

SPEKTROSKOPIA ELEKTRONÓW AUGERA

W ZAAWANSOWANEJ PRACOWNI FIZYCZNEJ

Tomasz Greczyło, Piotr Mazur, Ewa Dębowska

Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Wrocławski

STRESZCZENIE

Artykuł opisuje doświadczenie studenckie – spektroskopię elektronów Augera (AES) z zastosowaniem analizatora z polem hamującym (RFA) – realizowane w II Pracowni fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego. Autorzy prezentują stanowisko doświadczalne oraz ilustrują jego działanie przykładowymi wynikami eksperymentalnymi. Dyskutowane są także wady i zalety stanowiska pomiarowego oraz proponowanych zadań doświadczalnych.

1. WSTĘP

Zajęcia w zaawansowanej pracowni fizycznej stanowią ważny element kształcenia studentów na kierunkach przyrodniczych, ale szczególną rolę odgrywają w kształceniu fizyków. Ważnym jest by wykonywane przez studentów doświadczenia umożliwiały kształtowanie umiejętności oraz pozwalały na zgłębianie metod doświadczalnych wykorzystywanych w pracy ośrodka naukowo-dydaktycznego [1]. Przeświadczenie to stało się głównym powodem skonstruowania i oddania do użytku w II Pracowni fizycznej Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego zaawansowanego stanowiska pomiarowego noszącego nazwę *Spektroskopia elektronów Augera*. Ćwiczenie umożliwia obserwację i badanie zjawiska Augera oraz wykorzystanie spektroskopii elektronów Augera do badania składu chemicznego powierzchni próbki. Wymagane do przeprowadzenia doświadczenia i zrozumienia zachodzących zjawisk przygotowanie teoretyczne jest doskonałym wstępem do szerszego spojrzenia na metody spektroskopii ciała stałego [2]. Artykuł opisuje szczegółowo stanowisko pomiarowe i procedurę pomiarową oraz prezentuje otrzymane wyniki wraz z ich interpretacją fizyczną. Autorzy mają nadzieję, że opisywane stanowisko pomiarowe będzie mogło być zbudowane i

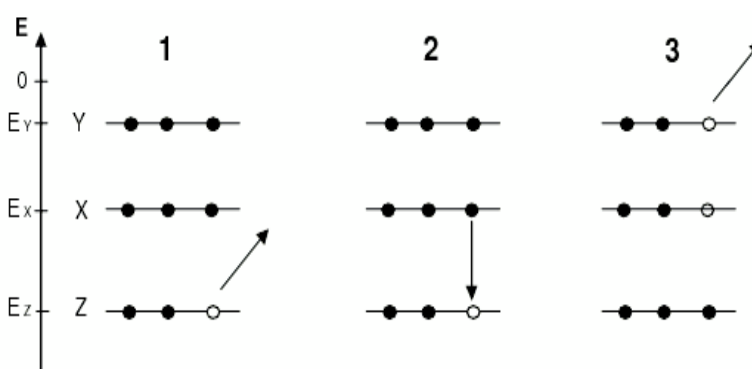
wykorzystane do pomiarów także w innych pracowniach studenckich w kraju i poza jego granicami.

2. ZAGADNIENIA TEORETYCZNE

2.1 Zjawisko Augera

W roku 1925 P. Auger, badając w komorze Wilsona oddziaływanie promieniowania rentgenowskiego z atomami gazu zauważył, że atom po jonizacji wskutek zderzenia z kwantem promieniowania ulega samorzutnie powtórnej jonizacji [3]. Przebieg zjawiska – zwanego zjawiskiem Augera – podzielony na trzy fazy jest schematycznie przedstawiony na rysunku 2.1. W początkowej fazie (1) ma miejsce usunięcie, wskutek pochłonięcia energii kwantu promieniowania (względnie energii innego elektronu lub jonu), elektronu z jednego z niżej położonych poziomów energetycznych (E_Z). Powstałe w wyniku tego zjawiska wolne miejsce w powłoce (Z) atomu jest w bardzo krótkim czasie zajmowane (2) przez elektron z bardziej zewnętrznej powłoki (X), a uwalniana przy tym energia jest przekazywana innemu elektronowi (3) z wyższej powłoki atomowej (Y). Dzięki tej energii elektron opuszcza atom, co prowadzi do kolejnej jonizacji. Wyemitowany w ostatniej fazie (3) procesu elektron nosi nazwę elektronu Augera. W przedstawionym zjawisku energia elektronu Augera nie zależy od sposobu dokonania pierwszej jonizacji i jest zdeterminowana jedynie układem poziomów energetycznych atomu. Energia

ostatniego elektronu zużywana jest częściowo na przyrost jego energii potencjalnej związanej z uwolnieniem z atomu, reszta zaś zamienia się w jego energię kinetyczną. Bilans energetyczny dla tego zjawiska można zapisać następująco:



Rys. 2.1 Mechanizm zjawiska Augera

$$E_{ZXY} = -E_Z - (-E_X) - (-E_Y)$$

Każdy pierwiastek chemiczny ma zatem charakterystyczny dla siebie zestaw energii elektronów Augera, a odpowiednie przejścia dla poszczególnych pierwiastków opisywane są liczbą wyrażającą energię w eV oraz za pomocą liter odpowiadających stosownym poziomom energetycznym ($E_Z E_X E_Y$) np. Si – 92 LVV, C – 272 KLL, K – 252 LMM. Eksperymentalne zmierzenie wartości odpowiadających tym energiom sygnałów elektrycznych – spektroskopia

Augerowska (AES – *Auger Electron Spectroscopy*) – może być metodą analizy składu chemicznego warstwy próbki, z której pochodzą rejestrowane elektrony Augera. Należy przy tym pamiętać, że energia emitowana przy danym przejściu energetycznym nie jest ściśle określona, a szerokość przedziału energii jest głównie zależna od naturalnych szerokości tych poziomów energetycznych. Jeżeli badana próbka znajduje się w fazie skondensowanej to poziomy energetyczne poszczególnych tworzących ją atomów są rozmyte i przesunięte w stosunku do poziomów w izolowanych atomach [4]. Fakt ten prowadzi do dodatkowego rozmycia energii elektronów Augera i do zmiany położenia maksimów rozkładów tych energii tzw. przesunięcia chemicznego.

Energia elektronów Augera wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset, a nawet w wyjątkowych przypadkach do kilku tysięcy eV, w zależności od rodzaju przejścia prowadzącego do emisji, a także od rodzaju emitujących atomów [5]. Elektron Augera wyemitowany z atomu w głębi próbki może na drodze do powierzchni doznać strat energii na skutek oddziaływania z elektronami atomów powierzchni, generowaniem plazmonów objętościowych i powierzchniowych lub wzbudzeniem wewnętrznych poziomów energetycznych w atomie. Ponadto elektron taki oddziałuje z siecią krystaliczną wytwarzając lub pochłaniając fonony, co skutkuje zmianą jego pędu. Na skutek zmiany energii elektron przestaje wyróżniać się spośród innych elektronów emisji wtórnej i nie daje wkładu do mierzonego natężenia prądu Augera [2].

Rejestrowanie elektronów Augera dostarcza więc informacji o warstwie powierzchniowej próbki, a ponieważ energia tych elektronów jest zdeterminowana układem poziomów energetycznych macierzystego atomu możliwe jest określenie składu powierzchni takiej próbki – ściślej warstwy o grubości kilku stałych sieci. Dostarczana przez AES informacja jest głównie jakościowa i pozwala na wykrycie obecności danego pierwiastka w warstwie powierzchniowej próbki.

2.2 Analizator RFA

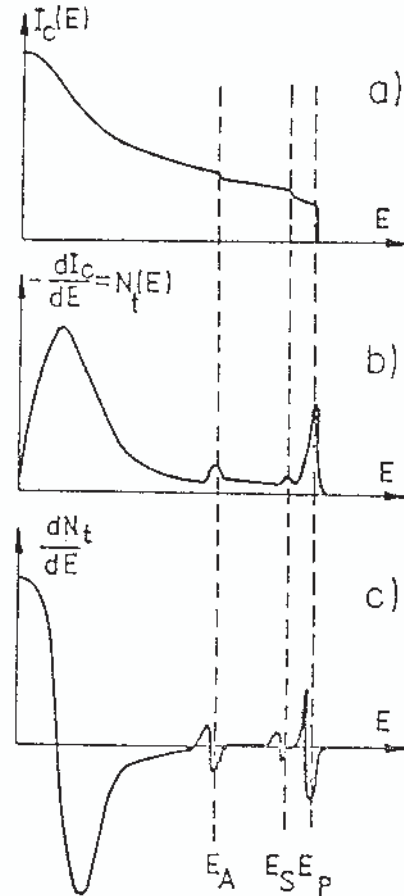
Jedną z praktycznych realizacji AES jest analizator z polem hamującym (RFA – *Retarding Field Analyzer*), który ze względu na jego wykorzystanie w prezentowanej aparaturze pomiarowej zostanie bliżej opisany. Konstrukcja pierwszego analizatora z polem hamującym została opisana przez Webera i Perii w roku 1967 [6]. W pracy tej wykorzystane zostało urządzenie do obserwacji dyfrakcji powolnych elektronów (LEED – *Low Energy Electron Diffraction*) składające się z działa elektronowego, umieszczonej centralnie na wprost działa próbki, zespołu półsferycznych siatek otaczających próbkę oraz ekranu luminescencyjnego. Całość znajduje się wewnątrz szklanej bańki próżniowej, z której wyprowadzone są kontakty

elektryczne. Pierwszą siatkę spektrometru umieszcza się na takim samym potencjale jak próbkę. Do siatki drugiej przyłożony jest potencjał hamujący elektrony. Kolektor elektronów, które przeszły przez filtr energetyczny na ogół pokryty jest luminoforem. Jeśli stopniowo, w praktyce na ogół w sposób zbliżony do liniowego, będzie zwiększany potencjał hamujący, to natężenie prądu kolektora będzie malało. Przykładową zależność natężenia prądu kolektora od energii wiązki pierwotnej elektronów przedstawia rysunek 2.2.1a. Ponadto na rys. 2.2.1 znajdują się poszczególne etapy różniczkowania prądu kolektora celem otrzymania krzywych Augera $\left(\frac{dN_t}{dE} = f(E)\right)$. Uskoki na pierwszej ($I_C = f(E)$) i drugiej krzywej ($N_t = f(E)$) zostały znacznie powiększone, gdyż we właściwej skali nie byłyby widoczne. Na krzywej rozkładu energii elektronów – c) – pojawiają się nieciągłości odpowiadające:

- energii elektronów Augera poszczególnych pierwiastków chemicznych próbki – E_A ,
- energii elektronów, które doznały charakterystycznej straty energii na wytworzenie plazmonu – E_S ,
- energii elektronów pierwotnych (użytych do pobudzenia próbki) – E_P .

Elektroniczne różniczkowanie rozkładu energii elektronów z zastosowaniem analizatora RFA pozwala na pomiar sygnałów poniżej poziomu szumów, w tym sygnału związanego z elektronami Augera. W celu wydzielenia prądu elektronów Augera z tła elektronów emisji wtórnej do siatki drugiej analizatora przykładana się ujemny względem próbki potencjał, nałożonym ze zmiennym w czasie potencjałem modulującym o amplitudzie ε (na ogół 0,1 – 1 V) i częstotliwości ω . Napięcie pomiędzy tą siatką a próbką zależy więc od czasu w następujący sposób:

$$U = -At + \varepsilon \cos \omega t = U_- + \varepsilon \cos \omega t. \quad (2.1)$$



Rys. 2.2.1 Poszczególne etapy różniczkowania prądu kolektora (za [2]) – szczegółowy opis w tekście

Natężenie prądu kolektora $I_c(U)$ można rozwinąć w szereg Taylora wokół wybranego napięcia U_0 (odpowiadającego energii E_0) otrzymując:

$$I_c(U) = I_c(U_0) + \Delta U \left. \frac{dI_c}{dU} \right|_{U=U_0} + \frac{1}{2} (\Delta U)^2 \left. \frac{d^2 I_c}{dU^2} \right|_{U=U_0} + \frac{1}{6} (\Delta U)^3 \left. \frac{d^3 I_c}{dU^3} \right|_{U=U_0} + \dots \quad (2.2)$$

gdzie,

$$\Delta U = \varepsilon \cos \omega t, \quad (2.3)$$

Po przekształceniu, (2.2) przyjmuje postać:

$$I_c(U) = I_c(U_0) + \varepsilon \cos \omega t \left. \frac{dI_c}{dU} \right|_{U=U_0} + \frac{1}{4} \varepsilon^2 (\cos 2\omega t + 1) \left. \frac{d^2 I_c}{dU^2} \right|_{U=U_0} + \frac{1}{24} \varepsilon^3 (3 \cos \omega t + \cos 3\omega t) \left. \frac{d^3 I_c}{dU^3} \right|_{U=U_0} + \dots \quad (2.4)$$

W mierzonym natężeniu prądu kolektora pojawiają się składowe zmienne o częstotliwości ω oraz częstotliwościach będących jej całkowitymi wielokrotnościami. Amplituda A_1 składowej o częstotliwości ω jest proporcjonalna do pierwszej pochodnej prądu kolektora po napięciu hamownia (odpowiadającemu energii elektronów), podczas gdy amplituda A_2 składowej o częstotliwości 2ω , jest proporcjonalna do drugiej pochodnej prądu kolektora po napięciu.

$$A_1 \approx \varepsilon \left. \frac{dI_c}{dU} \right|_{U=U_0} \quad A_2 \approx \frac{\varepsilon^2}{4} \left. \frac{d^2 I_c}{dU^2} \right|_{U=U_0} \quad (2.5)$$

W obu przypadkach ze względu na małą wartość ε pomijamy wyrazy zawierające wyższe potęgi tej wielkości.

Jeśli zatem wybierzemy z prądu kolektora składową o częstotliwości ω i zarejestrujemy zależność odpowiadającej jej wartości sygnału od liniowo zmiennej w czasie składowej napięcia hamującego to otrzymamy krzywą przedstawioną na rysunku 2.2.1b niosącą informację o rozkładzie energetycznym emitowanych elektronów. Rejestrując składową o częstotliwości 2ω i prezentując zależność odpowiadającej jej wartości sygnału od energii elektronów otrzymamy krzywą, na której widoczne będą charakterystycznego piku Augera (rysunek 2.2.1c).

Do wydzielenia z natężenia prądu kolektora RFA składowej o częstotliwości ω lub 2ω stosuje się układ, którego schemat blokowy prezentuje rysunek 4.2. Liniowo zmienne w czasie napięcie U zmodulowane napięciem zmiennym $\varepsilon \cos \omega t$, wytwarzanym przez generator G a doprowadzanym do układu siatki hamującej poprzez transformator Tr, przyłożone jest pomiędzy siatką 2 spektrometru a masą. Prąd kolektora K płynie przez układ rezonansowy RLC (R.C.)

wytwarzając różnicę potencjałów, która po wzmocnieniu rejestrowana jest przez nanowoltomierz fazoczuły L.A. (*lock-in-amplifier*). Na wejściu odniesienia tego woltomierza podawane jest napięcie o częstotliwości ω lub 2ω poprzez przełącznik P'. Woltomierz fazoczuły wzmacnia wybiórczo jedynie tę składową mierzonego napięcia, która ma określoną fazę względem napięcia odniesienia. Wydzielony w ten sposób i zarejestrowany sygnał zwany jest krzywą rozkładu elektronów emisji.

3. APARATURA POMIAROWA

4.1 Charakterystyka zestawu

Opisany układ pomiarowy pozwala wygrzać, w celu usunięcia zanieczyszczeń, próbkę krzemową, dokonać dla niej pomiarów spektroskopowych RFA oraz pokryć jej powierzchnię atomami potasu ze znajdującego się w aparaturze źródła jonów K^+ . Układ pozwala zatem prowadzić badania umożliwiające poznanie praw rządzących zjawiskami zachodzącymi w tego typu analizatorze, jak również wykorzystywać go do praktycznego badania składu powierzchni próbki, na różnych etapach jej przygotowania. Rysunek 4.1 prezentuje widok aparatury pomiarowej w II Pracowni fizycznej IFD UW, w skład której wchodzi:



Rys. 4.1 Widok aparatury pomiarowej (szczegółowy opis w tekście).

1. manipulator (umożliwia obrót i przesuwanie próbki w trzech wymiarach),

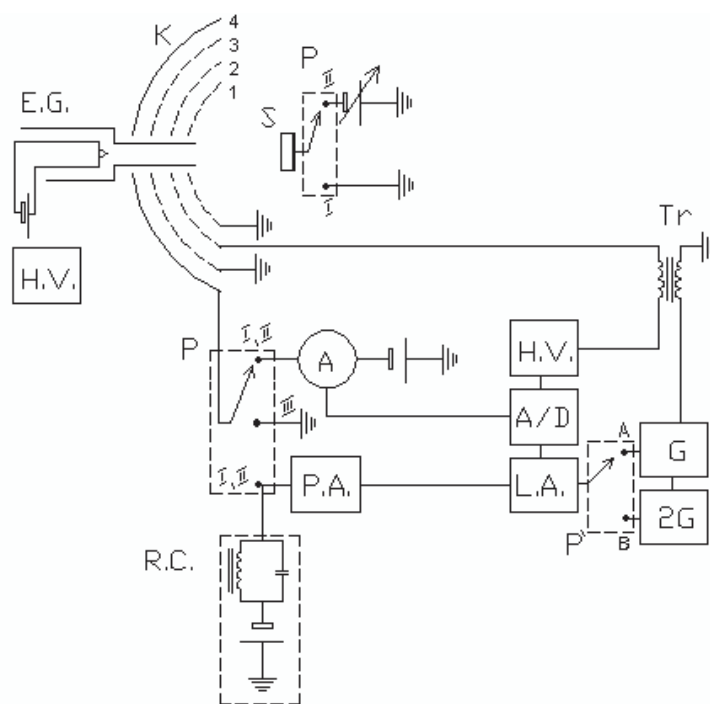
2. komora pomiarowa (wykonana ze stali nierdzewnej),
3. zasilacz pompy jonowo-sublimacyjnej (PZK - 100),
4. zasilacz pompy tytanowej (VT 992-0052),
5. zasilacz kolektora (0 – 100V),
6. blok zasilaczy wysokiego napięcia zasilających działko elektronowe ($E_{\max} = 3 \text{ keV}$),
7. sterowalny zasilacz napięcia hamującego,
8. przełącznik częstotliwości (P'),
9. nanowoltomierz fazoczuły (Lock-in type 232B),
10. oscyloskop z wbudowanym generatorem częstotliwości (OS 5020G),

11. miernik prądu próbki (Metex M-3800),
12. zasilacz obwodu żarzenia katody oraz działa elektronowego Wehnelta,
13. przełącznik P trybu pracy (zerowy potencjał próbki - I, polaryzacja próbki - II, grzanie próbki - III).

4.2 Układ do pomiaru rozkładów energetycznych elektronów

Schemat blokowy zbudowanego układu AES użytego do realizacji opisywanych zadań doświadczalnych przedstawia rysunek 4.2. Oznaczone na schemacie blokowym stosownymi symbolami elementy to odpowiednio:

- A – amperomierz,
- E.G. – działa elektronowe,
- S – próbka,
- K – katoda,
- Tr – transformator separujący,
- H.V. – zasilacz wysokiego napięcia sterowany komputerem,
- A/D – układ przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych wraz z komputerem zbierającym dane i sterującym pomiarem,
- L.A. – nanowoltomierz fazoczuły współpracujący z układem przetworników,
- P.A. – przedwzmacniacz,
- G (2G) – generator napięcia zmiennego wraz z mnożnikiem częstotliwości,
- R.C. – układ filtra częstotliwości (układ rezonansowy),
- P, P' – przełączniki trybów pracy.



Rys. 4.2 Schemat blokowy układu pomiarowego (opis w tekście)

Ponadto układ wyposażony jest w sterowanie i elementy systemu wytwarzania ultrawysokiej próżni tj. próżni o ciśnieniu około $1 \cdot 10^{-9}$ Tr obejmujący pompę obrotową (próżnia wstępna), pompę jonowo-sublimacyjną PZK – 100 oraz pompę sublimacyjną (tytanową).

4. TEMATYKA DOŚWIADCZENIA I PROCEDURA POMIAROWA

3.1 Cele doświadczenia

Celem doświadczenia jest praktyczne zaznajomienie studentów ze spektroskopią RFA poprzez pomiar wielkości charakteryzujących próbkę krzemową w celu określenia składu jej powierzchni. Przygotowując się do realizacji zadania doświadczalnego studenci poznają teorię praw fizycznych rządzących tego rodzaju spektroskopią, jak również, zapoznają się z literaturą prezentującą to zagadnienie. Doświadczenie składa się z kilku etapów:

- uzyskanie próżni o stosownych parametrach umożliwiających badania;
- przygotowanie próbki, tj. oczyszczenie jej powierzchni poprzez grzanie wskutek przepływu prądu;
- przeprowadzenie rejestracji natężenia prądu kolektora w funkcji napięcia hamującego odpowiadającego energii rejestrowanych elektronów (charakterystyka $I_c(E)$) dla różnych potencjałów próbki przy różnych energiach wiązki pierwotnej;
- przeprowadzenie rejestracji sygnału proporcjonalnego do liczby elektronów o zadanej energii osiagających kolektor dla wybranego potencjału próbki, przy różnych energiach wiązki pierwotnej (rozkład energetyczny $N_i(E)$ – pierwsza pochodna);
- rejestracja krzywych Augera dla próbki oczyszczonej, dla wybranego potencjału próbki, przy różnych energiach wiązki pierwotnej (zależność $dN_i(E)/dE$ – druga pochodna);
- rejestracja krzywych Augera dla próbki oczyszczonej, dla wybranej wartości energii wiązki pierwotnej, przy różnych potencjałach próbki;
- rejestracja krzywych Augera dla próbki naporowanej jonami potasu – bezpośrednio po naporowaniu, po ponownym przegrzaniu próbki oraz po 24h w warunkach ultrawysokiej próżni.

3.2 Procedura pomiarowa

Wewnątrz komory pomiarowej stale utrzymywane są warunki próżniowe dzięki ciągłej pracy pompy jonowej. Przed przystąpieniem do pomiarów student, zazwyczaj na krótko, włącza także pompę tytanową, której praca pozwala otrzymać próżnię o ciśnieniu około $1 \cdot 10^{-9}$ Tr. Kolejnym krokiem jest oczyszczenie próbki. W tym celu przełącznik trybu pracy (P) ustawiany jest w pozycji III, w której odłączone są wszystkie urządzenia pomiarowe. Przepływ prądu o natężeniu $I_g \sim 4,6A$ w czasie $t_g \leq 3s$ powoduje rozgrzanie próbki krzemowej do temperatury

powyżej 1500 K. Następnie student przystępuje do rejestracji natężenia prądu emisji wtórnej dla wybranego potencjału próbki, przy różnych energiach wiązki pierwotnej, jako funkcji napięcia hamowania odpowiadającego energii elektronów emisji osiagających kolektor. W tym celu przełącznik trybu pracy umieszczany jest w pozycji I (wówczas potencjał próbki wynosi 0V) lub II (wówczas potencjał próbki może być zmieniany) i mierzony jest prąd kolektora I_c dla poszczególnych wartości energii elektronów E . Zmianą potencjału siatki hamującej steruje komputer poprzez przetwornik cyfrowo-analogowy. Wynikiem tego rodzaju pomiarów są krzywe prezentowane na rysunku 5.1.

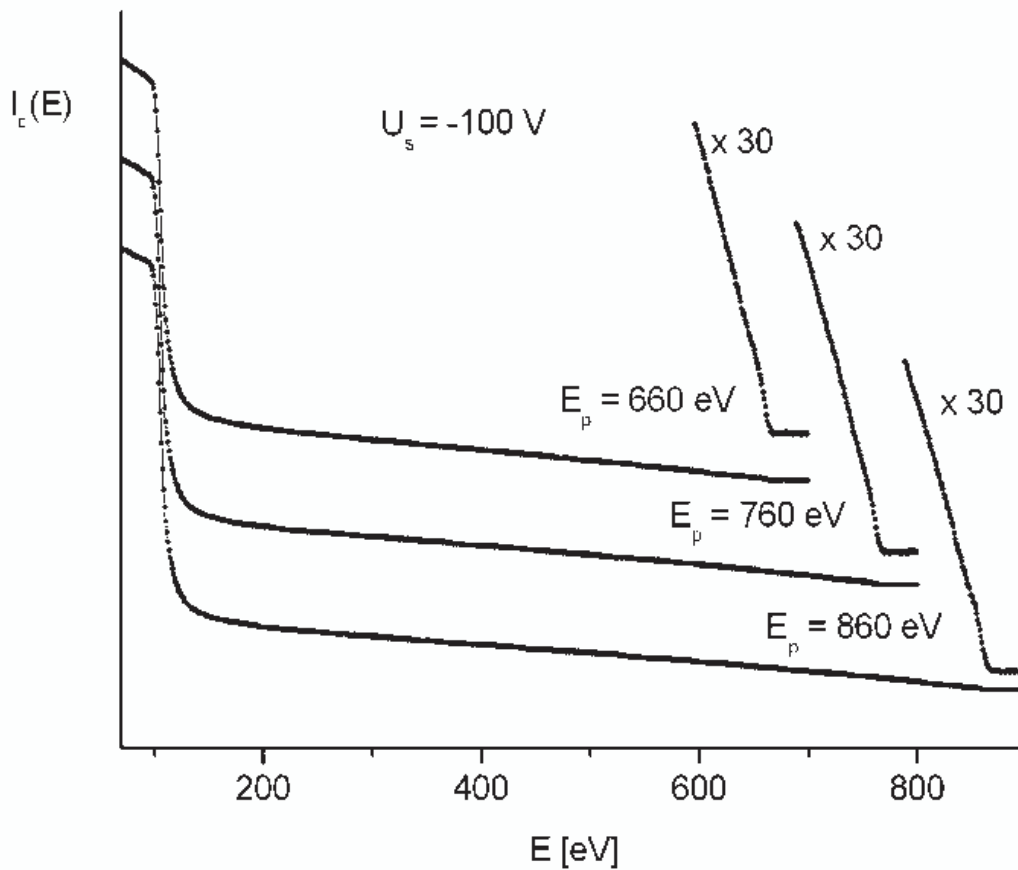
Podanie na wejście odniesienia nanowoltomierza fazoczułego napięcia odniesienia o częstotliwości $f_1 = 3,2$ kHz (przełącznik P' w pozycji A) pozwala na pomiar liczby elektronów o zadanej energii osiagających kolektor dla wybranego potencjału próbki, przy różnych energiach wiązki pierwotnej. Wynikiem tych pomiarów są krzywe prezentowane na rysunku 5.2.

Podanie na wejście odniesienia nanowoltomierza fazoczułego napięcia o częstotliwości podwojonej $f_2 = 6,4$ kHz (przełącznik P' w pozycji B) pozwala na rejestrację krzywych (pików) Augera dla wybranego potencjału próbki, przy różnych energiach wiązki pierwotnej oraz na rejestrację krzywych Augera dla wybranej energii wiązki pierwotnej, przy różnych potencjałach próbki. Tego rodzaju wyniki prezentują rysunki 5.3 i 5.4.

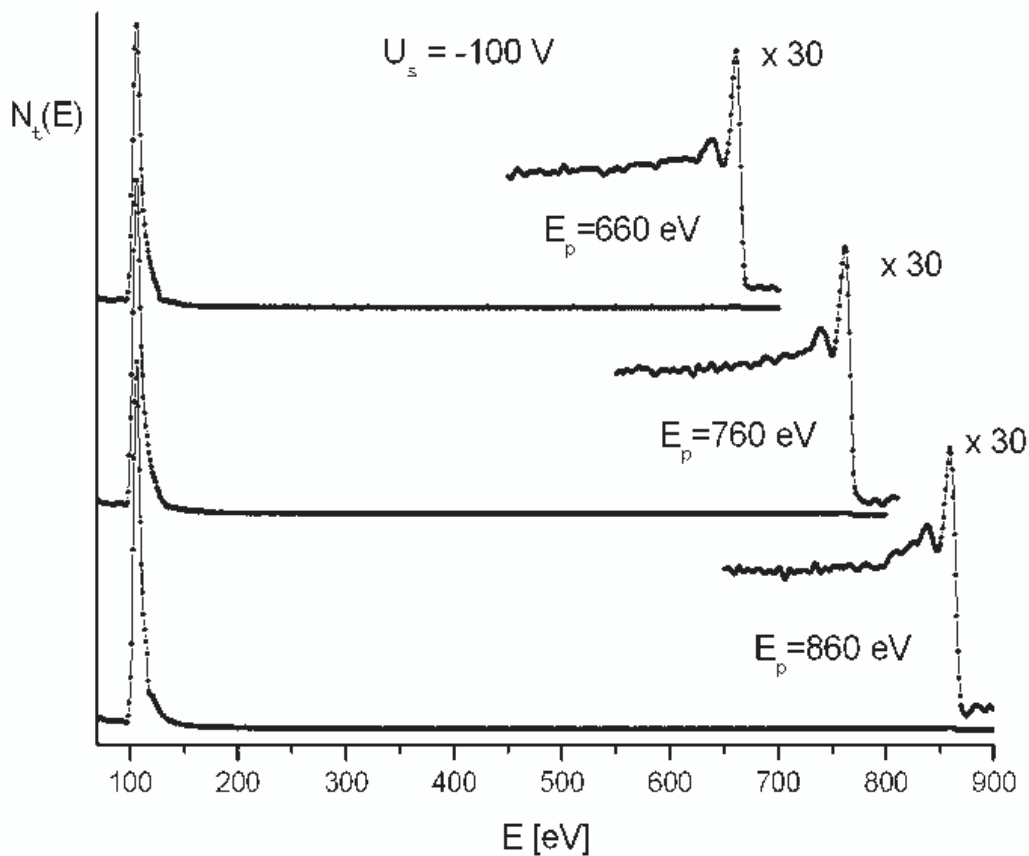
W kolejnej części doświadczenia studenci pokrywają próbkę krzemową atomami potasu. W tym celu zmieniają położenie próbki manipulatorem ustawiając ją na wprost źródła potasu i odłączają aparaturę pomiarową (przełącznik P w pozycji III). Na skutek przepływu prądu o natężeniu $I_K = 16$ A przez źródło jony K^+ są odparowywane i osiadają na próbce Si. Wówczas możliwa jest rejestracja krzywych Augera dla próbki naparowanej – bezpośrednio po naparowaniu, po ponownym przegrzaniu próbki oraz po kilkunastu godzinach w warunkach ultrawysokiej próżni. Rysunek 5.5 prezentuje przykładowe wyniki doświadczalne dla tej procedury.

5. WYNIKI POMIARÓW I OBSERWACJI

Jak wynika z rozważań teoretycznych przedstawionych w części 2.1 niniejszej pracy, rejestracja natężenia prądu emisji wtórnej oraz elektroniczne różniczkowanie tej wielkości fizycznej pozwala na zdobycie informacji na temat składu chemicznego powierzchni badanej próbki. Wykresy 5.1 i 5.2 przedstawiają rzeczywiste krzywe otrzymane dla potencjału próbki $U_s = -100$ V przy trzech różnych wartościach energii wiązki pierwotnej (E_p) wraz z ich powiększeniami w okolicach tych energii.



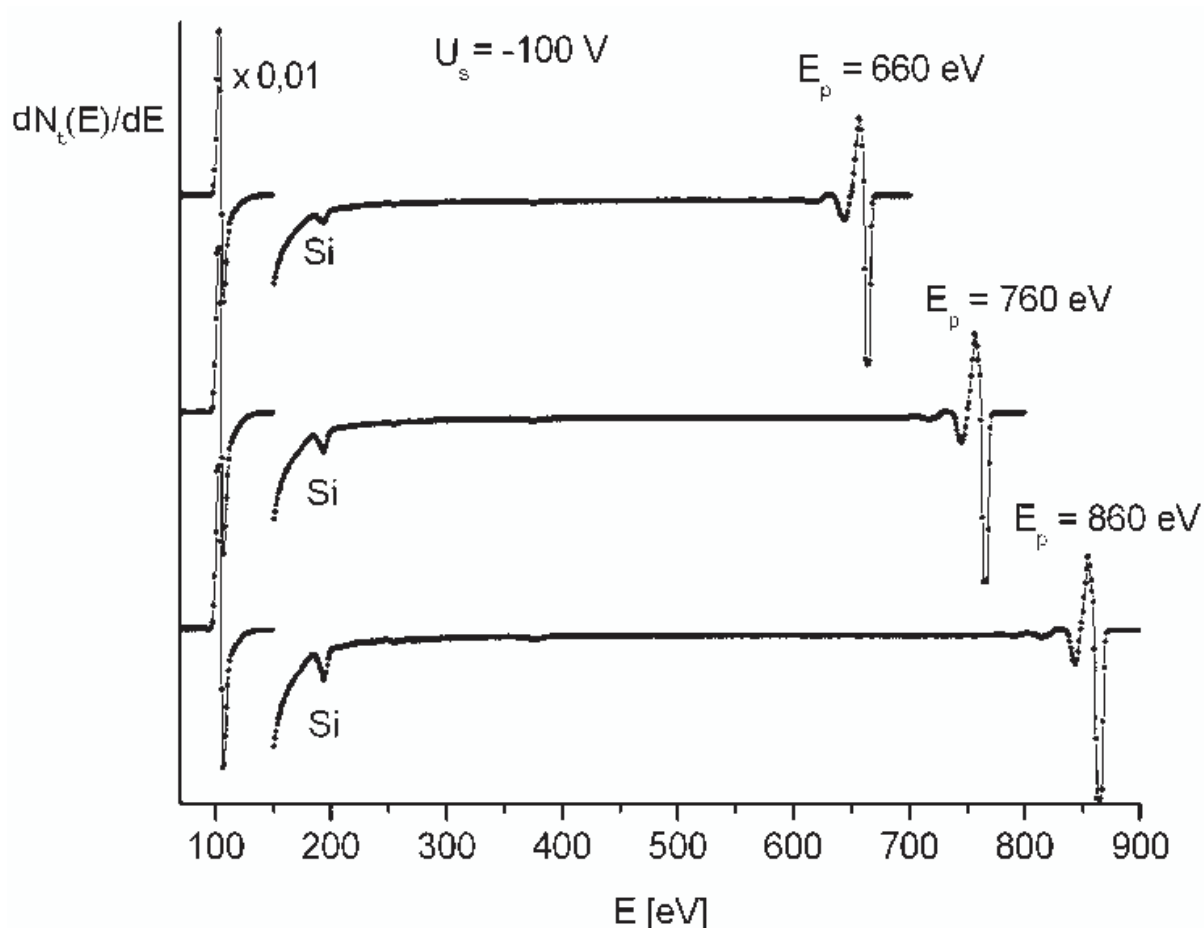
Rys. 5.1 Zależność natężenia prądu elektronów $I_c(E)$ osiągających kolektor RFA od ich energii E dla trzech wartości energii wiązki pierwotnej E_p wraz z 30. krotnym powiększeniem obszarów w okolicach wartości E_p .



Rys. 5.2 Zależność liczby elektronów N_t osiągających kolektor RFA od ich energii E dla trzech wartości energii wiązki pierwotnej E_p wraz z powiększeniem obszarów w okolicach wartości E_p .

Na wykresie 5.1 widać, że natężenie prądu emisji wtórnej znacząco maleje powyżej energii 100eV (odpowiadającej potencjałowi próbki $U_s = -100V$) a następnie nieznacznie maleje i dopiero 30. krotne powiększenie fragmentów krzywych w okolicach wartości energii wiązki pierwotnej pozwala dostrzec subtelne zmiany mierzonej wielkości. Na kolejnym wykresie (rys. 5.2) prezentowane są pierwsze pochodne natężeń rejestrowanego prądu. Wyraźnie widać na nich pik elektronów wtórnych i dopiero 30. krotne powiększenia fragmentów rejestrowanych krzywych w okolicach wartości energii wiązki pierwotnej pozwalają dostrzec ich subtelną strukturę – piki elastyczne.

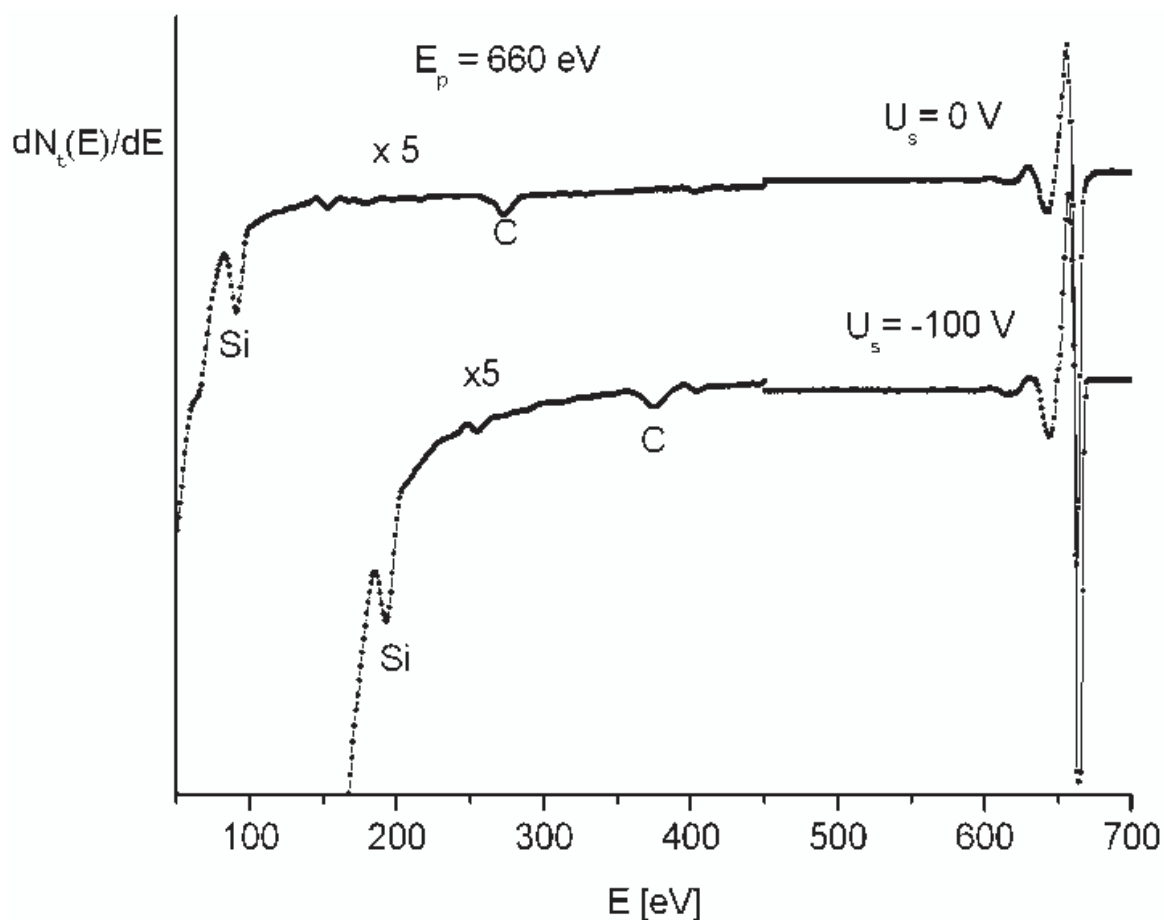
Na rysunkach 5.3 i 5.4 prezentowane są krzywe otrzymane w wyniku kolejnego różniczkowania prądu kolektora. Wyraźnie widać na nich charakterystyczne piki Augera odpowiadające przejściu 92 LVV dla atomów krzemu (rys. 5.3) oraz przejściu 272 KLL dla atomów węgla zanieczyszczających próbkę (rys. 5.4), a także piki o energii wiązki pierwotnej.



Rys. 5.3 Widmo Augera uzyskane dla próbki krzemowej Si o potencjale $U_s = -100V$ dla trzech różnych wartości energii wiązki pierwotnej E_p .

Każda z krzywych prezentowanych na rysunku 5.3 jest nieciągła – jej pierwsza część, na której widać pik związany z potencjałem próbki jest 100 razy pomniejszona w stosunku do części zawierającej piki Augera. Dzięki temu możliwe jest prezentowanie wyników doświadczalnych o różnym poziomie rejestrowanego sygnału na jednym wykresie. Zgodnie z mechanizmem zjawiska emisji Augera położenie pików charakterystycznych zależy jedynie od wartości potencjału próbki, a nie zmienia się wraz ze zmianą energii wiązki pierwotnej, co ilustruje rysunek 5.3.

Na rysunku 5.4 widać natomiast, że zmiana potencjału próbki powoduje zmianę położenia



Rys. 5.4 Widmo Augera uzyskane dla próbki krzemowej Si naturalnie zanieczyszczonej atomami węgla C uzyskane dla energii wiązki pierwotnej $E_p = 660$ eV przy dwóch różnych potencjałach próbki.

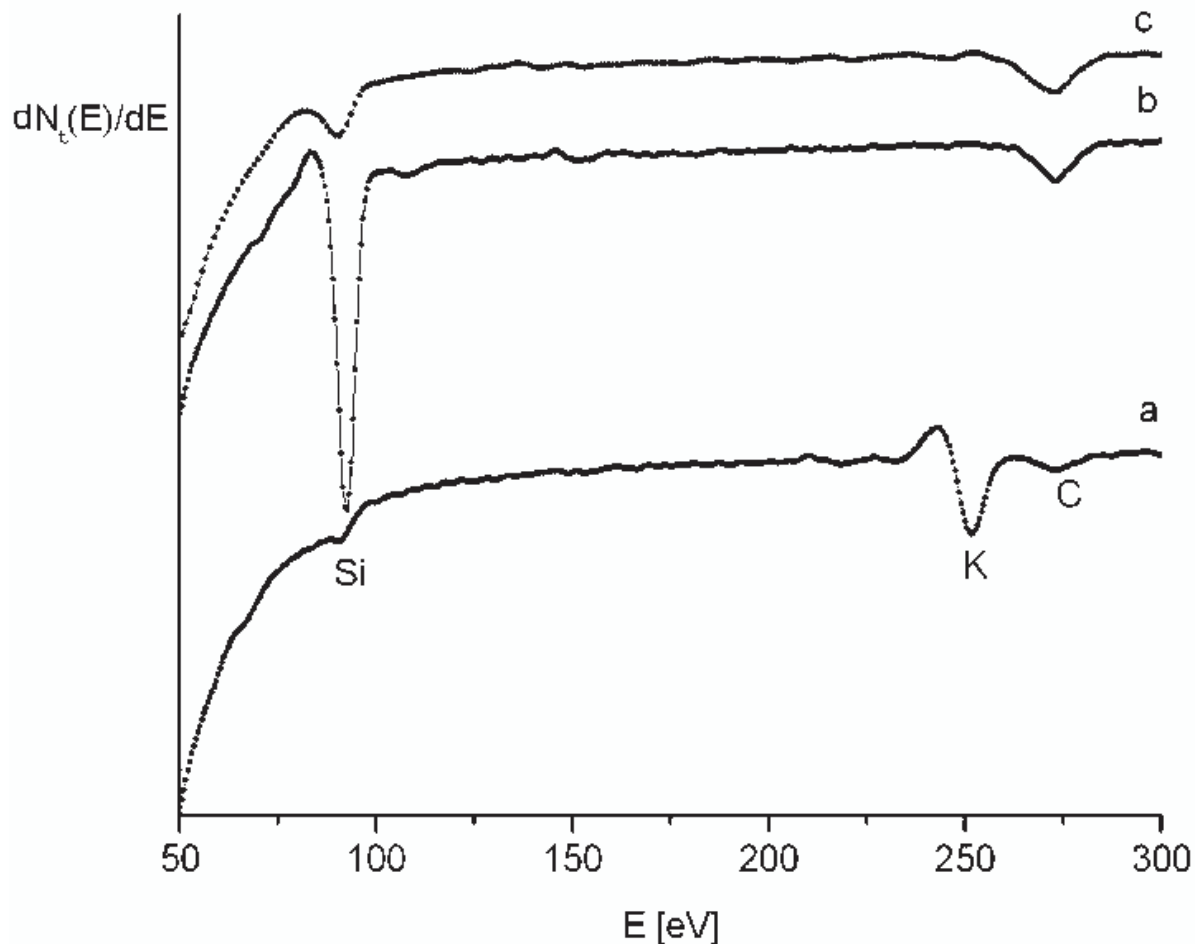
pików Augera, ale nie ma wpływu na położenie piku elastycznego.

Ostatni z wykresów – rys. 5.5 – prezentuje wyniki pomiarów spektroskopowych dla próbki Si poddanej trzem różnym procesom:

- a) naparowaniu na nią atomów potasu K, (widoczny jest także nieznaczny pik odpowiadający atomom węgla towarzyszącym procesowi naparowywania),
- b) oczyszczeniu próbki wskutek jej ogrzania,

c) pozostawieniu próbki w komorze doświadczalnej przez kilkanaście godzin w warunkach próżniowych.

Prezentowane wyniki potwierdzają, że najwyraźniejszy pik odpowiadający krzemowi otrzymywany jest dla próbki oczyszczonej, natomiast pokrycie jej innymi atomami lub pozostawienie w warunkach próżniowych przez dłuższy czas prowadzi do wyraźnej zmiany składu powierzchni.



Rys. 5.5 Widmo Augera uzyskane dla próbki krzemowej Si: **a)** po jej naparowaniu atomami potasu; **b)** po jej przegrzaniu oraz **c)** po kilkunastu godzinach w warunkach próżniowych

Tego rodzaju wyniki eksperymentalne (rys. 5.1 – 5.5) są analizowane i prezentowane przez studentów w postaci sprawozdania z wykonania ćwiczenia.

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony powyżej układ pomiarowy umożliwiający spektroskopię Augera z wykorzystaniem analizatora z polem hamującym RFA pozwala na prowadzenia pomiarów charakterystyk próbki krzemowej w warunkach wysokiej próżni. Metoda ta jest wciąż stosowana w badaniach ciała stałego i praktyczne jej przybliżenie studentom fizyki doświadczalnej jest

bardzo wartościowe. Otrzymane w wyniku realizacji doświadczenia wyniki w pełni potwierdzają zalety tej metody, to jest:

- dostarczanie informacji o składzie powierzchni próbki;
- obrazowanie opisanych w części teoretycznej mechanizmów zjawiska;
- komputerowe wspomaganie procesu pomiarowego.

Do największych trudności prezentowanego doświadczenia studenckiego, które należy pokonać przygotowując stanowisko pomiarowe należy zaliczyć:

- prowadzenie pomiarów w warunkach wysokiej próżni, co wymaga zastosowania stosunkowo kosztownych przyrządów do jej wytwarzania i kontrolowania;
- pomiar sygnałów o niewielkich wartościach nanowoltomierzem fazoczułym - przyrządem także stosunkowo kosztownym;
- rozbudowaną aparaturę pomiarową (szczególnie zasilanie katody oraz poszczególnych siatek analizatora).

Jednakże otrzymywane wyniki eksperymentalne są niezwykle kształcące i dostarczają szeregu informacji, zarówno o metodzie pomiarowej, jak i jej podstawach fizycznych. W opinii autorów wyniki pomiarów w pełni rekompensują trudy budowy i uruchomienia stanowiska pomiarowego. Autorzy uważają także, że mimo znaczącego stopnia zaawansowania aparatury oraz metody pomiarowej, stanowisko pomiarowe może zostać odtworzone w innych jednostkach naukowo-dydaktycznych jako wartościowe zadanie doświadczone. Autorzy sądzą, że prezentowane stanowisko doświadczone jest użytecznym narzędziem w zaawansowanej pracowni fizycznej, a jego wykorzystanie pozwala doskonalić umiejętności eksperymentatorskie niezbędne w pracy fizyka.

THE AUGER SPECTROSCOPY AT STUDENTS' LABORATORY

Tomasz Greczyło, Piotr Mazur, Ewa Dębowska

ABSTRACT

This paper presents AES – *Auger Electron Spectroscopy* with RFA – *Retarding Field Analyzer* designed for an advanced physics experiment to be carried out in Physics Laboratory II at the Institute of Experimental Physics, Wrocław University. The authors discuss the process of setting up the experiment and the results of measurements obtained within. Advantages and disadvantages of the apparatus are discussed along with descriptions of possible didactical uses.

LITERATURA

-
- [1] T. Greczyło, E. Dębowska, *Aparat rentgenowski w zaawansowanej pracowni fizycznej*, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, tom IX, nr 2 (2004) 118-125
 - [2] S. Mróz, *Spektroskopia Elektronów Augera*, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław 1992
 - [3] P. Auger, *Comptes Rendus* 180, 65 (1925)
 - [4] Ch. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999
 - [5] Ch. C. Chang, *Auger Electron Spectroscopy*, *Surface Science* **25**, 53-78 (1971)
 - [6] R. E. Weber, W. T. Peria, *Use of LEED Apparatus for the Detection and Identification of Surface Contaminants*, *J. Appl. Phys.* 38, 4355 (1967)