

Jacek SZUBER

SPEKTROMETR WYDAJNOŚCI KWANTOWEJ FOTOEMISJI
DO BADAŃ POWIERZCHNI PÓLPRZEWODNIKÓW

Streszczenie. W pracy opisano spektrometr wydajności kwantowej fotoemisji do badania struktury pasmowej termicznie oczyszczonej w ultrawysokiej próżni powierzchni półprzewodników poddanej oddziaływaniu różnych atmosfer gazowych.

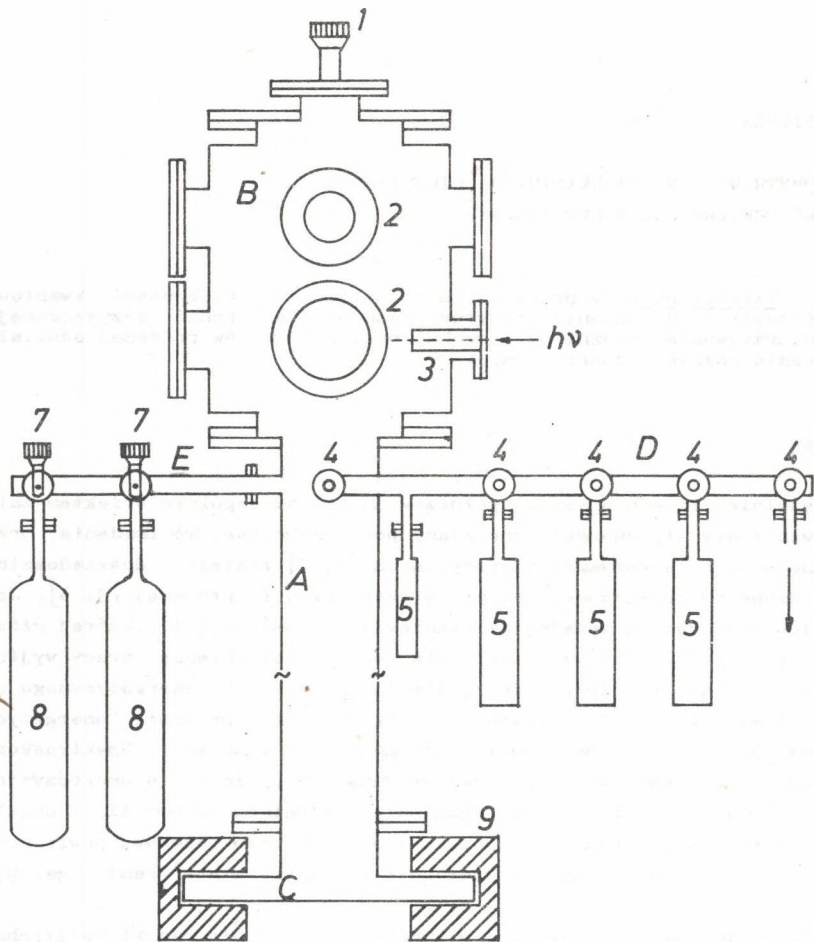
1. Wstęp

W ostatnich latach w fizyce półprzewodników szczególnym obiektem zainteresowań stały się energetyczne stany powierzchniowe. Ich istnienie, przewidziane na drodze rozważań teoretycznych [1, 2] zostało doświadczalnie potwierdzone metodami spektroskopii elektronowej i optycznej [3, 4]. Jedną z nich jest metoda wydajności kwantowej fotoemisji [5], której główną zaletą jest to, że nie tylko umożliwia dokładne określenie pracy wyjścia i energii jonizacji półprzewodnika ale także rozkładu energetycznego obsadzonych stanów powierzchniowych zlokalizowanych w przerwie energetycznej oraz górnej części pasma walencyjnego półprzewodnika. Spektroskopia wydajności kwantowej fotoemisji zastosowana w badaniach atomowoczystej, łupanej powierzchni Si i Ge oraz półprzewodników grupy III-V umożliwiła uzyskanie wielu cennych informacji o strukturze pasmowej powierzchni zarówno atomowoczystej jak i w kontakcie z różnymi atmosferami gazowymi [6, 7].

W pracy opisano, opracowany i wykonany w Instytucie Fizyki Politechniki Śląskiej spektrometr wydajności kwantowej fotoemisji do badania struktury pasmowej termicznie oczyszczonej w ultrawysokiej próżni powierzchni półprzewodników poddanej oddziaływaniu różnych atmosfer gazowych.

2. Stanowisko pomiarowe

Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat blokowy, opracowanego i zestawionego przez autora, oryginalnego spektrometru elektronowego umożliwiającego m.in. badania struktury pasmowej powierzchni wybranych półprzewodników, poddanej procesowi obróbki termicznej w bardzo wysokiej próżni, metodą wydajności kwantowej fotoemisji. Najważniejszym jego elementem jest cylindryczna, próżniowa kamera pomiarowa ze stali nierdzewnej 1R18N9T



Rys. 1. Uproszczony schemat układu próżniowego spektrometru elektronowego z kamerą pomiarową

A - główny kanał próżniowy, B - kamera pomiarowa, C - pompa jonowo-sorpcyjna PZK-100, D - magistrala bezolejowej próżni wstępnej, E - magistrala dozowników gazu

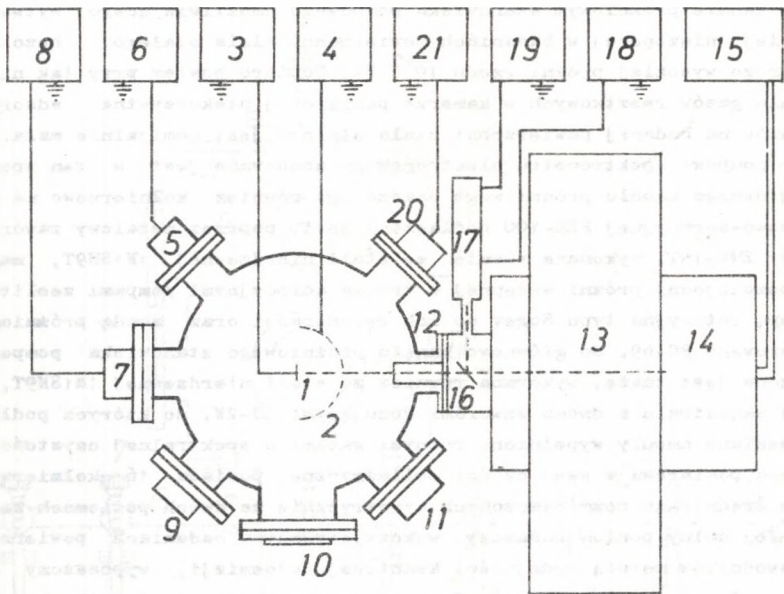
1 - przepust obrotowy PO-4UW, 2 - wziernik, 3 - kwarcowe okno optyczne, 4 - metalowy zawór odcinający bardzo wysokiej próżni typu ZMW-15T, 5 - zeolitowa pompa sorpcyjna, 6 - sonda próżniomierza oporowego PO-69, 7 - metalowy zawór dozujący bardzo wysokiej próżni typu ZD-2W, 8 - szklana ampoula z gazem spektralnie czystym, 9 - magnes stały pompy jonowo-sorpcyjnej PZK-100, 10 - układ pompowy do regeneracji zeolitowych pomp sorpcyjnych składający się z pompy rotacyjnej typu Sogev i olejowej pompy dyfuzyjnej PDG-120M

osadzona kołnierzowo na wykonanym również ze stali nierdzewnej 1H18N9T głównym kanale próżniowym stanowiska pompowego umożliwiającego wytworzenie w niej, niezbędnej w badaniach powierzchni ciała stałego, bezolejowej, bardzo wysokiej próżni rzędu 10^{-7} Pa. Dopiero bowiem przy tak niskim ciśnieniu gazów resztkowych w камерze pomiarowej niekorzystna adsorpcja tych gazów na badanej powierzchni ciała stałego jest pomijalnie mała. Stanowisko pompowe spektrometru elektronowego zbudowane jest w ten sposób, że do głównego kanału próżniowego osadzonego również kołnierzowo na pompie jonowo-sorpcyjnej PZK-100 podłączona jest, poprzez metalowy zawór odcinający ZMW-15T, wykonana również ze stali nierdzewnej 1H18N9T, magistrala bezolejowej próżni wstępnej z trzema sorpcyjnymi pompami zeolitowymi, pompą rotacyjną typu Sogev do ich regeneracji oraz sondą próżniomierza oporowego PO-69. Do głównego kanału próżniowego stanowiska pompowego podłączona jest także, wykonana również ze stali nierdzewnej 1H18N9T, dodatkowo magistrala z dwoma zaworami dozującymi ZD-2W, do których podłączone są szklane ampule wypełnione różnymi gazami o spektralnej czystości.

Kamera pomiarowa w swej części cylindrycznej posiada 16 kołnierzy o różnych średnicach rozmieszczonych symetrycznie na dwóch poziomach badawczych. Jej dolny poziom badawczy, wykorzystywany w badaniach powierzchni półprzewodników metodą wydajności kwantowej fotoemisji, wyposażony jest m.in. co ilustruje schemat przedstawiony na rys. 2 we wsierlnik, kwarcowe okno optyczne, sferyczny analizator fotoelektronów oraz sondę próżniomierza jonizacyjnego PW-12. Na górnym kołnierzu stanowiącym zakończenie nie-cylindrycznej części kamery pomiarowej osadzony jest dodatkowo kołnierz z przepustem obrotowym PO-4UW, spełniającym rolę manipulatora, z uchwytem na badaną próbkę półprzewodnikową. We wszystkich połączeniach kołnierzowych stosowane są płaskie uszczelki z miedzi elektrelitycznej. Wszystkie przepusty elektryczne elementów wyposażenia kamery pomiarowej wykonane są na złączach metal-szkło.

Istotnym fragmentem spektrometru jest zespół zasilająco-pomiarowy. W jego skład wchodzi m.in. próżniomierze: oporowy PO-69 i jonizacyjny PW-12, zasilacz pompy jonowo-sorpcyjnej PZK-100, zasilacze lamp monochromatora SPM-2, zasilacz prostego działania elektronowego do termicznej obróbki powierzchni badanego kryształu wraz z cyfrowym miernikiem temperatury oraz elektrometr wibracyjny VAJ-51 i mikrowoltomierz U722A pracujące wraz z zasilaczami wysokiego napięcia typu ZWN-41 w układach detekcji światła i fotoelektronów w układzie blokowym przedstawionym na rys. 2.

Źródłem monochromatycznego promieniowania nadfioletowego, w badaniach powierzchni półprzewodników metodą wydajności kwantowej fotoemisji, o maksymalnej energii fotonu $h\nu = 6,2$ eV jest prymarnie-szterciadlany, wysokorozdzielczy monochromator SPM-2 z optyką kwarcową wyposażony m.in. w lampę deuterową D_2E o mocy 30 W.



Rys. 2. Uproszczony schemat rozmieszczenia elementów wyposażenia dolnego poziomu badawczego próżniowej kamery pomiarowej wykorzystywanego w badaniach powierzchni półprzewodników metodą wydajności kwantowej fotoemisyjnej oraz schemat blokowy układów detekcji światła i fotoelektronów

1 - badana płytka półprzewodnikowa, 2 - sferyczny kolektor fotoelektronów, 3 - elektrometr wibracyjny VAJ-51, 4 - zasilacz wysokiego napięcia ZWN-41, 5 - sonda próżniomierza jonizacyjnego PW-12, 6 - próżniomierz jonizacyjny PW-12, 7 - działko elektronowe do termicznej obróbki powierzchni kryształu, 8 - zasilacz działka elektronowego, 9 - działko jonowe do oczyszczania powierzchni kryształów (w przygotowaniu), 10 - wziernik, 11 - sektorowy analizator energii fotoelektronów (w przygotowaniu), 12 - kwarcowe okno optyczne, 13 - monochromator SPM-2, 14 - zwierciadlany układ skupiający źródeł światła monochromatora SPM-2, 15 - zasilacze źródeł światła monochromatora SPM-2, 16 - dzielnik światła, 17 - fotopowielacz M12FQC51, 18 - zasilacz wysokiego napięcia ZWN-41, 19 - mikrowoltomierz U722A, 20 - oświetlacz halogenowy do oczyszczania wnętrza próżniowej kamery pomiarowej, 21 - zasilacz oświetlacza halogenowego

3. Metodyka badań

W badaniach, metodą wydajności kwantowej fotoemisyjnej struktury pasmowej realnej powierzchni półprzewodników, poddanej procesowi obróbki termicznej w bardzo wysokiej próżni kryształy w kształcie cienkiej płytki o wymiarach ok. 10 x 10 x 0,2 mm o określonej orientacji powierzchni, po wstępnej obróbce mechaniczno-chemicznej umieszcza się w osadzonym centralnie w komorze pomiarowej na przepuszcisku obrotowym PO-4UW uchwycie molibdenowym i poddaje się obróbce termicznej wiązką elektronową z prostego działka elektronowego, którego trzy spiralki wolframowe znajdują się w bezpośrednim

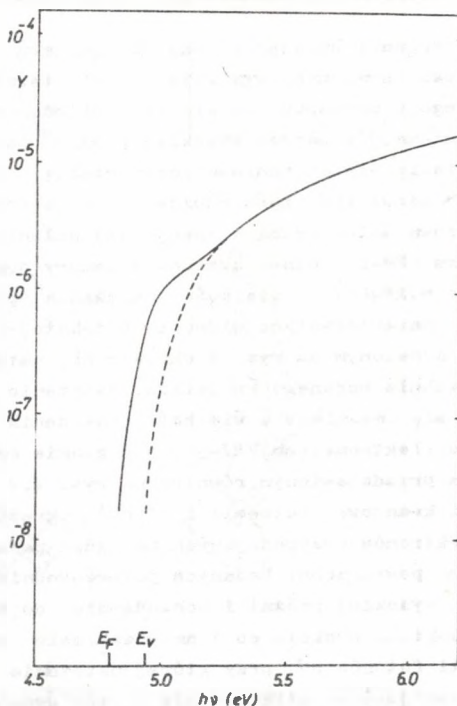
sąsiedztwie tylnej ścianki badanej płytki. Do pomiaru temperatury płytki w trakcie jej obróbki termicznej wykorzystuje się termoparę Fe-Konstantan podłączoną do jednego z zaczipów tantalowych molibdenowego uchwyty płytki. Po obróbce termicznej w bardzo wysokiej próżni powierzchnię badanego półprzewodnika oświetla się monochromatyczną wiązką promieniowania nadfioletowego, której niewielka część odbijana jest w sposób ciągły przez cienką płytkę kwarcową umieszczoną w specjalnej osłonie pomiędzy kolimatorem monochromatora SPM-2 i oknem kwarcowym kamery pomiarowej na fotopowielacz odniesienia M12PQC51. Z wielkości natężenia prądu fotopowielacza M12PQC51, o znanej charakterystyce widmowej fotokatody, uderzonego w układzie blokowym przedstawionym na rys. 2 określa się natężenie światła padającego na powierzchnię badanego kryształu. Natężenie emitowanych fotoelektronów określa się natomiast z wielkości natężenia prądu nasycenia fotoemisji mierzonego elektrometrem VAJ-51, o poziomie szumów własnych 10^{-15} A, w układzie blokowym przedstawionym również na rys. 2.

Widmo wydajności kwantowej fotoemisji $Y(h\nu)$ określanej jako liczba fotoemitowanych elektronów przypadających na jeden padający (pochłonięty) foton o energii $h\nu$ powierzchni badanych półprzewodników po jej obróbce termicznej w bardzo wysokiej próżni i ochłodzeniu do temperatury pokojowej zdejmuje się punkt po punkcie co 1 nm w zakresie energii fotonów $h\nu$ od 6,2 eV do energii fotonów $h\nu$, przy której natężenie prądu nasycenia fotoemisji przewyższa jeszcze kilkakrotnie poziom szumów własnych elektrometru VAJ-51.

W pobliżu progu fotoemisji powierzchni badanych półprzewodników natężenie światła nadfioletowego padającego na badaną płytkę półprzewodnikową jest zazwyczaj rzędu 10^{12} fotonów/sek co umożliwia rejestrację widm wydajności kwantowej fotoemisji $Y(h\nu)$ z dokładnością ok. $\pm 10\%$ aż do wydajności kwantowej fotoemisji rzędu 10^{-8} (elektronu) foton przy rozdzielczości energetycznej widm rzędu 0,02 eV. Z pochodnej widma wydajności kwantowej fotoemisji $dY(h\nu)/dh\nu$ obliczonej numerycznie, np. w języku BASIC można określić rozkład energetyczny efektywnej gęstości stanów zlokalizowanych w przerwie energetycznej i górnej części pasma walencyjnego półprzewodnika.

4. Możliwości badawcze spektrometru

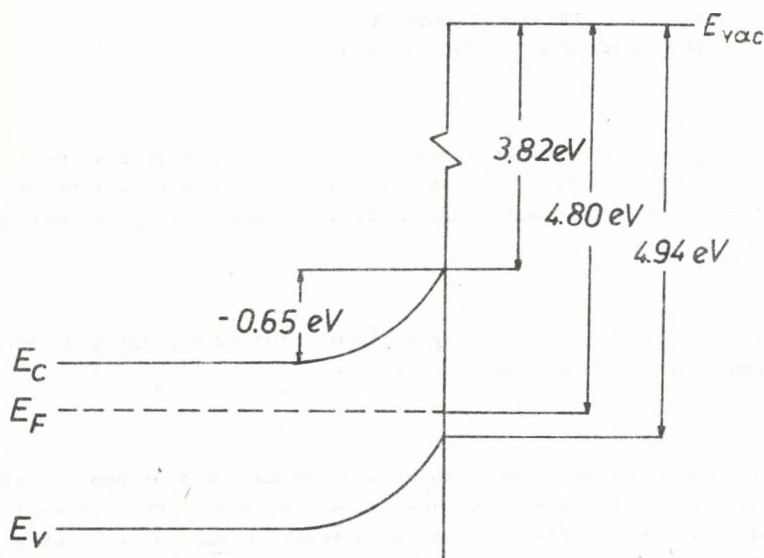
Rys. 3 przedstawia typowe widmo wydajności kwantowej fotoemisji powierzchni (111) Si typu n o koncentracji nośników 10^{21} $[m^{-3}]$ poddanej procesowi niskotemperaturowego wygrzewania w 650 K w ultrawysokiej próżni $5 \cdot 10^{-7}$ Pa. Niskoenergetyczną gałąź krzywej wydajności kwantowej fotoemisji na rys. 4 opisuje wzór Kane'a [8] z wykładnikiem 3 a odpowiadająca niskoenergetycznemu progowi fotoemisji praca wyjścia wynosi 4,80 eV. Wysekoenergetyczną gałąź krzywej wydajności kwantowej fotoemisji na rys. 3 opisuje natomiast wzór Kane'a [8] z wykładnikiem 3/2, co odpowiada przej-



Rys. 3. Widmo wydajności kwantowej fotoemisji $Y(h\nu)$ (liczba emitowanych elektronów przypadających na jeden padający foton o energii $h\nu$) powierzchni (111) Si typu n o koncentracji nośników 10^{15} na cm^3 poddanej procesowi obróbki termicznej w temperaturze 650 K w bardzo wysokiej próżni $5 \cdot 10^{-7}$ Pa

ściom skośnym elektronów walencyjnych emitowanych z czystej powierzchni (111) Si. Określona z wysokoenergetycznego progu fotoemisji energia jonizacji wynosi 4,94 eV.

Na rys. 4 przedstawiono, wykorzystując określone z wysokoenergetycznego i niskoenergetycznego progu fotoemisji wartości pracy wyjścia i energii jonizacji, strukturę pasm energetycznych na powierzchni (111) Si typu n o koncentracji nośników $10^{21} [\text{m}^{-3}]$ poddanej procesowi niskotemperaturowego wygrzewania w 650 K w ultrawysokiej próżni $5 \cdot 10^{-7}$ Pa. Znaczne zakrzywienie pasm wynoszące (-0,65 eV) wynika prawdopodobnie z ładunku tzw. tlenku próżniowego zawierającego paramagnetyczne centra powierzchniowe -Si, na wygrzanej niskotemperaturowo w wysokiej próżni powierzchni (111) Si [10]. Wartość ta jest o około 0,3 eV wyższa niż dla łupanej w ultrawysokiej próżni a następnie wygrzanej w 650 K powierzchni (111) Si 9, a więc powierzchni atomowoczystej.



Rys. 4. Struktura pasm energetycznych powierzchni (111) Si określona na podstawie widma wydajności kwantowej fotoemisji przedstawionego na rys. 3

Podziękowanie

Wyrażam podziękowanie Prof. dr hab. Aleksandrowi Opilskiemu za wnikliwe przejrzenie maszynopisu i cenne uwagi.

LITERATURA

- [1] S.G. Davidson, J.D. Levine: Solid State Physics 25, 1 1970.
- [2] F. Garcia-Moliner, F. Flores: J. Phys. C 9, 1009 1976.
- [3] W. Monch: Surface Sci. 63, 79 1977.
- [4] M. Schluter: Adv. Solid State Phys. 155 1978. .
- [5] C. Sebbenne, D. Boimont, G. Guichar, M. Balkanski: Proc. II Int. Conf. Solid Surfaces Kyoto 1974, 405.
- [6] C.A. Sebbenne: Il Nuovo Cimento 39B, 768 1977.
- [7] G.M. Guichar, M. Balkanski, C. Sebbenne: Surface Sci. 86, 874 1979.
- [8] E.O. Kane: Phys. Rev. 127, 131 1962.
- [9] G.M. Guichar, C. Sebbenne, G. Garry, M. Balkanski: Le Vide - Les Couches Minces 30A, 97 1975.
- [10] J. Szuber, B. Salamon: Physica Status Solidi (a) 53, 289 1979.

СПЕКТРОМЕТР КВАНТОВОЙ ОТДАЧИ ФОТОЭМИССИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Р е з ю м е

В настоящей работе описан спектрометр квантовой отдачи фотоэмиссии для исследования зонной структуры термически очищенной в ультраглубоком вакууме поверхности полупроводников подверженных воздействию различных газовых атмосфер.

THE SPECTROMETER OF QUANTUM YIELD OF PHOTOEMISSION IN THE INVESTIGATION
OF THE SURFACE OF SEMICONDUCTORS

S u m m a r y

The paper describes the spectrometer of quantum yield of photoemission in the investigation of band structure concerning the surface of semiconductors which was thermally cleaned in ultra-high vacuum and subjected to the influence of various gas atmospheres.

Recensent: Prof. dr hab. Aleksander Opilski

Wpłynęło: 08.03.1981 r.