

## УПРАЖНЕНИЕ 2. ФОТОЕФЕКТ: ОПРЕДЕЛЯНЕ КОНСТАНТАТА НА ПЛАНК

**Цел на упражнението** е експерименталното определяне на една от фундаменталните константи във физиката на микросвета – константата на Планк.

### Теоретични бележки

Идеята за кванта електромагнитно излъчване е въведена през 1900 г. от Планк във връзка с обяснение на топлинното излъчване. Планк постулира, че атомните осцилатори излъчват енергия

$$E = n\varepsilon_0 \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

а минималната порция енергия е пропорционална на честотата

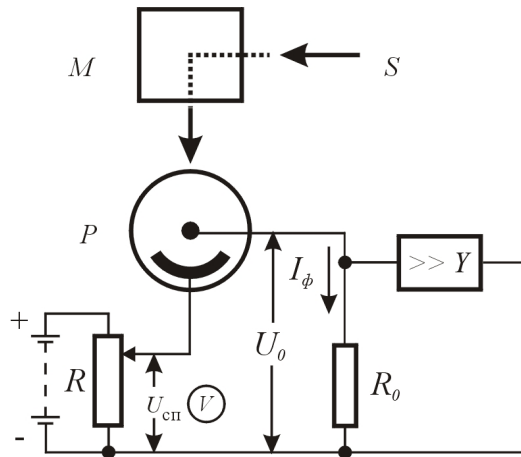
$$(II.4) \quad \varepsilon_0 = h\nu.$$

Константата на пропорционалност, известна като *константа на Планк*, се появява във всички изрази, описващи законите на микросвета. Големината на тази универсална константа е  $h = 6,67 \cdot 10^{-34}$  J.s. Често се използва и редуцираната константа на Планк

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$$

*Фотоефектът* представлява избиване на електрони от веществото под действие на електромагнитно излъчване като светлина (от видимата или УВ област), рентгенови лъчи или  $\gamma$ -лъчи. При *външния фотоефект* фотоелектроните се избиват от зоната на проводимост, т. е. от почти свободни електрони, докато при *вътрешния фотоефект* това са електрони от дълбоко разположените атомни слоеве, при което получената ваканция незабавно се запълва с електрони от по-горните слоеве и се излъчват характеристични рентгенови лъчи.

*Външният фотоефект* може да се изследва с фотоклетка Р, която представлява вакуумен прибор с два електрода – анод и катод (фиг. II.3). Светлина с точно определена честота, получена от монохроматора М, влиза през прозрачната стена на фотоклетката и пада върху катода, от който избива електрони. Приложеното напрежение между него и анода насочва електроните към анода (колектора) и във външната верига протича ток  $I_{\text{ф}}$  (фототок). Основните закономерности при фотоефекта са следните:



Фиг. II.3. Опитна постановка за определяне на константата на Планк

1. Съществува гранична честота на светлината  $\nu_{\text{гр}}$  (или  $\lambda_{\text{гр}} = c/\nu_{\text{гр}}$ ), под която за дадения материал на катода не може да се наблюдава фотоефект, независимо от интензитета на светлинния поток.

2. Фотоелектроните напускат катода с енергии от 0 до  $T_{\text{max}} = \frac{1}{2}m_0v_{\text{max}}^2 = eU_{\text{сп}}^{\text{max}}$ , където  $U_{\text{сп}}^{\text{max}}$  е спиращият потенциал, при който фототокуът става 0. Максималната енергия зависи линейно от честотата и не зависи от плътността на светлинния поток.

3. При фиксирана честота  $\nu$  броят на фотоелектроните за единица време е пропорционален на интензитета на светлината.

4. Фотоелектроните се появяват около  $10^{-9}$  s след облъчването със светлина, т. е. практически мигновено.

Обяснението на тези закономерности дава през 1905 г. Айнщайн, който разглежда светлината като корпускули с енергия  $E = h\nu$ , наречени от него *фотони*. Фотоните предават енергията си на електрон от веществото, чиято кинетична енергия е

$$(5) \quad T = eU_{\text{сп}}^{\text{max}} = h\nu - A.$$

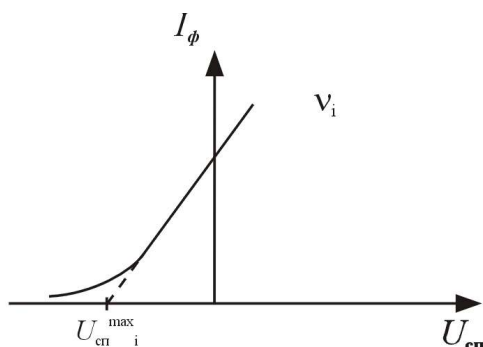
Тук  $A$  е отделителната работа на електрона. Този израз всъщност представлява законът за запазване на енергията. Граничната честота (или дължина на вълната) зависи от отделителната работа на метала, от който е направен катодът на фотоклетката:

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{c}{\nu_{\text{гр}}} = \frac{ch}{A}.$$

Ако в този израз заместим  $A$  с една типична стойност  $2 \text{ eV}$ , за  $\lambda_{\text{гр}}$  се получава  $\sim 600 \text{ nm}$ , което е в червената област на видимия спектър, затова  $\lambda_{\text{гр}}$  се нарича *червена граница на фотоефекта*.

### Опитна постановка

Опитна проверка на закона на Айнщайн за фотоефекта и определяне константата на Планк може да бъде направена с показаната на фиг. II.3 постановка. Светлина с точно определена честота се получава от *монохроматор*. Тя влиза през прозорчето на фотоклетката и се измерва волт-амперната характеристика – зависимостта на фототока  $I_{\phi}$  от спиращото напрежение  $U_{\text{сп}}$ . Типична зависимост е показана на фиг. II.4.



Фиг. II.4. Зависимост на фототока  $I_{\phi}$  от спиращото напрежение  $U_{\text{сп}}$  при определена честота  $\nu_i$

Вижда се, че веднага след подаване на отрицателно напрежение фототокът започва плавно да спада. Ако всички електрони имаха една и съща енергия, при определена стойност на спиращото напрежение фототокът би станал равен на нула рязко и без преход. Зависимостта на това максимално спиращо напрежение от честотата следва от уравнение (II.5):

$$(II.6) \quad U_{\text{сп}}^{\text{max}} = \frac{h\nu}{e} - \frac{A}{e}.$$

Електроните обаче излизат от различни дълбочини в материала на катода и под различни ъгли, така че техните загуби на енергия са различни. Освен това обикновено

двата електрода на фотоклетката са направени от различни метали и между тях се появява контактна потенциална разлика, чиято стойност зависи и от дебелината на окисния слой върху повърхността на металите. Големината на максималния спиращ потенциал  $U_{\text{сп}}^{\text{max}}$  не може да се определи много точно, защото фототокуът не спира рязко при даден потенциал, а особено при по-високи честоти и по-слаб интензитет на линиите намалява много бавно. В такъв случай трябва да се вземе подходящо подобрена екстраполирана стойност.

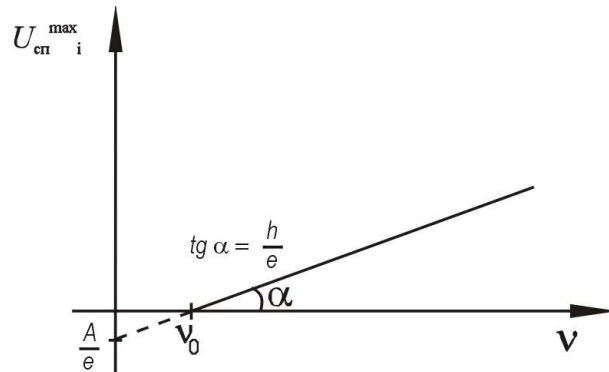
### Изпълнение на упражнението

Ако се работи със светлина с непрекъснат спектър, най-напред трябва да се построи *дисперсионната крива на монохроматора*, която представлява зависимостта на дължината на вълната от скалните деления на барабана  $N$ , въртящ стъклените призми,  $\lambda = f(N)$ . Тази крива се построява с помощта на източник на светлина с линеен спектър с известни дължини на вълните на линиите, напр. живачна лампа.

Измерването на дисперсионната крива може да се избегне, ако се работи със светлина с линеен спектър, напр. също от живачна лампа. В този случай обаче, броят на точките, с които се проверява уравнението на Айнщайн (II.6), е силно ограничен. Практически функцията  $U_{\text{сп}}^{\text{max}} = f(\nu)$  се построява само върху четири точки, получени чрез зависимостта на фототока от спиращото напрежение  $U_{\text{сп}}$  за четирите най-ярки във видимата област линии: жълта, жълто-зелена, синя и виолетова (червената линия в спектъра на живака е с честота под граничната за фотоефект). Ако се работи с лампа с нагряване (непрекъснат спектър), чрез барабана на монохроматора и входния му процеп се подбира монохроматична светлина с малко отклонение  $\Delta\nu$  около средната стойност  $\nu_0$ . Последната се определя от дължината на вълната, получена опитно чрез дисперсионната крива. За получаване коефициентите на правата (II.6) с по-голяма точност се определят спиращите напрежения  $U_{\text{сп}}^{\text{max}}$  за 10–15 честоти. Проверката на уравнението на Айнщайн за фотоефекта става, като на графика се нанасят стойностите на  $U_{\text{сп}}^{\text{max}}$  в зависимост от честотата  $\nu$  на светлината – фиг. II.5. Тъй като се очаква линейна зависимост, ъгловият наклон и пресечната точка на правата с абсцисната ос се определят по метода на *линейната регресия*. Ако някоя точка лежи много далеч от правата, очевидно определянето на  $U_{\text{сп}}^{\text{max}}$  не е коректно и измерванията за тази честота трябва да се повторят. Ъгловият наклон на правата дава отношението  $h/e$ , така че

стойността на константата на Планк се получава от него с умножение по  $e$ . Работата за извличане на електрон от метала  $A$  се определя от пресечната точка на правата с ординатната ос, а пресечната точка с абсцисната ос дава  $\nu_{\text{гр}}$ . От известната стойност на  $h$  се оценява относителната неопределеност

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{h_{\text{теор}} - h_{\text{изм}}}{h_{\text{теор}}} \cdot 100 \text{ \%}.$$



Фиг. II.5. Зависимост на  $U_{\text{сп } i}^{\max}$  от честотата  $\nu$