

Efectul fotoelectric extern și constanta Plank - selecția de lungimi de undă folosind filtre interferențiale

Cuvinte cheie: energia fotonului (ϵ), absorbția fotonului, efect fotoelectric extern, lucru de extracție, fotocelulă, filtru interferențial, mecanică cuantică, constanta Plank

Principiu

Efectul fotoelectric este un experiment cheie în dezvoltarea modernă a fizicii. Lumina albă de la filamentul lămpii este filtrată printr-un filtru interferențial și iluminează o fotocelulă. Energia cinetică maximă a electronului extras din materialul fotocelulei *depinde doar de frecvența luminii incidente, și nu depinde de intensitatea acestei luminii incidente*. Această lege apare a fi în contradicție cu teoria că *lumina este o undă electromagnetică*, dar devine de înțeles în cadrul teoriei că *lumina este un corpuscul*. Tensiunile de frânare U_0 pentru diferite frecvențe ale luminii sunt determinate din caracteristicile I/U ale fotocelulei, și aceste caracteristici sunt reprezentate grafic pentru frecvențele ν corespunzătoare.

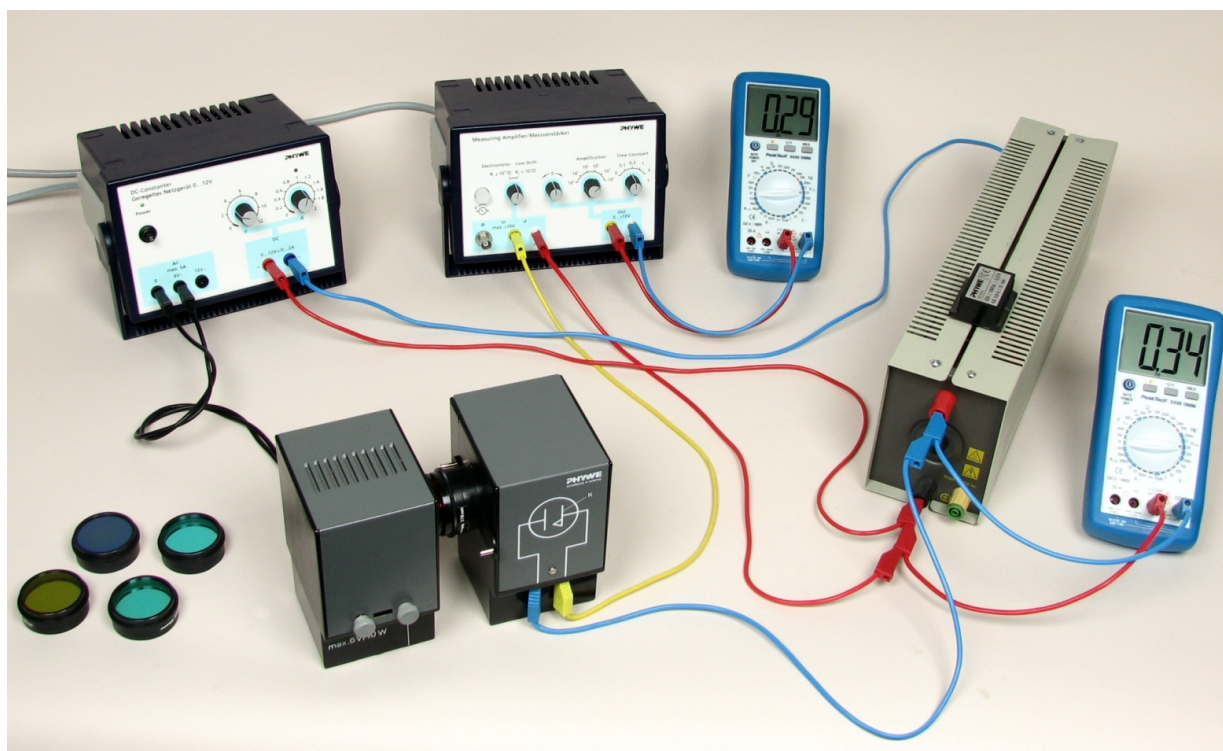


Figura 1: Montaj experimental

Echipament

Fotoceulă	1
Filtre interferențiale, set de 3 piese	1
Filtre interferențiale, set de 2 piese	1
Lampă	1
Sursă de tensiune 0...12V CC/ 6 V,12 V CA	1
Amplificator de măsură universal	1
Multimetru digital	2
Reostat	1
Cablu de conectare, mufă 4mm, 32 A, roșu, 50cm	4
Cablu de conectare, mufă 4mm, 32 A, albastru, 50cm	3
Cablu de conectare, mufă 4mm, 32 A, galben, 50cm	1
Cablu de conectare, mufă 4mm, 32 A, negru, 50cm	2
Cablu de conectare, mufă 4mm, 32 A, albastru, 100cm	1
Expert TESS, CD-ROM cu Experimente Laborator	1

Obiective

1. Determinarea experimentală a tensiunilor de frânare U_0 pentru diferite frecvențe și intensități, și reprezentarea lor grafică pentru diferite frecvențe ν
2. Calcularea constantei Plank din graficul dependenței tensiunii de frânare U_0 de frecvența luminii ν

Mod de lucru

Experimentul pentru demonstrarea efectului fotoelectric este format din: o celulă fotoelectrică, al cărei catod este iradiat cu un fascicul de lumină caracterizat de frecvența ν ; un potențiomtru care permite să fie aplicată o tensiune U celulei(pozitivă sau negativă față de catod); un voltmetru pentru a măsura tensiunea; un microampermetru pentru a măsura curentul fotoelectric.

- Montajul experimental este figurat în Fig.1
- Realizați legăturile electrice ca în Fig.2
- Reglați amplificatorul pe modul de drift redus, amplificare 10^4 și constanta de timp 0.3 s
- Verificați zeroul amplificatorului universal - cu circuitul în gol, adică fără legături la bornele de intrare ale amplificatorului reglați mișcând controlul de zero, până când la ieșire tensiunea este zero volți
- Reglați sursa de tensiune de alimentare pe potențiomtru la 3 V, și curent 1 A
- Plasați fotocelula direct în fața lămpii, îndepărtând piedica de pe apertura rotundă a fotocelulei.
- Filtrele interferențiale sunt plasate pe rând unul câte unul pe apertura de intrare a fotocelulei

- Observați tensiunea de la ieșirea fotoamplificatorului care este proporțională cu fotocurentul stabilit prin circuit și care este dependent de sensul tensiunii din partea fotocelulei.
- *Mișcând cursorul reostatului, măsurați tensiunea pentru stabilirea unui curent de zero amperi în circuit, pentru diferite frecvențe. (Tensiunea de frânare)*

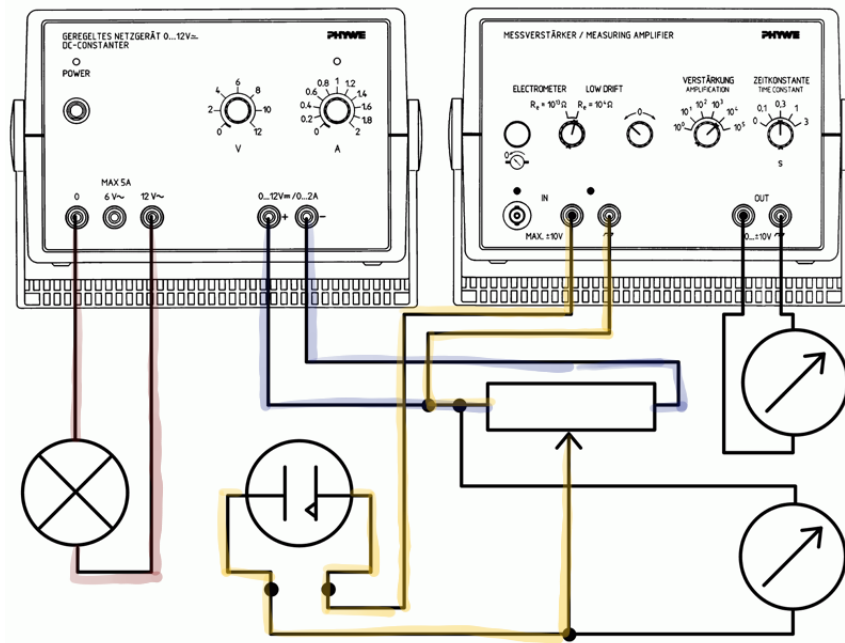


Figura 2: Legăturile electrice ale montajului experimental

Observații despre măsurători:

Amplificatorul are la intrare o rezistență de 10,000 Ohmi. Dacă amplificatorul este reglat pe amplificarea 10^4 , atunci un volt la ieșirea amplificatorului corespunde la 0,0001 V la intrare și astfel curentul este de 10 nA.

Constanta de timp este reglată pentru a evita erorile din cauza zgomotelor de fond.

Teorie și evaluare

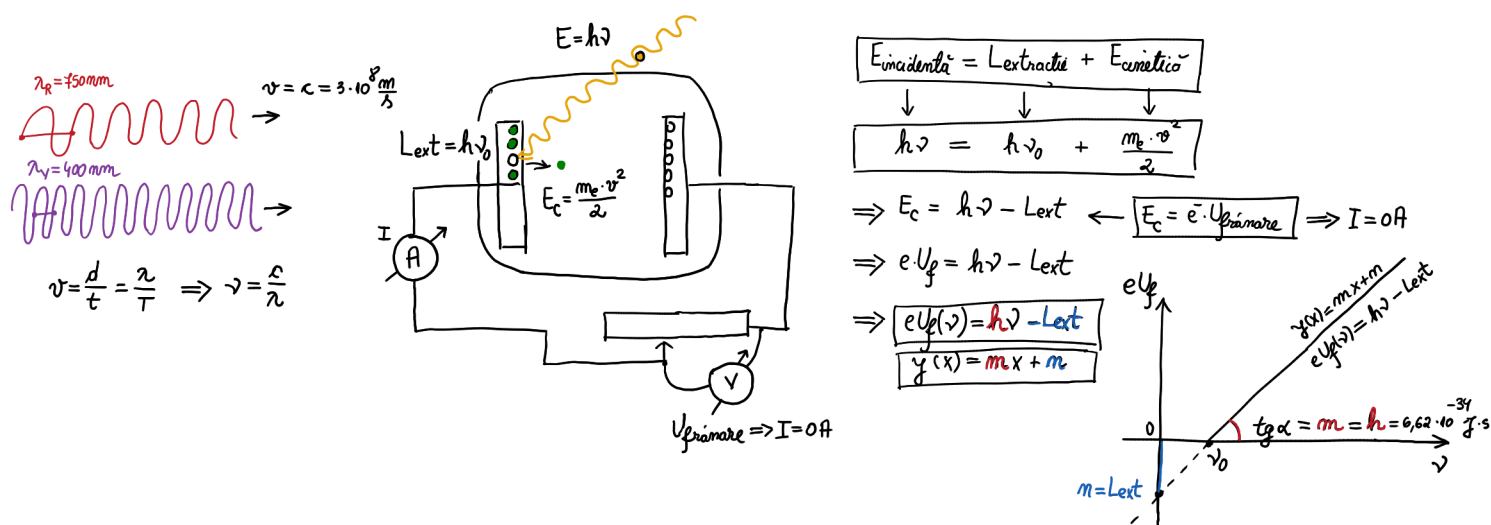


Figura 3: Schiță efect fotoelectric

Legile efectului fotoelectric:

1. *Efectul fotoelectric se produce doar pentru frecvențe ale luminii incidente ν mai mari decât o frecvență de prag ν_0 . Frecvența de prag depinde doar de materialul din care e confecționat catodul fotocelulei.*
2. *Dacă intensitatea luminii incidente crește atunci fotocurentul rezultat prin circuitul electric nu crește. Cu alte cuvinte dacă amplitudinea undei incidente este mai mare, și atunci lumina incidentă este mai intensă, asta nu înseamnă că vor fi extrași mai multi electroni din catod. Ceea ce se și observă că fotocurentul rezultat în circuitul electric nu crește.*
3. *Dacă fluxul incident de lumină pe catod este mai mare atunci fotocurentul rezultat prin circuitul electric crește. Cu alte cuvinte dacă este iluminată o suprafață mai mare, mai mulți fotoni extrag, fiecare, electroni din această suprafață, rezultând astfel un curent prin circuitul electric mai mare.*
4. *Efectul fotoelectric se produce practic instantaneu.*

Efectul fotoelectric extern a fost prima dată descris în anul 1886 de Heinrich Hertz. Curând a devenit clar că acest efect prezintă caracteristici care nu pot fi explicate de teoria clasică ondulatorică a luminii. De exemplu, când avem de a face cu o lumină mai strălucitoare, cu intensitatea luminii mai mare, atunci când aceasta lovește metalul catodului, este de așteptat conform teoriei clasice ondulatorice a luminii, ca electronii emiși din metal să reiasă mai energetici, adică să absorbă mai multă energie din lumina incidentă. Contrar, experimentele au arătat că energia maximă cu care un electron este emis depinde doar de *frecvența luminii incidente* și este *independentă de intensitate*.

Explicația teoretică a fost dată de Einstein în anul 1905. El a sugerat că lumina poate fi considerată că se comportă o particulă în anumite limite, mișcându-se cu viteză constantă (viteza luminii în vid) și care deține energia $E = h\nu$. Explicația lui Einstein asupra efectului fotoelectric, care demonstrează caracterul de particulă al fotonului, a contribuit la

dezvoltarea teoriei cuantice. Deci, efectul fotoelectric extern este un experiment cheie în dezvoltarea fizicii moderne și Einstein a obținut premiul Nobel în Fizică ”pentru descoperirea legii efectului fotoelectric.”

Obiectivul 1 - *Determinarea experimentală a tensiunilor de frânare U_0 pentru diferite frecvențe și intensități, și reprezentarea lor grafică pentru diferite frecvențe*

În interiorul fotocelulei, un catod confecționat dintr-un material cu lucru mic de extracție a electronilor din material este situat împreună cu un anod metalic într-un tub vidat. Dacă din exterior un foton cu frecvența ν lovește catodul, atunci un electron poate fi eliberat din materialul catodului (efect fotoelectric extern) și asta doar dacă fotonul care provine din exterior este suficient de energetic.

Dacă electronii emiși ajung la anod, ei sunt absorbiți și rezultă astfel în închiderea unui circuit, rezultă un fotocurent.

Efectul fotoelectric constă în interacția unui foton cu un electron. În această interacțiune impulsul și energia se conservă, electronul absoarbe fotonul și deține după interacțiune întreaga energie a fotonului absorbit, $h\nu$. Dacă energia fotonului $h\nu$ este mai mare decât lucrul de extracție L_{ext} (lucru mecanic de extracție din catod), electronul poate după interacțiune să părăsească materialul cu o energie cinetică maximă $E_c = h\nu - L_{ext}$. Acest bilanț energetic poartă numele de **ecuația Einstein a efectului fotoelectric**:

$$h\nu = L_{ext} + E_c \quad (1)$$

Energia cinetică E_c a electronilor emiși este determinată folosind un câmp electric de frânare: o tensiune electrică negativă față de catod este aplicată pe anodul fotocelulei. Acest lucru frânează electronii între catod și anod, astfel intensitatea I a fotocurentului scade pentru că nu toți electronii, care au o distribuție de energii de mișcare diferite, au o energie suficientă pentru a ajunge la anod. Valoarea tensiunii negative aplicate pentru care niciun electron nu mai ajunge la anod, deci pentru care fotocurentul devine $I=0$, se numește **tensiune de frânare** și se notează U_f .

Trasând graficul intensității I în funcție de tensiunile negative aplicate U , se observă dependența lui U_f de lungimea de undă λ a luminii incidente și independența de intensitatea luminii, conform Fig.4 și Fig.5.

Pentru că lampa este situată pe rând în contact direct, apoi la 5 cm, apoi la 10 cm, intensitatea luminii incidente descrește pe catod. Odată cu descreșterea intensității luminii descrește și intensitatea fotocurentului. *Obs:* Ținând cont de legea conservării energiei, toată energia situată pe o coroană sferică din jurul lămpii apropiată de lampă se distribuie pe o coroană sferică mai îndepărtată de lampă la mai mulți oscilatori. Deci fiecărui oscilator îi revine o porție mai mică de energie deci o amplitudine mai mică. Cu alte cuvinte, cu cât suntem mai departe de lampă cu atât amplitudinea undei luminoase este mai mică.

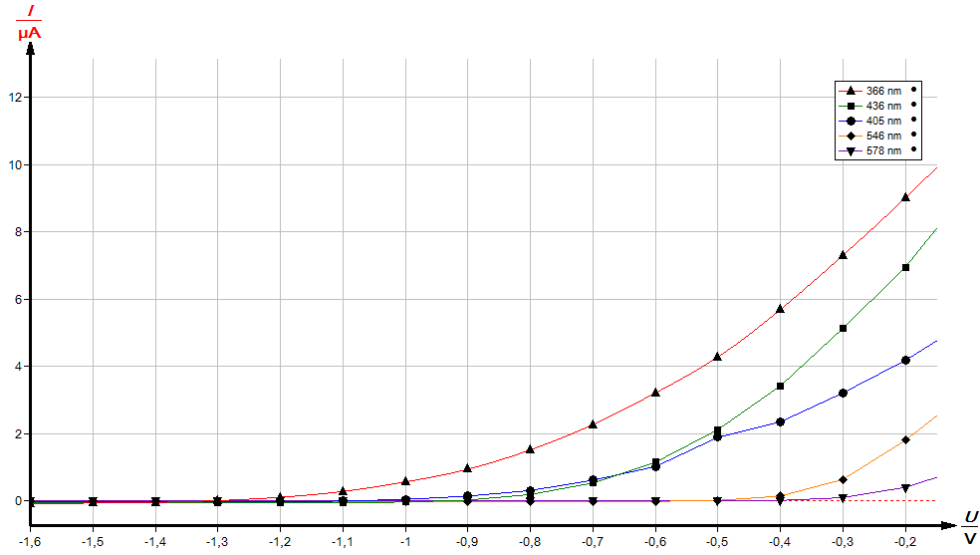


Figura 4: Intensitatea fotocurentului I în funcție de tensiunea negativă aplicată la diferite frecvențe ale luminii incidente

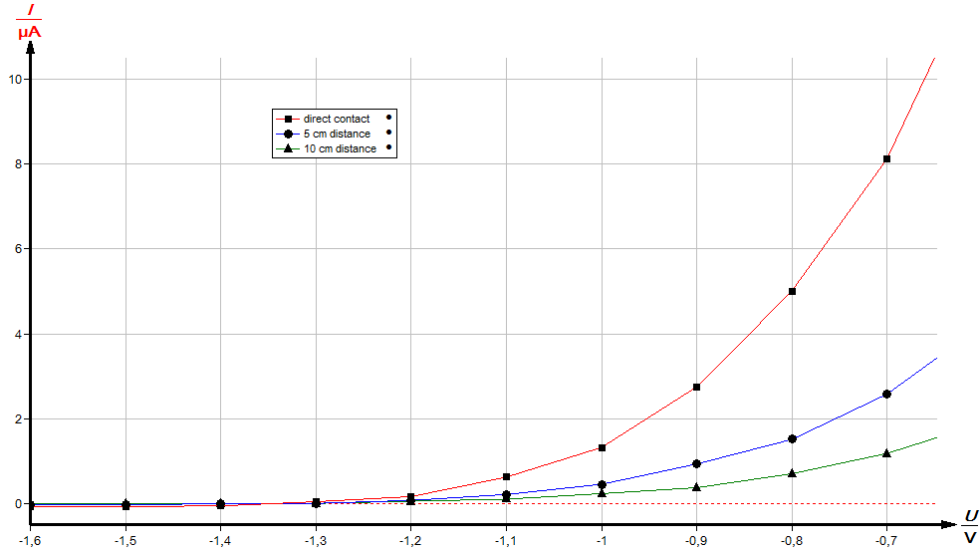


Figura 5: Intensitatea fotocurentului I în funcție de tensiunea negativă aplicată la diferite intensități obținute îndepărtând lampa la 0 cm, 5 cm, 10 cm (cu lungimea de undă constantă $\lambda = 436$ nm)

Obiectivul 2 - *Calcularea constantei Planck din graficul dependenței tensiunii de frânare U_0 de frecvența luminii ν*

Electronii pot ajunge la anod doar dacă energia lor cinetică E_{cin} este mai mare decât pierderea de energie pe care ar pierde-o în urma traversării împotriva câmpului electric generat de tensiunea negativă U plus a tensiunii de contact U_{AC} dintre anod și catod care are același sens ca tensiunea negativă, după cum se vede în Fig.6.

După cum tensiunea de contact este de același ordin de mărime cu tensiunea negativă, nu putem să o neglijăm. De aceea, nu este posibil să determinăm valoarea absolută a energiei cinetice a electronilor. Cu toate acestea, constanta Planck poate fi calculată din dependența tensiunii de frânare în funcție de frecvența luminii incidente, din cauza următoarelor considerente:

λ/nm	U_f/V	$\nu/10^{12} \text{ Hz}$
366	-1.50	820
405	-1.20	741
436	-1.00	688
546	0.50	550
578	-0.40	520

Tabela 1: Tensiuni de frânare pentru filtre interferențiale (diferite lungimi de undă)

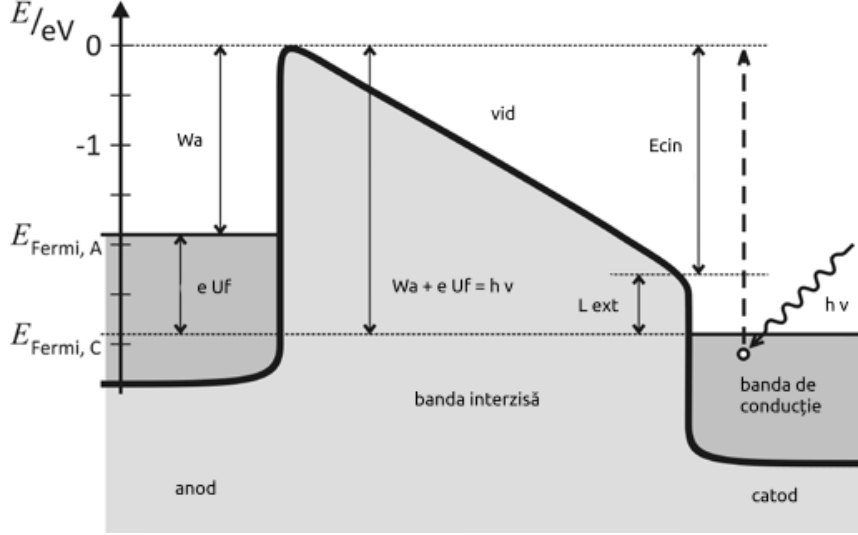


Figura 6: Diagramă energetică pentru electronii fotocelulei iluminate cu $\lambda=436\text{nm}$, $\nu=688 \text{ THz}$ și tensiunea negativă $U_0=1 \text{ V}$

La tensiunea de frânare U_f , energia cinetică E_c a electronului este egală cu energia pierdută de electron în câmpul electric eU (U incluzând tensiunea de frânare U_f și tensiunea de contact U_{AC}):

$$e(U_f + U_{AC}) = E_{\text{cin}} \quad (2)$$

Tensiunea de contact este calculată din potențialul electrochimic al anodului U_A și al catodului U_C și în urma înmulțirii ambelor potențiale cu sarcina electronului $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$ se obțin energiile W_a și W_c . W_c sau L_{ext} . Ecuația (2) devine:

$$eU_f + W_A - W_C = E_{\text{cin}} \quad (3)$$

Pentru a calcula constanta Plank, h , folosind efectul fotoelectric, comparăm (3) cu (1):

$$E_c = eU_f + W_A - L_{\text{ext}} = h\nu - L_{\text{ext}} \quad (4)$$

Lucrul mecanic de extracție nu apare în formula tensiunii de frânare U_f și ecuația 4 poate fi scrisă după cum urmează:

$$eU_f = f\nu - W_a \quad (5)$$

$$U_f = \frac{h}{e}\nu - U_A \quad (6)$$

Cum U_A este constantă, o relație liniară există între tensiunea de frânare U_f și frecvența luminii ν . Panta dependenței liniare dintre acestea reprezintă chiar constanta Plnk. Frecvența

luminii ν poate fi calculată din lungimea de undă a filtrului interferențial prin $\nu = c/\lambda$ cu viteza luminii fiind $c = 299\,729\,458$ m/s.

Panta măsurată este:

$$0.00366 \frac{V}{10^{12} \frac{1}{s}}$$

Înmulțirea cu e dă: $h = 5.59 \cdot 10^{-34} J_s$

Valoarea astfel determinată are o abatere de $\pm 20 \%$ față de valoarea din literatură :
 $h = 6.62 \cdot 10^{-34} J_s$

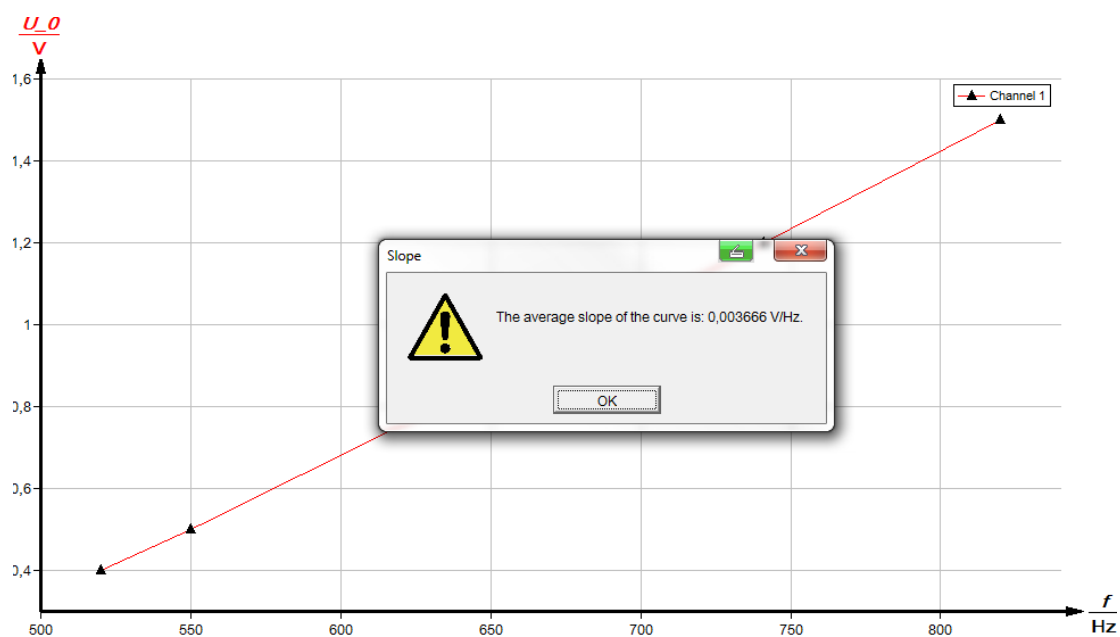


Figura 7: Tensiunea de frânare U_f în funcție de frecvența luminii incidente.

Observații

Lucrul de extracție L_{ext} sau W_C nu apare în formula în care apare tensiunea de frânare U_f . Acest lucru se petrece deoarece electronii vin din nivelul Fermi în catod și apoi trebuie să ajungă pe suprafața anodului, deci fiind deja în stare să părăsească suprafața catodului. Lucrul de extracție L_{ext} sau W_C pe de altă parte determină dacă energia fotonului este suficientă pentru a elibera un electron de pe catod. Istoric, acest prag de produce a efectului fotoelectric, această lungime de undă de prag a constituit o descoperire importantă a efectului și abia mai târziu a fost înțeleasă, atunci când spectrul de energie al electronilor eliberați a fost sistematic examinat din dependența de frecvență și intensitate.

Determinând tensiunea de frânare U_f se găsesc curbe având mici pante când traversează axa-x a absciselor (punctul de zero). O determinare exactă a tensiunii de frânare este deci complicată.

Există un curent negativ pentru tensiuni foarte negative aplicate. Acest curent este datorat fotocurentului de la anod la catod. De asemenea electronii pot fi eliberați de la anod. Numărul de electroni de acolo, deci, de asemenea depind de frecvența luminii și depind într-un mod diferit față de catod. Putem presupune, că intensitatea și sensibilitatea la lungimi de undă a fotocurentului invers de la anod la catod este diferit față de cel principal de la catod la anod. Deci deplasarea punctului de zero pentru fiecare intensitate a luminii incidente, datorată acestui efect, este diferită pentru fiecare lungime de undă. Caracteristica U/I a fotocelulei este din cauza punctului de zero o măsurătoare cu încredere mai scăzută.

Cu toate astea curentul invers, de la anod la catod, poate fi considerat neglijabil față de lucrul mecanic de extracție al catodului comparat cu cel al anodului. Acest lucru justifică neglijarea efectului curentului invers.

Altfel decalajul din cauza punctului de zero în dependența în funcție de intensitate, ar trebui să fie măsurate pentru fiecare lungime de undă și ar trebui să se ia în considerare încercarea de normalizare în raport cu intensitatea.

Din moment ce efectele distribuției de energie a electronilor se fac prezente, câștigul de precizie în această procedură nu va fi mărit pentru a recomanda în general această măsurătoare. Ambele, și lucrul mecanic de extracție pentru ca electronii să părăsească materialul și energia electronului înainte de interacție cu fotonul, nu au puncte de extreme atât de clare pentru a atinge o precizie mare pentru această metoda, care este deci limitată.

Măsurările cu radiații X sunt mai potrivite pentru o măsurare precisă a constantei Plank, h , dar efectul fotoelectric are motivele sale pentru relevanța sa istorică.

$$\lambda=366 \text{ nm}$$

U(V)	I (μA)
0.2	
0.4	
0.6	
0.8	
1	
1.2	
1.4	
1.6	
1.8	
2	
2.2	
2.3	
2.4	
2.6	
2.8	
3	

$$\lambda=436\text{nm}$$

U(V)	I (μA)
0.2	
0.4	
0.6	
0.8	
1	
1.2	
1.4	
1.6	
1.8	
2	
2.2	
2.3	
2.4	
2.6	
2.8	
3	

$$\lambda=405\text{nm}$$

U(V)	I (μA)
0.2	
0.4	
0.6	
0.8	
1	
1.2	
1.4	
1.6	
1.8	
2	
2.2	
2.3	
2.4	
2.6	
2.8	
3	

$$\lambda=546\text{nm}$$

U(V)	I (μA)
0.2	
0.4	
0.6	
0.8	
1	
1.2	
1.4	
1.6	
1.8	
2	
2.2	
2.3	
2.4	
2.6	
2.8	
3	

$$\lambda=578\text{nm}$$

U(V)	I (μA)
0.2	
0.4	
0.6	
0.8	
1	
1.2	
1.4	
1.6	
1.8	
2	
2.2	
2.3	
2.4	
2.6	
2.8	
3	

Reprezentați, pe același grafic, graficele intensității fotocurentului I în funcție de tensiunea negativă aplicată la diferite frecvențe ale luminii incidente.

$$\lambda = 436nm$$

distanța= 0 cm

U(V)	I (μ A)
0.2	
0.4	
0.6	
0.8	
1	
1.2	
1.4	
1.6	
1.8	
2	
2.2	
2.3	
2.4	
2.6	
2.8	
3	

distanța= 5 cm

U(V)	I (μ A)
0.2	
0.4	
0.6	
0.8	
1	
1.2	
1.4	
1.6	
1.8	
2	
2.2	
2.3	
2.4	
2.6	
2.8	
3	

distanța= 10 cm

U(V)	I (μ A)
0.2	
0.4	
0.6	
0.8	
1	
1.2	
1.4	
1.6	
1.8	
2	
2.2	
2.3	
2.4	
2.6	
2.8	
3	

Reprezentați, pe același grafic, graficul intensității fotocurentului I în funcție de tensiunea negativă aplicată la diferite intensități obținute îndepărtând lampa la 0 cm, 5 cm, 10 cm (cu lungimea de undă constantă $\lambda = 436$ nm)

Lungime de undă λ (nm)	Tensiuni de frânare U_f	Frecvența ν (Hz)

Reprezentați graficul $e \cdot U_f$ în funcție de frecvența ν și determinați panta graficului, adică h - constanta Plank.