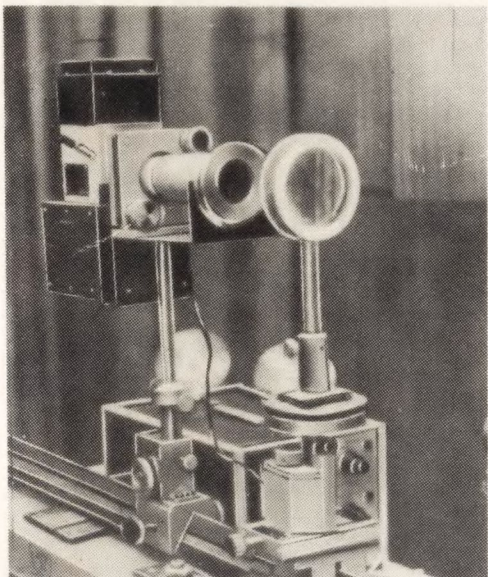


Rys. 1. Schemat blokowy układu polaryskopu liniowego

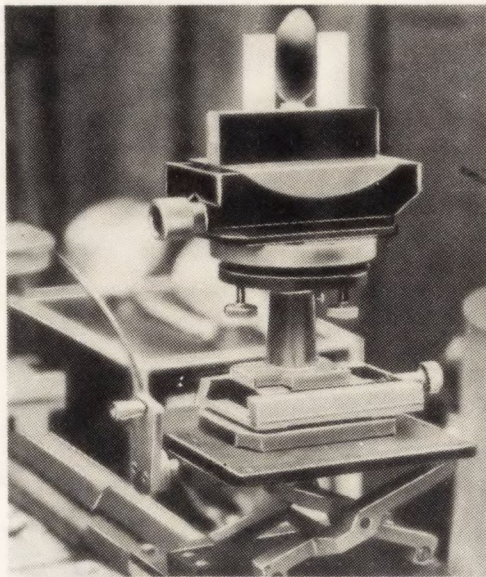
W skład układu źródła promieniowania wchodzi w kolejności:

- lampa halogenowa typu LH 31 o napięciu zasilania 24 V i mocy 150 W. Widmo promieniowania tej lampy jest zbliżone do widma promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze ok. 2800 K - dzięki temu może ona zostać efektywnie wykorzystana do badań w bliskiej podczerwieni i w zakresie widzialnym. Zastosowanie lamp halogenowych o mniejszej mocy może utrudnić uzyskanie obrazu rozkładu naprężeń o wystarczającej jasności /kontraście/. Natomiast stosowanie lamp halogenowych o mocy powyżej 150 W stwarza spore kłopoty związane z chłodzeniem układu źródła promieniowania. Stabilną pracę układu źródła promieniowania zapewnia układ zasilania składający się z stabilizatora sieciowego i transformatora laboratoryjnego z prostownikiem;
- zespół soczewek umożliwiających uzyskanie stożkowej bryły fotometrycznej źródła promieniowania;
- wymienny filtr optyczny. Stosowanie wymiennych filtrów optycznych ma na celu dobór odpowiednich zakresów widma promieniowania do badań określonych materiałów oraz ochronę cieplną polaryzatora i innych elementów optycznych układu. W układzie polaryskopu, skonstruowanego przez autorów, zastosowano filtry optyczne, których charakterystyki widmowe transmisji pokazano na rys. 2.

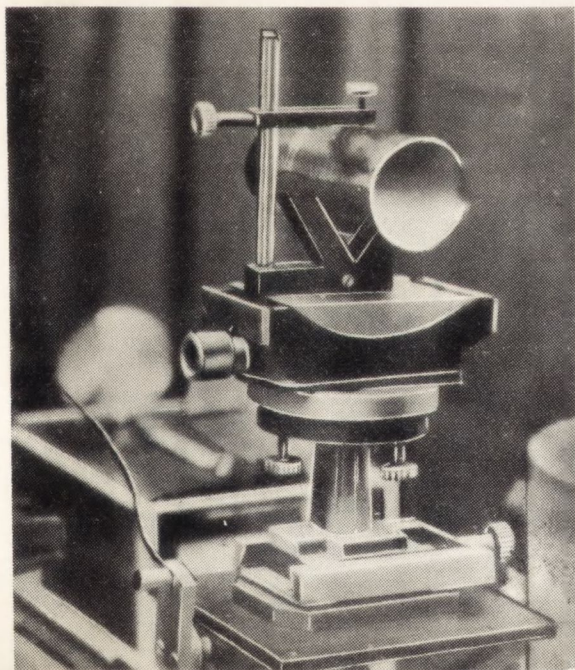
Filtry, których charakterystyki transmisji oznaczono symbolami od a) do c), mogą być wykorzystane do badań materiałów, których próg transmisji leży w zakresie widzialnym widma. Przy czym do badań materiałów



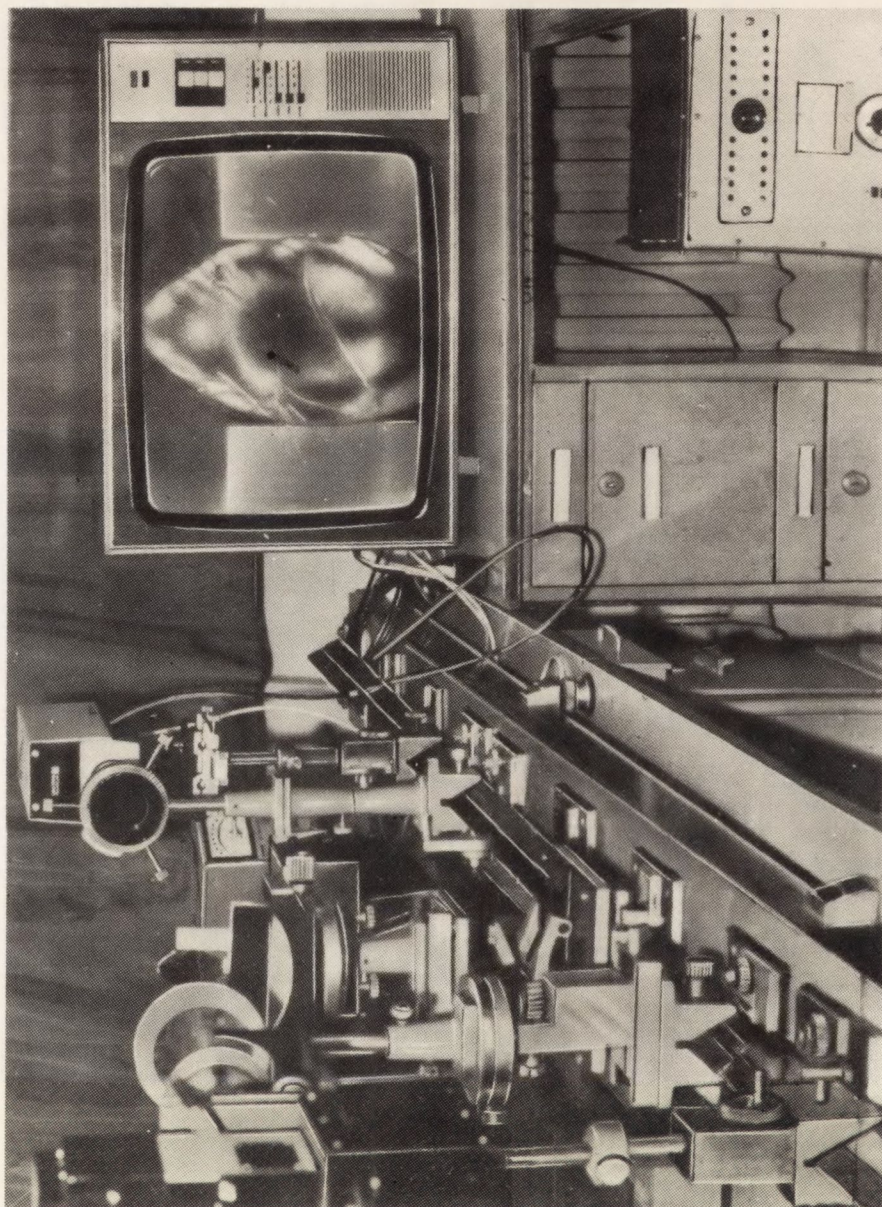
Rys. 3. Widok ogólny układu źródła promieniowania /Fot. J. Wiszniewski/



Rys. 4. Widok ogólny uchwyty próbki. W uchwycie zamocowano płytkę GaP /Fot. J. Wiszniewski/

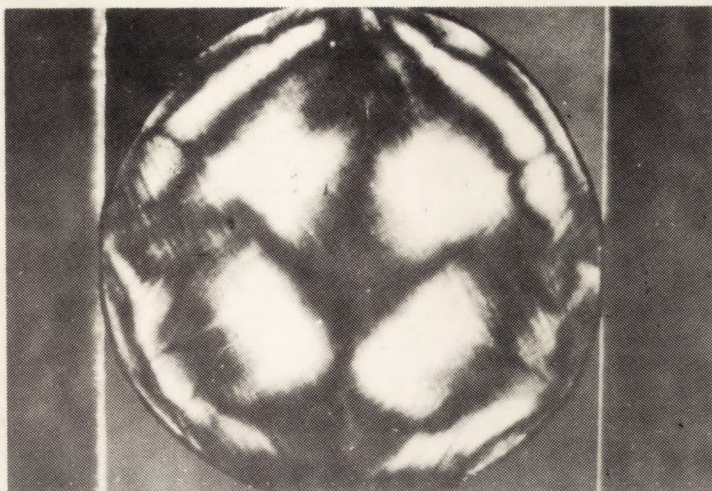


Rys. 5. Widok ogólny uchwyty próbki. W uchwycie zamocowano kryształ Si /Fot. J. Wiszniewski/

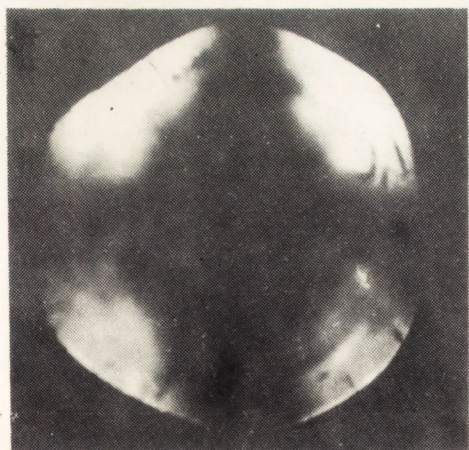


Rys. 6. Widok ogólny układu polaryskopu. W uchwycie zamocowano płytkę GaP. Obraz polaryskopowy rozkładu naprę-

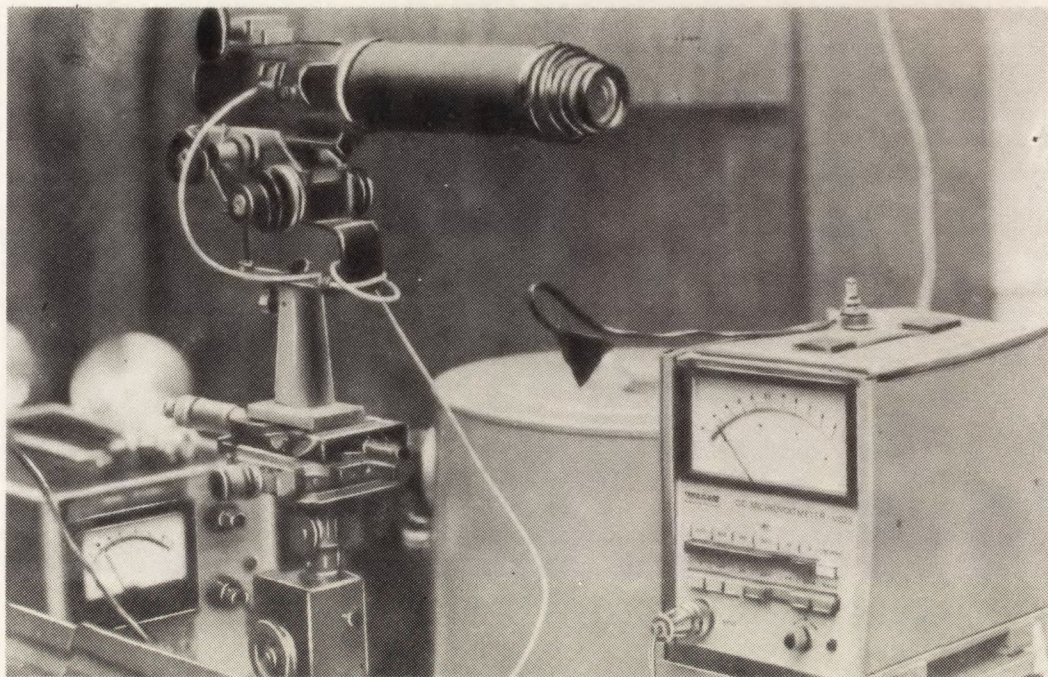
żeń w płytce jest widoczny na ekranie monitora telewizyjnego /Fot. J. Wiszniowski/



Rys. 7. Obraz polaryskopowy rozkładu naprężeń w płytce GaP

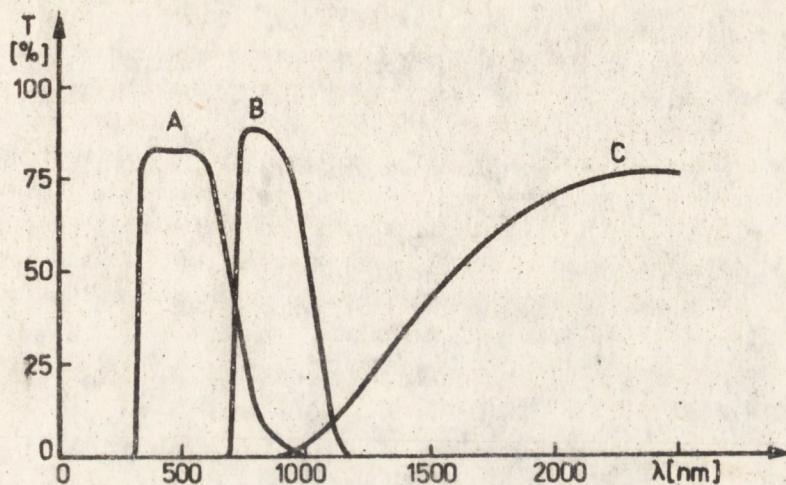


Rys. 8. Obraz polaryskopowy rozkładu naprężeń w płytce GaAs



Rys. 10. Widok ogólny układu detekcyjnego /Fot. J. Wiszniowski/

takich, jak np. GaP, ZnTe lub ZnSe, najbardziej odpowiednim (zwłaszcza w przypadku rejestracji obrazu rozkładu naprężeń) jest filtr, którego charakterystykę oznaczono symbolem a).



Rys. 2. Charakterystyki widmowe transmisji wymiennych filtrów optycznych stosowanych w układzie źródła promieniowania polaryskopu

Filtry, których charakterystyki transmisji oznaczono symbolami b) i c) mogą być wykorzystane do badań materiałów, których próg transmisji leży w zakresie bliskiej podczerwieni, takich jak np. GaAs, InP, CdTe, CdSe lub Si. Filtr, którego charakterystyka transmisji została oznaczona symbolem c), może być ponadto stosowany do badań materiałów takich, jak np. GaSb lub Ge;

- polaryzator. W układzie zastosowano polaryzator typu Polaroid HR, wyposażony fabrycznie w filtr czerwony. Polaryzator ten ma bardzo dobre własności polaryzacyjne /stopień polaryzacji bliski 100%/ w zakresie długości fal promieniowania 600+2500 nm, dzięki czemu może zostać wykorzystany do badań większości materiałów półprzewodnikowych, w tym wszystkich wyżej wymienionych;
- soczewka kondensorowa. Do przekształcenia stożkowej bryły fotometrycznej źródła promieniowania w równoległą wiązkę promieniowania o zadanej średnicy, jest potrzebny optyczny element skupiający o średnicy nie mniejszej niż średnica wiązki. Do badań materiałów o średnicach do 80 mm zastosowano soczewkę kondensorową dwuwypukłą typu D80/F200. Natomiast do badań materiałów o średnicach do 125 mm zastosowano soczewkę kondensorową płaskowypukłą typu D128,8/F200. Przeprowa-

dzony pomiar równoległości wiązek promieniowania uzyskanych za pomocą wymienionych soczewek kondensorowych wykazały, że w obydwu przypadkach nierównoległość wiązek nie przekraczała 1° .

Nowością w stosunku do układów tego rodzaju opisanych w literaturze [np. 5] jest stosowanie soczewki kondensorowej za polaryzatorem, co umożliwia uzyskanie równoległej, spolaryzowanej wiązki promieniowania o średnicy większej od średnicy polaryzatora. Stosując więc polaryzator /o średnicy 50 mm/ mający dobre własności polaryzacyjne w szerokim zakresie kątów padania niespolaryzowanej wiązki promieniowania oraz element skupiający, wykonany z odprężonego materiału, można uzyskiwać równoległe, spolaryzowane wiązki promieniowania o średnicach znacznie większych od średnicy polaryzatora. Badając stopień polaryzacji w przekroju stosowanych wiązek promieniowania stwierdzono, że zastosowanie powyższego rozwiązania spowodowało jedynie nieznaczne zmniejszenie stopnia polaryzacji, nie mające praktycznego znaczenia dla przeprowadzanych badań.

Wymienione powyżej elementy układu źródła promieniowania (z wyjątkiem soczewki kondensorowej) są montowane w jednej obudowie (rys. 3), która na odpowiednim statywie jest umieszczana na ławie optycznej. Elementy regulacyjne statywu umożliwiają zmianę położenia osi optycznej źródła promieniowania względem osi optycznej całego układu.

Uformowana w układzie źródła promieniowania spolaryzowana, równoległa wiązka promieniowania pada prostopadle na powierzchnię badanej próbki. Próbką może być cały kryształ otrzymany w procesie krystalizacji materiału półprzewodnikowego, którego końce zostaną obcięte, a powierzchnie czołowe odpowiednio przygotowane do badań.

Bkonstruowany przez autorów układ polaryskopu umożliwia prześwietlanie równoległą wiązką promieniowania kryształów o długości do 2 m i średnicy do 125 mm. Próbką może być również płytka o określonej orientacji, wycięta z badanego kryształu. Powierzchnie próbki powinny być polerowane i trawione w celu uzyskania jak największego stopnia gładkości.

Badana próbka jest mocowana w uchwycie (rys. 4 i 5), który umożliwia regulację położenia próbki względem osi optycznej układu, a także obrót próbki wokół osi o kąt $\pm 30^{\circ}$. Regulację zapewniają elementy typu ŁOK z cobrabidowskiego zestawu optycznego.

Uchwyt próbki jest tak skonstruowany, że zapewnia stabilne jej mocowanie, a także minimalny docisk, nie zniekształcający pola naprężeń istniejących wewnątrz próbki. W przypadku cienkich próbek (płytek), podstawowe elementy służące do mocowania próbki są wykonane z teflonu (rys. 4), w którym znajdują się rowkowe wycięcia o niewielkiej głębokości, zapewniające dostępność do badań praktycznie całej powierzchni próbki.

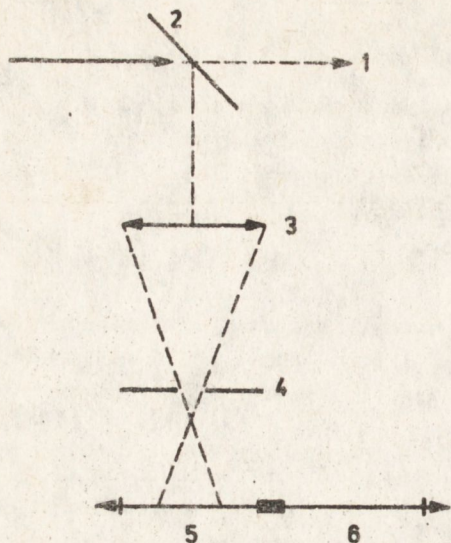
Funkcję analizatora pełni polaryzator typu Polaroid HR zamontowany w obudowie, umożliwiającej jego obrót o kąt 360° , z dokładnością do $30'$.

Obserwacji obrazu rozkładu naprężeń w badanej próbce dokonuje się za pomocą kamery telewizyjnej typu TPK-16, wyposażonej w endikon typu F2,5M3-UR, czuły na promieniowanie w zakresie długości fal $400+2000$ nm. Kamera jest wyposażona w wymienny zestaw obiektywów, umożliwiający uzyskiwanie powiększeń w granicach $2+200x$. Obraz z kamery jest wyświetlany na ekranie monitora telewizyjnego typu MTV-6134.

Układ polaryskopu z torem telewizyjnym zapewnia maksymalną wygodę obserwacji obrazu rozkładu naprężeń w badanej próbce, dając możliwość regulacji powiększenia, jasności i kontrastu obrazu. Na rys. 6 przedstawiono ogólny widok polaryskopu.

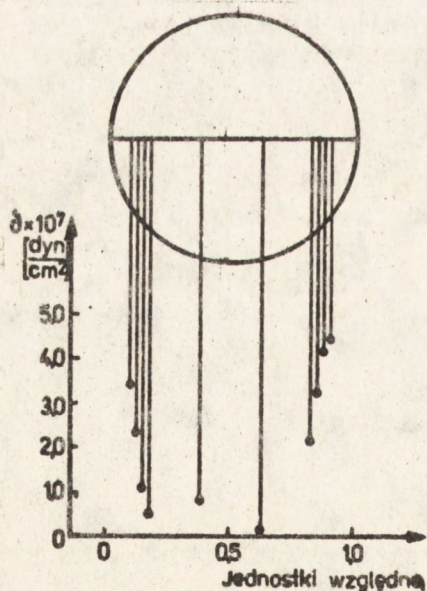
Rejestracji obrazów rozkładu naprężeń można dokonywać bezpośrednio z ekranu monitora telewizyjnego (rys. 6) za pomocą kamery fotograficznej. W celu uzyskania fotografii tych obrazów o większej zdolności rozdzielczej i lepszej jakości, urządzenie rejestrujące jest umieszczone w torze wiązki promieniowania tuż za analizatorem. W przypadku materiałów, których próg transmisji leży w zakresie widzialnym, do rejestracji stosuje się kamerę fotograficzną typu Contax RTS, wyposażoną w przyrząd mieszkowy do zdjęć z bliska. W przypadku materiałów, których próg transmisji leży w zakresie bliskiej podczerwieni (poniżej 1200 nm), rejestracji dokonuje się na płytach fotograficznych typu ORWO I 1050, za pomocą skonstruowanej przez autorów przystawki fotograficznej. Na rys. 7 i 8 pokazano przykładowo fotografie obrazów rozkładu naprężeń w płytkach GaP i GaAs pochodzących z kryształów, otrzymanych metodą Czochoalskiego. W opracowaniach [6,7] podano sposób przeprowadzania analizy obrazów rozkładu naprężeń, umożliwiającej ustalenie stanu naprężeń w badanym materiale półprzewodnikowym.

Do wyznaczania bezwzględnych wielkości naprężeń zastosowano tzw. metodę fotometryczną, której podstawy teoretyczne zostały podane w pracach [7,8]. W metodzie wykorzystuje się związek między wielkością naprężeń (dwójłomnością wymuszoną mechanicznie), a stosunkiem ekstremalnych natężeń wiązek promieniowania przechodzącego przez próbkę i analizator, uzyskanych podczas obrotu analizatora przy uprzednim ustawieniu osi przepuszczania polaryzatora pod kątem 45° do kierunku naprężenia osiowego w próbce. Na rys. 9 pokazano schemat układu pomiarowego, który jest umieszczany w torze wiązki promieniowania między analizatorem a kamerą telewizyjną.



Rys. 9. Schemat blokowy układu pomiaru naprężeń:
 1 - tor wiązki promieniowania, 2 - płytka światłodzielnąca, 3 - obiektyw, 4 - diafragma, 5 - matówka, 6 - powierzchnia światłoczuła detektora promieniowania

Głównym elementem układu pomiarowego jest układ detekcyjny (rys. 10), w skład którego wchodzi: obiektyw typu Auxanar 3,5/80, diafragma umożliwiająca regulację pola widzenia detektora w granicach 0,5÷6 mm oraz detektor promieniowania. Do pomiaru natężenia wiązki promieniowania odbitego od płytki światłodzielnącej stosuje się dwa rodzaje detektorów: fotoogniwo germanowe lub fotodiode krzemową, które swoimi zakresami czułości obejmują zakresy widm promieniowania używane do badań. W obydwu przypadkach detektory te są wykorzystywane w układzie pracy fotoogniwa. Prąd zwarciový detektorów jest mierzony za pomocą czułego mikrowoltomierza typu V623.



Rys. 11. Rozkład wielkości różnicy naprężeń głównych wzdłuż średnicy płytki GaP 111

Szczegółowy opis techniki pomiaru naprężeń jest podany w opracowaniu [7]. Na rys. 11 pokazano przykładowo rozkład różnicy naprężeń głównych [2], zmierzony wzdłuż średnicy płytki GaP o orientacji [111].

/Tekst dostarczono 1985.02.22./

LITERATURA

1. Sikorski S., Swiderski J.: "Fotometryczne kryteria oceny materiałów półprzewodnikowych", Biblioteka Elektroniki nr 7, ITE PAN, Warszawa, 1968.
2. Doroszkiewicz R.S.: "Elastoptyka - stan i rozwój polaryzacyjno-optycznych metod doświadczalnej analizy naprężeń", PWN, 1975.
3. Wierzchowski W.: Prace ITME, 11, 1984.
4. Nye J.F.: "Własności fizyczne kryształów w ujęciu tensorowym i macierzowym", PWN, 1962.
5. Woskriesińska W., Orłow G.N., Suworow J.K.: Opt. Miech. Prom., 5, 1978, 69.
6. De Nicola R.O., Tauber R.N.: J. Appl. Phys., 42,11,1971,4262.
7. Adamkiewicz G., Bajor A.: Opracowanie ITME, Warszawa, 1984.
8. Michael A.J.: J. Opt. Soc. Am., 58,7,1968,889.