Martin Beránek, 3.F

# Úloha A9 – Studium fotoelektrického jevu. Určení Planckovy konstanty.

Pracovní úkol:

1. Změřte voltampérové charakteristiky fotonek GKE a GKV.
2. Rozborem charakteristik zjistěte, která z nich je vakuová a která plynem plněná.
3. Změřte VA charakteristiky vakuové fotonky pro záporné hodnoty anodového napětí.
4. Zpracováním výsledků měření určete hodnotu Planckovy konstanty.

Teorie: Rozdělení energií elektronů v kovu seřídí Fermi-Diracovou statistikou. Při absolutní nule je energie všech elektronů menší než Fermiho energie $u_F$. V případě kovu při pokojové teplotě existují i elektrony s větší energií, ale jejich počet je zanedbatelný. Aby elektrony mohly opustit kov, potřebují mít dost energie na vykonání výstupní práce. Tato výstupní práce je větší, než Fermiho energie, takže za běžných podmínek je uvolňování elektronů z kovu zanedbatelné. Pokud ale nějakým způsobem zvýšíme energii elektronů, mohou elektrony opouštějící kov přenášet měřitelný elektrický proud.

Zvýšení energie elektronů je možné provést buďto zahřátím kovu, kdy se (přesně podle Fermi-Diracovy statistiky) zvětší množství elektronů, které mají dostatečnou energii pro opuštění kovu. Druhou metodou, která je použita při měření této úlohy, je osvětlení vzorku. Dopadající fotony mohou zvýšit energii některého z elektronů a ten tím získá dostatečnou energii pro opuštění kovu.

Aby k tomuto jevu (vnějšímu fotoefektu) došlo, je třeba, aby energie dopadajících fotonů byla větší, než rozdíl mezi výstupní prací a Fermiho energií. Pokud dále vytvoříme kolem kovu elektrické pole, mohou být elektrony usměrňovány v dalším pohybu po opuštění kovu.

U zkoumaných součástek – fotonek – je katoda vyrobena z kovu s poměrně malou výstupní prací elektronů a je nanesena na vnitřní stěně baňky. Uvnitř baňky je anoda tvořená kovovou smyčkou. Pokud katodu osvětlíme, budou se z ní uvolňovat elektrony a některé dopadnou na anodu. Tím vznikne proud, který lze měřit. Když navíc vytvoříme potenciálový spád od katody k anodě (tedy připojíme fotonku ke zdroji napětí), bude na anodu dopadat větší množství elektronů a hodnota fotoproudu vzroste. Vzniklé elektrické pole totiž směřuje k anodě i takové elektrony, které by na ni jinak nedopadly. Při určité hodnotě napětí už na anodu dopadají všechny vzniklé elektrony a fotoproud při dalším zvyšování napětí už neroste. Tento proud nazýváme nasyceným.

V případě fotonky, která není vakuová, ale je plněná plynem, dojde ještě k dalšímu zvýšení proudu v důsledku ionizace. Tento typ fotonek ale není vhodný pro následující měření.

Při opačně polarizovaném napětí mezi anodou a katodou vzniknou následující efekty. Předně musí mít elektron opouštějící katodu dostatečnou energii, aby se vůbec mohl dostat ke katodě. Dále jsou elektrony místo směrování k anodě od ní elektrickým polem odkláněny. Rozdělení energií elektronů opouštějících kov odpovídá rozdělení uvnitř kovu, takže už podle prvního zmíněného efektu bude fotoproud s rostoucím záporným napětím klesat. Druhý efekt vybírá s rostoucím napětím stále menší rozsah směrů rychlostí elektronů. Elektrony, jejichž rychlost má jiný směr na anodu nedopadnou, protože budou vzniklým polem odchýleny.

Z předchozího plyne, že fotoproud bude s rostoucím záporným napětím klesat a bude existovat jistá hodnota napětí, při které proud klesne na nulu. Při experimentu se ale objeví ještě fotoproud elektronů opouštějících anodu a směřujících ke katodě. Z toho důvodu se naměřený proud bude s rostoucím napětím limitně blížit k nasycené hodnotě fotoproudu z anody.

Podle předchozího odstavce lze zjistit mezní energii elektronů opouštějících katodu. Tato energie odpovídá energii světelných kvant (zmenšené o výstupní práci a zvětšené o Fermiho energii) a podle Einsteinova zákona je energie fotonů přímo úměrná jejich frekvenci. Konstantou úměrnosti je Planckova konstanta. Protože energie fotonů se liší od energie elektronů o nějakou konstantu, bude platit, že energie elektronů roste lineárně s frekvencí fotonů a směrnici této závislosti udává právě Planckova konstanta.

Vzhledem k tomu, že konkrétní závislost fotoproudu na napětí je dána mimo jiné i geometrií fotonky, není dost dobře možné použít nějakou teoretickou závislost a nafitovat ji na naměřená data. To, spolu s existencí anodového proudu nepříznivě ovlivní přesnost měření.

Měření: Nejprve jsme proměřil voltampérové charakteristiky dvou fotonek v propustném směru. Jak je jasně vidět z grafu 1, je fotonka označená GKV vakuová a GKE plněná plynem. Pro další měření tedy použiji fotonku GKV.

Dále jsme měřil voltampérovou charakteristiku v závěrném směru. Pro osvětlení jsem použil rtuťovou výbojku a monochromatický filtr. Tím jsme získal pět různých vlnových délek.

V každém případě jsme se pokusil určit hodnotu fotoproudu z anody. Nasycený proud se blížil ke 150 pA, ale při napětí odpovídajícím energii fotoelektronů emitovaných z katody nelze tento proud považovat za nasycený.

Při zpracování výsledků jsme pro proložení použil nafitovaný polynom druhého stupně. Protože nemám k dispozici žádnou teoretickou závislost, použil jsme nejjednodušší možnou funkci, která může naměřeným hodnotám odpovídat. Navíc jsme při fitování nebral v úvahu hodnoty pro vyšší napětí, kde se silně projevuje efekt fotoproudu z anody. Jako hledanou nulovou hodnotu beru místo, kde tato funkce dosahuje hodnoty $-$ $-100$ pA.

Naměřené hodnoty i nafitované funkce jsou zobrazeny v grafu 2. Hodnoty při osvětlení světlem vlnové délky 405 nm se mi nepodařilo proložit vhodnou funkcí tak, aby zároveň klesla pod $-100$ pA, takže je z dalšího zpracování vyřazuji. Zbývají čtyři hodnoty napětí, které by měly být lineárně závislé na frekvenci světla $\nu$ (přičemž platí $\nu = c/\lambda$, kde $c$ je rychlost světla ve vakuu a $\lambda$ vlnová délka).

Tyto hodnoty jsou spolu s příslušnou nafitovanou přímkou vyneseny v grafu 3. Po provedení lineární regrese v programu Gnuplot vychází hodnota směrnice (a tedy i Planckovy konstanty)

$$h = (6{,}1 \pm 0{,}4) \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js}\,.$$

Diskuze: Rozdíl Va charakteristik mezi vakuovou fotonkou a fotonkou plněnou plynem se projevil dle teoretických předpokladů. Skok VA charakteristiky u vakuové fotonky je patrně způsoben tím, že fotokatoda není jednoduchá destička z jednoho kovu, ale má složitější strukturu i složení. Nicméně je jasně vidět, že křivka označená GKV se blíží k nějaké limitní hodnotě proudu a naopak křivka GKE po chvilkovém zpomalení nárůstu začala opět prudce stoupat.

Měření Planckovy konstanty touto metodou bylo dost obtížné, protože naměřené charakteristiky připomínají spíš pozvolný pokles, který se limitně blíží k hodnotě okolo $-150$ pA, než křivku, která by v konkrétním místě protínala vhodnou hodnot proudu. Už samotný fakt, že hledám, kde proložená křivka protne hodnotu $-100$ pA je silně zjednodušujícím předpokladem. Ovšem žádnou jinou možnost určení fotoproudu vycházejícího z anody nemám. Nejistotu v „kritické“ hodnotě proudu jsme se pokusil vyjádřit pomocí neurčitosti energií v grafu 3. Další podstatná chyba může být způsobena metodou prokládání naměřených hodnot. Ale protože nemám žádný rozumný teoretický model, je toto nejlepší možný způsob. Chyba vzniklá z tohoto není ve výsledku započítána a neumím ji odhadnout.

Pro přesnější měření by byla vhodná –jak je zmíněno i ve studijním textu – aparatura s malou fotokatodou umístěnou ve středu duté koule tvořící anodu. Tím by bylo zajištěno, že všechny elektrony, které mají dostatečnou energii dopadnou na anodu a odpadly by problémy plynoucí z geometrie experimentu, které jsem zmiňoval v teoretické části. Závislost fotoproudu na napětí by pak byla dána pouze rozdělením energií elektronů v katodě. Toto rozdělení je dobře známé, takže by bylo možné fitovat přesnou funkci.

Závěr: Podle VA charakteristik vynesených v grafu 1 jsem rozlišil vakuovou fotonku od fotonky plněné plynem. Pro vakuovou fotonku jsme změřil voltampérové charakteristiky v závěrném směru při osvětlení světlem různých vlnových délek. Výsledky jsou v grafu 2. Na základě těchto údajů jsme se pokusil určit Planckovu konstantu. Získal jsme hodnotu $(6{,}1 \pm 0{,}4) \cdot 10^{-34}$ Js. V uvedené odchylce ovšem nejsou zahrnuty všechny chyby plynoucí z realizace experimentu. Změřená hodnota se od tabulkové liší asi o osm procent.

Literatura:

[1] Brož, Voskovec, Valouch: Fyzikální a matematické tabulky, SNTL, Praha 1980
[2] A. Beiser: Úvod do moderní fyziky, Academia, Praha 1978
[3] text k úloze A9