

Sławomir KOŃCZAK
Marian NOWAK

Instytut Fizyki Politechniki Śląskiej

KOMPENSACYJNA METODA BADAŃIA EFEKTU FOTOMAGNETOELEKTRYCZNEGO

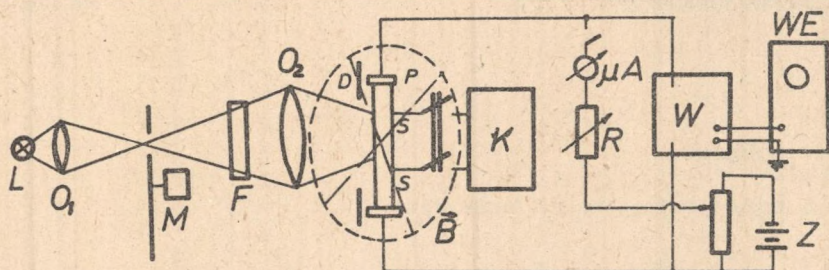
Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania zależności metody kompensacyjnej pomiaru efektu fotomagnetoelektrycznego od stosowanego pola magnetycznego w badaniach materiałów półprzewodnikowych. Otrzymane wyniki eksperymentalne pozwoliły określić szybkość powierzchniowej rekombinacji, czas życia i ruchliwość holowską nośników ładunku.

WSTĘP

Szereg własności półprzewodników, a szczególnie ich zastosowanie w mikroelektronice, zależy od zachowania się układu powierzchnia - objętość półprzewodnika. W badaniach własności tych układów wykorzystuje się szereg metod, które można podzielić na polowe i "inne" [1]. Wśród zjawisk fizycznych, jakie wykorzystuje się do metod badawczych zaliczanych do "innych" dosyć poczesne miejsce, ze względu na dużą ilość informacji jakie można tu uzyskać, zajmuje zjawisko fotomagnetoelektryczne FME [1].

Najczęściej stosowaną metodą wykorzystującą zjawisko fotomagnetoelektryczne do badania materiałów półprzewodnikowych jest tzw. metoda kompensacyjna [4, 7, 8, 10-17, 19-22]. Metoda ta została zaproponowana przez H. Bulliarda [3]. Polega ona na kompensacji fotomagnetycznej siły elektromotorycznej przy pomocy zmian spadku potencjału na próbce, związanych z fotoprzewodnością. Ogólny schemat aparatury pomiarowej przedstawia rys. 1. Warunkom, w których zachodzi kompensacja, odpowiadają proste zależności określające podstawowe parametry półprzewodników, takie jak: czas życia nośników oraz szybkość powierzchniowej rekombinacji, np.: [15, 17, 22].

Główną zaletą tej metody jest powiązanie interesujących nas wielkości z wielkościami łatwo mierzalnymi, takimi jak: napięcie kompensacji U_k , wartość indukcji pola magnetycznego B oraz długość obszaru oświetlonego l , a przede wszystkim uniknięcie wyznaczania intensywności oświetlenia. Metoda ta nie wymaga złożonej aparatury. Mierzone napięcie jest znacznie większe $\frac{G_0}{\Delta G}$ razy (G_0 - ciemna przewodność próbki, ΔG - zmiana przewodności wywołana fotoprzewodnictwem) od napięcia otwartego obwodu FME obserwowanego w tych samych warunkach.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego wyznaczenia drogi dyfuzji metodą kompensacyjną

L - źródło światła, O_1, O_2 - soczewki obiektywu, M - modulator, F - filtr, D - przesłona zasłaniająca kontakty, P - próbka, s - sonda, K - komparator, R - rezystor regulowany, W - wzmacniacz, WE - wskaźnik zera, A - mikroamperomierz, Z - zasilanie

Ponieważ w tej metodzie nakładają się na siebie dwa zjawiska, a mianowicie fotomagnetoelektryczne i fotoprzewodnictwo, T.S. Moss wprowadził pojęcie czasu stosunkowego jako czasu życia wyznaczonego metodą kompensacyjną [23].

$$\tau_k = \frac{(\tau_{fp})^2}{\tau_{FME}} \quad (1)$$

gdzie:

$$\tau_{fp} = \frac{\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p}{\mu_n + \mu_p}; \quad \tau_{FME} = \frac{p_0 \tau_n + n_0 \tau_p}{n_0 + p_0}$$

τ_{fp}, τ_{FME} - czasy życia nośników określone na podstawie efektów fotoprzewodnictwa i FME;

τ_n, τ_p - czasy życia elektronów i dziur,

n_0, p_0 - równowagowe koncentracje elektronów i dziur.

Ze względu na to, iż kinetyka fotoprzewodnictwa i zjawiska FME są różne [3, 6], pomiędzy obu efektami powstaje różnica faz określona prostym związkiem [9, 15]:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \omega\tau, \quad (2)$$

gdzie ω jest częstotliwością modulacji światła.

To ostatnie zjawisko jest wykorzystywane w metodzie różnicy faz, stosowanej przy wyznaczaniu dużych wartości czasu życia nośników. Metodę kompensacyjną stosujemy do pomiaru małych czasów życia [9].

Przeprowadzenie pomiarów w różnych temperaturach [15] lub przy wykorzystaniu światła o różnych długościach fali [14, 15, 20 21] pozwala na określenie czasu życia zarówno nośników mniejszościowych, jak i większościowych.

Autorzy niniejszej pracy dokonali próby wykorzystania metody kompensacyjnej stosując przy pomiarach różne wartości indukcji stosowanego pola magnetycznego, co pozwala na uzyskanie dodatkowych informacji o badanym półprzewodniku, jak np. ruchliwość holowska nośników mniejszościowych.

OPRACOWANIE TEORETYCZNE

W pracy wykorzystano opis teoretyczny efektu FME zaproponowany w 1956 r. przez S.W. Kurnicka i R.N. Zittera [25] przy uwzględnieniu uzupełnienia dokonanego w 1958 r. przez R.N. Zittera [23]. Zgodnie z takim modelem w warunkach grubej próbki, przy małej intensywności silnie pochłanianego światła i jednakowej szybkości powierzchniowej rekombinacji na oświetlonej i nieoświetlonej powierzchni próbki, w przypadku półprzewodnika typu n, napięcie FME wyraża się wzorem:

$$U_{FME} = \frac{e \mathcal{R} R_B a B \sqrt{D_p \tau_{FME}} (\mu_{nH} + \mu_{pH})}{(1 + \mu_{pH}^2 B^2)^{1/2} \left[1 + s \sqrt{\frac{\tau_{FME}}{D_p}} (1 + \mu_{pH}^2 B^2)^{1/2} \right]} \quad (3)$$

a zmiana napięcia wywołana fotoprzewodnictwem jest określona przez:

$$\Delta U = \frac{U_k R_B \frac{a}{l} e \mathcal{R} \tau_{fp} (\mu_n + \mu_p)}{1 + s \sqrt{\frac{\tau_{fp}}{D_p}} (1 + \mu_{pH}^2 B^2)^{1/2}} \quad (4)$$

gdzie:

- e - ładunek elementarny,
- \mathcal{R} - szybkość generacji par nośników na jednostkę powierzchni próbki,
- a - szerokość obszaru oświetlanego próbki,
- l - długość obszaru oświetlanego próbki,
- R_B - rezystancja próbki w obecności pola magnetycznego.

Zastосуjmy wzory (3) i (4) dla otrzymania związków opisujących zaproponowaną metodę badawczą. Zakładając, że $\tau_{FME} = \tau_{FP} = \tau_k$, otrzymujemy z porównania tych wzorów:

$$U_k = 1 \cdot g \left(\frac{D_p}{\tau_k} \right)^{1/2} \frac{B}{\sqrt{1 + \mu_{pH}^2 B^2}} = A_1 \frac{B}{\sqrt{1 + \mu_{pH}^2 B^2}} \quad (5a)$$

gdzie:

$$g = \frac{\mu_{nH} + \mu_{pH}}{\mu_n + \mu_p}$$

Niezależnie od wartości τ_{FME} i τ_{Fp} związek (5a) pozostanie słuszny dla dostatecznie małego s , w przypadku gdy $s \left[\frac{\tau_{FME}}{D_p} (1 + \mu_{pH}^2 B^2) \right]^{1/2} \ll 1$ i $s \left[\frac{\tau_{Fp}}{D_p} (1 + \mu_{pH}^2 B^2) \right]^{1/2} \ll 1$ (nawet dla najsilniejszych, stosowanych w doświadczeniu pól magnetycznych).

W przypadku dużych wartości s i gdy $\tau_{FME} \neq \tau_{Fp}$ mogą zachodzić trzy przypadki:

gdy:

$$s \left[\frac{\tau_{FME}}{D_p} (1 + \mu_{pH}^2 B^2) \right]^{1/2} \gg 1 \gg s \left[\frac{\tau_{Fp}}{D_p} (1 + \mu_{pH}^2 B^2) \right]^{1/2}$$

to:

$$U_k = \frac{1}{s} \frac{D_p g}{\tau_{Fp}} \frac{B}{1 + \mu_{pH}^2 B^2} = A_2 \frac{B}{1 + \mu_{pH}^2 B^2} \quad (5b)$$

gdy:

$$s \left[\frac{\tau_{FME}}{D_p} (1 + \mu_{pH}^2 B^2) \right]^{1/2} \ll 1 \ll s \left[\frac{\tau_{Fp}}{D_p} (1 + \mu_{pH}^2 B^2) \right]^{1/2}$$

to:

$$U_k = g \left(\frac{D_p \tau_{FME}}{\tau_{Fp}} \right)^{1/2} s B = A_3 B \quad (5c)$$

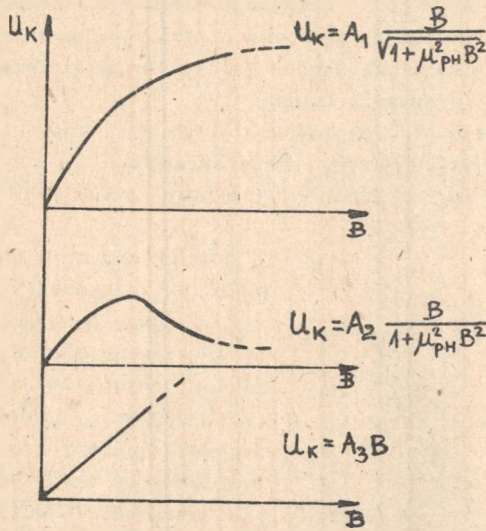
gdy:

$$s \left| \frac{\tau_{FME}}{D_p} (1 + \mu_{pH}^2 B^2) \right|^{1/2} \gg 1 \quad \text{i} \quad s \left| \frac{\tau_{Fp}}{D_p} (1 + \mu_{pH}^2 B^2) \right|^{1/2} \gg 1$$

otrzymujemy wzór podobny do (5a), z tym, że τ_k należy zastąpić przez τ_{Fp} .

Przy założeniu, iż $\mu^2 B^2 \ll 1$ wzór (5a) sprowadzają się do relacji wykorzystywanej przy określaniu czasu życia metodą kompensacyjną w słabych polach magnetycznych [15, 17, 22]. Zależności U_k od B pozostają tego samego typu co w (5a) i (5b) także w przypadku, gdy światło generujące nośniki zawiera oprócz składowej silnie pochłanianej przez materiał i słabo pochłanianej a zapewniającą generację monopolarną pod warunkiem, że obie składowe posiadają jednakową intensywność. Zmianie ulega wówczas jedynie wielkość g , która w tym przypadku wynosi $\frac{\mu_{nH} \mu_{pH}}{\mu_n}$. Warto podkreślić, że monopolarne zjawisko FME nie może być obserwowane w warunkach stacjonarnych, w jakich są realizowane badania metodą kompensacyjną [15, 17].

Zakładając, iż wielkości D_p , τ , s , μ_{pH} , g nie zależą od B jak to czyniono w podobnego typu badaniach [25, 27]) widzimy, że wzory (5a - 5d) przedstawiają różną zależność U_k od B (rys. 2). Porównanie krzywych doświadczalnych z teoretycznymi (rys. 2) powinno dostarczyć bardziej konkretnych informacji w porównaniu z tymi, jakie dotychczas uzyskiwano, wykorzystując metodę kompensacyjną.



Rys. 2. Krzywe teoretyczne przedstawiające zależność napięcia kompensacji od indukcji przyłożonego pola magnetycznego

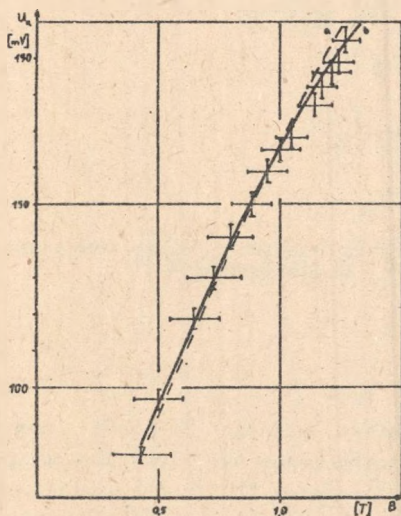
EKSPERYMENT

Pomiary realizowano w oparciu o stanowisko, którego schemat został przedstawiony na rys. 1. Źródłem pola magnetycznego był elektromagnes prądu stałego WZ-2 zasilany zasilaczem stabilizowanym ZP-17. Przy określaniu wartości indukcji magnetycznej posłużono się wynikami pracy [25]. Oświetlenie zapewniała żarówka TUNGSRAM - 8V/50W. Intensywność światła oszacowano w trakcie innych pomiarów na $10^{19} \frac{\text{kwant}}{\text{m}^2 \text{s}}$. Wiązkę świetlną modulowano mechanicznie z częstotliwością 80 Hz. Do pomiaru spadku napięcia na próbce użyto kompensatora prądu stałego KM-145 wraz z galwanometrem magneto-elektrycznym GL-2. Do określenia punktu kompensacji użyto oscyloskopu typu OSA 601 włączonego w obwód pomiarowy poprzez przedwzmacniacz Unipan typ 233.7 i nanowoltomierz selektywny Unipan typ 233. Częstotliwość pomiarową ustalono poprzez zbieranie sygnału z fotodiody FG-2 umieszczonej na drodze modulowanej wiązki światła. Źródłem prądu płynącego przez próbkę była bateria napięcia stałego 4,5 V. Natężenie prądu mierzono mikroamperomierzem (zakres $150 \mu\text{A}$, klasa 0,5) i ustalono przy pomocy rezystorów dekadowych OD-6.

Badania przeprowadzono na germanie typu n, o rezystywności $20 \Omega\text{cm}$. Próbkę miały kształt prostopadłościanu o wymiarach $9,3 \times 3,8 \times 1,0 \text{ mm}^3$. Dla tak grubej próbki powszechnie przyjęta jest stosowność wzorów wyprowadzonych dla tzw. warunków płytek grubych [22]. Powierzchnia próbek zosta-

ła wypolerowana mechanicznie a następnie chemicznie przy pomocy mieszanki: $3 \text{ HF} + 5 \text{ HNO}_3 + 3 \text{ CH}_3\text{COOH}$. Czas polerowania chemicznego wynosił 3 minuty. Przed przystąpieniem do pomiarów próbki sezonowano przez okres kilku miesięcy w normalnej atmosferze w celu uniknięcia zmian stanu powierzchni w trakcie przeprowadzania badań.

Pomiary realizowano przy pomocy kontaktów dociskowych, zapewniających kontakt omowy, przy czym obszary przykontaktowe były osłonięte przed światłem. Badania przeprowadzono w normalnej atmosferze w temperaturze 300 K.



Rys. 3. Krzywe teoretyczne dla przypadku (5a) i (5b) oraz punkty eksperymentalne

Wyniki niektórych przeprowadzonych pomiarów zaznaczono na rys. 3. Ponieważ w próbce mamy do czynienia nie tylko ze zjawiskiem FME, lecz także z efektami fotowoltaicznymi, więc w przypadku używania metody kompensacyjnej zachodzi konieczność skompensowania także napięć związanych z tymi ostatnimi efektami. Wielkość składowej napięcia, która służy temu celowi, określono w warunkach $B = 0$. Wartość tego napięcia wynosi 30 mV.

Na rys. 3 przedstawiono dwie krzywe teoretyczne wynikające ze wzorów (5a) i (5b) dla stosowanego pola magnetycznego oraz punkty pomiarowe. Stałe A_1 i A_2 wyznaczono poprzez podstawienie danych doświadczalnych do odpowiednich wzorów i uśrednienie po całej serii pomiarów.

W wykorzystywanym zakresie pól magnetycznych obie krzywe niewiele odbiegają od siebie i mieszczą się w granicach błędów doświadczalnych. Przebieg punktów doświadczalnych, zwłaszcza dla silniejszych pól magnetycznych, wydaje się jednak wskazywać, że adekwatniejszy do uzyskanych wyników jest wzór (5b). Świadczy to o stosunkowo dużej wartości s . Wniosku, iż dla badanego półprzewodnika $\zeta_{\text{FME}} \gg \zeta_{\text{FP}}$

raczej nie można wyciągać, ponieważ w przeprowadzonym eksperymencie światło oprócz składowych zapewniających generację par nośników i silnie pochłanianych w badanym materiale, zawierało również składowe o większych długościach fali, słabo pochłaniane i zapewniające monopolarną generację nośników w całej objętości próbki.

Przy pomocy metody najmniejszych kwadratów aproksymowano wyniki pomiarów krzywą o równaniu:

$$\frac{B}{U_k} = a B^2 + b, \quad (6)$$

gdzie:

$$a = (0,78 \pm 0,09) \frac{1}{TV},$$

$$b = (5,8 \pm 0,2) \frac{T}{V}.$$

Porównując równania (5b) i (6) widzimy, że ruchliwość holowska mniejszościowych nośników ładunku μ_{pH} jest określona poprzez związek:

$$\mu_{pH} = \sqrt{\frac{a}{b}} \quad (7)$$

i wynosi ona w tym przypadku:

$$\mu_{pH} = (0,368 \pm 0,029) \frac{m^2}{Vs}.$$

Warto zaznaczyć, że jeżeli wykorzystano do aproksymacji wyników krzywą odpowiadającą relacji (5a), to po podobnej procedurze otrzymano wartość ruchliwości holowskiej:

$$\mu_{pH} = (0,56 \pm 0,10) \frac{m^2}{Vs}.$$

w przeciwieństwie do ruchliwości wyznaczonej poprzednio jest to wielkość niezgodna, w granicach błędu, z danymi literaturowymi [24].

Korzystając ze wzoru (5b) i wyników eksperymentalnych, otrzymano wartość iloczynu:

$$s\tau_{FP} = (2,19 \pm 0,09) 10^{-4} m.$$

Opierając się na wynikach uzyskanych przy użyciu metody kompensacyjnej w słabym polu magnetycznym i z bezwzględnych pomiarów napięcia FME, otrzymano:

$$\tau_k = 1,1 \cdot 10^{-5} s, \quad \tau_{FME} = 1,4 \cdot 10^{-5} s.$$

Wobec tego:

$$\tau_{FP} = 1,2 \cdot 10^{-5} s \quad i \quad s = 18 \frac{m}{s} = 1800 \frac{cm}{s}.$$

Na tych samych próbkach były jeszcze przeprowadzane badania efektu EFM przy użyciu metody laserowego wzbudzenia nośników. Przeprowadzono je w warunkach powierzchniowej generacji nośników impulsowym laserem rubinowym. Otrzymano w tym przypadku następujące wyniki:

$$\tau_{FME} = 5,5 \cdot 10^{-3} s, \quad s = 160 cm/s.$$

Różnica wyników uzyskanych przy użyciu obu metod pomiarowych wynika prawdopodobnie z różnego stopnia wzbudzenia nierównowagowych nośników.

PODSUMOWANIE

Celem pracy było wykorzystanie teorii efektu FME wg Kurnicka i Zittera do opisanie kompensacyjnej metody badania tego efektu. Przeprowadzono analizę wzorów (3) i (4) do omawianej metody, otrzymując różne zależności napięcia kompensacji U_k od wielkości indukcji przyłożonego pola magnetycznego dla różnych przypadków wartości szybkości rekombinacji powierzchniowej s i czasu życia nośników τ_{FME} i τ_{FP} , wzory (5a), (5b), (5c). Porównanie wyników eksperymentalnych otrzymanych na próbkach germanu typu n, każe skłaniać się raczej ku przyjęciu dużej szybkości rekombinacji powierzchniowej. Jest to zgodne z przewidywaniami, bowiem jak wspomniano wcześniej badane próbki były przed przystąpieniem do pomiarów starzone przez kilka miesięcy.

W celu poszerzenia zakresu uzyskiwanych informacji z metod fotomagnetoelektrycznych należy w dalszych badaniach przeprowadzić analizę widmowych charakterystyk efektu FME i efektu fotoprzewodnictwa oraz badanie zależności temperaturowych. Pozwoli to na jednoznaczną ocenę takich wielkości jak: czas życia nośników większościowych i mniejszościowych, ruchliwość i szybkość powierzchniowej rekombinacji. Ciekawym wydaje się rozpracowanie porównania wyników otrzymanych przy pobudzaniu laserowym i klasycznym.

LITERATURA

- [1] Many A., Goldstein Y., Grover B.: Semiconductor Surfaces, NH, 1971.
- [2] Annual Book of ASTM Standards 1971, Part 8, Easton 1971, s. 483.
- [3] Bulliard H.: Phys. Rev., 94 (1954), s. 1564.
- [4] Gałkina T.I.: FTT, 1, 2 (1959), s. 216.
- [5] Gartner W.: Phys. Rev., 105, 3 (1957), s. 823.
- [6] Gribin W.A., Kikoin I.K.: ZETE, 41, 4/10 (1961), s. 1331.
- [7] Kałasznikow S.G., Landsberg E.G.: ZTF; 28, 7 (1958), s. 1387.
- [8] Kowtoniuk N.F., Koncewoj J.A.: Pomiarów parametrów materiałów półprzewodnikowych, (Moskwa 1970), Warszawa 1973, s. 188 i 116.
- [9] Landsberg E.G.: Zawodskaja Laboratorija, 27, 10 (1961), s. 1224.
- [10] Mironow A.G.: FTT, 1 3(1959), s. 525
- [11] Moss T.S.: Optical Properties of Semiconductors, (London 1959), Moskwa 1961, s. 79.
- [12] Nasledow D.N., Smietannikowa J.S.: FTT, 4, 1(1962), s. 110.
- [13] Nowysz K., Surma B., Strzelecka S.: Materiały elektroniczne, 4(1973), s. 7.

- [14] Petrusiewicz W.A.: FTT, 4, 2(1962), s. 461.
- [15] Rawicz J.I.: Fotomagnitnyj efekt w półprzewodnikach i jego primienienije, Moskwa 1967.
- [16] Van Roosenbroeck W.: Phys. Rev., 101(1956), s. 1713.
- [17] Rywkin S.M.: Fotoelektriczskie jawlenija w półprzewodnikach, Moskwa 1963, s. 371.
- [18] Rzanow A.W.: Elektronnyje processy na powierzchni półprzewodników, Moskwa 1971, s. 194.
- [19] Sokołowska A., Sokołowski M., Wesołowski K.: Własności materiałów półprzewodnikowych. Warszawa 1972, s. 11.
- [20] Subasziw W.K.: FTT, 5, 2(1963), s. 556.
- [21] Suszkow W.P., Iglicyn M.I.: FTT, 6, 10(1964), s. 3107.
- [22] Techniczeskoje opisanie: Ustanowka dla izmierienija skorosti powierzchniowej rekombinacji i aremieni žizni nositeliej toka, Model No ŻK 78, 02/SŻ.
- [23] Zitter R.N.: Phys. Rev., 112(1958), s. 852.
- [24] Wolf H.: Półprzewodniki, (New York 1971), Warszawa 1975.
- [25] Kurnick S.W., Zitter R.N.: J. Appl. Phys., 27, (1956), s. 278.
- [26] Kubczak W.: Praca dyplomowa magisterska, Wydz. Mat. Fiz., Pol. Śl., Gliwice 1975.
- [27] Dickson J.R.: Phys. Rev., 107, 2(1957), s. 374.

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
ФОТОМАГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Р е з ю м е

В работе была представлена возможность использования зависимости компенсационного измерения фотомангнетозлектрического эффекта от применяемого магнетического поля в исследовании полупроводниковых материалов. Полученные исследовательские результаты позволили определить скорость поверхностной рекомбинации, время существования и буксирующее движение носителей заряда.

COMPENSATORY METHOD OF INVESTIGATION,
OF PHOTOMAGNE-ELECTRICAL EFFECT

S u m m a r y

In the work has been presented the possibility of taking advantage of the dependence of compensatory method to measure the photomagne electrical effect upon the practical magnetic field in the investigation of semiconductor materials. The obtained experimental results allowed to determine the velocity of superficial recombination, life-time and Hall mobility.