

A2

FOTOELEKTRISK EFFEKT

MÅLSÄTTNING:

Här illustreras ljusets kvantisering genom undersökning av den fotoelektriska effekten. Man bestämmer utträdesarbetet för ett ämne samt förhållandet mellan Plancks konstant och elektronens laddning.

FÖRBEREDELSE:

Baskunskaper i energinivåer i atomer (kvantisering), samt en introduktion till ett fast ämnes energistruktur.

Namn.....	Kurs.....
Utförd den.....	Handledare.....
Godkänd den.....	av.....

Fysiska institutionen
Arne Rosén
Halina Roth
Halina Rubinsztein

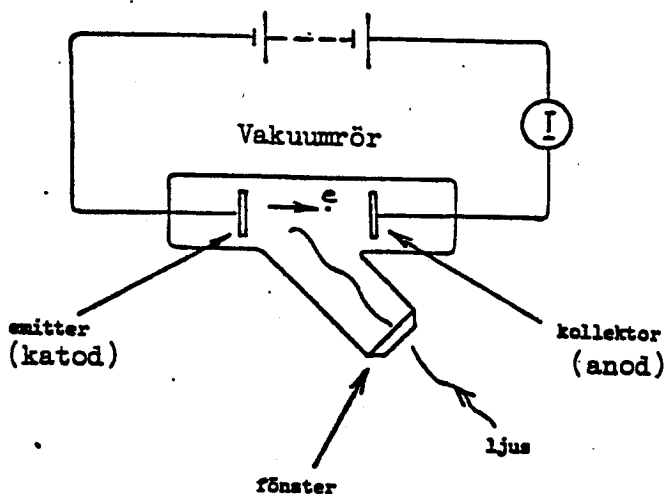
INLEDNING

H. Hertz fann år 1887 vid studium av de elektromagnetiska vågorna att positiv laddning samlas på en isolerad metallektrod då dess yta belyses med ultraviolett ljus. Ph. Lenard visade senare år 1899 att den positiva laddningen uppstod p.g.a. att elektroner s.k. fotoelektroner utsändes när ytan belystes med det ultravioletta ljuset. Dessa båda iakttagelser får betraktas som upptäckten av den fotoelektriska effekten. Det skulle dock dröja ända till 1905 innan Einstein gav en tillfredsställande förklaring av den fotoelektriska effekten.

TEORI

I. Experimentuppställning.

Den fotoelektriska effekten studeras vanligen med hjälp av ett vakuumrör med två elektroder, där den ena, katoden eller emittern, belyses med UV-ljus (fig. 1). Ström flyter då genom röret i riktning från den andra elektroden, anoden eller kollektorn, till katoden.



Figur 1. Försöksuppställning för undersökning av den fotoelektriska effekten.

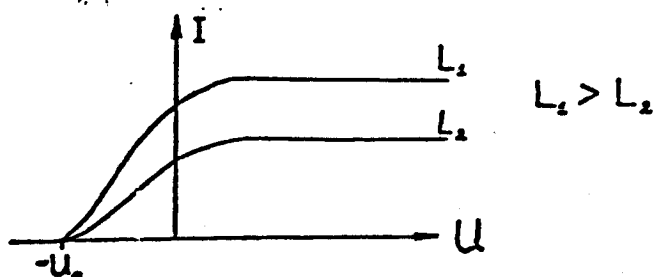
Strömmen utgörs av elektroner, som utsänds, emitteras, från emittern då denna belyses. Det vidare studiet av dessa effekter gav flera utifrån den klassiska fysikens lagar helt överraskande resultat. De experimentella resultaten kan sammanfattas enligt följande:

1. Om en växande positiv spänning läggs över röret (dvs anoden positiv i förhållande till katoden), växer fotoströmmen till ett mättnadsvärde som är proportionellt mot ljusintensiteten (L) (figur 2).
2. Om en växande negativ spänning läggs över röret upphör fotoströmmen helt vid en bestämd spänning. Denna s k spärrspänning (U_0) är oberoende av ljusintensiteten (figur 2).
3. Under en viss frekvens för ljuset, tröskelfrekvensen (ν_0), erhålls ingen fotoström hur hög ljusintensiteten än är. Spärrspänningen växer dessutom linjärt med det instrålade ljusets frekvens (figur 3).

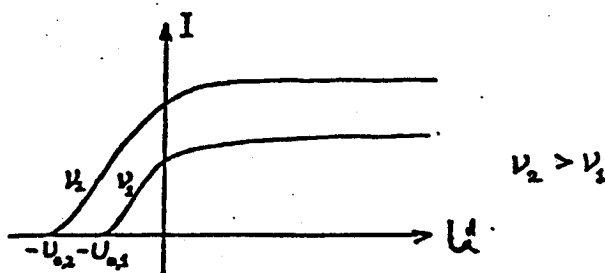
$$U_0 \propto \nu - \nu_0$$

(1)

4. Tröskelfrekvensen beror på vilka material emitter och kollektor består av.



Figur 2. Fotoströmmen som funktion av anodspänningen för två olika ljusintensiteter L_1 och L_2 .



Figur 3. Fotoströmmen som funktion av anodspänningen för två olika frekvenser ν_1 och ν_2 .

II. Tolkning av resultaten.

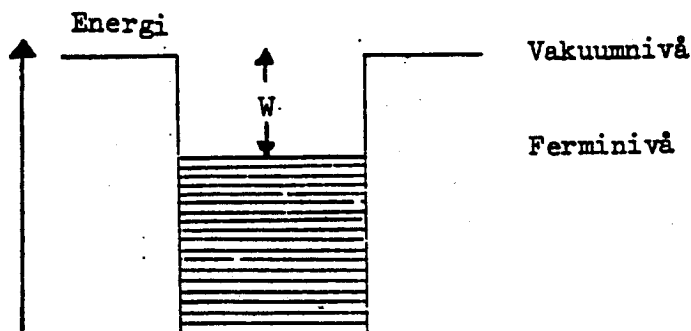
(a) Klassiskt

Den elektromagnetiska strålningen är bärare av energi och ett energiutbyte sker mellan strålningen och elektronerna i metallen, så att elektroner frigörs. Fotoströmmen bör då växa med ljusintensiteten i enlighet med punkt 1. Däremot är det helt ofattbart utifrån den klassiska fysiken att det finns en spärrspänning, under vilken fotoströmmen blir noll, samt att långvågig strålning inte förmår frigöra en enda fotoelektron, hur hög intensiteten än är (punkt 2 och 3).

(b) Kvantfysikaliskt

Lösningen på problemet gav Einstein 1905 genom att tillämpa den av Planck införda kvanthypotesen. Einstein antog att ljus består av partiklar, fotoner, var och en med energin $h\nu$, där h är Plancks konstant och ν ljusets frekvens. Under den fotoelektriska processen växelverkar en inkommande foton med en elektron i metallen och avger hela sin energi till elektronen. De exciterade elektronernas energi är därför beroende av ljusets frekvens och inte av ljusets intensitet ($= h\nu$ ggr antalet inkommande fotoner per tids- och ytenhet). Einsteins teori för den fotoelektriska effekten illustreras i figur 4.

I en metall är atomernas valenselektroner inte bundna till enskilda atomer utan de kan nu röra sig fritt omkring i metallen som s k ledningselektroner. Det fordras emellertid ett arbete för att föra en elektron från metallens inre och ut genom metallens yta.



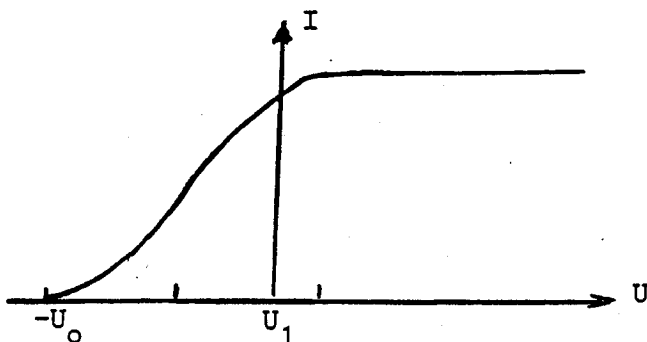
Figur 4. Energiförhållande för elektroner i en metall.

Ledningselektronerna är alltså bundna i en potentiallåda och hindras av en potentialbarriär vid metallytan från att utan vidare lämna metallen (figur 4). Om potentiallådan är av makroskopisk utsträckning, ligger de tillåtna energinivåerna mycket tätt, så tätt att man oftast i praktiken kan tala om en kontinuerlig fördelning av tillåtna tillstånd. Då ledningselektronerna skall fördelas på dessa, måste man ta hänsyn till Paulis uteslutningsprincip, enligt vilken högst en elektron kan befinna sig i ett och samma tillstånd. De tillåtna tillstånden fylls således nerifrån och upp med en elektron i varje, tills man kommit upp till ferminivån, då samtliga elektroner fått sin plats. De tillåtna tillstånden mellan ferminivån och vakuumnivån, där elektronerna har just tillräcklig energi för att lämna metallen, är obesatta. Separationen mellan vakuumnivån och ferminivån kallas metallens utträdesarbete, W .

Ljus med frekvensen ν kan excitera en elektron från ett fyllt tillstånd till ett ofyllt tillstånd, som ligger $h\nu$ högre i energi. För att elektronen skall frigöras från metallytan måste ljusets energi vara större än potentialbarriärens höjd, dvs det tillstånd den exciteras till måste ligga ovanför vakuumnivån. Om strålningen är så långvågig att fotonens energi inte uppgår till detta belopp, dvs $h\nu < W$, kan uppenbarligen ingen elektron frigöras, oberoende av ljusets intensitet. Om $h\nu > W$ emitteras elektroner. Deras rörelseenergi efter emission blir lika med skillnaden mellan ljusets energi och elektronens bindningsenergi. Maximal kinetisk energi efter emissionen får då de elektroner som exciteras från ferminivån:

$$E_k^{\max} = h\nu - W \quad (2)$$

I en fotocell (figur 1) är i vanliga fall emitter och kollektor tillverkade av olika metaller och följaktligen har de olika utträdesarbete, W_e och W_c . Om man mäter strömmen I som funktion av den pålagda spänningen U , erhålls en kurva enligt figur 5, under förutsättning att $W_e < W_c$. Kurvan är horisontell ner till U_1 , där den börjar avta och bli noll vid $-U_0$. Detta resultat skall vi nu förklara med hjälp av figur 6 som visar energiförhållanden för emitter och kollektor i en fotocell vid olika spänningar över fotocellen.



Figur 5. Fotoströmmen som funktion av anodspänningen för en fotocell där emittorn och kollektorn är tillverkade av olika material.

Figur 6a visar energiförhållandena för kollektorn och emittorn innan fotocellen inkopplas i kretsen. Eftersom kollektorn och emittorn antas ha olika utträdesarbete ligger deras Fermi-nivåer på olika höjd. Om kollektorn och emittorn sammankopplas utan att anbringa någon yttre spänning överföres ett visst antal elektroner från den ena av elektroderna till den andra, vilket innebär att Fermi-nivån för kollektorn och emittorn får samma energi enligt figur 6b.

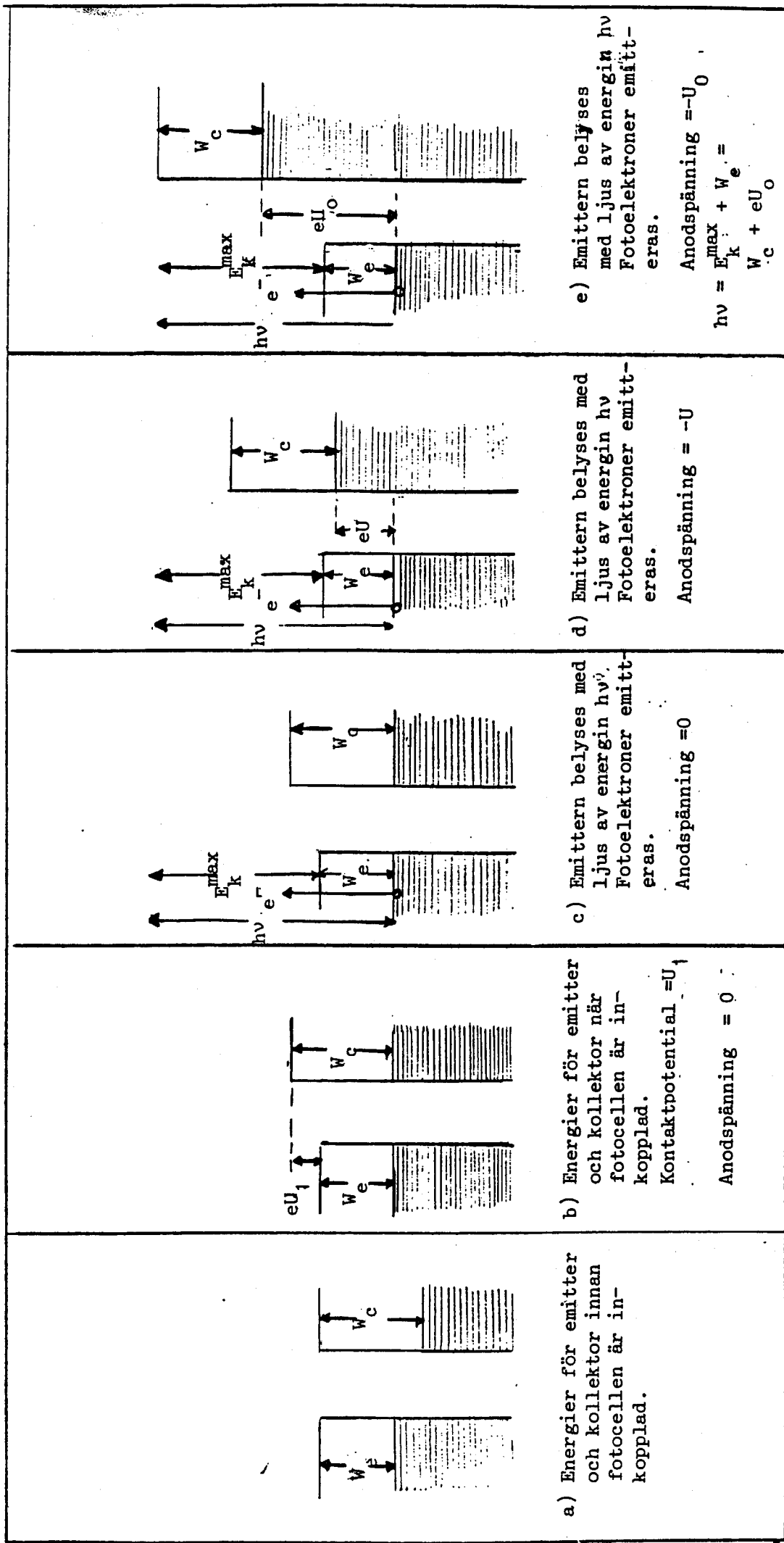
Emittorn belyses med ljus av energin $E = h\nu$. Elektroner kommer då att samlas på kollektorn och registreras som en ström I endast om de har tillräcklig energi för att ta sig genom kollektorns potentialbarriär. Om en negativ spänning läggs på kollektorn kommer kollektorns energinivåer att höjas motsvarande enligt figur 6d och 6e. Då vakuumnivån för kollektorn ligger högre än vakuumnivån för emittorn, figur 6c, kommer elektronerna successivt att stoppas tills $U = -U_0$, figur 6e då inga elektroner alls kan nå kollektorn och strömmen I blir noll.

Från figur 6b erhålles

$$\frac{1}{e} (W_c - W_e) = U_1 \quad (3)$$

som kallas kontaktpotentialen, och från figur 6e erhålles

$$h\nu = eU_0 + W_c \quad (4)$$



Figur 6. Energiförhållanden för emitter och kollektor i en fotocell vid olika spänningar över fotocellen.

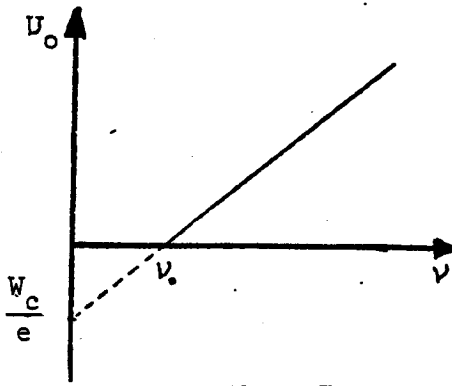
Omskrivning av ekv. (4) ger

$$U_o = \frac{h}{e} \nu - \frac{W_c}{e} = \frac{h}{e} \left(\nu - \frac{e}{h} \frac{W_c}{e} \right) = \frac{h}{e} (\nu - \nu_o) \quad (5)$$

vilket är ekvivalent med ekv (1).

$$\nu_o = \frac{W_c}{h}$$

utgör den s.k. gränshfrekvensen. Observera att gränshfrekvensen ger kollektorns, och inte emitterns, utträdesarbete.

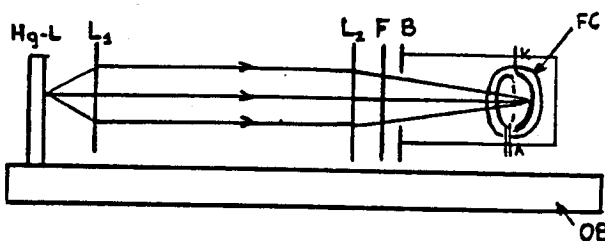


Figur 7. Spärrspänningen som funktion av ljusets frekvens för en fotocell.

UTFÖRANDE

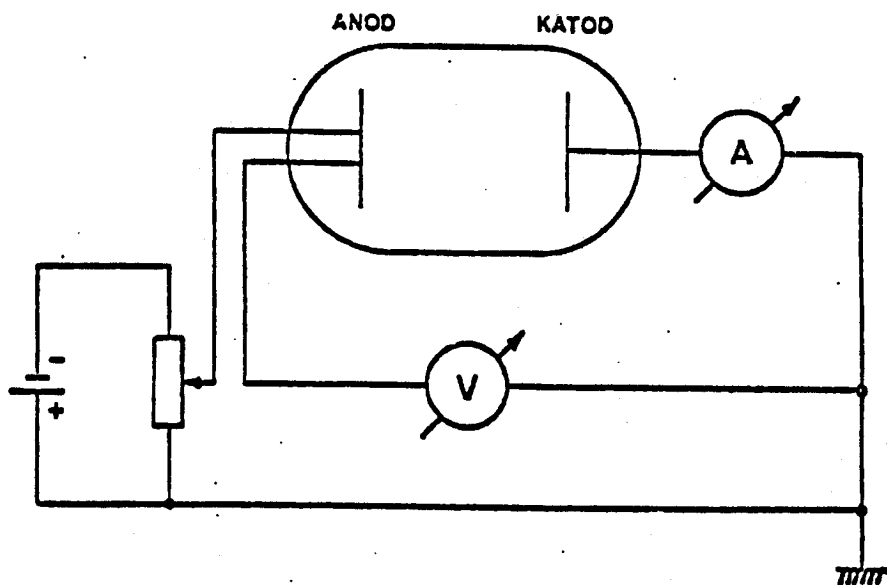
Fotoströmmen uppmättes som funktion av den retarderande spänningen för fem olika frekvenser på ljuset från en Hg-lampa. Från erhållna diagram bestäms spärrspänningen. Frekvensen varieras genom att byta filter. Utförandet göres enligt följande punkter.

1. Sätt på mätförstärkaren (uppvärmningstid 30 min)

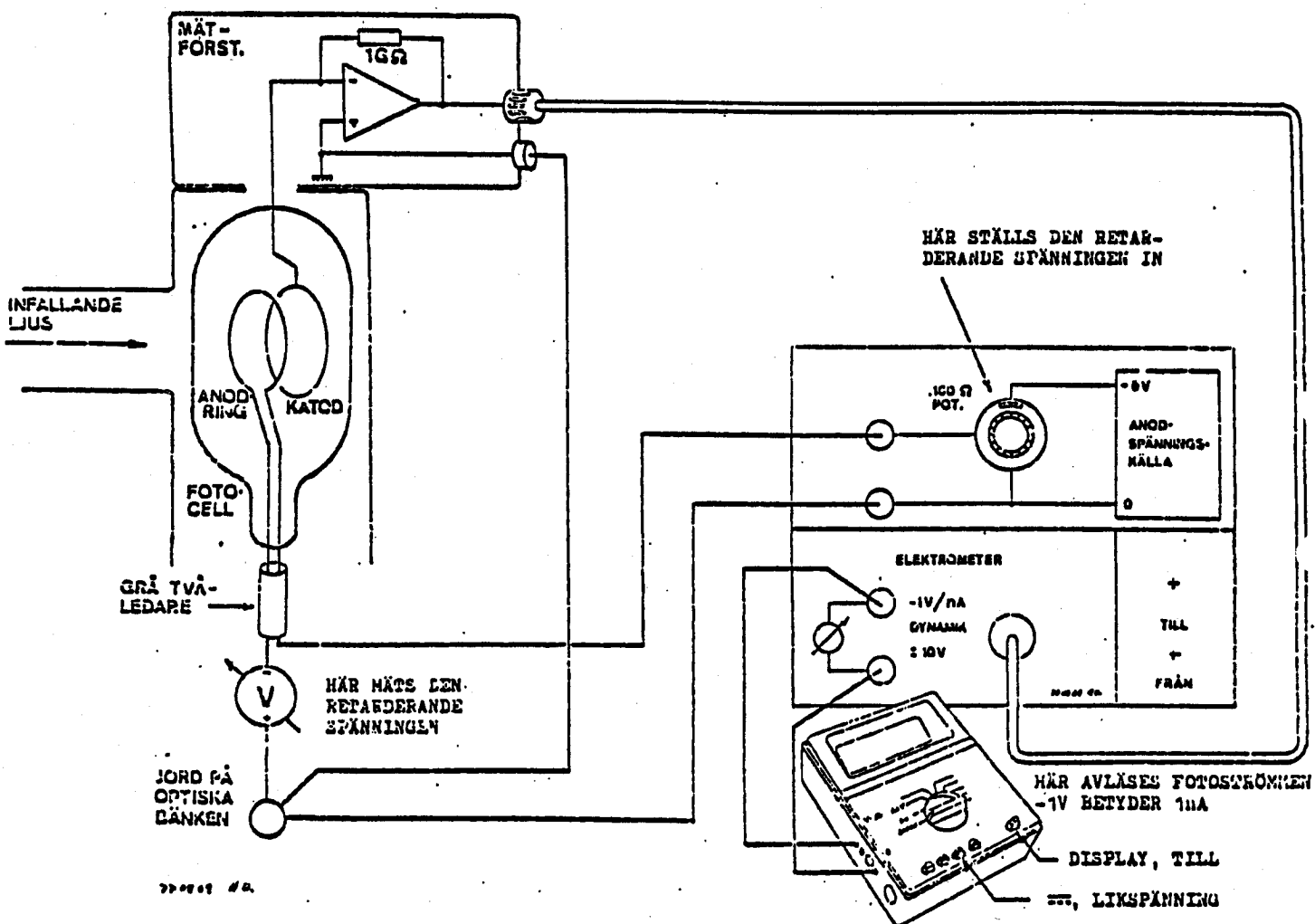


Hg-L	-	Hg-lampa
L ₁	-	lins
L ₂	-	"
F	-	filter
B	-	bländare
FC	-	fotocell
OB	-	optisk bänk

Figur 8. Försökupställning för bestämning av spärrspänningen.



Figur 9. Principschema för mätapparaturen.



Figur 10. Kopplingsschema

OBSERVERA!

Fotokatoden får aldrig utsättas för direkt belysning från Hg-lampan. Om så sker, riskerar man att överhetta fotokatoden varvid materialet förångas.

1. Stäng bländaren.
2. Sätt en kartongbit eller annat ogenomskinligt föremål mellan L_1 och L_2 (se figur 8).
3. Tänd Hg-lampan. Det tar 5-10 minuter innan den når full intensitet.
4. Koppla upp systemet enligt figur 10.
5. Slå på den digitala multimetern genom att trycka på "DISPLAY". Om siffrorna inte tänds, kontrollera nätanslutningen. Denna sker via en batterieleminator, som ansluts till en kontakt på instrumentets högra sida.
Se till att instrumentet är inställt på likspänningsmätning, område 20 V. Knappen "DC" skall vara nedtryckt.
6. Starta det kombinerade anodspännings- och strömmätningssaggregatet.
7. Drag ned anodspänningen till 0 V.
8. Observera utslaget på digitalvoltmetern, som indikerar fotoströmmen. Utslaget bör inte överstiga 5 mV.
9. Sätt 5460-Å filtret i hållaren. Detta filter ger den lägsta fotoströmmen och är därför lämpligt att använda vid en eventuell justering av det optiska systemet.

10. Tag bort kartongbiten och öppna långsamt bländaren samtidigt som fotoströmmen avläses. Vid full öppning bör den uppgå till 0,1 nA. Om inte, bör det optiska systemet justeras. Se upp, Hg-lampan blir mycket het!
11. För varje filter utföres följande:
 - a. Stäng bländaren och sätt kartongbiten mellan L_1 och L_2 . Byt filter.
 - b. Drag ned anodspänningen till 0 V.
 - c. Tag bort kartongbiten och öppna mycket försiktigt bländaren, samtidigt som fotoströmmen observeras. Denna får inte överstiga 5 nA (5 V på digitalvoltmetern) för att undvika överstyrning av mätförstärkaren.
 - d. Sätt anodspänningen på -3,5 V. En svag negativ fotoström kommer nu att indikeras, vilket är helt i sin ordning.
 - e. Mät fotoströmmen som funktion av anodspänningen med 0,5 V intervall (-3,5 V, -3,0 V, -2,5 V o.s.v.). Strömmen är i början nästan konstant och ändras drastiskt först när spärrspänningen passerats. Gå då tillbaka till föregående mätpunkt och fortsätt mätningen med 0,1 V intervall.
12. Rita ett diagram av I som funktion av U för de olika frekvenserna.
13. Rita ett diagram över U_0 som funktion av ν . Bestäm h/e och utträdesarbetet (W_c). Gör en feluppskattning.

1983-01-18

Instuderingsfrågor till laboration:

A2 FOTOELEKTRISK EFFEKT

1. Beskriv den fotocell som används för att undersöka fotoeffekten.
2. Hur ändras spärrensningen och strömmen genom cellen om ljusintensiteten minskas till hälften?
3. Hur ändras spärrensningen om ljusets frekvens minskas?
4. Vad menas med tröskelfrekvensen?
5. Beskriv energiförhållandet för elektronerna i en metall med en enkel figur.
6. Förklara utträdesarbetet för ett material.
7. Ange villkoret för att elektroner skall emitteras från en yta pga fotoeffekt.
8. Vilken frekvens och vilken energi har fotoner med våglängden 5000 Å?
9. Fotoner med energin E träffar en fotokatod med utträdesarbetet W . Hur stor motspänning U_0 måste påläggas för att ingen ström skall flyta genom cellen?
10. Utträdesarbetet kan beräknas med hjälp av spärrensningen. För vilken av elektroderna gäller detta resultat?

