

3. Időpont: 2024. február 22. 16:00-19:00, 4 óra foglalkozás

Hely: Baár-Madas Református Gimnázium Budapest Lorántffy Zsuzsanna u. 3.

Ezen a foglalkozáson a detektor fizikájának kicsit távolabbi megközelítésével, a Planck-állandó egy lehetséges kimérésével foglalkoztunk. A mérést különböző színű LED-ek (Light Emitting Diode) nyitó irányú feszültségének meghatározásával mérhetjük.

Ilyen feladat volt az idei Szilárd Leó versenyen is.

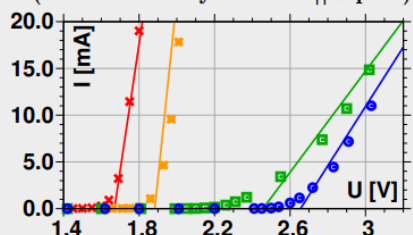
9. Feladat:

A LED fénykibocsátása akkor történik, amikor nyitóirányú áram folyik, és az elektronok „visszaugranak” alacsonyabb energiájú állapotba a tiltott sávon keresztül. A Planck-állandó meghatározását célzó iskolai kísérletben változtatható feszültségű tápegységre nyitóirányban egy LED-et kapcsoltak, és több U feszültségen megmérték a diódán átfolyó $I(U)$ áram nagyságát. Különböző színű LED-ekkel kísérletezve, a táblázatban mellékelt nyitófeszültségeket mérték. Az $I(U)$ karakteristikákból az ábrán szemléltetett módon határozták meg az $U_0 \equiv U(I = 0)$ nyitófeszültségeket, melyek az illesztett egyenesek metszéspontjai az x tengellyel. A LED-ek hullámhosszát az egyes LED-ek adatlapjából vették.

Adatok: $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js.

- A táblázat adatait felhasználva határozzuk meg Planck-állandó legvalószínűbb értékét!
- Hány %-al tér el az így meghatározott Planck-állandó az irodalmi adattól?
- Okozhatja-e a mért eltérést a LED-ek hullámhosszának $\leq 10\%$ -os eltérése a megadott adattól? A választ röviden indokoljuk!

(kitűzte: Borbély Venczel || 5 pont)



Szín	λ [nm]	U_0 [V]
Piros	620	1,67
Narancs	590	1,88
Zöld	520	2,46
Kék	460	2,66

Megoldás:

Megjegyzés: Hasonló mérési feladat szerepelt a 2005-ös verseny döntőjében.

- Mivel az elektron a nyitófeszültségnek megfelelő szélességű tiltott sávon ugrik alacsonyabb energiájú állapotba, ezért az energiájának megváltozása eU_0 . Ezt az energiát sugározza ki a LED foton formájában. Emiatt a foton energiája egyenlő az elemi töltés és a nyitófeszültség szorzatával:

$$E_\gamma = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda} = eU_0 \quad (1 \text{ pont})$$

amiből a Planck-állandót kifejezve

$$h = \frac{e}{c} \cdot \lambda U_0 \approx \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot \lambda U_0 = \frac{16}{3} \cdot 10^{-28} \frac{\text{C} \cdot \text{s}}{\text{m}} \cdot \lambda U_0 = \frac{16}{3} \cdot 10^{-37} \frac{\text{C} \cdot \text{s}}{\text{nm}} \cdot \lambda [\text{nm}] \cdot U_0 [\text{V}].$$

Ide λ -t nanométerben, U_0 -t Voltban behelyettesítve, a Planck-állandót Js egységekben kapjuk. Számítsuk ki a négy λU_0 szorzatot és azok átlagát:

Szín	λ [nm]	U_0 [V]	$\lambda \cdot U_0$ [nm · V]	$10^{34} \cdot h$ [Js]	Δh [%]
Piros	620	1,67	1035,4	5,522	16,7
Narancs	590	1,88	1109,2	5,916	10,7
Zöld	520	2,46	1279,2	6,822	3,0
Kék	460	2,66	1223,6	6,526	1,5
Átlag			1161,85	6,197	6,5

A négy érték átlaga $\overline{\lambda U_0} = 1161,85 \text{ nm} \cdot \text{V}$, amiből a Planck-állandóra kapjuk, hogy

$$\bar{h} \approx \frac{16}{3} \cdot 10^{-37} \frac{\text{C} \cdot \text{s}}{\text{nm}} \cdot 1161,85 [\text{nm} \cdot \text{V}] \approx 6,197 \cdot 10^{-34} \text{ Js}. \quad (2 \text{ pont})$$

Más gondolatmenet is teljes pontszámot ér, ha elvileg helyes, és jó eredményt ad.

Megjegyzés: A táblázatot a javítás megkönnyítése céljából közöljük, a diáktól nem elvárt.

b) Az irodalmi adattól való eltérés ($1 \cdot 10^{-34}$ Js-al egyszerűsítve):

$$\Delta h = \frac{|\bar{h} - h|}{h} = \frac{|6,197 - 6,626|}{6,626} \approx 0,065 = 6,5\%. \quad (1 \text{ pont})$$

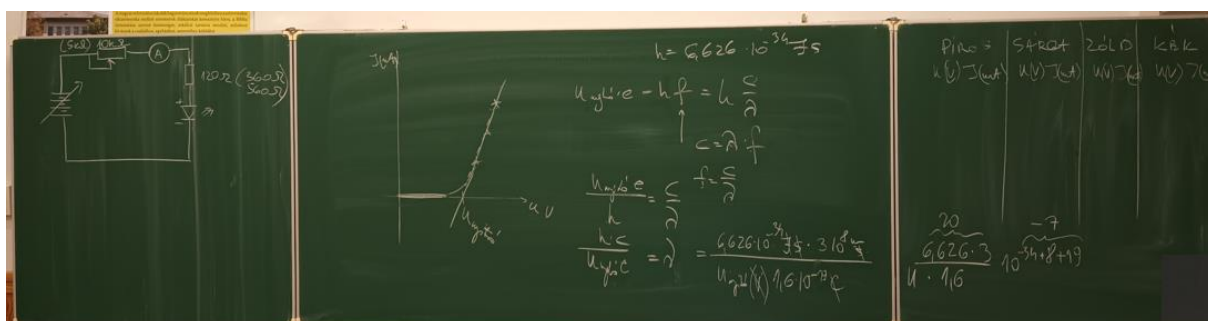
c) Igen, okozhatja. A h számított értéke egyenesen arányos λ -val, így abban egy legfeljebb 10%-os eltérés ugyanekkora eltérést okoz h értékében. Ebbe belesik a mért eltérés. **(1 pont)**

(A megadott hullámhossz adat lehet pontatlan, a LED nem tisztán monokromatikus, a hullámhossz függ a hőmérséklettől is.)

Megjegyzés: Aki a (b) pontban számítási hiba miatt 10%-nál nagyobb hibát hoz ki, és emiatt helyes indoklás mellett ($h \propto \lambda \Rightarrow \Delta h \propto \Delta \lambda$) a saját (rossz) eredményével konzisztensen nemleges választ ad, a (c)-ben az is megkaphatja az 1 pontot.

A LED fizikájáról olvashatunk a https://hu.wikipedia.org/wiki/Vil%C3%A1g%C3%ADrt%C3%B3_d%C3%B3da és rövid animációt találunk a <https://www.youtube.com/watch?v=AeJxHpxnWmY> oldalon. A fenti feladatban leírt első mondat: „A LED fénykibocsátása akkor történik, amikor nyitóirányú áram folyik, és az elektronok ” visszaugranak” alacsonyabb energiájú állapotba a tiltott sávon keresztül.” lényegén azt jelenti, hogy az elektron bekötődik egy kötés nélküli helybe, azaz lyukba. Az animáción a pozitív töltések a lyukak.

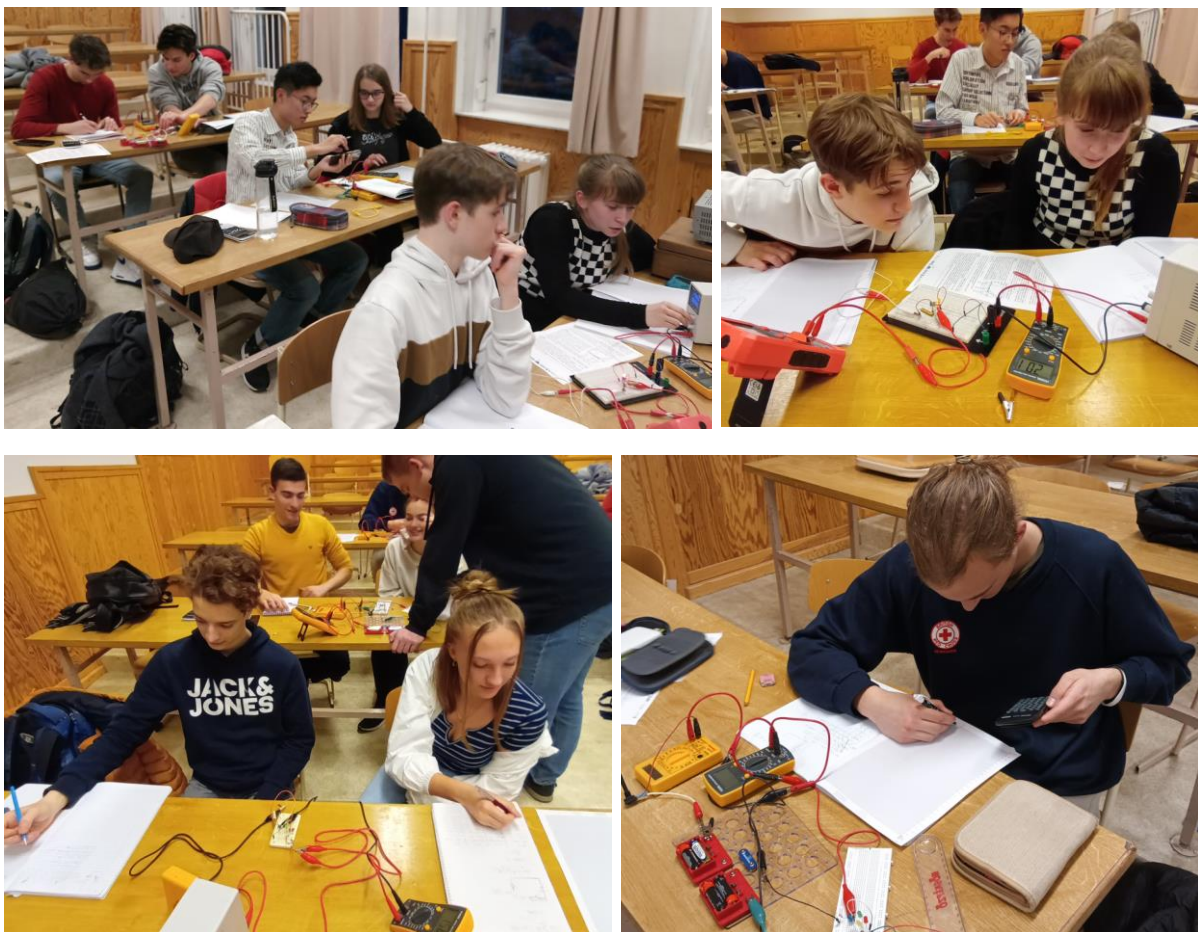
Mivel a Planck-állandó méréséhez ismernünk kellene a LED-ek fényének hullámhosszát, ezért inkább a hullámhossz meghatározását vettük célba ismert Planck-állandó érték mellett. Az áramkörü mérés lényegében ugyanaz, mint a fenti feladatban leírt folyamat. A táblán megjelenítettem a mérési összeállítást, a mérési eredményekhez szükséges táblázatokat és a szükséges számítások összefüggéseit.



Tehetségeink között volt aki, már többször elvégezte ezt a mérést, így tudott segíteni a többinek.



Komoly munkával sikerült a mérési eredményekből a kívánt grafikonokat elkészíteni, amelyekből az egyenes illesztéssel meghatározhattuk a nyitófeszültséget.



Végül az eredmények, ha nem is mindenkinél ugyanazok:

$x = 55$

Sárga led

$(-1)+10+10+10$
2

$(V) U_T$ 1,77 1,87 1,93

$(V) U_{led}$ 1,77 1,65 1,88 1,89 1,91

$(mA) I_m$ 0,05 0,25 0,5 0,68 1,1

$y = a + bX$

$X = \frac{14055}{7515}$

$a = -140,65$

$b = 73,315$

$X = 1918$

$(V) U_T$					
$(V) U_{led}$	1,95	1,97	1,99	2,00	2,01
$(mA) I_m$	2,95	3,07	4,0	5,05	6,01

$(V) U$	2,02	2,03	2,05	2,05	2,05
$(mA) I_m$	7,02	8,01	9,03	10,3	11,0

A milliméterpapíron megjelenített mérési adatok az egyenesillesztéssel és a feszültség tengely metszéspontjának leolvasásával adják a LED nyitófeszültségét.



A piros, a leghosszabb hullámhosszú LED nyitófeszültsége a legkisebb, azt követi a sárga és a zöld LED nyitó feszültsége, de alig eltérő módon. A kék, a legrövidebb hullámhosszú LED jól elkülönül a többitől.

Felhasználva a számpéldában megismert összefüggést.

$$\lambda = \frac{hc}{eU}$$

$U_{\text{piros}} = 1,83 \text{ V}$ -nak olvasva $\lambda_{\text{piros}} = 679 \text{ nm}$, $U_{\text{kék}} = 2,63 \text{ V}$, $\lambda_{\text{kék}} = 472 \text{ nm}$ kapjuk.

Közelítőleg hasonló eredmények jelentek meg a fenti számpéldában.