

Andrzej GRABOWSKI, Janusz JAGLARZ, Mirosława KĘPIŃSKA,  
Barbara LONCIARZ, Marian NOWAK, Anna STARCZEWSKA

## **NOWE STANOWISKA BADAWCZE W ZFCS INSTYTUTU FIZYKI POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ**

**Streszczenie.** Przedstawiono nowe stanowiska do badań materiałów półprzewodnikowych opracowane i skonstruowane w Zakładzie Fizyki Ciała Stałego Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Katowicach. Stanowiska te służą do badań bezkontaktową metodą fotomagnetoelektryczną, metodą stacjonarnej siatki dyfrakcyjnej indukowanej światłem, metodami widmowych badań fotoprzewodnictwa i transmisji optycznej oraz metodami badań elipsometrycznych i skaterometrycznych.

## **NEW EXPERIMENTAL SETUPS IN DIVISION SOLID STATE PHYSICS INSTITUTE OF PHYSICS AT SILESIAN TECHNICAL UNIVERSITY**

**Summary.** New experimental setups for investigations of semiconducting materials which are constructed in Solid State Physics Section of Institute of Physics at the Silesian Technical University in Katowice are presented. They are used in contactless investigations of photoelectromagnetic effect, in investigations applying steady state photocarrier grating technique, in spectral investigations of photoconductivity and optical transmittance, in ellipsometry and scatterometry.

## НОВЫЕ УЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ В СЕКЦИИ ФИЗИКИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ СИЛЕЗКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

**Резюме.** Представлено новые измерительные установки для исследований полупроводниковых материалов, которые построено в Секции Физики Твердых Тел Института Физики Силезкого Политехнического Института в Катовицах. Эти установки использованы в исследованиях фотомагнитоэлектрического эффекта в конфигурации корбино, исследованиях методом стационарной дифракционной решетки индуцированной светом, методами спектральных исследований фотопроводимости и оптического пропускания а также эллипсометрическими и скатерометрическими методами.

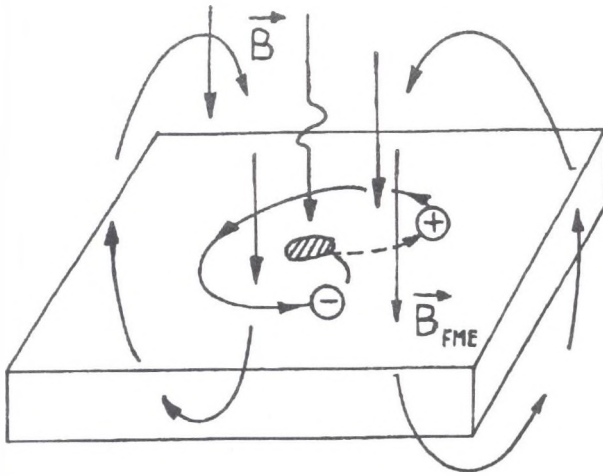
### 1. Wstęp

W Zakładzie Fizyki Ciała Stałego Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Katowicach prowadzone są badania własności optycznych, rekombinacyjnych i kinetycznych materiałów półprzewodnikowych [1]. W ostatnim czasie opracowano i zbudowano cztery nowe skomputeryzowane stanowiska pomiarowe służące temu celowi. W większości metod badawczych bazujących na nich wyznacza się parametry półprzewodników metodą dopasowania charakterystyk teoretycznych do nieliniowych zależności badanych zjawisk od zmiennych eksperymentalnych, np. długości fali, natężenia i kąta padania lub odbicia oraz częstotliwości modulacji promieniowania elektromagnetycznego. W dopasowaniu tym stosuje się własne metody i oprogramowanie komputerowe.

### 2. Stanowisko do wyznaczania czasu życia nośników ładunku bezkontaktową metodą fotomagnetoelektryczną

Światło energii fotonów większej od szerokości przerwy energetycznej padając na półprzewodnik fotogeneruje w nim nadmiarowe elektrony i dziury. W prezentowanej metodzie oświetla się punktowo jedynie niewielką część próbki półprzewodnikowej (rys. 1). Niejednorodny rozkład natężenia światła po powierzchni badanej próbki wywołuje gradient koncentracji nośników ładunku. Gradient ten występuje m. in. w kierunkach równoległych

do powierzchni próbki. W związku z tym elektrony i dziury dyfundują od obszaru oświetlonego we wszystkich kierunkach. Jeśli próbka znajduje się w polu magnetycznym o wektorze indukcji skierowanym prostopadle do jej powierzchni, to siła Lorentza zakrzywia trajektorie ruchu dyfundujących elektronów i dziur w przeciwnych kierunkach. W wyniku tego pojawia się cyrkulacja prądu elektrycznego nadmiarowych nośników ładunku wokół oświetlonego obszaru próbki (rys. 1). Prąd taki, zwany prądem fotomagnetoelektrycznym, jest źródłem nowego pola magnetycznego o indukcji  $B_{FME}$  (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie natury bezkontaktowych badań zjawiska FME (opis oznaczeń w tekście)

Fig. 1. Schematic illustration of nature of contactless measurement of PEM

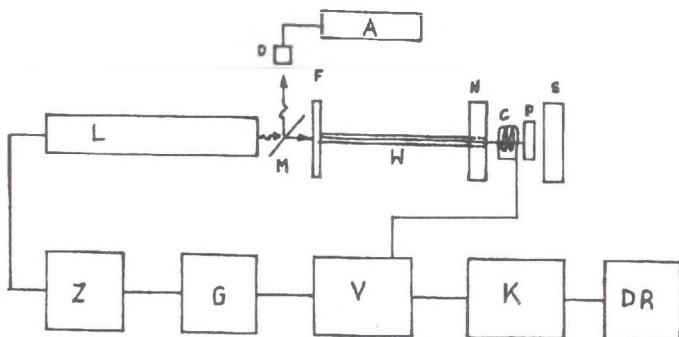
W przypadku okresowego modulowania natężenia oświetlenia wywołuje się zmiany natężenia  $i_{FME}$  prądu fotomagnetoelektrycznego, a tym samym zmiany w czasie indukcji pola magnetycznego  $B_{FME}$ . Zmiany te mogą indukować w cewce pomiarowej usytuowanej równoległe do powierzchni próbki zmienny sygnał napięciowy. Rejestracja tego sygnału dostarcza pośrednich informacji na temat natężenia prądu  $i_{FME}$ . Ponieważ natężenie tego prądu zależy [2] od podstawowych parametrów rekombinacyjnych, optycznych i kinetycznych półprzewodnika, to tym samym wielkość sygnału indukowanego w cewce pomiarowej dostarcza informacji o tych parametrach. Taka konfiguracja eksperymentu była zaproponowana w pracy [3] i stanowi pewien wariant metod badawczych opisanych w pracach [4, 5, 6]. Główną jej zaletą jest wyeliminowanie potrzeby posiadania kontaktów na badanej próbce. Jej wadą było natomiast to, iż była zaproponowana [3] jako metoda porównawcza wymagająca wyskalowania w oparciu o próbki wzorcowe o znanych wartościach czasów życia nośników ładunku. Można ją także stosować przeprowadzając badania w funkcji

długości fali promieniowania oświetlającego próbkę. Takie badania widmowe pozwalają wyznaczyć czasy życia i szybkości rekombinacji powierzchniowej nośników ładunku poprzez dopasowanie charakterystyk teoretycznych do wyników doświadczalnych. Wymaga to jednak znajomości parametrów optycznych badanych próbek oraz stosunkowo dużego natężenia światła monochromatycznego o zmiennej energii fotonów.

W celu wyeliminowania powyższych niedogodności w stanowisku badawczym przedstawianym w niniejszej pracy wykorzystano zależność natężenia prądu  $FME$  od częstotliwości modulacji promieniowania padającego na próbkę [7]. W przypadku silnej absorpcji światła ( $kw \gg 1$ , gdzie  $w$  - grubość próbki,  $k$  - współczynnik absorpcji promieniowania padającego na nią) w grubej próbce ( $w/L \gg 1$ , gdzie  $L$  - droga dyfuzji nośników ładunku) o pomijalnej rekombinacji powierzchniowej nośników ładunku, zależność  $i_{FME}$  od częstotliwości  $f$  modulacji światła określona jest wzorem [7]

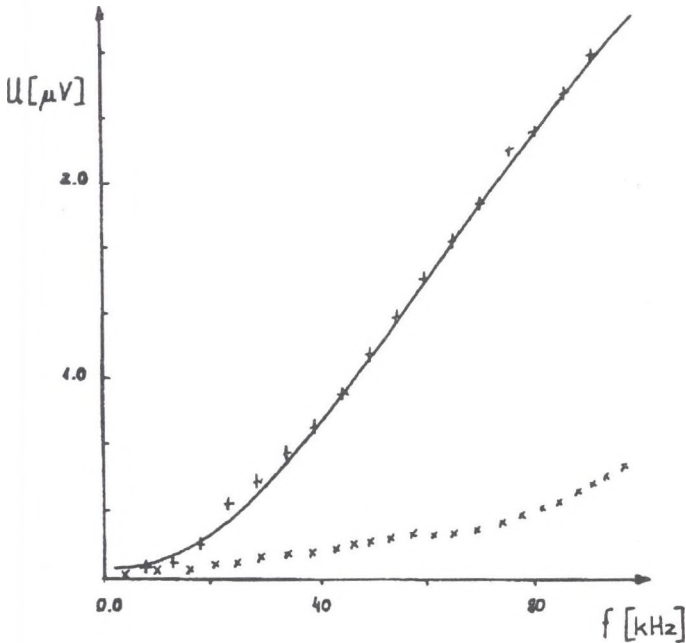
$$i_{FME} = \frac{A}{(1 + (2\pi f\tau)^2)^{1/4}}, \quad (1)$$

gdzie:  $A$  - natężenie prądu  $FME$  w warunkach stałego oświetlenia,  $\tau$  - czas życia nośników ładunku wyznaczony w badaniach  $FME$ .



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia czasu życia nośników ładunku bezkontaktową metodą FME (L - laser He-Ne, Z - zasilacz lasera, G - generator modulujący natężenie światła laserowego, V - nanowoltomierz heterodynowy EG&G 5110, K - mikrokomputer IBM PC/AT, DR - drukarka, N, S - magnesy trwałe, C - indukcyjna cewka pomiarowa, P - próbka, W - światłowód, F - filtry neutralne, M - płytka samodzielną, D - fotodioda, A - amperomierz)

Fig. 2. Schematic illustration of the experimental setup for measurement of carrier lifetime using contactless PEM method (L - laser He-Ne, Z - power supply, G - generator modulating laser emission, V - lock-in amplifier EG&G 5110, K - microcomputer IBM PC/AT, DR - printer, N, S - permanent magnets, C - induction measurement coil, P - sample, W - optical waveguide, F - neutral light filters, M - beam splitter, D - photodiode, A - ammeter)



Rys. 3. Zależność sygnału napięciowego od częstotliwości modulacji światła w badaniach FME monokrystalicznego Si metodą bezkontaktową (+ sygnał napięciowy wyindukowany w wyniku zjawiska FME, x sygnał szumów, krzywa ciągła przedstawia dopasowaną zależność teoretyczną dla wartości  $\tau = 3\mu s$ )

Fig. 3. Voltage response in PEM contactless investigations of crystalline Si vs frequency of illumination intensity (+ voltage response evoked by the PEM effect, x noises, solid curve represent the fitted theoretical dependence for  $\tau = 3\mu s$ )

Napięcie  $V$  wyindukowane w cewce pomiarowej (rys. 2) jest proporcjonalne do szybkości zmian indukcji pola magnetycznego  $b_{FME}$  wywołanego zjawiskiem  $FME$ . Ponieważ indukcja  $B_{FME}$  dodatkowego pola magnetycznego wywołanego przepływem prądu  $i_{FME}$  jest proporcjonalna do natężenia tego prądu to

$$V \sim \frac{di_{FME}}{dt}, \tag{2}$$

czyli

$$V = a \frac{\tau^2 f^3}{(1 + (2\pi f\tau)^2)^{5/4}}, \tag{3}$$

gdzie  $a$  - stała proporcjonalności niezależna od częstotliwości modulacji światła. Wartość tej stałej aparaturowej zależy między innymi od konfiguracji cewki pomiarowej i sprzężenia indukcyjnego pomiędzy nią a próbką.

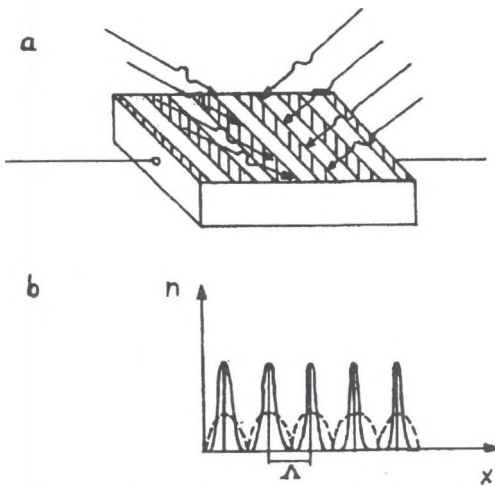
Dopasowując wzór (3) do nieliniowej, stwierdzonej eksperymentalnie zależności sygnałów rejestrowanych w cewce pomiarowej w badaniach *FME* w funkcji częstotliwości modulacji światła (rys. 3) można stosunkowo prosto wyznaczyć czas życia  $\tau$  nośników ładunku w badanej próbce. Dopasowanie to jest elementem nowości w porównaniu z metodami *FME* badań bezkontaktowych zaproponowanych w pracach [3, 4, 5, 6].

Rysunek 3 przedstawia typową zależność zmierzonego sygnału *FME* oraz szumów od częstotliwości modulacji światła oświetlającego próbkę. Próbka ta o grubości  $d=350 \mu\text{m}$  była wykonana z krystalicznego Si o orientacji (100), typu - p domieszkowanego bromem, i oporze właściwym  $\rho = 100 \Omega\text{cm}$ . Krzywa ciągła na rysunku przedstawia charakterystykę teoretyczną (3) dopasowaną do wyników doświadczalnych dla wartości  $\tau = 3 \mu\text{s}$ . Wyniki te uzyskano wykorzystując stanowisko badawcze przedstawione na rys. 2. Składa się ono z lasera He-Ne (LGI-201) emitującego światło o długości fali  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ . Promieniowanie tego lasera jest modulowane elektronicznie za pomocą generatora (G) G-911 sterującego zasilaczem. Na drodze promienia laserowego umieszczane są filtry neutralne firmy Oriel zmieniające natężenie światła padającego na próbkę. Próbkę (P) umieszcza się między biegunami magnesów trwałych (N i S). Wykorzystywane magnesy są wykonane z  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  przez firmę AMAG. Posiadają one następujące parametry: energia  $(BH)_{\text{max}}=240 \text{ kJ/m}^3$ , siła koercji  $=800 \text{ kA/m}$ , remanencja  $B_r=1.1 \text{ T}$ , współczynnik temperaturowy  $=0.15 \text{ \%}/\text{K}$ , temperatura Curie  $T_c=570 \text{ K}$ , gęstość  $=7.5 \text{ g/cm}^3$ , twardość  $=60 \text{ HRC}$ . W prezentowanym stanowisku badawczym magnesy te pozwalają uzyskać pole magnetyczne o indukcji  $1.1 \text{ T}$  w obszarze roboczym, w którym umieszczana jest próbka. W jednym z nich został wykonany metodą elektrodrążenia otwór o średnicy  $1 \text{ mm}$ , przez który promieniowanie oświetla badany materiał. Pomiędzy magnesami umieszczona jest cewka pomiarowa (C) składająca się z  $5600$  zwojów. Światło lasera doprowadzone jest do otworu w magnesie światłowodem. Przy tym jego natężenie jest monitorowane w trakcie pomiarów (rys. 2). Potrójny ekran izoluje całość od zewnętrznych zakłóceń. Indukowany w cewce pomiarowej sygnał jest mierzony za pomocą nanowoltomierza LOCK-in AMPLIFIER EG&G 5110. Pomiary są sterowane mikrokomputerem IBM PC/XT poprzez magistralę IEC-625 za pomocą programu numerycznego napisanego w języku TURBO PASCAL. Badania testujące wykonano w temperaturze pokojowej.

### 3. Stanowisko do pomiaru długości drogi dyfuzji metodą stacjonarnej siatki dyfrakcyjnej generowanej światłem

Istota pomiaru długości drogi dyfuzji nośników ładunku w półprzewodnikach metodą stacjonarnej siatki dyfrakcyjnej wzbudzanej światłem [8, 9] jest następująca. Badana próbka oświetlona jest w tym samym miejscu dwoma promieniami świetlnymi padającymi symetrycznie pod pewnym kątem  $\sigma$  w stosunku do siebie. W przypadku identycznej polaryzacji światła w tych promieniach na próbce wytwarza się obraz dyfrakcyjny (rys. 4a) złożony z „jasnych” i „ciemnych” prążków. Odległość między prążkami  $\Lambda$  zależy od kąta  $\sigma$

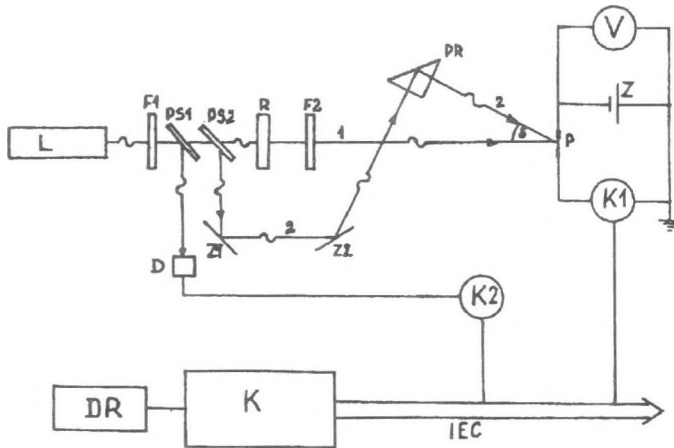
$$\Lambda = \frac{\lambda}{2} \sin \frac{\sigma}{2}. \quad (4)$$



Rys. 4. Rozkład natężenia światła (a) i koncentracji nadmiarowych nośników ładunku (b) wzdłuż próbki, na którą padają dwa promienie światła o jednakowej polaryzacji ( $\Lambda$  - stała siatki dyfrakcyjnej indukowanej światłem, krzywe ciągła i przerywana ilustrują schematyczne rozkłady przestrzenne nośników ładunku w przypadkach dłuższej i krótszej drogi dyfuzji nośników w badanym materiale)

Fig. 4. Spatial distribution of radiation intensity (a) and concentration of excess charge carriers (b) along a sample illuminated with two coherent light beams ( $\Lambda$  - period of the grating induced by the light interference, solid and broken curves represent the schematic distributions of carriers in cases of longer and shorter diffusion lengths, respectively)

W przypadku odpowiedniej energii fotonów w miejscach „jasnych” następuje fotogeneracja nadmiarowych nośników ładunku. Jeśli do próbki zostanie przyłożone napięcie w kierunku prostopadłym do prążków, to można ją w tym przypadku rozpatrywać jako szeregowo połączenie obszarów „jasnych” i „ciemnych” o różnej rezystancji. Poprzez próbkę płynie wówczas pewien przypadkowy prąd elektryczny o natężeniu  $I_1$ . W przypadku gdy polaryzacja światła w promieniach padających na próbkę jest różna, to nie zachodzi interferencja i wówczas można uważać próbkę za jednorodnie oświetloną. W takim przypadku po przyłożeniu do niej napięcia płynie przez nią prąd elektryczny o natężeniu  $I_2$ .



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania drogi dyfuzji nośników ładunku metodą stacjonarnej siatki dyfrakcyjnej generowanej światłem (L - laser emitujący promienie liniowo spolaryzowane, 1, 2 - numeracja wiązek światła padających na próbkę, F1, F2 - filtry neutralne, PS1, PS2 - płytki światłodzielnice, R - rotator skrecający płaszczyznę polaryzacji światła, PR - pryzmat, Z1, Z2 - zwierciadła płaskie, P - próbka, Z - zasilacz napięciowy, V - woltomierz, D - fotodioda, K1, K2 - pikoamperomierze, K - mikrokomputer, IEC - magistrala IEC-625, DR - drukarka)

Fig. 5. Scheme of measurement setup for investigations of carrier diffusion length using the steady state photocarrier grating technique (L - laser emitting plane polarized radiation, 1, 2 - description of radiation beams incident upon the sample, F1, F2 - neutral density filters, PS1, PS2 - beam splitters, R - rotator of radiation polarization, PR - prism, Z1, Z2 - plane mirrors, P - sample, Z - voltage supply, V - voltmeter, D - photodiode, K1, K2 - picoammeters, K - mikrocomputer, IEC - IEC-625 data bus, DR - printer)

Gradienty koncentracji nadmiarowych nośników ładunku, występujące w warunkach interferencji światła padającego na próbkę, prowadzą do dyfuzji nośników. Tym samym wraz ze wzrostem drogi dyfuzji  $L$  nadmiarowych nośników ładunku następuje poszerzenie obszarów, w których one występują (rys. 4b). Tym samym stosunek natężeń prądów  $I_1$  do  $I_2$  również zależy od drogi dyfuzji. Wyznaczenie  $L$  sprowadza się [8, 9] do zbadania

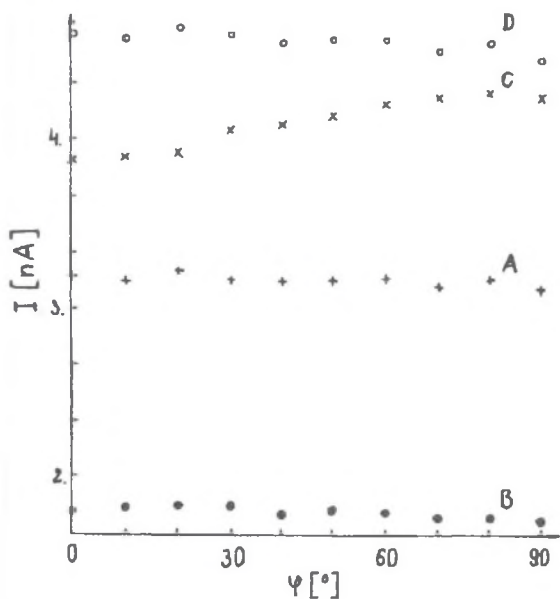


i odpowiedniej interpretacji stosunku natężeń prądów płynących przez próbkę w przypadkach z interferencją oraz bez interferencji światła padającego na nią. Długość drogi dyfuzji jest następującą funkcją stałej  $\Lambda$  siatki dyfrakcyjnej indukowanej światłem, a tym samym kąta  $\sigma$  pomiędzy promieniami padającymi na próbkę

$$L = \frac{\Lambda}{2\Pi} \left[ \frac{2\alpha\gamma\theta^{0.5}}{1+\theta} (1-\beta^2)^{-0.5} - 1 \right]^{0.5}, \quad (5)$$

gdzie  $\alpha$  - współczynnik potęgowy występujący w zależności  $\sigma_{pc} \sim I_0^\alpha$  fotoprzewodnictwa elektrycznego od natężenia światła padającego na próbkę,  $\gamma$  - współczynnik empiryczny [8, 9] o wartości z przedziału (0,1) uwzględniający częściową koherencję promieni,  $\theta$  - stosunek natężeń światła w obu wiązkach,  $\beta = I_1/I_2$ .

Schemat układu pomiarowego przedstawia rys. 5. Źródłem światła monochromatycznego jest laser He-Ne (LGI-201), dający ciągłą wiązkę światła liniowo spolaryzowanego o długości  $\lambda = 632.84$  nm. Wiązka ta przechodzi przez zestaw filtrów neutralnych F1



Rys. 6. Zależność natężenia prądu fotoprzewodnictwa płynącego przez cienką warstwę a-Si:H od kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła (A - na próbkę pada tylko promień 1 (rys. 2), B - na próbkę pada tylko promień 2 (rys. 2), C - na próbkę padają oba promienie, D - suma algebraiczna sygnałów A i B)

Fig. 6. Photoconductivity current intensity in a-Si:H thin film vs angle of light polarization (A - the sample illuminated with beam 1 (Figure 2), B - the sample illuminated with beam 2 (Figure 2), C - the sample illuminated with both beams, D - algebraic sum A and B)

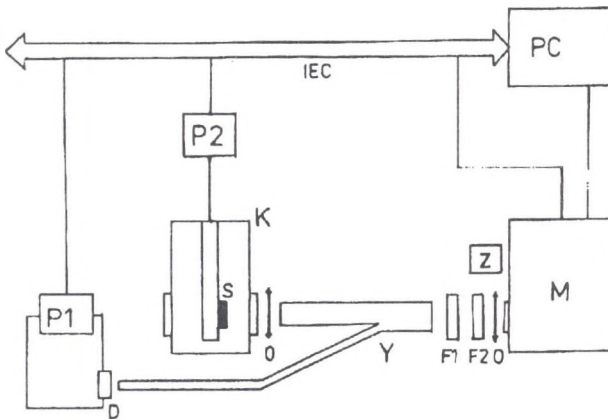
umożliwiających przeprowadzenie pomiarów w funkcji natężenia światła. Natężenie to jest monitorowane w trakcie pomiarów za pomocą fotodiody D. Następnie wiązka światła jest rozszczepiana za pomocą płytki światłodzielnącej PS2 na dwa promienie. Na drodze pierwszego z nich ustawiony jest rotator R (Carl Zeiss Jena), który pozwala na skrócenie płaszczyzny polaryzacji światła. Po przejściu przez ten rotator światło kierowane jest poprzez filtry neutralne F2 na próbkę. Filtry te pozwalają regulować natężenie światła w celu otrzymania jednakowych natężeń w obu wiązkiach padających na próbkę. Zapewnia to możliwie największy kontrast w obrazie interferencyjnym. Drugi promień jest kierowany za pomocą układu dwóch zwierciadełek płaskich Z1 i Z2 oraz pryzmatu PR w ten sam punkt próbki pod znanym kątem  $\sigma$  w stosunku do promienia pierwszego. Ustawienie kąta  $\sigma$  oraz jego pomiar następują za pomocą mechanizmu pochodzącego z przystawki KRM-1 do badań rentgenowskich metodą małąkątową. Kąt można zmieniać w zakresie od  $0^\circ$  do  $19^\circ$  z dokładnością  $1''$ . Ze względu na bardzo dużą światłoczułość badanych próbek układ jest odizolowany od otoczenia.

Do badanych próbek przykładają się napięcie stałe z regulowanego zasilacza 5121 Unitra. Natężenie prądu płynącego przez próbkę oraz natężenie prądu generowanego w fotodiodzie są mierzone za pomocą pikoamperomierzy Keithley-485/4853. Rejestracja wyników jest sterowana mikrokomputerem IBM-286PC/AT poprzez magistralę IEC-625 za pomocą programów napisanych w języku Turbo Pascal. Dla każdego punktu eksperymentalnego zaznaczonego na wykresie (rys. 6) dokonuje się serii kilkudziesięciu pomiarów w celu wyeliminowania szumów. Zastosowanie techniki pomiarów stałoprądowych jest elementem nowości w stosunku do metodyki pomiarów zaproponowanej w pracach [8, 9]. Zmiana ta jest podyktowana nieliniową zależnością fotoprzewodnictwa badanych warstw a-Si:H od natężenia oświetlenia oraz długą stałą czasową zmiany przewodnictwa elektrycznego badanych próbek o bardzo dużej rezystancji.

Rysunek 6 przedstawia przykładowe wyniki badań cienkiej warstwy uwodornionego amorficznego krzemu a-Si:H otrzymanego metodą w. cz. rozkładu silanu na Uniwersytecie w Bari we Włoszech. Przedstawia on zależność natężenia prądu płynącego przez próbkę w funkcji kąta skrócenia płaszczyzny polaryzacji  $\phi$  jednej wiązki względem drugiej w zakresie od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , dla przypadków: A - gdy na próbkę pada tylko pierwszy promień, B - gdy na próbkę pada tylko drugi promień, C - gdy na próbkę padają dwa promienie jednocześnie pod kątem  $\sigma = 18.62^\circ$ . Zależność D przedstawia sumę algebraiczną natężeń prądów zarejestrowanych w przypadkach A i B, gdy dwa promienie padają osobno, czyli zależność natężenia prądu w funkcji skrócenia kąta polaryzacji światła, jaka powinna wystąpić, gdyby nie było wpływu zjawiska interferencji. W granicznych przypadkach zależność C ukazuje różnicę w natężeniu prądu płynącego przez próbkę, gdy występuje interferencja ( $\phi = 0^\circ$ ) oraz gdy ona nie występuje ( $\phi = 90^\circ$ ). Wyznaczona na podstawie tych wyników długość drogi dyfuzji wynosi  $L=0.10 \mu\text{m}$ .

## 4. Stanowisko do badań fotoprzewodnictwa elektrycznego w półprzewodnikach

Oświetlenie półprzewodników promieniowaniem elektromagnetycznym o odpowiedniej energii fotonów powoduje fotogenerację w nich nadmiarowych, swobodnych nośników ładunku elektrycznego. Zmianę przewodnictwa elektrycznego próbek wywołaną tymi nośnikami nazywamy fotoprzewodnictwem elektrycznym. Badanie charakterystyk widmowych tego zjawiska pozwala uzyskać informacje o rekombinacyjnych [10] i optycznych [11] parametrach materiałów półprzewodnikowych. W wyniku badań zależności fotoprzewodnictwa od natężenia światła i temperatury próbki można uzyskać informacje na temat rozkładu energetycznego stanów elektronowych w przerwie energetycznej półprzewodnika [12].



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego do badań fotoprzewodnictwa elektrycznego w półprzewodnikach (Z - źródło światła, M - monochromator, O - obiektyw, F1 - filtr neutralny światła, F2 - filtr krawędziowo odcinający, Y - kabel światłowodowy rozgałęziony typu Y, K - kriostat optyczny azotowy z okienkami kwarcowymi, S - próbka, D - fotodetektor, P1 - pikoamperomierz, P2 - elektrometr, PC - mikrokomputer IBM PC/AT wraz z drukarką, IEC - magistrala IEC-625)

Fig. 7. Schematic illustration of the experimental setup for measurement of photoconductivity (Z - light source, M - monochromator, O - objective, F1 - neutral light filter, F2 - band pass filter, Y - bifurcated fiber bundles, K - liquid nitrogen cryostat with quartz windows, D - photodetector, P1 - picoammeter, P2 - electrometer, PC - microcomputer IBM PC/AT and printer, IEC - IEC-625 data bus)

Na stanowisko pomiarowe do badania fotoprzewodnictwa (rys. 7) składają się następujące cztery podukłady:

- a. źródło światła monochromatycznego,
- b. tor światłowodowy,
- c. kriostat z uchwytem próbki,
- d. blok pomiaru natężenia prądu fotoprzewodnictwa i natężenia światła,
- e. mikrokomputer i programy numeryczne sterujące przebiegiem eksperymentu, rejestracją wyników i ich opracowaniem.

Źródłem światła monochromatycznego jest oświetlacz wysokiej jasności (z lampami halogenową lub ksenonową o mocy 1000[W]) ustawiony na wejściu podwójnego monochromatora interferencyjnego typu GDM-1000 Carl Zeiss Jena. Monochromator ten zapewnia zdolność rozdzielczą rzędu  $\Delta\lambda=2\text{nm}$  w widmowym zakresie pracy od  $0.3\mu\text{m}$  do  $1.3\mu\text{m}$ . W celu wyeliminowania nakładających się na siebie ugiętych wiązek interferencyjnych pierwszego i drugiego rzędu monochromator został wyposażony w zestaw filtrów interferencyjnych krawędziowo odcinających firmy Carl Zeiss Jena. Poza tym został on rozbudowany o automatyczną przesłonę i elektroniczny przełącznik typu start/stop, które są sterowane mikrokomputerem poprzez magistralę IEC-625. Generator impulsów skalujących zamontowany w monochromatorze steruje zapisem odpowiednich długości fal w mikrokomputerze w trakcie eksperymentu.

Tor światłowodowy służy rozdzieleniu wiązki światła wychodzącej z monochromatora na dwie części. Jedna z nich oświetla badaną próbkę, a druga umożliwia monitorowanie aktualnego natężenia światła stosowanego w eksperymencie. Na wejściu do kabla światłowodowego typu Y o stosunku powierzchni świecących 9:1 umieszcza się obiektyw skupiający oraz filtry neutralne firmy Oriol. Zestaw tych filtrów umożliwia zmianę natężenia światła w eksperymencie w zakresie od 1 do  $10^{-5}$ . Szersza końcówka kabla światłowodowego zaopatrzona jest w obiektyw skupiający światło na badanej próbce.

Kriostat optyczny, azotowy typu przepływowego firmy Kriopan umożliwia pomiar fotoprzewodnictwa w zakresie temperatur od 78 K do 360 K. Wyposażono go w dodatkowy przepust prądowy o rezystancji pomiędzy kontaktami większej od  $10^{12}\Omega$  w celu umożliwienia badań próbek wysokoomowych. Kriostat posiada kwarcowe okienka, a przed uchwytem, w którym mocowana jest próbka, umieszcza się przesłonę z otworem kalibracyjnym o średnicy zależnej od wymiarów próbki. Przesłona umożliwia wyeliminowanie zjawisk fotowoltaicznych, jakie mogłyby zaistnieć w oświetlonych obszarach przykontaktowych badanych półprzewodników.

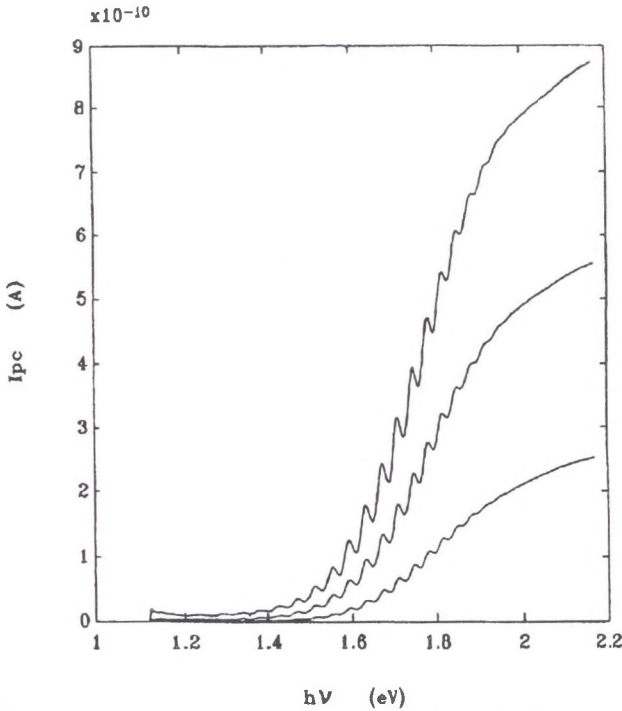
Natężenie prądu fotoprzewodnictwa mierzy się elektrometrem Keithley 617 z wewnętrznym stabilizowanym źródłem napięciowym. Natężenie światła jest rejestrowane stosownie do zakresu widmowego fotopowielaczem typu M12FC51 (dla  $\lambda = (0.3 \div 0.6)\mu\text{m}$ ), fotodiodą krzemową S2386 firmy Hamamatsu (dla  $\lambda = (0.6 \div 0.9)\mu\text{m}$ ), oraz fotodiodą germanową SFH236 Siemens (dla  $\lambda = (0.9 \div 1.3)\mu\text{m}$ ). Fotopowielacz jest zasilany źródłem wysokonapięciowym ZWN-42. Fotodiody pracują jako fotoogniwa w reżimie zwarciovym. Natężenie prądu płynącego przez odpowiedni fotodetektor mierzone jest pikoamperomierzem Keithley 485/4853. Fotodiody umieszczone są w specjalnej głowicy pomiarowej zapewniającej ich stabilizację temperaturową, a ponadto ekranującą przed zewnętrznym polem elektrycznym oraz zewnętrznymi źródłami światła w trakcie pomiarów.

Elektrometr i pikoamperomierz, podobnie jak monochromator, są sterowane mikrokomputerem IBM-PC-286/AT poprzez magistralę IEC-625. Odpowiednie programy sterujące zostały opracowane w naszym Zakładzie w językach Basic i Turbo Pascal.

Metodyka badań fotoprzewodnictwa w tak wyposażonym układzie sprowadza się do ustalenia poziomu natężenia światła wychodzącego z monochromatora i przeprowadzenia pomiarów natężenia prądu fotoprzewodnictwa w funkcji zmienianej długości fali światła padającego na próbkę. Dla każdej z długości fal rejestruje się serię wyników, a następnie wyznacza jej wartość średnią i odchylenie standardowe od wartości średniej. Jednocześnie w podobny sposób mierzy się natężenie światła dla każdej z długości fali. Opisane pomiary przeprowadza się wielokrotnie dla różnych poziomów natężenia światła wychodzącego z monochromatora w zakresie 1 do  $10^{-5}$ .

Dla każdego z ustalonych, danym zestawem filtrów neutralnych, poziomu natężenia światła wychodzącego z monochromatora, dla różnych długości fali na badaną próbkę padają różne ilości fotonów w jednostce czasu. Wynika to z charakterystyk widmowych źródła światła, monochromatora i kabli światłowodowych. W ogólnym przypadku natężenie prądu fotoprzewodnictwa jest nieliniową funkcją natężenia oświetlenia. W związku z tym zachodzi konieczność unormowania wyników badań fotoprzewodnictwa dla jednej (lub kilku) ustalonych wartości natężenia światła padającego na próbkę. W przedstawionej metodyce badań dokonuje się to numerycznie. Rysunek 8 przedstawia typowe charakterystyki widmowe natężeń prądów fotoprzewodnictwa w cienkiej warstwie a-Si o grubości  $w=3\mu\text{m}$  dla różnych natężeń oświetlenia. Widoczne na tym rysunku piki interferencyjne są dowodem wysokiej zdolności rozdzielczej opisanego stanowiska badawczego.

Za pomocą programów komputerowych opracowanych w naszym Zakładzie na podstawie tak otrzymanych charakterystyk widmowych fotoprzewodnictwa elektrycznego wyznacza się zależności widmowe współczynników wydajności kwantowej fotogeneracji swobodnych nośników ładunku elektrycznego, iloczyny ruchliwości i czasu życia nośników.



Rys. 8. Charakterystyki widmowe natężeń prądów fotoprzewodnictwa w cienkiej warstwie a-Si dla trzech różnych natężeń oświetlenia

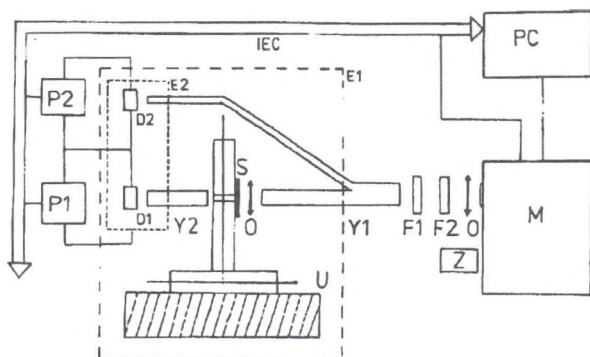
Fig. 8. Photoconductivity spectra of a thin film a-Si for three different incident light intensities

## 5. Stanowisko do badań transmisji optycznej

Badania transmisji optycznej polegają na pomiarze stosunku natężeń światła przechodzącego przez badaną próbkę oraz światła padającego na nią. Znajomość tego ilorazu, zwanego współczynnikiem transmisji, jako funkcji energii fotonów padającego światła pozwala wyznaczyć współczynnik absorpcji, część rzeczywistą współczynnika załamania, grubość badanego materiału oraz jej wariancję w oświetlonym obszarze próbki [13].

Na stanowisko pomiarowe do badania transmisji (rys.9) składają się następujące cztery podukłady:

- a. źródło światła monochromatycznego,
- b. tor światłowodowy,



Rys. 9. Schemat układu pomiarowego do badań transmisji optycznej (Z - źródło światła, M - monochromator, O - obiektyw, F1 - filtr neutralny, F2 - filtr krawędziowo odcinający, Y1 - kabel światłowodowy rozgałęziony typu Y, Y2 - kabel światłowodowy, U - stolik mikroskopowy z przesuwym uchwytem typu x-Y, S - próbka, D1, D2 - fotodetektory, P1, P2 - pikoamperomierze, E1 - komora pomiarowa światłoszczelna, E2 - głowica z fotodetektorami, PC - mikrokomputer IBM PC/AT wraz z drukarką, IEC - magistrala IEC-625)

Fig. 9. Schematic illustration of the experimental setup for measurement of optical transmission (Z - light source, M - monochromator, O - objective, F1 - neutral light filter, F2 - band pass filter, Y1 - bifurcated fiber bundles, Y2 - single fiber bundle, U - multi-axis stage of a microscope, D1, D2 - photodetectors, P1, P2 - picoammeters, PC - mikrokomputer IBM PC/AT and printer IEC - IEC-625 data bus)

- c. kriostat lub przystawka mikroskopowa z uchwytem próbki,
- d. blok pomiaru natężenia prądu fotoprzewodnictwa i natężenia światła,
- e. mikrokomputer i programy numeryczne sterujące przebiegiem eksperymentu, rejestracją wyników i ich opracowaniem.

Stanowisko to wykorzystuje podstawowe elementy opisanego stanowiska do badań fotoprzewodnictwa elektrycznego (rys. 7): źródło światła monochromatycznego oraz tor światłowodowy.

Do badań zależności temperaturowych współczynnika transmisji używany jest kriostat optyczny azotowy podobnie jak w stanowisku badań fotoprzewodnictwa elektrycznego. Światło wychodzące z szerszego kabla światłowodowego zostaje skupione obiektywem i oświetla poprzez okienko kwarcowe próbkę umieszczoną na tzw. zimnym palcu miedzianym kriostatu. Następnie światło to jest doprowadzane kablem światłowodowym do fotodetektora mierzącego jego natężenie.

Badania w temperaturze pokojowej transmisji optycznej w różnych obszarach próbki wykonuje się umieszczając badaną próbkę na stoliku mikroskopowym w przesuwym

uchwycie typu X-Y. Obiekt w kierunku światła wychodzące z kabla światłowodowego na próbkę. Po przejściu przez nią przechodzi ono przez otwór kalibracyjny i wychodzi do kabla światłowodowego doprowadzonego do detektora mierzącego natężenie światła transmitowanego.

Zarówno w badaniach temperaturowych, jak i w temperaturze pokojowej cieńsza część światłowodu typu „Y” prowadzi tzw. wiązkę odniesienia od monochromatora do drugiego fotodetektora monitorującego natężenie światła w trakcie eksperymentu.

W badaniach transmisji optycznej stosuje się fotodetektory tego samego typu i w tej samej konfiguracji jak w badaniach natężenia światła w trakcie pomiarów fotoprzewodnictwa elektrycznego. Jediną różnicą jest to, iż natężenia prądów płynących przez fotodetektory, mierzące zarówno natężenie światła przechodzącego przez próbkę, jak i wiązki odniesienia, są mierzone pikoamperomierzami Keithley 485/4853.

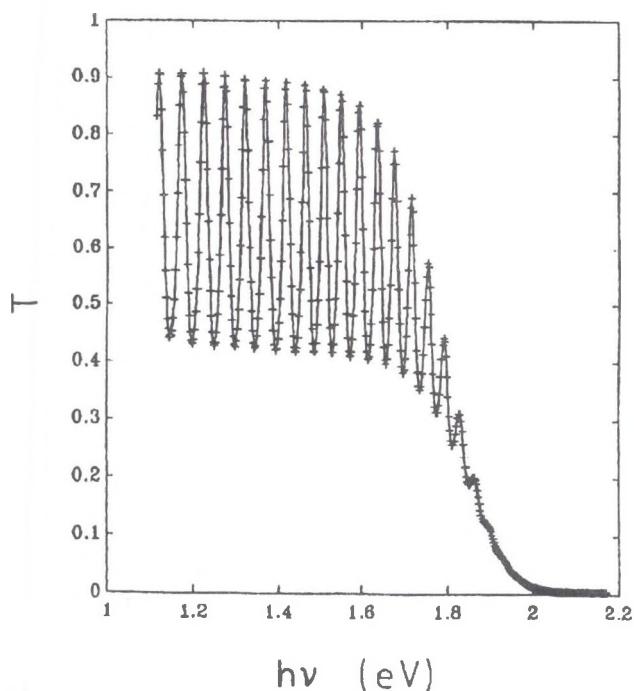
Podobnie jak w przypadku badań fotoprzewodnictwa elektrycznego monochromator i pikoamperomierze są sterowane mikrokomputerem IBM-PC-286/AT poprzez magistrale IEC-625. Odpowiednie programy sterujące zostały opracowane w naszym Zakładzie w językach Basic i Turbo Pascal.

Metodyka badań transmisji w tak wyposażonym układzie sprowadza się do ustalenia, danym zestawem filtrów neutralnych, poziomu natężenia światła wychodzącego z monochromatora i przeprowadzenia jednoczesnych pomiarów natężenia światła transmitowanego przez próbkę oraz natężenia w wiązce światła transmitowanego przez próbkę oraz natężenia w wiązce odniesienia w funkcji zmienianej długości fali światła padającego na próbkę. Dla każdej z długości fal rejestruje się serię wyników, a następnie wyznacza się jej wartość średnią i odchylenie standardowe od wartości średniej. Opisanymi pomiarami przeprowadza się wielokrotnie dla różnych poziomów natężenia światła wychodzącego z monochromatora w zakresie 1 do  $10^{-5}$ .

Jest to konieczne, ponieważ, jak stwierdzono w [14], w pewnych przypadkach współczynnik transmisji optycznej jest nieliniową funkcją natężenia oświetlenia. Zależność ta jest szczególnie wyraźna dla fotonów o energii zbliżonej do szerokości optycznej przerwy energetycznej cienkich warstw a-Si. Podobnie jak w badaniach widmowych fotoprzewodnictwa elektrycznego, dla każdego z ustalonych poziomów natężenia światła wychodzącego z monochromatora dla różnych długości fali na badaną próbkę padają różne ilości fotonów w jednostce czasu. W związku z tym zachodzi konieczność unormowania wyników badań transmisji dla jednej (lub kilku) ustalonych wartości natężenia światła padającego na próbkę. W przedstawionej metodyce badań dokonuje się to numerycznie. Rysunek 10 przedstawia typową charakterystykę widmową współczynnika transmisji w cienkiej warstwie a-Si o grubości  $w=3\mu\text{m}$  dla ustalonego natężenia oświetlenia  $I_0 = 1 \cdot 10^{10}$  (fotonów  $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Za pomocą programów komputerowych opracowanych w naszym Zakładzie na podstawie tak otrzymanych charakterystyk widmowych transmisji optycznej wyznacza się





Rys. 10. Charakterystyka widmowa współczynnika transmisji w cienkiej warstwie a-Si o grubości  $3 \mu\text{s}$  dla ustalonego natężenia oświetlenia  $I_0 = 1 \cdot 10^{19}$  (fotonów  $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

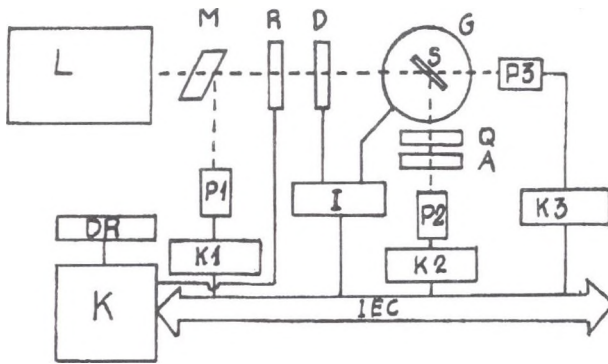
Fig. 10. Optical transmission spectra for  $3\mu\text{m}$  thin film of a-Si and incident light intensity  $I_0 = 1 \cdot 10^{19}$  (photon  $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

zależności widmowe współczynników absorpcji oraz części rzeczywistych współczynników załamania dla różnych natężeń oświetlenia badanych próbek [13, 14]. Poza tym wyznacza się z badań transmisji optycznej grubość badanego materiału oraz jej wariancję w oświetlonym obszarze próbek.

## 6. Stanowisko do badań elipsometrycznych i skaterometrycznych

Elipsometria i skaterometria są nieniszczącymi, bezkontaktowymi metodami wyznaczania geometrycznych i optycznych parametrów ciał stałych. Parametrami tymi są grubości cienkich warstw oraz współczynniki absorpcji i części rzeczywiste zespolonych współ-

czynników załamania promieniowania elektromagnetycznego w tych warstwach i ich podłożu. Badania elipsometryczne wykorzystują zależność natężenia i fazy promieniowania odbitego lub przechodzącego od kąta padania i polaryzacji światła padającego oraz parametrów optycznych i grubości warstw tworzących próbkę [16]. W badaniach skaterometrycznych dla ustalonego kąta padania światła wyznacza się rozkład kątowy promieniowania odbitego od próbki. Rozkład ten również zależy od polaryzacji światła oraz geometrycznych i optycznych parametrów badanego materiału. Jednocześnie dostarcza on informacji nie tylko na temat tzw. zwierciadlanego odbicia promieniowania, lecz również jego rozpraszania dyfuzyjnego wywołanego niejednorodnością powierzchni i warstw odbijających.



Rys. 11. Schemat stanowiska do badań elipsometrycznych i skaterometrycznych (P1, P2, P3 - fotodetektory mierzące natężenia światła wychodzącego ze źródła światła L, odbitego od próbki oraz przechodzącego przez nią, K1, K2, K3 - pikoamperomierze, M - płytka światłodzielną, R - rotator do skręcania płaszczyzny polaryzacji, D - przesłona, Q - płytka ćwierćfalowa lub kompensator Babineta, A - analizator, K - mikrokomputer IBM PC-XT, DR - drukarka, IEC - magistrala IEC-625, I - komutator kanałów I-201, G - goniometr GUR-5, S - próbka)

Fig. 11. Schematic arrangement of the experimental setup for ellipsometry and scatterometry (P1, P2, P3 - photodetectors used to measure intensity of radiation from the light source L, reflected or transmitted through a sample, K1, K2, K3 - picoammeters, M - beam splitter, r - rotator of the plane of radiation polarization, D - shutter, Q -  $\lambda/2$  plate or Babinet compensator, A - analyzer, K - microcomputer IBM PC-XT, DR - printer, IEC - IEC-625 data bus, I - channel scanner I-201, G - goniometr GUR-5, S - sample)

Schemat zbudowanego stanowiska badawczego przedstawiony jest na rys. 11. Składają się na nie:

1. źródło światła monochromatycznego,
2. rotator do skręcania płaszczyzny polaryzacji światła,
3. filtry neutralne,
4. goniometr wraz z uchwytem próbki,
5. analizator stanu polaryzacji światła odbitego,
6. mierniki natężenia światła odbitego i przechodzącego przez próbkę,
7. mikrokomputer i oprogramowanie numeryczne służące do sterowania przebiegiem eksperymentu, rejestracją wyników pomiarów i ich opracowaniem.

Jako źródło światła monochromatycznego stosuje się wymiennie:

- a. laser typu He-Ne o pracy ciągłej emitujący promieniowanie liniowo spolaryzowane o długości fali  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  i mocy 10 mW,
- b. żarowy oświetlacz z monochromatorem pryzmatycznym SPM-2, z kablem światłowodowym typu Y, kolimatorem wiązki równoległej o średnicy oraz polaryzatorem Nicola.

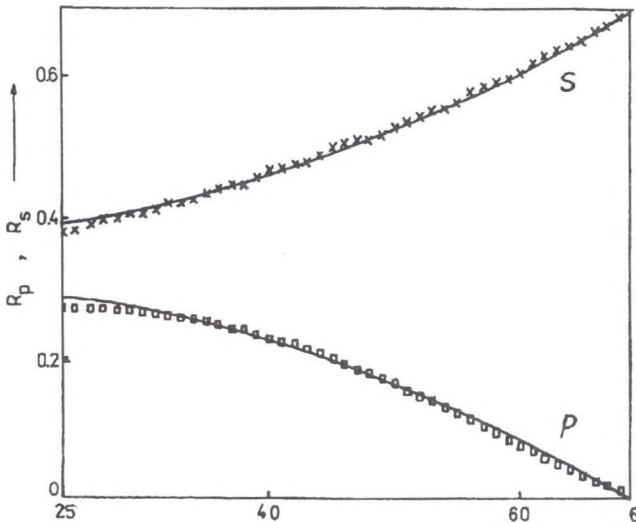
Płytką światłodzielną oraz fotodetektor P1 (fotodiody krzemowa BPYP-34 wykorzystana jako fotoogniwo pracujące w reżimie zwarciovym) wraz z pikoamperomierzem Keithley 485/4853 podłączonym poprzez magistralę IEC-625 umożliwia monitorowanie natężenia światła laserowego w trakcie wykonywania pomiarów. W przypadku stosowania monochromatora monitoruje się natężenie promieniowania stosowanego w badaniach mierząc natężenie światła w torze odniesienia światłowodu typu Y, którego drugi, szerszy tor prowadzi promieniowanie do próbki.

Jako rotator płaszczyzny polaryzacji światła laserowego stosuje się kwarcową płytkę półfalową obracaną silnikiem krokowym sterowanym komputerem. Wykorzystując jako źródło światła monochromator, obrót płaszczyzny polaryzacji promieniowania dokonywany jest poprzez obrót pryzmatu Nicola silnikiem krokowym sterowanym komputerem.

Przesłona elektromagnetyczna, umożliwiająca kalibrację mierzonych natężeń światła, sterowana jest komputerowo poprzez magistralę IEC-625 za pomocą komutatora kanałów I-201. Zestaw filtrów neutralnych umożliwia zmianę natężenia promieniowania stosowanego w badaniach.

Próbka oraz fotodetektory P2 i P3 umieszczone są na stoliku goniometrycznym GUR-5. Kąt padania promieniowania na próbkę wyznacza się z dokładnością do  $0.01^\circ$ , natomiast kąt jego odbicia z dokładnością do  $0.01^\circ$ . Kąt padania można zmieniać ręcznie lub automatycznie silnikiem sterowanym komputerowo poprzez magistralę IEC-625 i komutator kanałów I-201. Badania transmisji optycznej prowadzi się w temperaturze pokojowej. W czasie badań współczynnika odbicia próbka może być umieszczona w powietrzu lub w przepływowym kriostacie azotowym z oknem w postaci powierzchni rury kwarcowej. Zmianami temperatury w kriostacie steruje się za pomocą regulatora temperatury TC-660 Unipan.

W przypadku wyznaczania kątów elipsometrycznych  $\Psi$  i  $\Delta$  techniką PSA [16] pomiędzy próbką a fotodetektorem umieszcza się analizator A stanu polaryzacji promieniowania odbitego.

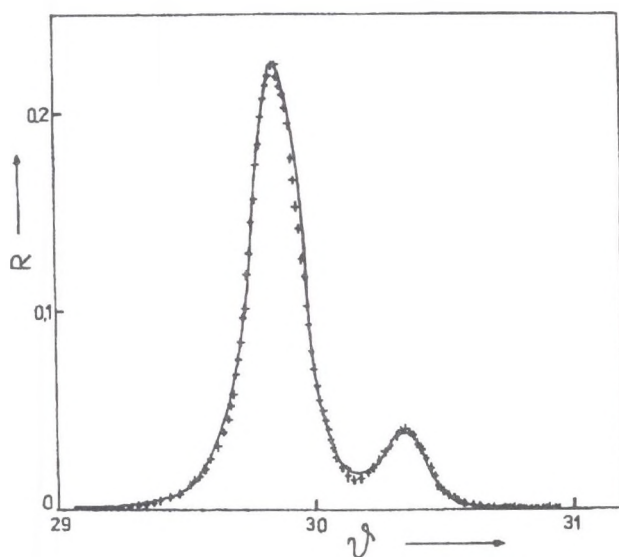


Rys. 12. Zależność energetycznego współczynnika odbicia od kąta padania dla krystalicznego Si (+, o - wyniki eksperymentalne, p, s - światło spolaryzowane o wektorze natężenia pola elektrycznego równoległym i prostopadłym do płaszczyzny padania,  $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ , krzywe ciągłe przedstawiają zależności teoretyczne dopasowane do danych eksperymentalnych, wartości dopasowanych parametrów badanej próbki:  $n=3,87\pm 0,08$ ,  $k=3,19\cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$   
 Fig. 12. Dependence of energetic coefficient of reflection on angle incidence for crystalline Si (+, o - experimental results, p, s - linear polarized light with electric field vector in and normal to plane of incidence,  $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ , full curves show teoretical dependences fitted to experimental data, values of fitted parameters for the investigated sample:  $n=3,87\pm 0,08$ ,  $k=3,19\cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$

Jako fotodetektory światła odbitego lub przechodzącego przez próbkę stosuje się, w zależności od długości promieniowania, fotodiody krzemowe Hamamatsu S2386 lub germanowe SFH236 Siemens wykorzystane jako fotoogniwa pracujące w reżimie zwarciovym. Natężenie prądów zwarciovych generowanych światłem mierzy się pikoamperomierzami Keithley 485/4853 podłączonymi poprzez magistralę IEC-625 do mikrokomputera IBM-XT/PC sterującego przebiegiem eksperymentu i rejestracją wyników. Sterujące programy numeryczne są napisane w języku Turbo Pascal. W trakcie pomiarów następuje wizualizacja wyników eksperymentalnych na ekranie monitora mikrokomputera.

Przedstawione stanowisko pomiarowe umożliwia:

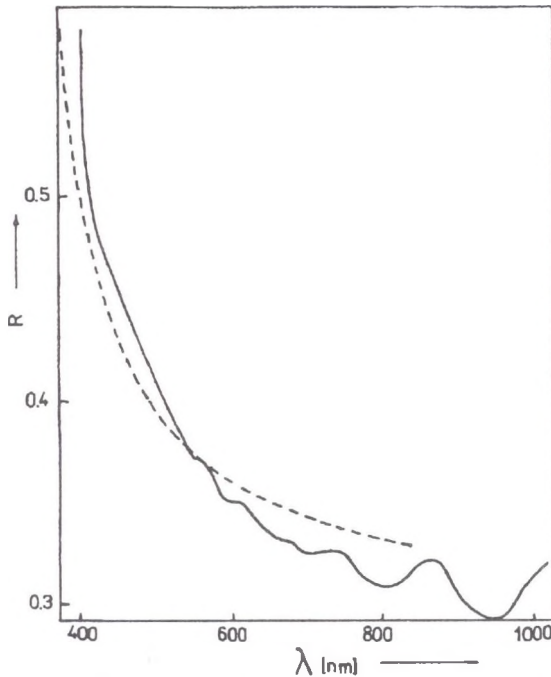
1. badanie zależności natężenia światła odbitego lub przechodzącego od kąta padania na próbkę dla ustalonej polaryzacji liniowej (np. p lub s), rys. 12,
2. badanie zależności natężenia światła odbitego od kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji promieniowania padającego na próbkę,



Rys. 13. Zależność współczynnika odbicia promieniowania laserowego od kąta odbicia od warstwy a-Si naniesionej na podłożu ze szkła BK7 (+ wyniki doświadczalne, krzywa ciągła przedstawia dopasowaną zależność teoretyczną, wartości dopasowanych parametrów badanej próbki:  $w=0,208 \mu\text{m}$ ,  $n=3,24$ ,  $k=8,49 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$ ,  $n_4=1,53$ )

Fig. 13. Reflection coefficient vs angle of reflection for laser beam incident on a thin a-Si film on BK7 glass substrate (+ experimental results, full curve shows fitted theoretical dependence, values of fitted parameters for the investigated sample:  $w=0.208 \mu\text{m}$ ,  $n=3.24$ ,  $k=8.49 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$ ,  $n_4=1.53$ )

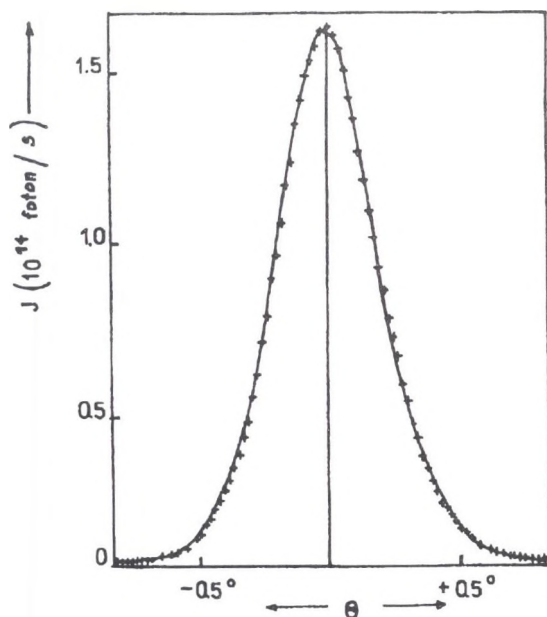
3. badanie zależności natężenia światła odbitego od kąta odbicia od próbki dla ustalonej polaryzacji liniowej (np. p lub s) oraz ustalonego kąta padania na próbkę, rys. 13,
4. badanie zależności widmowej natężenia światła odbitego lub przechodzącego dla ustalonej polaryzacji liniowej (np. p lub s) oraz ustalonego kąta padania na próbkę, rys. 14,
5. badanie jednorodności optycznej próbki poprzez wyznaczenie zależności natężenia światła odbitego od położenia wiązki padającej na próbkę dla ustalonej polaryzacji liniowej (np. p lub s) oraz ustalonego kąta padania na próbkę,



Rys. 14. Zależność współczynnika odbicia światła liniowo spolaryzowanego od długości fali dla krystalicznego krzemu (polaryzacja s, kąt padania  $60^\circ$ , krzywa ciągła przedstawia dane eksperymentalne, krzywa przerywana - dane literaturowe dla (100) powierzchni krzemu [16])

Fig. 14. Reflection coefficient of linear polarized light vs wavelength for cristaline Si (polarization S, angle of incidence  $60^\circ$ , full curve shows experimental data, dashed line - data (100) surface of Si from [16])

6. pomiar parametrów optycznych i geometrycznych metodą zerową PSQA [16],
7. pomiar parametrów optycznych metodą obracanego polaryzatora PSA [16],
8. wyznaczanie rozkładu natężenia w wiązce światła (rys. 15).



Rys. 15. Kątowy rozkład natężenia promieniowania lasera He-Ne LG-600 (+ - wyniki eksperymentalne, krzywa ciągła przedstawia krzywą Gaussa dopasowaną do wyników doświadczalnych,  $\sigma = 0.2^\circ$ )

Fig. 15. Angular distribution of radiation intensity in laser beam of He-Ne laser LG-600 (+ - experimental results, full curve shows Gauss distribution fitted to experimental data,  $\sigma = 0.2^\circ$ )

Optyczne i geometryczne parametry badanych próbek wyznacza się przez dopasowanie numeryczne nieliniowych zależności teoretycznych do wyników doświadczalnych uzyskanych w badaniach elipsometrycznych i skaterometrycznych.

#### Podziękowania

Autorzy serdecznie dziękują Panom A. Krykoniowi oraz mgr. inż. W. Wierzbickiemu za pomoc w skonstruowaniu przedstawionych stanowisk badawczych.

## Literatura

- [1] M. Nowak, *Zeszyty Naukowe Politech. Śląsk*.
- [2] M. Nowak, *Progress Quantum Electronics* **11** (1987), 205.
- [3] J. Hlavka, *Rev. Sci Instrum.* **52** (1981), 60.
- [4] J. Hlavka, *Rev. Sci Instrum.* **54** (1983), 1386.
- [5] J. Hlavka, *Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brun.* **11** (1981), 231.
- [6] J. Hlavka, *Scripta Fac. Sci. Nat. UJEP. Brunexsis. Physica* **1** (1976), 23.
- [7] S. C. Choo, A. M. Etchells and L. A. K. Watt, *Phys. Rev.* **B4 (12)** (1971), 4499.
- [8] D. Ritter, E. Zeldov, K. Weiser, *J. Appl. Phys. Lett.* **49** (1986), 791.
- [9] D. Ritter, E. Zeldov, K. Weiser, *J. Appl. Phys.* **62** (1987), 4563.
- [10] V. Augelli, R. Murri, M. Nowak, *Phys. Rev.* **B39 (12)** (1989), 8336.
- [11] M. Vanecek, J. Kocka, J. Stulik, *Solid State Com.* **39** (1981), 1199.
- [12] T. J. McMahon, J. P. Xi, *Phys. Rev.* **B34 (4)** (1986), 2475.
- [13] M. Nowak, *Thin Sol. Films* (przedłożone do druku).
- [14] A. Grabowski, M. Nowak, *Zeszyty Naukowe Politech. Śląsk*. (przedłożone do druku).
- [15] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara, *Ellipsometry and polarized light*, North-Holland, Amsterdam 1992.
- [16] G. E. Jellison Jr., *Optical Materials* **1** (1992), 41.

*Recenzent: Prof. dr hab. inż. Antoni Rogalski*

*Wpłynęło do redakcji 26.01.1995 r.*



## Abstract

New experimental setups for investigations of semiconducting materials which are constructed in Solid State Physics at the Silesian Technical University of Institute of Physics in Katowice are presented. They are used in nondestructed contactless investigations such as: setup for determinations carrier lifetime in PME effect, setup to determination length of diffuse path using steady state photocarrier grating technique, setup to investigate photoconductivity in semiconductors, setup to investigation optical transmission and setup to ellipsometric and scatterometric investigations. The new contactless photoelectromagnetic PEM method of determining carrier lifetime uses the dependence of PEM magnetic flux on frequency of chopping the illumination intensity. In the presented experiment the chopping frequency is change up to 100 kHz. The carrier lifetime is evaluated by fitting the experimental PEM results with the theoretical relation. The steady state photocarrier grating technique uses interference pattern obtained over the illuminated sample surface when two coherent radiation beams hit the sample with different angles of incidence. Due to this interference effect the sample area between two electrodes is consistent of several regions of different concentrations of free carriers and therefore electric conductivity. In the experimental setup the dependence of the total conductivity on polarization, intensity and angle of incidence of radiation is examined to determine the diffusion length of carriers. Investigations of spectral characteristics of photoconductivity for different temperature and illumination intensity allow to obtain information about recombination and optical parameters of semiconductor material as well as on energetic distribution of electron states. Investigations of interference spectral characteristics of transmission and reflection coefficients allow to determine absorption coefficients, real parts of refractive indices, thickness of examined material and standard deviation of its in illuminated area of the sample. Ellipsometry investigates dependence of intensity and phase of reflected or transmitted light on intensity, polarisation and angle of incidence of light to determine optical and geometrical parameters of layered structures. In scatterometry the angular distribution of reflected radiation is used for this.