

13. ВЪНШЕН ФОТОЕФЕКТ

Цел на упражнението: Запознаване с явлението външен фотоефект, основните закономерности, на които то се подчинява, и приемниците на светлина, основани на неговото действие.

Теоретични бележки.

Основни закономерности при фотоефекта

Явлението външен фотоелектричен ефект или фотоелектронна емисия се състои в отделянето на електрони от повърхността на веществото при облъчването му със светлина. Фотоефектът е открит от Херц през 1887 г. Условието, при които се проявява това явление, са изследвани експериментално от Столетов, който установява следните основни закономерности:

1. Скоростта, кинетичната енергия на отделените електрони, зависи от честотата на падащата светлина. За всяка повърхност съществува минимална честота на падащата светлина, наречена „червена граница” на фотоефекта, такава, че светлина с по-малка честота не предизвиква емисия на електрони. Светлина с по-голяма честота винаги предизвиква фотоелектронна емисия. Съществува линейна връзка между честотата на падащата светлина и енергията на фотоелектроните.

2. Скоростта, кинетичната енергия на фотоелектроните, не зависи от интензивността на лъчението.

3. Емисията на електрони започва веднага след началото на облъчването на повърхността на материала със светлина (безинерционност на фотоелектронната емисия).

4. Броят на фотоелектроните, фототокут, зависи право пропорционално от интензивността на падащата светлина.

Тези експериментални факти могат да бъдат обяснени само с квантовата теория за светлината, според която светлината се излъчва, поглъща и разпространява на порции – кванти. Според тази теория светлината взаимодейства с веществото като частица, наречена фотон, с енергия $E = h\nu$ и импулс $p = h\nu/c$ (където h е константата на Планк, ν – честотата на светлинната вълна и c – скоростта на светлината). При взаимодействието на фотона с електрона енергията на фотона изцяло се предава на електрона. Енергетичният баланс за един елементарен акт на поглъщане на фотона се описва с известното уравнение на Айнщайн, предложено от него през 1905 г.

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 + A, \quad (1)$$

където $\frac{1}{2}mv_{\max}^2$ е максималната кинетична енергия E_{\max} на електрона след отделянето му от повърхността, а A е отделителната работа, необходима за неговото отделяне от повърхността.

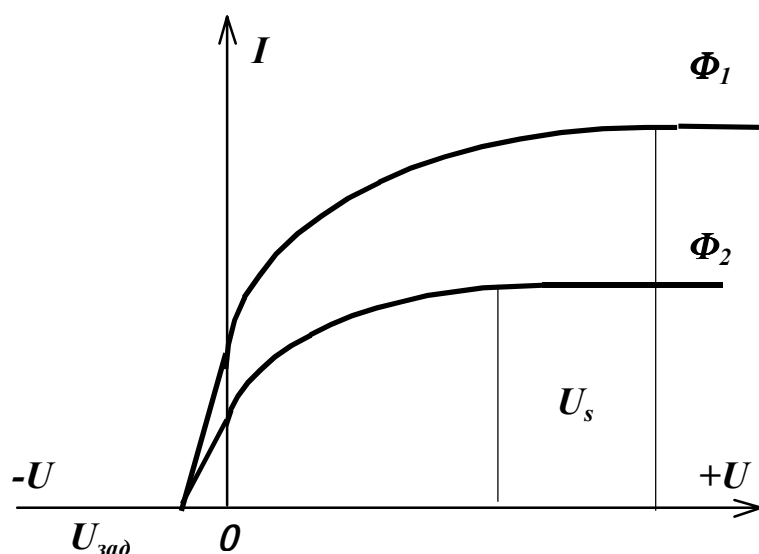
Ако енергията на фотона е по-голяма от отделителната работа ($h\nu > A$), то разликата в енергиите се отнася от излитащия електрон. Тази енергия е максималната кинетична енергия E_{\max} , която би могъл да има излитащия електрон. От друга страна, ако $h\nu < A$, е невъзможно да бъдат отделени електрони от повърхността на материала. Вероятността да бъдат погълнати едновременно два или

повече фотона е много малка при обикновените светлинни интензивности, но с откриването на лазерите и техните огромни мощности това става възможно. Тогава се наблюдава т. нар. многофотонен фотоэффект.

Фотоэффектът бива външен и вътрешен. При външния фотоэффект избитите електрони напускат повърхността на облъченото вещество, докато при вътрешния фотоэффект те остават в обема му и повишават неговата проводимост.

На принципа на външния фотоелектричен ефект се основава действието на приемниците на светлина – фотоклетки и фотоумножители, които намират широко приложение в науката и техниката.

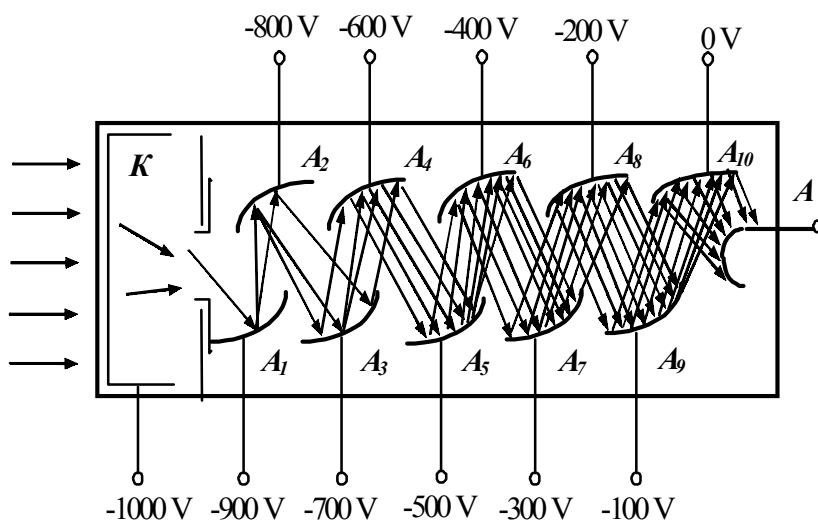
Фотоклетка. Фотоклетката представлява малък стъклен балон, въздухът от който е евакуиран до висок вакуум – вакуумни фотоклетки. Отвътре върху част от повърхността на балона е нанесен тънък слой от метал, метален окис или метал – полупроводник със сравнително малка отделителна работа, който играе ролята на фотокатод. Срещу него е разположен втори електрод – анод, обикновено с формата на пръстен, рамка или малка пластинка. Между катода и анода се създава потенциална разлика. При неосветен катод във веригата не тече ток. При осветяване на фотокатода във веригата протича ток, който е функция на интензивността на облъчващата светлина. Волтамперната характеристика представлява зависимостта на тока I във веригата на фотоклетката от приложеното напрежение U между нейния фотокатод и анода при постоянна осветеност. Луксамперната характеристика представлява зависимостта на фототока от светлинния поток Φ , падащ върху фотокатода от осветеността E ($\Phi=ES$, където S е площта на фотокатода) при постоянно напрежение. Волтамперната характеристика на вакуумната фотоклетка в общия случай има вида показан на фиг.1. В нея Φ_1 и Φ_2 са две стойности на светлинния поток, осветяващ повърхността, от която се излъчват фотоелектрони. Тъй като електроните се излъчват с начална кинетична енергия, необходимо е да се приложи отрицателно напрежение, за да се спре потока от фотоелектрони и токът да стане равен на нула (участъка $U < 0$). За напрежения над определена стойност U_s се достига насищане, т.е. всички фотоелектрони, излъчени от катода, попадат върху анода.



Фиг. 1. Волтамперна характеристика на фотоклетка.

Освен вакуумните фотоклетки, съществуват и т. нар. газови фотоклетки. При тях стъкленият балон съдържа инертен газ с малък йонизационен потенциал и налягане от 1 до 0.05 mm живачен стълб. Йонизацията на газа от ударите с излитащите от катода електрони води до усилване на фототока в тях.

Фотоелектронен умножител (фиг. 2.). Фотоумножителят е устройство за регистрация на слаби светлинни потоци. Той се състои от стъклен балон, най-често под формата на цилиндър, от който въздухът е евакуиран до висок вакуум, фотокатод – K и диноди A_1, A_2, \dots, A_{10} , към които се подава положително спрямо фотокатода напрежение.



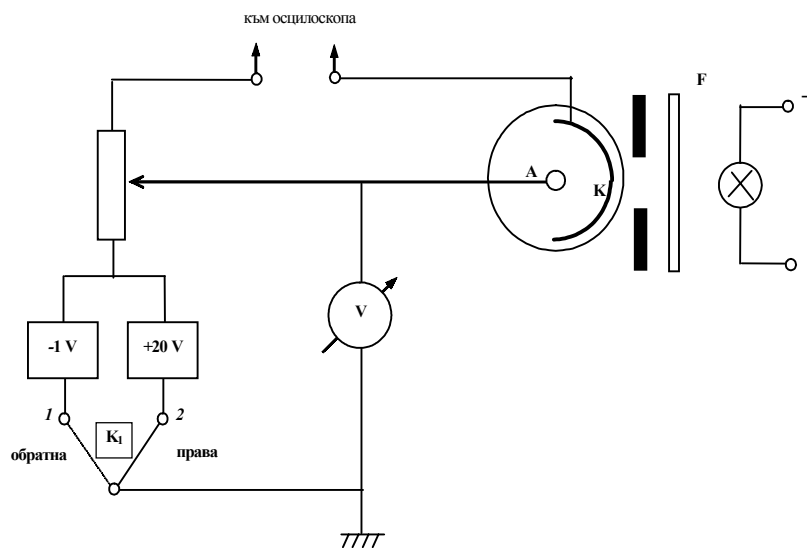
Фиг. 2. Принцилна схема на ФЕУ

От динод към динод напрежението нараства с приблизително 100 – 150 V. Фотокатодът е тънък полупрозрачен слой с дебелина няколко десетки nm от метал или метален окис с малка отделителната работа, нанесен от вътрешната повърхност на тръбата. При попадане на фотон върху фотокатода с известна вероятност (около 10%) от него се избиват фотоелектрони, които под действие на приложеното напрежение се ускоряват и попадат на първия динод. Всеки електрон избива 2 – 3 нови електрона от него с приблизително нулева енергия. Тези електрони от своя страна се ускоряват до втория динод, където броят електрони се умножава отново приблизително 2,5 пъти. Електронен умножител с 10 динода например, умножава електронния ток около $2,5^{10}$ пъти. Така устройството се превръща във фотоелектронен умножител, с чиято помощ могат да се измерват слаби светлинни потоци, преобразувани в електронен ток.

Описание на експерименталната постановка.

Необходимите уреди са: вакуумна фотоклетка, вградена в експериментална постановка, осцилоскоп, фотоумножител, източник на стабилизирано право напрежение, микроамперметър, светлинен източник – електрическа лампа, цветни филтри.

Експерименталната постановка за изследване на вакуумната фотоклетка е показана на фиг.3. Катодът К и анодът А се намират в стъклен балон. F е светлинен филтър, предназначен да пропусне само светлина с определена дължина на вълната. Напрежението, подавано между анода и катода е означено с U , а с U_I – напрежението, получено при протичането на фототока през входното съпротивление на осцилоскопа с големина $1\text{ M}\Omega$. Фототоктът се изчислява от закона на Ом ($I = U_I/R_I$). От двата изправителя, означени с „1 V” и „20 V” се получават съответно отрицателни и положителни постоянни напрежения. Прилагането на напрежения в обратна посока (– на анода) е необходимо за нулиране на фототока. С ключа K_1 се превключват токоизправителните групи, а с потенциометъра се регулира стойността на приложеното напрежение U . То се измерва с вградения волтметър.



Фиг. 3. Схема на експерименталната постановка.

Експериментални задачи

Задача 1. Снемане на волтамперна и луксамперна характеристики на фотоклетка.

Снемат се няколко волтамперни зависимости $I(U)$ при постоянна осветеност E и няколко луксамперни зависимости $I(E)$ – при постоянно напрежение U . Осветеността се мени чрез промяна на разстоянието r от източника на светлина до фотоклетката, тъй като е известно, че:

$$E = J / r^2, \quad (2)$$

където J е интензивността на източника на светлина. Единицата за измерване на осветеността E е лукс [lx]. Ако източникът на светлина не е калибриран, то се работи в относителни единици.

Ключът K_1 се поставя в положение 2 (права посока). Стойността на приложеното напрежение U се регулира с потенциометъра и се измерва с вградения волтметър. Използва се дясната част на скалата с обхват 20 V . Напрежението се изменя от 0 до 20 V (пет различни напрежения).

За снемане на волтамперната характеристика при отрицателни напрежения ключът K_1 се поставя в положение 1 (обратна посока). За измерване на приложеното

напрежение U се използва лявата част на скалата с обхват 1 V. Напрежението се изменя от 0 до -1 V.

Фототоокът се изчислява по формулата $I = U_1/R_1$, където R_1 е входното съпротивление на осцилоскопа RFT EO211, равно на 1 MΩ, а U_1 е измереното с осцилоскопа напрежение.

Построяват се семейства от зависимости $I(U)$ при пет различни напрежения (10, 12, 14, 16, 20 V) и $I(E)$ при пет различни разстояния r . Добре е да се работи на разстояния, които осигуряват еквидистантност на семейството криви $I(E)$. Да се има предвид, че $E \sim 1/r^2$. Всяка волт – амперна характеристика се измерва два пъти – при увеличаване и намаляване на напрежението. При прецизна работа различията в двете измерени величини не трябва да бъдат по-големи от точността на измерването. Данните се подреждат в таблица. Семействата криви на измерените зависимости се начертават на милиметрова хартия.

З а д а ч а 2. Определяне константата на Планк с помощта на фотоклетка.

При облъчване на метални повърхности светлината силно се поглъща и прониква на дълбочина не по-голяма от 10^{-7} m. Избитите фотоелектрони при движението си към повърхността бързо губят енергия и от повърхността излитат електрони от дълбочина от порядъка на $10^{-8} - 10^{-9}$ cm. Поради енергетичните загуби електроните са с енергия от 0 до E_{max} , като максимални енергии имат фотоелектроните, излъчени непосредствено от повърхността. При прилагане на задържащо напрежение $U_{зад}$ такава, че дори фотоелектроните с максимална кинетична енергия да не могат да достигнат до анода, е в сила равенството:

$$eU_{зад} = E_{max} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 \quad (3)$$

От сравняването на равенствата (1) и (3) следва, че

$$U_{зад} = \frac{h\nu}{e} - \frac{A}{e} \quad (4)$$

Следователно, задържащият потенциал зависи само от честотата на светлината ν и то линейно.

Точността на определянето на h зависи най-съществено от точността на определяне на задържащото напрежение. На практика прякото му измерване е затруднено, тъй като при стойности на напрежението, близки до стойността на $U_{зад}$, зависимостта $I(U)$ става нелинейна и дори е възможно фототоокът да приеме и отрицателни стойности. Това се обяснява с такива паразитни ефекти, като излъчване на фотоелектрони от анода, йонни токове и др. Затова е целесъобразно да се построи зависимостта на фототока от обратното напрежение и да се екстраполира с права линия. Пресечната точка на тази права и абсцисата дава стойността на $U_{зад}$.

„Нулата“ на осцилоскопа се определя при неосветена фотоклетка, ключът K_1 е в положение 1 и $U = 0$.

Фотоклетката се осветява през светлинен филтър (използва се набор от филтри, пропускащи определена дължина на вълната – $\lambda = c/\nu$, означена върху всеки филтър) при постоянно разстояние за даден филтър. Възможно е разстоянието да бъде различно за различните филтри. Строи се зависимостта на тока или по-точно на U_1 от приложеното напрежение U за всеки филтър. Резултатите се представят графично. През експерименталните точки се прекарва права, като пресечната и \square точка с абсцисата дава стойността на $U_{зад}$ за различните честоти на светлината ν .

Построява се зависимостта $U_{зад}(\nu)$, която е права линия (вж (4)). От нейния ъглов коефициент $\Delta U/\Delta \nu$ се определя h/e , а от отрязъка на правата с оста $U - A/e$. От

тези данни се пресмятат константата на Планк h и отделителната работа A , тъй като големината на товара на електрона e е известна ($e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

З а д а ч а 3. Волтамперна и луксамперна характеристика на фотоумножител

Катодът на използвания фотоумножител (ФЕУ–26) се свързва със стабилизирани източник на напрежение, а анодът се заземява. Работи се при напрежение 150 – 300 V. Източникът на светлина (електрическа лампа) да не се приближава на разстояния по-малки от 40 cm.

Построяват се зависимостите $I(U)$ при пет различни стойности на напрежението (в интервала 150 – 300 V) и пет различни разстояния, както в зад. 1.