

Mérési jegyzőkönyv

Megjegyzés:

Ez a mérési jegyzőkönyv elsősorban azoknak készült, akik nem tudják elvégezni a mérést. Ezért kellően részletes és didaktikus, hogy érthető, elképzelhető legyen, hogy mit és hogyan kellett mérni, a mérési eredményeket hogyan kellett feldolgozni, továbbá milyen következtetéseket lehetett (kellett volna) levonni.

Természetesen a verseny alatt a diákoktól nem vártunk el ennyire részletesen kifejtett, több oldalas jegyzőkönyvet. Nem feltétlen kellett behelyezni a táblázatokat és diagramokat a jegyzőkönyvbe, mert a méréshez a versenyzők által kitöltendő és leadandó Excel fájlban ez megtalálható volt az értékelők számára. A főbb mérési lépések leírását, elemzések, gondolatok, következtetések tömör megfogalmazását viszont elvártuk.

Az itt megadott jegyzőkönyv részletesebb és bővebb, mint amelyet a versenyzők a szűk időkorlátok között képesek írni; vázlatosabban leírt tapasztalatokat is elfogadtunk teljes értékűként.

A jegyzőkönyvet egyes szám első személyben írom, mint ahogy a versenyzők is tették. A jegyzőkönyvben bizonyos részekhez rövid magyarázatokat is fűzök, ezért a könnyebb megkülönböztetés miatt, a személyes megjegyzéseket és magyarázatokat dőlt betűvel szedtem és szögletes zárójelben írtam. Azokat a következtetéseket, amelyeket elvártunk, vastagított betűvel emeltem ki.

A keretezett szövegek a mérés leírásából származnak, nem elvárt részei a jegyzőkönyvnek!

A feladatok leírásánál a szögletes zárójelbe tett szám az adott feladatra adható maximális részpontszámot jelenti.

Bevezetés: feladat, mérés célja, előzetes várakozások

A feladat a fény polarizációjának vizsgálata és a jelenség magyarázata részecskemodell segítségével. A kísérlet első részében a klasszikus két polárszűrős kísérletet végezem el, majd utána két keresztezett polarizátor közé behelyezek egy harmadik polarizátort és megvizsgálom, mi történik, ha azt is elforgatom a másik két polarizátor között. A feladat kiírásánál szereplő elméletből kiderült, hogy

a fény intenzitása $\cos^2$ -es függvény szerint változik, a mérés során ezt szeretném igazolni. Az egyfotonos vizsgálat a fényrészecskék statisztikai vizsgálatát vetíti elő, így várhatóan a $\cos^2$ -es függvény valószínűségi értelmezését kell majd használnom. Két szorgalmi feladat is van: egyrészt megvizsgálni, hogy mi történik, ha a középső és az első szélső polarizátort állítom keresztezett állásba és a harmadikat vizsgálom; másrészt megvizsgálhatom, hogy ideális esetben mit kellene kapni. Azt várom, hogy a mért értékek korreláljanak az elméleti értékekkel.

[0] 1. feladat

Olvassuk végig a teljes mérésleírást, és ismerkedjünk meg a készülékkel. Nézzük meg a rendelkezésre álló számítógép Asztalán az OSzLFV2022 mappában lévő OSzLFV_kiserlet_2022_Fotonok_polarizacioja.avi videót! Azonosítsuk a kísérleti eszközön a fényforrást és a napelemet, valamint a forgatható polárszűrőket! Ismerjük meg, hogy a polárszűrők hogyan forgathatók, illetve hogyan rögzíthetők! Próbáljuk meg kivenni és visszatenni a középső darabot úgy, hogy közben a két szélső polárszűrő ne forduljon el!

Az 1. ábrán látható kísérleti eszköz két lombikfogó segítségével egy állványhoz van rögzítve. Az eszköz csőbe szerelt, forgatható, skálával ellátott polárszűrőkből, fényforrásból (LED) és fényérzékelőből (napelem) áll. Alul található a LED és felül a napelem. A LED fölött és a napelem előtt van egy-egy polarizátor (előbbi csavarokkal rögzítve), a harmadik polarizátor külön áll rendelkezésre. A fényforrás 6 V-os áramforrásról működik, védőellenállással van ellátva. A napelemhez egy ellenállás és egy multiméter kapcsolódik egyenáramú 2 mA-es méréshatárral; a fényintenzitással arányos áramerősséget mérem az ellenálláson.

[0] 2. feladat

Nyissuk meg a számítógép Asztalán az OSzLFV2022 mappában található Polarizacios_jelenseg_vizsgalata_ures.xlsx fájlt és nevezzük át! A névben szerepeljen a saját kódunk, és mentjük el a saját kódunknak megfelelő mappába! A mérés során mindig ezt az Excel fájlt használjuk!

Ezen felül a kísérlet elvégzéséhez egy rövid eszközleírás és egy Excel fájl áll rendelkezésemre Polarizacios_jelenseg_vizsgalata_ures.xlsx néven. Ezt a fájlt kell átnevezni saját kódra. Az Excel fájl három munkalapból áll. Az 1. mérés munkalap a kétpolarizátoros kísérlethez (5. mérési feladat), a 2. mérés munkalap a hárompolarizátoros feladathoz (6. mérési pont) tartozik. Az Összehasonlítás munkalapon a két mérés összehasonlítását tehetem meg.



1. ábra. A kísérleti eszköz

[0] 3. feladat

Kapcsoljuk a LED-et megfelelő polaritással az asztali áramforrásra, és adjunk feszültséget a LED-re! Állítsuk a két polárszűrőt párhuzamosra, és mérjük meg és jegyezzük fel a napelem áramát!

Polaritáshelyesen bekötöttem a LED-et az asztali áramforrásra és a mérőműszert is rákötöttem a napelem kivezetéseire. Miután bekapcsoltam a fényforrást, mindkét polarizátort a 0 osztásra állítottam. Ekkor elvileg párhuzamos a két polarizátor. Ekkor 0,490 mA áramerősséget mértem.

Megvizsgáltam, hogy mi történik, ha egy kicsit jobbra, illetve balra elforgatom. Mindkét irányban azt tapasztaltam, hogy csökkent az áramerősség, vagyis a két polarizátor valóban párhuzamos állásban volt.

[Előfordulhatott az a pontatlanabb eszközöknél, hogy a párhuzamos állás nem pont a két 0 állásban volt. Ekkor célszerű feljegyezni az eltolódás értékét.]

[5] 4. feladat

Lassan forgassuk körbe a napelemnél lévő polarizátort (javaslat: 15 fokként), és rögzítsük a mért áramerősségeket! Az Excel tábla 1. mérés fül segítségével határozzuk meg az $I(\alpha_1)$ áramerősség(szög) függvény amplitúdóját és fázisszögét! A jegyzőkönyvben értelmezzük és elemezzük a kapott adatokat és görbéket!

15°-onként elforgattam a napelem előtti polarizátort és az ampermérőn mért

áramerősség értékeket beírtam az Excel fájl *1. mérés* munkalapján az $I(\alpha_1)$ oszlopába a megfelelő szögállás mellé. A feljegyzett adatokat az 1. táblázat tartalmazza.

Az Excel fájl a mérés közben automatikusan elkészítette az áramerősség-szög diagramot (kék görbe a 2.a ábrán). Ez a görbe látszólag egy $\cos^2$ -es függvény, de hogy megbizonyosodjak róla, használok a fájlba beépített függvényt és rákattintok az „Illesztés” gombra. A függvény a Solver bővítmény segítségével a négyzetes eltérések átlagának minimumát felhasználva meghatározza az A amplitúdót és a φ_1 fázist. Esetemben **az amplitúdó értéke 0,502 mA, a ϕ_1 fázis 1,299°**. *[Ezek az értékek a táblázatból is leolvashatók, de a feladat az volt, hogy határozzuk meg ezeket az értékeket, ezért a mérési jegyzőkönyvben ki kell írni, ki kell emelni őket.]*

A Solver bővítmény kiszámolja az egyes szögállásoknak megfelelő intenzitás értéket az $A \cdot \cos^2(\alpha_1 + \phi_1)$ oszlopban. Ez jelenik meg a 2.a ábrán lévő grafikonon narancssárga színnel. A 2.b ábrán az illeszkedés pontosságát láthatjuk. A mérési pontjainkra egy lineáris trendvonalat illeszt az Excel. Látható, hogy a **mérési pontjaink eléggé illeszkednek a trendvonalra, az illeszkedés jósága közel 1 ($R^2 = 0,9977$)**. **Ez azt igazolja, hogy a mért adataim is $\cos^2$ -es függvény szerint változnak**. Hibaforrás lehet a pontatlan szögbeállítás forgatás közben, illetve, ha a részekből álló eszköz nincs tökéletesen egy tengelyben (ez okozhatja az amplitúdó nagyságának különbségét 0° , illetve 180° esetén).

[A mérési adatokból még az is jól látszik, hogy ha a polarizátorok 90° -os, illetve 270° -os szöget zárnak be egymással, akkor nem, vagy csak alig engednek át fényt. Ezt az állapotot nevezzük keresztezett polarizátor állásnak. 180° és 0° állásban a legnagyobb az áramerősség értéke, vagyis ekkor vannak a polarizátorok azonos állásban.]

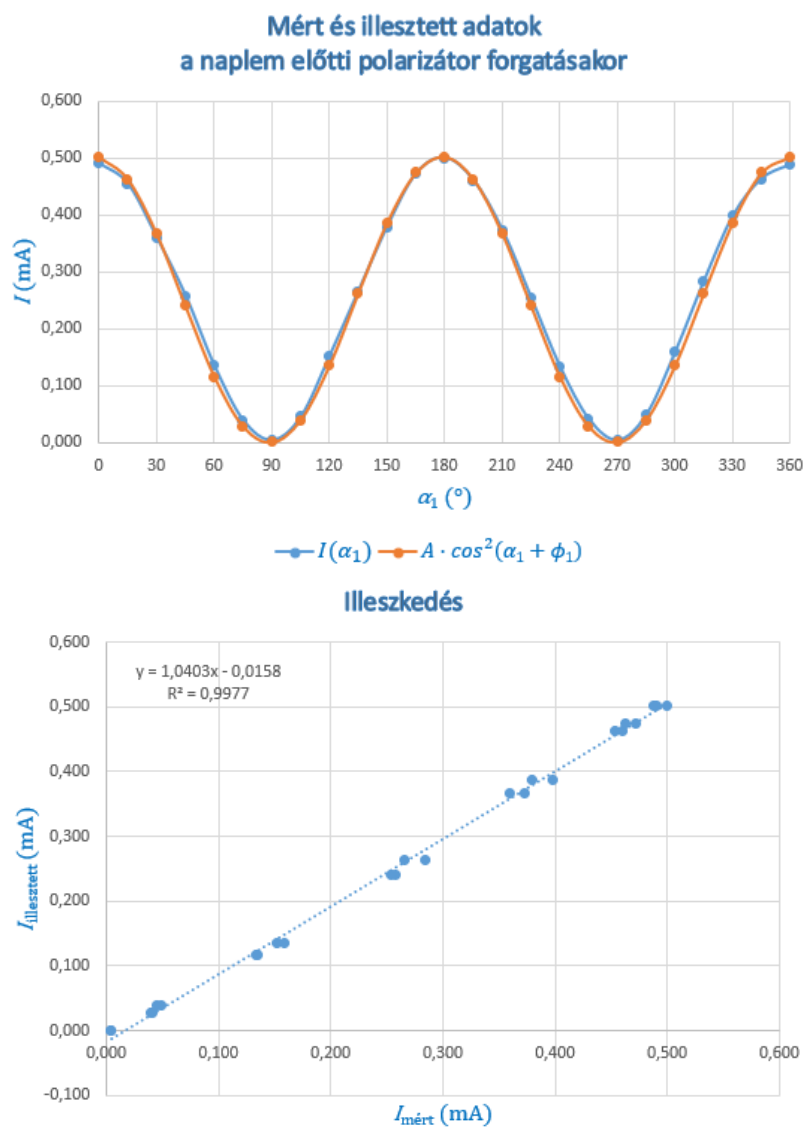
[5] 5. feladat

Keressük meg a napelemnél lévő polarizátor segítségével azt a szögállást, amelynél a legkisebb az áramerősség nagysága (keresztezett polarizátor állás, 90° -es osztás körül várható)! Jegyezzük fel az esetleges szögeltérést, és rögzítsük ebben a helyzetben a polarizátort! Cseréljük ki az üres középső elemet a harmadik, forgatható polárszűrőre! Vigyázzunk, hogy a csere közben ne forduljon el a két másik polárszűrő! Lassan forgassuk körbe a középső polarizátort, és rögzítsük a mért áramerősségeket! Az EXCEL tábla *2. mérés* fül segítségével határozzuk meg az $I(\alpha_2)$ áramerősség(szög) függvény amplitúdóját és fázisszögét! A jegyzőkönyvben értelmezzük és elemezzük a kapott adatokat és görbéket!

Az 5. feladatpontnál először megkerestem a napelem előtti polarizátor elforgatásával azt az állást, amelynél a legkisebb volt az áramerősség értéke. Ez 90° fölött volt egy kicsivel, kb. az előző mérésnél kapott $1,3^\circ$ -os eltérésnél. Ezután rögzítettem ezt a polarizátort a kis csavarok segítségével. Kicseréltem a középső

1. táblázat. A két polárszűrővel mért (első két oszlop) és számolt adatok

	$A:$	0,502	Négyzetes eltérések átlaga:
	$\phi_1:$	1,299	$1,50 \cdot 10^{-4}$
$\alpha_1(^{\circ})$	$I(\alpha_1)$	$A \cdot \cos^2(\alpha_1 + \phi_1)$	Négyzetes eltérések ($\cdot 10^{-4}$)
0	0,490	0,502	1,49
15	0,454	0,463	0,792
30	0,360	0,367	0,472
45	0,258	0,240	3,29
60	0,135	0,116	3,65
75	0,039	0,028	1,17
90	0,004	0,000	0,140
105	0,045	0,040	0,294
120	0,152	0,136	2,69
135	0,266	0,263	0,114
150	0,379	0,387	0,576
165	0,472	0,474	0,052
180	0,500	0,502	0,049
195	0,460	0,463	0,084
210	0,373	0,367	0,376
225	0,254	0,240	2,00
240	0,133	0,116	2,93
255	0,041	0,028	1,64
270	0,004	0,000	0,140
285	0,049	0,040	0,888
300	0,159	0,136	5,47
315	0,284	0,263	4,57
330	0,398	0,387	1,30
345	0,463	0,474	1,27
360	0,488	0,502	2,02



2. ábra. A mért és az illesztett adatok és az illesztés pontossága két polarizátor esetén

üres csövet a harmadik polarizátorra és beállítottam a 0 állásba. 15° -onként elforgattam a középső polarizátort és az Excel fájl 2. mérés munkalapjába beírtam a mért áramerősség értékeit a megfelelő helyre. A fentiekben leírtak alapján meghatároztam a B amplitúdót és a ϕ_2 fázist. **A B amplitúdó értéke 0,478 mA, a ϕ_2 fázis 0° .** A mért és illesztett adatokat a 2. táblázat tartalmazza, a kapott diagramok a 3. ábrán láthatók. **A mért és az illesztett pontokra helyezett trendvonal illesztési jósága itt is közel 1, de kisebb, mint a kétpolarizátoros mérésnél.** ($R^2 = 0,9739$) Amint a 3.a ábrán is látható, ennél a mérésnél már nem annyira jól illeszkedik a mért és az illesztett görbe. A mért adatok ingadozása részben az eszköz tökéletlenségének tudható be *[valószínű, hogy nem volt tengelyben a középső polarizátor]*, másrészt a forgatás közben nem biztos, hogy mindig tökéletesen pontosan sikerült az adott szög osztására állni.

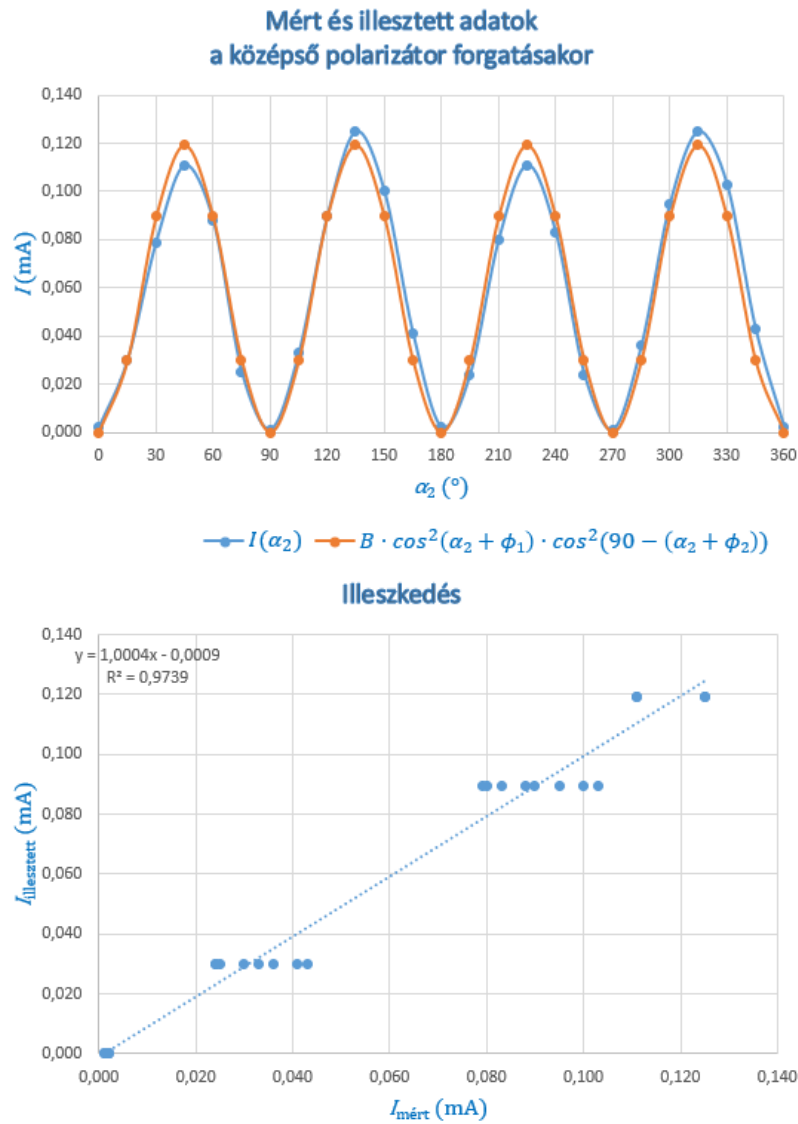
Az egyik érdekesség, amely feltűnik, hogy **keresztezett polarizátorok közé betett harmadik polarizátornak vannak olyan állásai, amelyen újra fény jut a napelemre.** Ennek a változásnak is $\cos^2$ -es a függvénye, csak amint sejteni lehetett az Excel fájlban megjelenő képleteknél, itt két $\cos^2$ függvény szorzása jelenik meg. Ennek a görbének a maximuma $(2k + 1) \frac{\pi}{4}$ -nél van ($k \in \mathbb{N}$). A jelenség érthető is, mert a szomszédos polarizátorok egymáshoz viszonyított állását kell figyelembe venni és nem a két szélső polarizátor egymáshoz viszonyított állását. Ekkor előfordulnak olyan helyzetek, amikor adott állásoknak megfelelő polarizációs állapotú fény jut a fényforrásból a fényérzékelőre.

A másik érdekesség, amely feltűnik, hogy **a kapott görbéknek a periódusa feleakkora, mint amit a kétpolarizátoros mérésnél mértem.** A harmadik érdekesség az, hogy **a B amplitúdó értéke és a diagramon látható maximális érték nem ugyanakkora.** A kétpolarizátoros mérésnél ez a két adat ugyanakkora volt. Az utóbbi két érdekességnek a magyarázata az, hogy **a két $\cos^2$ -es függvény szorzata jelentősen csökkenti az amplitúdót és felezi a periódusidőt** *[látjuk majd később az elméleti elemzésnél is]*. Sőt, a B értéke ugyanakkora kellene legyen, mint az A amplitúdó értéke, de mivel a polarizátorok nem teljesen átlátszók, itt egy kis fényvesztés tapasztalható.

[4] 6. feladat

Az Excel fájl *Összehasonlítás* munkalapján közös diagramon láthatjuk a két mérésünket. Milyen különbség látható a két görbe között? A jegyzőkönyvben próbáljuk értelmezni méréseink eredményét a fény fotonmodellje segítségével! Mit kell feltegyünk ahhoz, hogy ne kerüljünk ellentmondásba a fotonok oszthatatlanságával?

Ha összehasonlítom a két mérés során kapott illesztett görbét az *Összehasonlítás* munkalap segítségével, akkor azt látom, hogy **a hárompolarizátoros mérésnél a frekvencia kétszer akkora és a legnagyobb intenzitás érték sokkal kisebb, mint két polárszűrő esetén.** A táblázatok 3. oszlopából a



3. ábra. A mért és az illesztett adatok és az illesztés pontossága három polarizátor esetén

2. táblázat. A három polárszűrővel mért (első két oszlop) és számolt adatok

	B :	0,478	Négyzetes eltérések átlaga:
	ϕ_2 :	0	$4,89 \cdot 10^{-5}$
$\alpha_2(^{\circ})$	$I(\alpha_2)$	$B \cdot \cos^2(\alpha_2 + \phi_2) \cdot$ $\cos^2(90^{\circ} - (\alpha_2 + \phi_2))$	Négyzetes eltérések ($\cdot 10^{-4}$)
0	0,002	0,000	0,04
15	0,030	0,030	0,000
30	0,079	0,090	1,11
45	0,111	0,119	0,704
60	0,088	0,090	0,024
75	0,025	0,030	0,235
90	0,001	0,000	0,010
105	0,033	0,030	0,099
120	0,090	0,090	0,002
135	0,125	0,119	0,315
150	0,100	0,090	1,09
165	0,041	0,030	1,24
180	0,002	0,000	0,040
195	0,024	0,030	0,342
210	0,080	0,090	0,910
225	0,111	0,119	0,704
240	0,083	0,090	0,428
255	0,024	0,030	0,342
270	0,001	0,000	0,010
285	0,036	0,030	0,379
300	0,095	0,090	0,298
315	0,125	0,119	0,315
330	0,103	0,090	1,81
345	0,043	0,030	1,73
360	0,002	0,000	0,010

maximumokat véve:

$$\frac{I_{\max}(\alpha_2)}{I_{\max}(\alpha_1)} = \frac{0,119}{0,502} = 0,237,$$

vagyis a második mérésnél a mért intenzitásnál az első mérésnél mértnek mindössze 23,7%-a.

Ha mérési eredményeinket a fotonmodell segítségével próbáljuk értelmezni, akkor mindenképp szem előtt kell tartani, hogy a foton oszthatatlan. Ha gondolatban olyan fényforrást alkalmazunk, amelyből egyszerre csak egy foton lép ki, akkor ellentmondásba kerülhetünk, mert az egyetlen fotonra is érvényes kell legyen a kapott $\cos^2$ -es függvény, de egyetlen foton vagy átmegy vagy elnyelődik. Az ellentmondás úgy oldható fel, ha sok egyfotonos kísérletet nézve **az áthaladás $P(\vartheta)$ valószínűségét adja meg a $\cos^2$ -es függvény:**

$$P(\vartheta) = \cos^2(\vartheta).$$

[A polarizáció foton-modelles részletes értelmezését érdemes elolvasni a lábjegyzetben szereplő irodalmakból.^{1,2}]

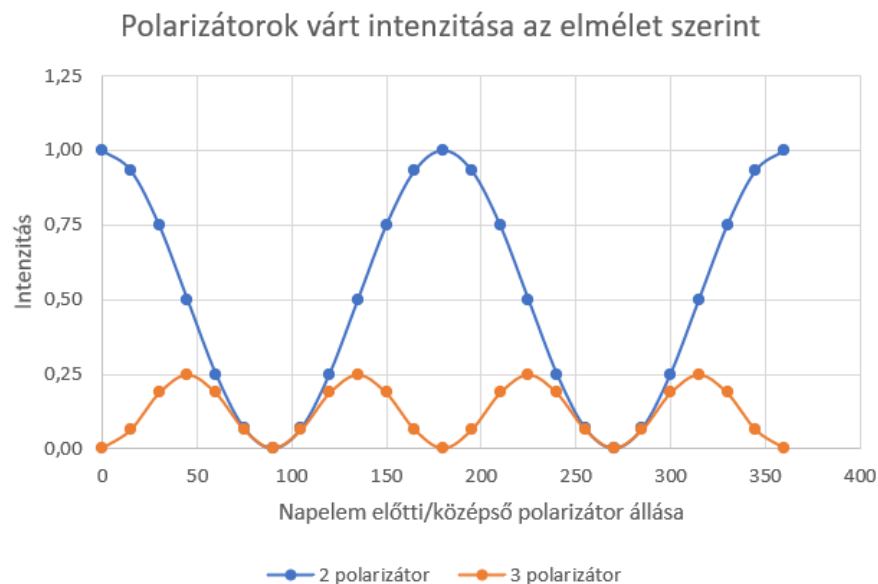
[+2] 7. feladat

Vizsgáljuk meg, hogy vajon felcserélhető-e az LED-nél lévő és a középső polarizátor szerepe? (Rögzítsük a középső és a fényelemnél lévő polarizátort egymáshoz képest 90° -ban, és forgassuk csak a LED-hez közel levőt!) A jegyzőkönyvben értelmezzük az eredményt!

A középső és a napelem előtti polarizátort keresztezett állásba állítottam és feloldottam a LED melletti polarizátort, majd elforgattam. Nem tapasztaltam lényeges áramerősség változást, az áramerősség értéke 0,001 mA és 0,002 mA között véletlenszerűen változott. Hasonlókat tapasztaltam akkor is, ha a LED melletti és a középső polarizátort rögzítettem egymáshoz keresztezett állásban és a napelem előtti polarizátort forgattam. Mindkét esetben azt láttam, hogy ha a két keresztezett polárszűrőn kívül forgatjuk a harmadikat, akkor nem tapasztalok intenzitásváltozást. Vagyis **a polarizátorok szerepe nem cserélhető fel.**

¹http://fizikaizsemle.hu/uploads/2021/06/fizszem-202106-tothkristof_14_07_55_1624882075.43.pdf

²<http://fiztan.phd.elte.hu/kozkinccs/magypub/pub/modern/kvantum-hatarozatlansag.pdf>



4. ábra. Polarizátorok viselkedése ideális esetben

[+3] 8. feladat

Vizsgáljuk meg, hogy mit kapnánk „ideális” esetben! A 3. feladatnál várható elméleti függvény: $I(\alpha_1)/I_0 = \cos^2(\alpha_1)$, a 4. feladatnál várható elméleti függvény pedig: $I(\alpha_2)/I_0 = \cos^2(\alpha_2) \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha_2)$. Készítsünk el egy, a *Mért és illesztett adatok összesítése* diagramhoz hasonló ábrázolást (nyissunk ehhez egy új munkalapot) és azt felhasználva hasonlítsuk össze a mérésünk során kapott grafikonokat (figyeljünk a függvények amplitúdóinak arányára is)! Miben tér el mérésünk az ideális esettől és mi lehet az eltérések oka? Rögzítsük a magyarázatot a jegyzőkönyvben!

Beillesztettem egy új munkalapot az Excel fájlba, és külön oszlopokba bírtam az egyes polarizátorok helyzetét. A LED melletti polarizátor helyzetét 0-nak tekintettem. A hárompolarizátoros esetben a napelem előtti polarizátor helyzete 90°-os (kereszttezett polarizátorok). A forgó polarizátor esetén 15°-onként számoltam. A feladatban megadott képletekkel kiszámoltam az intenzitás értékeket az egyes helyzetekben és ábrázoltam az eredményeimet a forgó polarizátor helyzetének függvényében.

A 4. ábrán látható, hogy a mérésem hasonló az ideális helyzethez. **A két-polarizátoros esethez képest a hárompolarizátoros elrendezésben a**

maximum a 25%-ára csökken le.

$$\frac{I_{\max}(\alpha_2)}{I_{\max}(\alpha_1)} = \frac{0,25}{1} = 0,25.$$

A mérések során kapott 23,7% nem áll messze ettől az értéktől. A különbség abból adódik, hogy a valóságban – az ideális esettel ellentétben – a polarizátorok nem teljesen átlátszók.

[11] 9. feladat

A mérés végén mentjük el a használt Excel fájlt, továbbá a mérésről készítsünk jegyzőkönyvet! A jegyzőkönyvet elkészíthetjük a mérőhelyen rendelkezésre álló számítógépen található táblázatkezelő és/vagy szövegszerkesztő szoftver segítségével, illetve kézzel is! A kézi vagy számítógépes munka nem jelent pontbeli különbséget. Amennyiben a számítógépet választjuk, készítsünk a Windows asztalon egy mappát a saját kódszámmal, és abba mentjük az eredményeket! Ha kézi jegyzőkönyv is van, jelöljük benne, hogy a számítógépen is vannak adatok! A jegyzőkönyv készítésénél vegyük figyelembe az „Általános tanácsok jegyzőkönyv írásához” című dokumentumban foglaltakat!

A mérés során a klasszikus polarizációs kísérlet mellett egy új érdekes jelenséggel találkoztam. Méréssel igazoltam a klasszikus elektrodinamikai elméletben kapott $\cos^2$ -es függést. A jelenség megmagyarázásánál a fotonelméletet is használtam, ahol az egyenletben szereplő $\cos^2$ -es tag a foton polarizátoron való átjutásának valószínűségét adja meg. Igazoltam azt is, hogy mérésem összhangban van az elmélet alapján vártakkal.

Tanulságok a versenyről

A legtöbb pontot a feladatban utasításként megjelenő és végrehajtott mérési részekre kaptak a versenyzők (4. és 5. feladatok).

Nehezebben ment a mért értékek elemzése, hiányos volt a mérésből kiemelendő adatok megemlítése, a mérés menetének rövid ismertetése, előzetes várakozás, cél megemlítése vagy valamilyen bevezető gondolat a méréshez. A jelenség teljes értékű fotonelméleti magyarázata két munkában jelent meg (egy szenior és egy junior versenyzőnél), további 7 versenyző adott részben jó értelmezést. A Szorgalmi feladat #1 (7. feladat) népszerű volt a szeniorok körében, a 19 versenyzőből 12-en válaszoltak erre a kérdésre. A másik szorgalmi feladatot összesen 5 versenyző kezdte el és ketten végezték el hibátlanul.

Jó tanács: mérési jegyzőkönyv íráskor érdemes egy kis bevezetővel kezdeni, a kért mérési adatokat kiemelten megjeleníteni, és végül méréseinket értékelni.

Örömmre szolgált, hogy a versenyzők megpróbálták értelmezni a látott jelenségeket, igyekeztek következtetéseket levonni, és hogy a hibaszámolás, hibák felderítése, valamint megmagyarázása is sokak számára fontos része mérő-kutató munkájuknak.

Az útmutató szerint összesen 30 pontot lehetett elérni (25 pont a kötelező részre és 5 pont a szorgalmi feladatokra). Maximum 25 pont került beszámításra, és aki a szorgalmi feladatokkal meghaladta ezt, különdíjban részesült. A legmagasabb elért pontszám a szenior kategóriában 27 pont, a junior kategóriában 19 pont volt. Az átlag a szenioroknál 16,8 pont (szórás 4,9), a junioroknál 12,6 pont (szórás 5,5).