

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

TDK dolgozat

**Izopropanol vizes oldatából álló folyadéksugarak
ütköztetésével előállított folyadékhártyák helyfüggő
vastagságának mérése**

Tóth Noémi

Fizika BSc szakos hallgató

Témavezető: Dr. Kovács Attila Pál adjunktus, SZTE TTIK Optikai és
Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged

2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Elméleti összefoglaló	5
2.1. A folyadékhártya előállítása és jellemzői	5
2.2. Módszerek a vastagság mérésére	7
2.3. Az izopropanol vizes oldatainak tulajdonságai	10
3. Célkitűzés.....	13
4. Eredmények.....	14
4.1. A térbeli felbontás meghatározása.....	14
4.2. A folyadékhártya vastagságának mérése	18
4.2.1. Vízhártya vastagságának mérése vízszintes tengely mentén.....	18
4.2.2. Izopropanol vizes oldataiból létrejövő folyadékhártya vastagságának mérése függőleges tengely mentén	20
5. Összefoglalás.....	23
6. Irodalomjegyzék.....	24
7. Köszönetnyilvánítás	25
8. Nyilatkozat.....	26

1. Bevezetés

Az utóbbi években a nagy teljesítményű impulzuslézerek fejlesztésével és egyre szélesebb körű használatukkal igény mutatkozott olyan céltárgyakra, amelyek képesek folyamatosan megújulni, mivel egy nagy teljesítményű lézerrel meglöve a céltárgyat az egyrészt károsodik, másrészt a keletkező törmelékek illetve reakciótermékek befolyásolhatják a kísérlet eredményét és károsíthatják a berendezést. Erre a problémára jó megoldásnak mutatkozott vékony folyadékrétegek, ezeken belül pedig folyadékhártyák használata lézeres céltárgyként. A folyadékok folyamatos áramoltatásával létrehozott folyadékhártyákkal végzett kísérletek további előnye, hogy ezeknél nincs szükség a kísérlet eredményét akár jelentősen befolyásoló üveg küvettára, mely a vizsgálandó folyadékot tartalmazná. Vékony folyadékhártyákat több kutatási területen is alkalmaznak, többek között folyadékfázis vizsgálatánál illetve spektroszkópiai méréseknél abban az esetben, ahol fontos, hogy a mérés küvetta nélkül történjen, valamint szabad részecskék előállítására, illetve lézeres részecskegyorsításra. Ez utóbbi alkalmazásnál kulcsfontosságú a folyadékhártya vastagságának pontos ismerete, amelyre hatékony módszernek mutatkozott a hártyát megvilágító fehér fény transzmissziós spektrumának vizsgálata.

A dolgozatom készítése során betekintést nyertem a Nemzeti Lézeres Transzmutációs Laboratórium (NLTL) lézeralapú neutrongyorsítási projektjébe. A kitűzött cél, vagyis a sikeres neutrongyorsítás eléréséhez ütköző folyadéksugarakkal előállított folyadékhártyákat használnak céltárgyként. A projekt jelentős részét képezik a vákuumban végzett kísérletek, melyekhez a folyadékhártyák legvékonyabb részét érdemes használni, így fontos ismerni a hártya vastagságának helyfüggését. Szükség van tehát olyan módszer kidolgozására, amellyel vákuumban, nagy pontossággal meg tudjuk határozni a folyadékhártyák vastagságát. A kísérletek során eddig a víz- illetve nehézvíz hártyák tűntek a legmegfelelőbb céltárgyaknak, de más kutatócsoportok által gyakran használt folyadékokat is vizsgáltak már, köztük izopropanolt.

A használt folyadékhártyák alakjának és vastagságának leírására több elméleti megközelítés is létezik. Ezek közül az egyik gyakran hivatkozott modell a Hasson és Peck által kidolgozott (HP) modell, amely a hártya vastagságát a folyadéksugarak ütközési pontjához viszonyított pozíciójának függvényében, kizárólag geometriai paraméterek alapján határozza meg, azaz kissé meglepő módon független a folyadék anyagi minőségétől. A modell bár jól ismert, azonban eddig kevés tanulmányban vetették össze kísérleti eredményekkel.

A projekthez kapcsolódóan a feladatom egyrészt az volt, hogy kiértékeljem azokat a spektrális transzmittancia görbéket, amiket levegőben, izopropanol 20%-os és 50%-os vizes oldataival létrehozott folyadékhártyákon átvilágítva vettek fel a folyadékhártya vastagságának meghatározása céljából. Másrészt a feladatom volt, hogy a kiértékelés során kapott vastagságértékeket vessem össze a HP-modellből adódó értékekkel, és vizsgáljam meg, hogy a hártya vastagsága valóban nem függ a folyadék sűrűségétől, viszkozitásától, illetve a felületi feszültségétől. Végül pedig kísérletileg meg kellett határoznom a módszer térbeli felbontását.

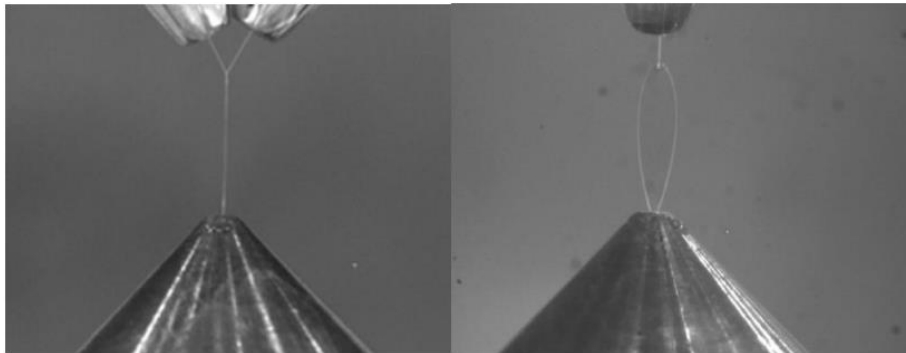
2. Elméleti összefoglaló

2.1. A folyadékhártya előállítása és jellemzői

Az elmúlt években több kutatócsoport is foglalkozott olyan módszerek kidolgozásával, melyekkel lézeres ionkeltés céltárgyának megfelelő, vékony és stabil folyadékhártyák állíthatók elő vákuumban. Ekimova és csoportjának sikerült elsőként két fúvóka segítségével létrehozott vékony folyadéksugarak ütköztetésével előállítani ilyen folyadékhártyát vákuumban [1]. Egy másik megoldás, amikor az ütköző folyadéksugarak módszeréhez szükséges két fúvóka helyett egy olyan 3D nyomtatott precíziós fúvókát használnak, amely önmaga elegendő a kívánt folyadékhártya előállításához, egyszerűsítve így a kétfúvókás rendszer hosszadalmas beállítási folyamatát [2]. Az eddigieknél nagyságrenddel vékonyabb folyadékhártyákat állítottak elő gázdinamikán alapuló fúvóka segítségével, ahol a központi folyadéksugarat két gázsugár nyomja össze egy vékony hártyává [3]. Ennek hátránya viszont, hogy a gáz diffúziója rontja a vákuumot. C. J. Crissman és csoportja mikrolitográfiás eljárást használva készített üvegből, előre meghatározott paraméterű hártyák előállítására alkalmas fúvókákat [4], melyek ugyan stabilan üzemeltethetők, azonban kialakításuk miatt, hasonlóan a 3D nyomtatott fúvókákhoz, a hártya paraméterein utólag nem lehet változtatni.

Az ütköző folyadéksugarak módszerénél két vékony, azonos átmérőjű és sebességű folyadéksugarat hoznak létre, melyeket megfelelő szög alatt ütköztetve az ütközés síkjára merőlegesen egy vékony, levél alakú folyadékhártya keletkezik a hártya belső részéhez képest vastag peremmel, amelyet több hasonló, egyre kisebb, egymásra páronként merőleges hártya követ (1. ábra). Céltárgynak csak az első, legvékonyabb és leghosszabb hártyát szokták

használni. Ahhoz, hogy korlátozzák a folyadék diffúzióját a vákuumba, egy gúla alakú fém befogót alakítottak ki, amely közvetlenül az első hártya alatt összegyűjti a folyadékot.

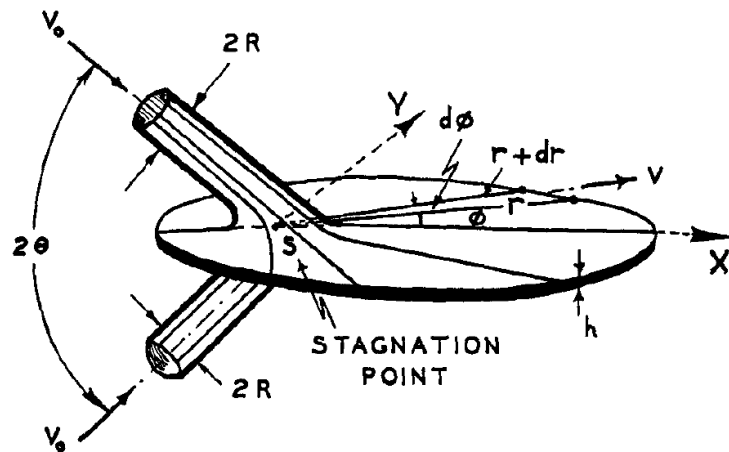


1. ábra. Az ütköző folyadéksugarak által kialakított hártya előlnézetből (bal oldalt) és oldalnézetből (jobb oldalt) [5].

A D. Hasson és R. E. Peck által kidolgozott, a hártya vastagságát adott pozícióban, a folyadéksugarak ütközési pontjához viszonyított távolság függvényében leíró, jól ismert elméleti modell ideális folyadékrendszer elemzésére épül, elhanyagolva a gravitáció, a felületi feszültség és viszkozitás hatásait. A modell az anyagmegmaradás és impulzusmegmaradás törvényére alapsz, és feltételezi az áramlási sebesség állandóságát az áramlási térben [6]. A kapott formula:

$$\frac{hr}{R^2} = \frac{\sin^3 \theta}{(1 - \cos \phi \cos \theta)^2}, \quad (1)$$

ahol h a hártya vastagsága, r a mérési pontnak a két folyadéksugár ütközési pontjától való távolsága, R a fúvókák és így a kiáramló folyadékoszlopok sugara, ϕ a vizsgált pont helyvektorának a hártya függőleges szimmetriatengelyével bezárt szöge, θ pedig a két ütköző folyadéksugár által bezárt szög fele (2. ábra). A modell figyelmen kívül hagyja a hártya peremét, de a hártya legvékonyabb pontjának keresésénél nincs is szükségünk a vastag perem vizsgálatára.



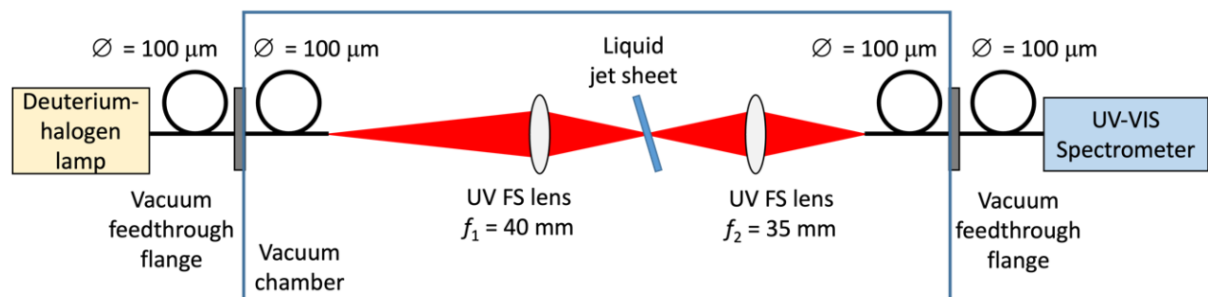
2. ábra. Modell az ütköző folyadéksugarak által létrehozott folyadékhártyák kialakulásának leírására [6].

2.2. Módszerek a vastagság mérésére

A folyadékhártyák vastagságának mérésére kidolgozott módszerek nagy része fényinterferencián alapul. A hártya relatív vastagsága nagy pontossággal mérhető monokromatikus interferometriával. Ebben az esetben akár egy mérésből a hártya teljes felületére meghatározható a vastagság változása [2, 3]. A módszer ugyanakkor nem alkalmas a vastagság mérésére akkor, ha nem ismerjük legalább egy pontban a hártya abszolút vastagságát. Az abszolút vastagságmérésre a szélessávú interferometria mutatkozik megfelelőnek [1-5, 7], melynek hátránya viszont, hogy a mérést a hártya minden, számunkra fontos pontján külön-külön el kell végeznünk. Szélessávú interferometria esetén a mérés végezhető a reflexiós spektrum elemzésével [2, 3], illetve a transzmissziós spektrum vagy a spektrális transzmittancia görbe vizsgálatával [4, 5, 7].

Az NLTL-ben kidolgozott vastagságmérési módszer szélessávú interferometrián alapul [5]. A folyadékhártya vastagságát kezdetben a spektrális transzmittancia, illetve reflektancia görbéken megjelenő spektrális modulációk alapján határozták meg. A két módszert összehasonlító kísérletek azt mutatták, hogy a vastagság pontosabban mérhető a spektrális transzmittancia görbe vizsgálatával. Szubmikron vastagságú rétegek esetén a spektrális transzmittancia maximumai az ultraibolya tartományban és a látható tartomány magasabb frekvenciás részein jelennek meg, vagyis a folyadékhártya megvilágításához kellően széles spektrumú, deutérium és halogén lámpát használnak. A kombinált lámpa fényét két, a vákuumkamra falán mechanikus csatolásban lévő multimódusú, 100 μm magátmérőjű UV-VIS

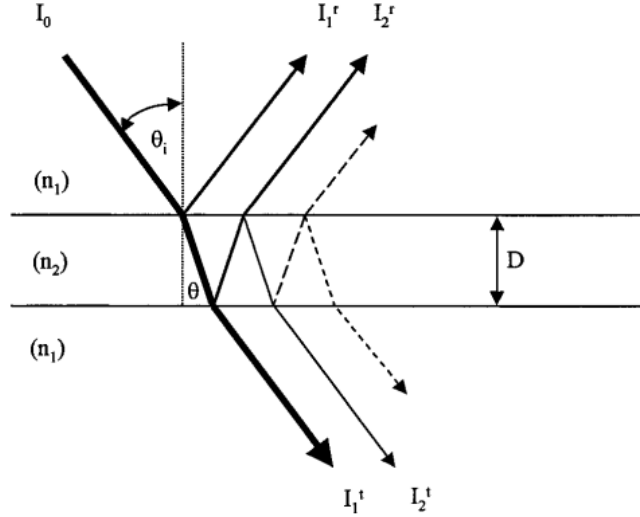
optikai szállal juttatják be a kamrába (3. ábra). A második optikai szál kimenetét egy 40 mm fókusztávolságú kvarc gyűjtőlencsével, 2:1-es kicsinyítést használva képezik rá a folyadékhártyára. Ily módon egy kb. 50 μm átmérőjű területen van megvilágítva a folyadékhártya felülete. A hártyán átjutó fénynyalábot egy 35 mm fókusztávolságú, kvarc gyűjtőlencse képezi egy újabb multimódusú, UV-VIS optikai szál bemenetére. A kamra falán ismét mechanikus átcsatolást használva, egy multimódusú optikai szál juttatja el a hártyán keresztülhaladt fényt egy Ocean Insight típusú, UV-VIS spektrométerbe.



3. ábra. Az NLTL által kifejlesztett kísérleti elrendezés [5].

A mérés első lépéseként a folyadékhártyát kimozzgatva a fényútból, felveszik a referenciaspektrumot. Ezután, a hártyát visszatolva a fénynyaláb útjába, felveszik a hártyán keresztülhaladt fény spektrumát, azaz a transzmittált spektrumot. A folyadékhártya pontos helyzete három, precíziós, számítógépvezérelt eltolóval állítható be, így a hártya tetszőleges pontján megmérhető annak vastagsága. A spektrális transzmittancia görbéből a következőkben leírt modell alapján határozzák meg a hártya vastagságát.

A folyadékhártyára beeső fény egy része visszaverődik a hártya elülső felületén, míg a másik része törés után keresztülhalad a folyadékrétegen. A hártya hátsó felületét elérve, a fény egy része visszaverődik onnan, míg a másik része törés után kilép a hártyából. Ez a folyamat ismétlődik a 4. ábrán látható módon. Akár a reflektált, akár a transzmittált sugarakat nézzük, a fénysugarak különböző fényutakat járnak be, így lencsével való összegyűjtés után a fókuszban a látható fényjelenséget ezen fénysugarak interferenciája határozza meg, azaz az ún. soksugaras interferencia jelensége áll elő [7, 8].



4. ábra. Soksugaras interferencia kialakulása vékony folyadékhártyában [7].

A hártán átjutó, a 4. ábrán I_1^t -vel és I_2^t -vel jelölt fénysugarak eltérő intenzitásúak a hártya felületén bekövetkező reflexió miatt. Jelen esetben az abszorpciót elhanyagoljuk. A transzmissziós spektrumban ezen fénysugarak interferenciájának hatása figyelhető meg. A hártya transzmittanciája felírható, mint [8]:

$$\frac{I^{(t)}}{I^{(i)}} = \frac{1}{1 + F \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_2 h \cos\theta\right)^2}, \quad (2)$$

ahol $I^{(t)}$ és $I^{(i)}$ a folyadékhártyán átjutó, illetve arra beeső fénysugarak intenzitása, λ a hullámhosszuk, n_2 és h rendre a folyadékhártya törésmutatója és vastagsága, míg θ a fénytörés szöge. Az F paraméter kiszámolható, mint:

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2}, \quad (3)$$

ahol

$$R = \frac{(r_s^2 + r_p^2)}{2}. \quad (4)$$

Itt r_s és r_p az s - és p -polarizált fénysugarak reflexiók együtthatói, melyeket a Fresnel-féle formulák [8] alapján számolhatjuk ki:

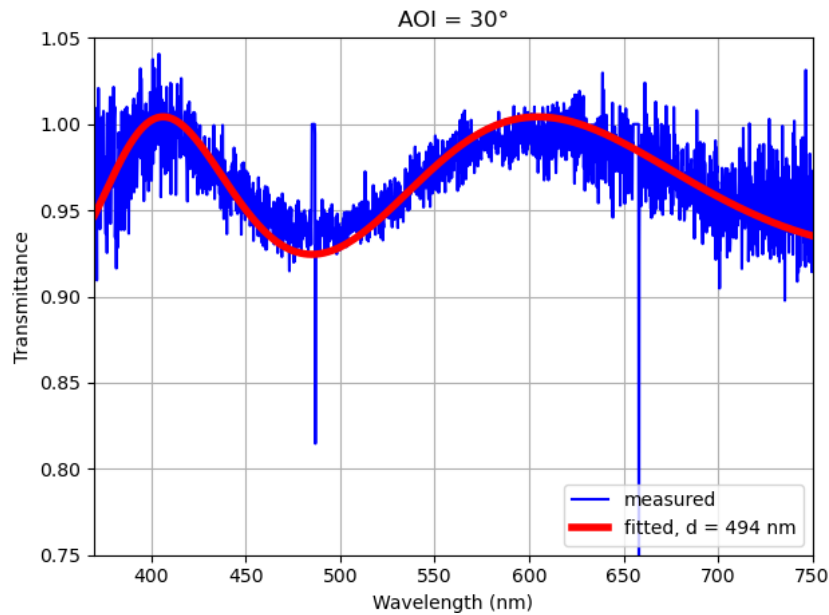
$$r_p = \frac{n_2 \cos\theta_i - n_1 \cos\theta}{n_1 \cos\theta + n_2 \cos\theta_i}, \quad (5)$$

és

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta}, \quad (6)$$

ahol θ_i a fény beesési szöge, n_1 pedig a környezet törésmutatója.

Ha a folyadékhártya azon kis részét, amelyet megvilágítunk, plánparallel rétegnek tekintjük, akkor a (2) összefüggéssel számolt görbét a mért spektrális transzmittancia értékekre illeszthetjük, ahonnan n_2 , n_1 és θ_i ismeretében és θ -t kiszámolva h meghatározható, mint az egyetlen ismeretlen illesztési paraméter (lásd 5. ábra).



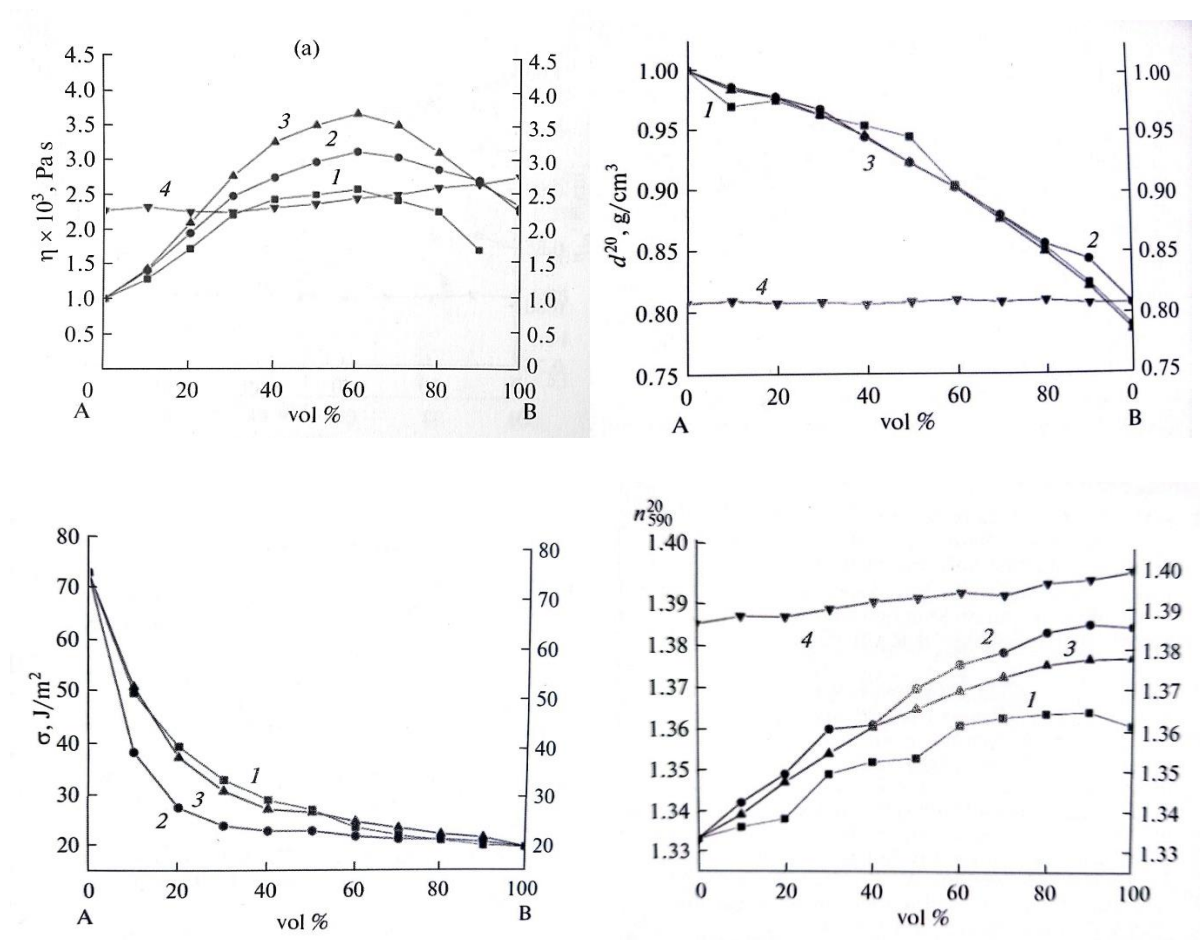
5. ábra. A mért (kék) és illesztett (piros) transzmittancia görbe [9].

Ennél a módszernél elengedhetetlen a használt folyadékok n_2 törésmutatóinak ismerete. A víz törésmutatója jól ismert, viszont az izopropanol vizes oldatainak törésmutatóit meg kell határozni a koncentráció függvényében.

2.3. Az izopropanol vizes oldatainak tulajdonságai

A folyadékhártya vastagságának transzmissziós módszerrel történő méréséhez kulcsfontosságú ismerni a folyadék törésmutatóját. Az alkoholok vizes oldatainak viszkozitása (η), felületi feszültsége (σ), sűrűsége (d^{20}), és ezáltal törésmutatója (n^{20}) azonban nem lineárisan függ az oldatok koncentrációjától (lásd 6. ábra). A kísérletekhez használt izopropanol oldatok viszkozitása – a 6. ábra bal felső grafikóján 3-as számmal jelölt görbe – a koncentráció növelésével monoton növekszik 60-65 térfogatszázalékig, ahol maximuma van,

ezután pedig monoton csökken [9]. A másik három grafikonon látható, hogy hogyan függ az oldatok felületi feszültsége, sűrűsége és törésmutatója a koncentrációtól.



6. ábra. Alkoholos oldatok viszkozitásának (bal oldalt fent), sűrűségének (jobb oldalt fent), felületi feszültségének (bal oldalt alul) illetve törésmutatójának (jobb oldalt alul) koncentrációfüggése. 1: víz-ethanol, 2: víz-propanol, 3: víz-izopropanol, 4: propanol-butanol [10].

A transzmittancia kiszámításához szükségünk van az izopropanol oldatok törésmutatójának ismeretére, melyet a Gladstone-Dale (GD) modell [11] alapján számoltam ki:

$$\frac{n_G - 1}{\rho} = w_1 \left(\frac{n_{D1} - 1}{\rho_1} \right) + w_2 \left(\frac{n_{D2} - 1}{\rho_2} \right), \quad (7)$$

ahol w_1 és w_2 rendre az izopropanol és a víz tömegszázaléka, n_G , n_{D1} és n_{D2} az oldat, az izopropanol és a víz törésmutatója, ρ , ρ_1 , ρ_2 pedig az oldat, az izopropanol és a víz sűrűsége. Az 1. táblázatban látható az izopropanol és víz sűrűsége (ρ), törésmutatója (n), viszkozitása (η) és felületi feszültsége (σ) 20°C hőmérsékleten.

	$\rho \left(\frac{g}{cm^3}\right)$	n	$\eta (10^3 Pa \cdot s)$	$\sigma (10^3 J \cdot m^2)$
Izopropanol	0,7855	1,3776	2,39	23,8
Víz	1,000	1,333	1,002	72,75

1. táblázat. Az izopropanol és víz fontosabb fizikai állandói [10].

A mérésekhez tiszta vizet, tiszta izopropanolt, valamint az izopropanol 20- illetve 50 %-os vizes oldatait használtuk.

3. Célkitűzés

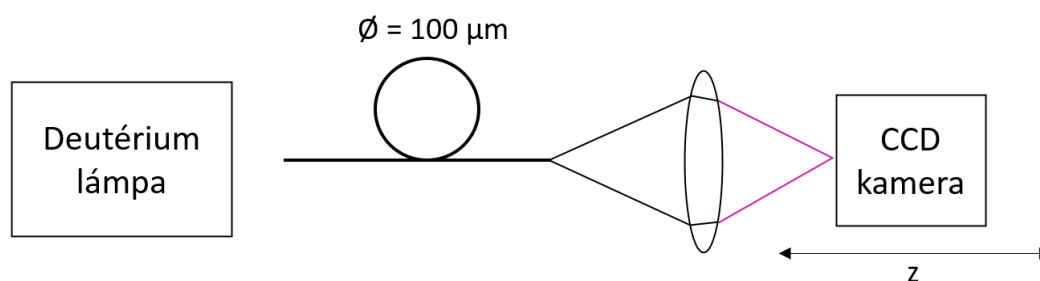
A dolgozatom keretében az alábbi célokat fogalmaztam meg:

- 1.) Ütköző folyadéksugarakkal létrehozott folyadékhártyák vastagságának meghatározása tiszta vízzel, tiszta izopropanollal és az izopropanol 20- illetve 50 %-os vizes oldataival kapott spektrális transzmittancia görbék kiértékelésével a hártya szimmetriatengelye mentén több pontban.
- 2.) A tiszta vízzel létrehozott folyadékhártya esetén a vastagságnak a szimmetriatengelyre merőleges irányban történő meghatározása.
- 3.) A folyadékhártya szimmetriatengelye mentén kapott vastagság-pozíció adatsorok összevetése alapján megvizsgálni, hogy mennyire teljesül a HP modell, azaz, hogy a vastagság valóban nem függ a folyadék anyagi jellemzőitől.
- 4.) Kísérletileg meghatározni a kísérleti elrendezés térbeli felbontását.

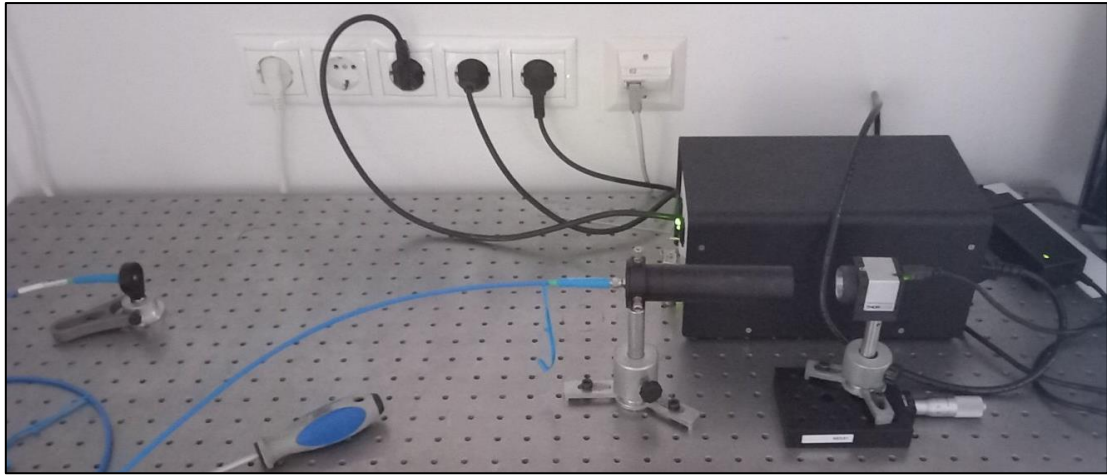
4. Eredmények

4.1. A térbeli felbontás meghatározása

A vastagságmérés szempontjából fontos ismernünk az ELI-ben megépített kísérleti elrendezés térbeli felbontását, azaz a folyadékhártyán előálló fényfolt méretét, mely az optika szál kimenetének leképezésével jön létre. A fényfolt méretének meghatározásához összeállítottam az ELI-ben a vastagságmérésekre használt elrendezésnek a folyadékhártya megvilágítását végző részét (7. ábra). A deutérium lámpa fényét, az ELI-beli elrendezéstől eltérően, csak egy multimódusú, 100 μm magátmérőjű UV-VIS optikai szál továbbította a 40 mm fókusztávolságú ömlesztett kvarcból készült gyűjtőlencse felé, de a leképezés szempontjából az eredetivel így is teljesen megegyezett ez az elrendezés. A 136 mm hosszú fémtubus egyik végén helyezkedett el az optikai szál befogója, míg a másik végén a gyűjtőlencse. A lencse után kialakuló fénynyaláb intenzitáseloszlását egy CCD kamerával (Thorlabs DCU224M) több pozícióban is felvettem a lencse optikai tengelye mentén, majd a kapott képek alapján határoztam meg a fényfolt átmérőjét. A kamera pozícióját mikrométercsavarral ellátott eltolóval változtattam, és a relatív pozíciót (z) a mikrométercsavar skálájáról olvastam le. A kísérleti elrendezésről készült fénykép a 8. ábrán látható.



7. ábra. A térbeli felbontás mérésénél használt kísérleti elrendezés sematikus rajza.



8. ábra. A térbeli felbontás mérésénél használt kísérleti elrendezés fényképe.

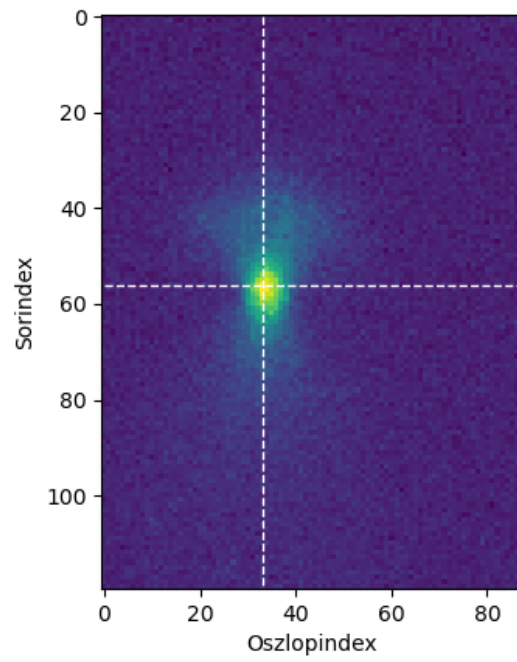
Az optikai elrendezés nagyítását kiszámíthatjuk a képtávolság és a tárgytávolság hányadosaként. A képtávolság meghatározására a vékony lencsékre vonatkozó lencsekészítők egyenletét használtam:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{t}} = \frac{1}{\frac{1}{4 \cdot 10^{-2} \text{ m}} - \frac{1}{13,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}}} = 5,67 \cdot 10^{-2} \text{ m}, \quad (8)$$

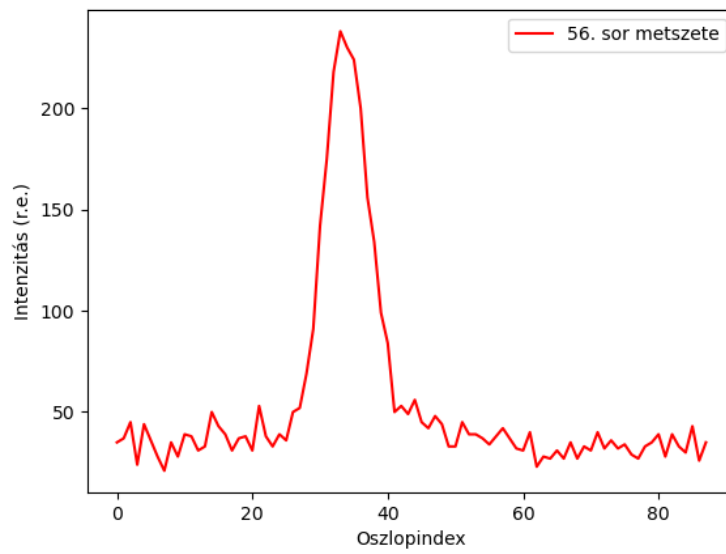
$$N = -\frac{k}{t} = \frac{5,67 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{13,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = -0,42. \quad (9)$$

A kapott nagyítást az optikai szál magátmérőjével megszorozva $42 \mu\text{m}$ -t kapunk, vagyis körülbelül ekkora átmérőjű foltot várunk a képsíkban.

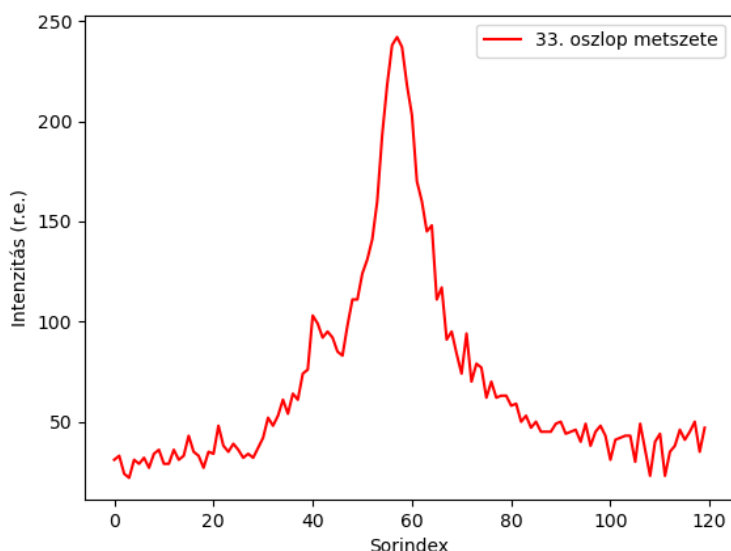
A képsík környékén készült képeken először megkerestem a fényfolt közepét (ahogy az a 9. ábrán látható), majd vettem a fényfolt közepén átmenő vízszintes (10. ábra) és függőleges metszetet (11. ábra). Az így kapott görbék alapján megállapíthattam a fényfolt szélességét illetve hosszát pixelekből oly módon, hogy a 10. és 11. ábrákról leolvastam a görbék szélességét az $\frac{1}{e^2}$ értéknél.



9. ábra. A fényfolt képe.



10. ábra. A fényfolt intenzitáseloszlása az 56. sor mentén.



11. ábra. A fényfolt intenzitáseloszlása a 33. oszlop mentén.

A mérésekhez használt CCD kamera chipjének pixelmérete a Thorlabs honlapja szerint $4,65 \times 4,65 \mu\text{m}$. Ennek ismeretében a foltméret kiszámolható, mint a fent leírt módon meghatározott pixelszám és egy pixel szélességének illetve magasságának szorzata.

z (mm)	Foltméret (μm)	
	Vízszintes	Függőleges
10,0	51	88
9,5	42	79
9,0	42	56
8,5	42	60
8,0	42	65

2. táblázat. A különböző z pozíciókban felvett fényfoltok méretei.

A 2. táblázatban látható eredmények alapján azt mondhatjuk, hogy a foltméret a képsíkban vízszintes irányban $42 \mu\text{m}$, ami megfelel a fentebb elvégzett számítások alapján megfogalmazott elvárásainknak. Függőleges irányban azonban észrevehetően nagyobb értékeket kaptam, ami arra utal, hogy a nyaláb asztigmias volt. Az asztigmatizmust nagy valószínűséggel az okozta, hogy az optikai szál kimenete nem a gyűjtőlencse optikai tengelyén helyezkedett el. Ennek oka lehet, hogy az ELI-ben végzett vastagságméréseknél nem a hátyát mozgatták finoman be a fényfolt pozíciójába, hanem az optikai szál kimenetét mozgatták oldalirányban kismértékben. Így a fényfolt végül ráesett a folyadékhártyára, azonban ekkor az optikai szál kimenete lemozdult a gyűjtőlencse optikai tengelyéről, asztigmatizmust okozva.

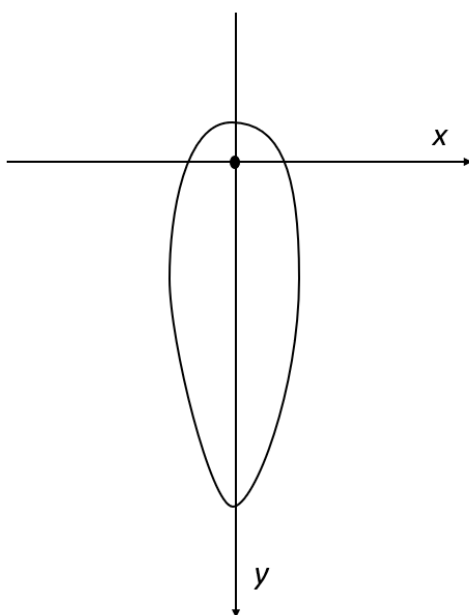
A méréseim alapján tehát azt állapítottam meg, hogy a folyadékhártyára eső fényfolt átmérője jól közelítéssel megegyezett a lencsekészítők egyenlete alapján várt $42 \mu\text{m}$ -rel,

azonban asztigmias volt. Így levonhatjuk következtetésül, hogy a jövőbeli vastagságméréseknél érdemes lenne módosítani a kísérleti elrendezés beállításán annyiban, hogy az optikai szál végének mozgatása helyett magát a folyadékhártyát kell úgy mozgatni, hogy fényfolt rákerüljön.

4.2. A folyadékhártya vastagságának mérése

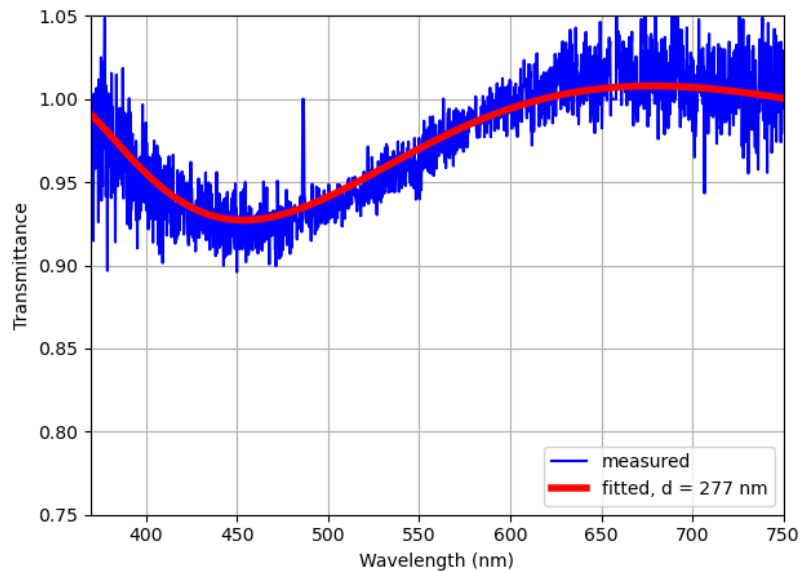
4.2.1. Vízhártya vastagságának mérése vízszintes tengely mentén

Először a hELios laborban vízhártyán végzett vastagságmérésekbe kapcsolódtam be. A méréseket levegőben végeztük, a folyadékhártya kialakításához desztillált vizet használtunk, a vízsugarakat előállító fúvókák átmérője $10\text{ }\mu\text{m}$ volt és a vízsugarakat 60° -os szög alatt ütköztettük. A mérések célja eredetileg a folyadékhártya alakjának feltérképezése volt, így a berendezés beállítása után megmértük a folyadékhártya vastagságát közelítőleg a hártya középpontján áthaladó vízszintes tengely mentén. Ez a tengely a referenciaponttól (a folyadéksugarak ütközési pontjától) $550\text{ }\mu\text{m}$ távolságban lefelé volt. A hártya függőleges szimmetriatengelyét a dolgozatomban y -al jelölöm, a folyadéksugarak találkozásának pontján áthaladó vízszintes tengelyt pedig x -el (12. ábra).



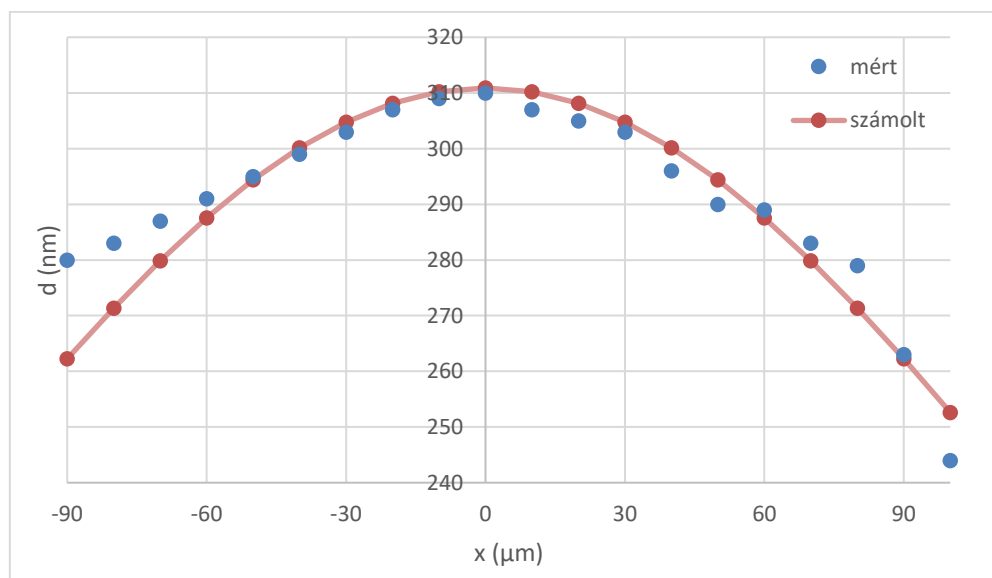
12. ábra. A folyadékhártya a méréseknél használt koordinátarendszerrel.

A 13. ábrán kék szín jelöli a felvett spektrális transzmittancia értékeket, míg a piros görbe a (2) összefüggés alapján illesztett transzmittancia görbét. Az ábrán látható esetben a hártya vastagsága a vizsgált pozícióban az illesztésből 277 nm-nek adódott.



13. ábra. Egy adott pozícióban mért spektrális transzmittancia görbe a ráillesztett görbével.

Az önkényesen választott vízszintes tengely mentén végzett mérés eredményei a 14. ábrán láthatóak. A kék pontok az x pozíció függvényében mért vastagságértékeket jelölik, a bordó görbe pedig a HP modell alapján számolt vastagság x pozíciótól való függését.



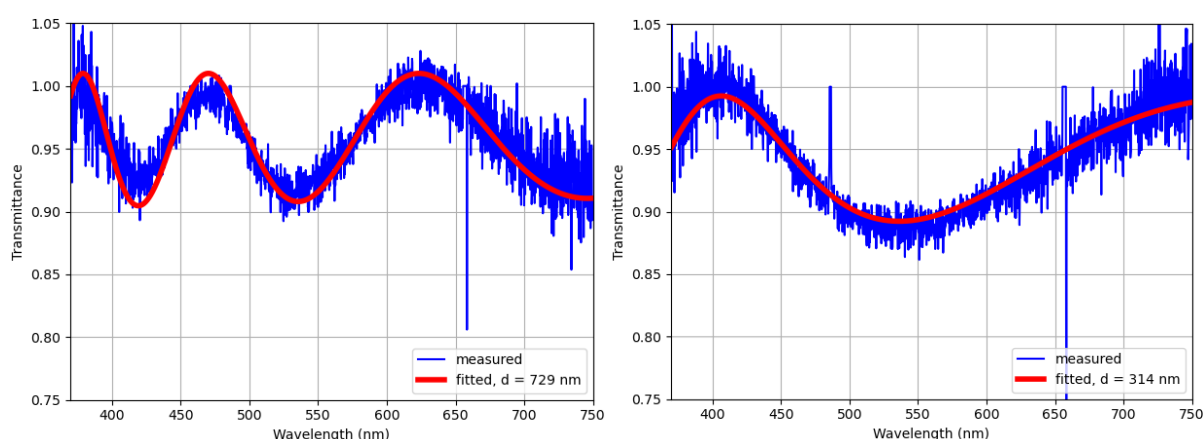
14. ábra. A desztillált vízből létrejött folyadékhártya vastagsága a választott vízszintes tengely mentén.

A 14. ábra alapján azt állapíthatjuk meg, hogy a folyadékhártya függőleges szimmetriatengelyének közelében a mért értékek ± 5 nm pontossággal visszaadják a HP modell által számolt értékeket. A folyadékhártya széle felé – a hártya vastag pereméhez közeledve – azonban az értékek egyre jobban eltérnek az elméleti modelltől bal oldalon, míg jobb oldalon elég jó az egyezés. Ennek alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a HP modell a folyadékhártya alakját legpontosabban a függőleges szimmetriatengely közelében írja le. Azt meg kell jegyezni, hogy a mérés során azt vettem észre, hogy a folyadékhártya nem volt teljesen homogén, a bal oldalon csillogást láttam, mintha a felülete nem lett volna teljesen sima, lokálisan egy kidudorodás volt megfigyelhető. Ilyen inhomogén áramlás könnyen előfordulhat, ha a két fűvóka nincsen tökéletesen szemben egymással. Ezek alapján a mérést célszerű lenne a későbbiekben megismételni, ügyelve a fűvókák pontos beállítására.

4.2.2. Izopropanol vizes oldataiból létrejövő folyadékhártya vastagságának mérése függőleges tengely mentén

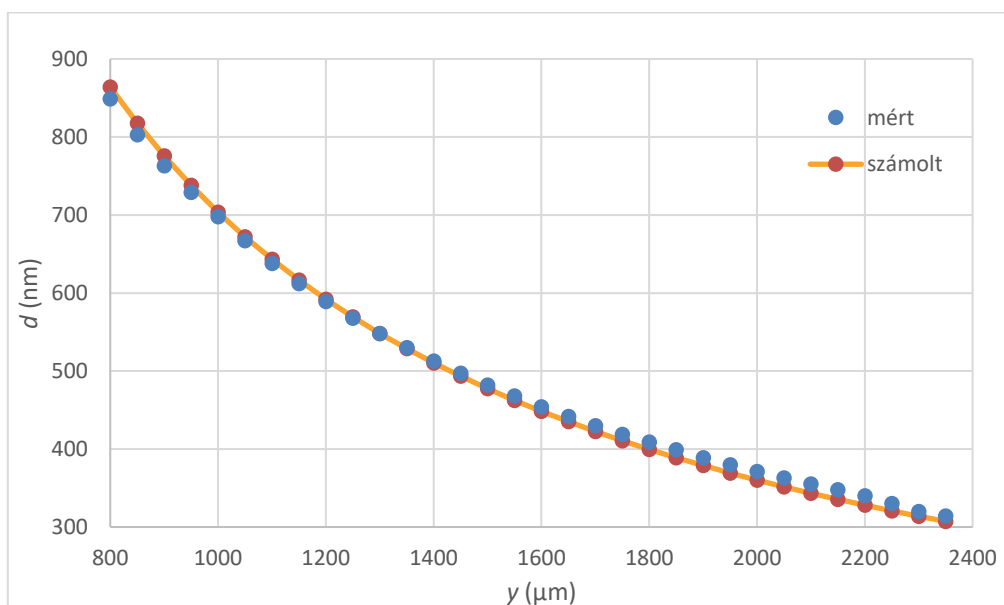
Ebben fejezetben az izopropanol vizes oldataiból előállított folyadékhártyák szimmetriatengelye mentén felvett spektrális transzmittancia görbék kiértékelésének eredményeit ismertetem. A méréseken sajnos idő hiányában nem tudtam részt venni.

A 15. ábrán láthatunk egy-egy példát a folyadékhártya vastagabb, a folyadéksugarak ütközéspontjához közelebbi, illetve attól távolabb lévő, vékonyabb részein felvett spektrális transzmittancia értékekre a rájuk a (2) egyenlet alapján illesztett görbékkel.



15. ábra. Példa a mért és illesztett spektrális transzmittancia görbékre a hártya vastagabb (bal oldalt) illetve vékonyabb (jobb oldalt) részein tiszta izopropanol hártya esetén.

Miután kiértékeltem a tiszta izopropanolból előállított folyadékhártya szimmetriatengelye mentén több pontban, levegőben felvett spektrális transzmittancia görbéket, meghatározva a hártya vastagságát, összehasonlítottam a mért értékeket a HP modell alapján számolt értékekkel. A mérésekhez névlegesen 18 μm átmérőjű fúvókákat használtak, azonban az illesztésnél a legjobb illeszkedés 19 μm -es fúvókákkal adódott. Tekintettel arra, hogy a fúvókák gyártásánál előfordulhat ± 1 μm -es eltérés, úgy gondolom, hogy a fúvókák átmérője valójában 19 μm lehetett. A két fúvókából kilépő folyadéksugarak ebben az esetben 53° alatt ütköztek. A mért vastagságértékek és a HP modell alapján számolt görbe a 16. ábrán látható.

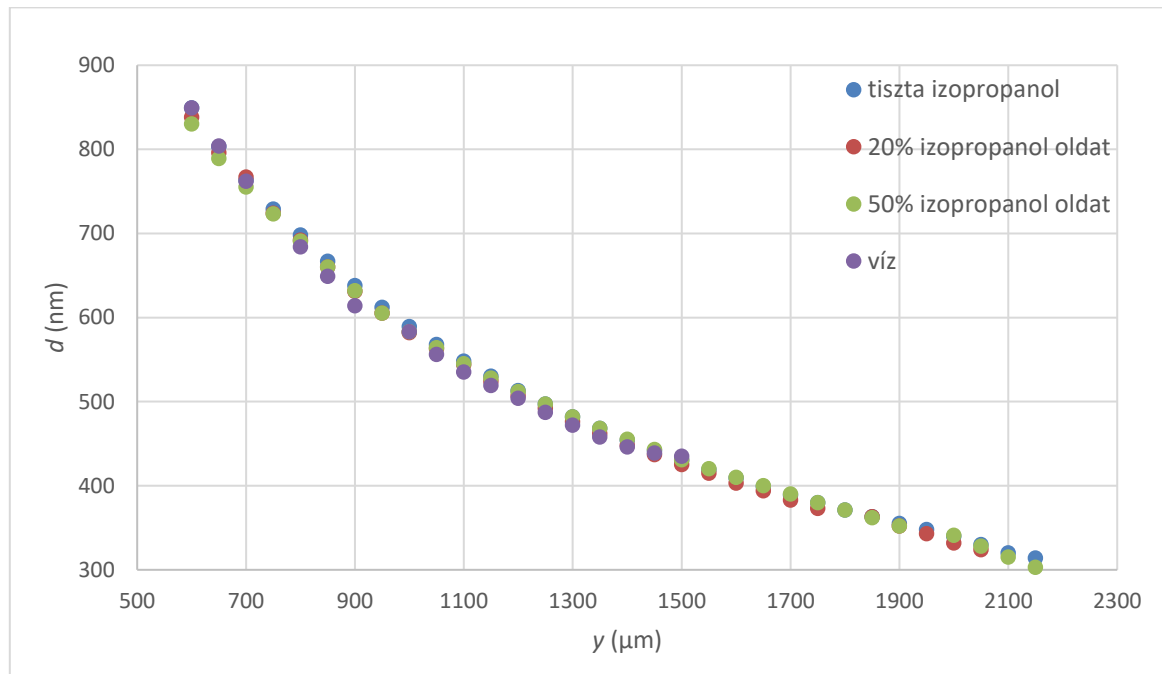


16. ábra. Tiszta izopropanolból előállított hártya vastagsága a függőleges szimmetriatengelye mentén.

A 16. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a mért eredmények jól egyeznek a HP modell alapján számolt vastagságértékekkel. A teljes mérési tartományon a mért és számolt értékek közötti relatív eltérés 4% alatt volt, ami megegyezik a vastagságmérési módszerünk hibahatárával. A hártya szimmetriatengelye mentén, az 1000 és 1600 μm közötti tartományban (a peremtől megfelelően távol) a relatív eltérés jóval a hibahatáron belül van.

Ezután kiértékeltem a tiszta vízzel, illetve az izopropanol 20%-os és 50%-os vizes oldataival kapott spektrális transzmittancia görbéket, szintén a folyadékhártya szimmetriatengelye mentén mérve. A kiértékeléshez az oldatok törésmutatóját a (7) összefüggés alapján számoltam. A különböző koncentrációjú oldatokkal kapott vastagságértékeket összehasonlító grafikon a 17. ábrán látható. A grafikonra tekintve megállapíthatjuk, hogy a különböző oldatok esetén is jól követik a vastagságértékek a HP

modell alapján kapott görbe menetét, azaz kijelenthetjük, hogy a HP modell jól írja le különböző oldatok esetén is a folyadékhártya vastagságának helyfüggését úgy, hogy nem veszi figyelembe a folyadék viszkozitását, sűrűségét és felületi feszültségét.



17. ábra. A különböző koncentrációjú oldatokkal végzett vastagságmérések eredményeinek összehasonlítása.

5. Összefoglalás

A munkám során az NLTL-ben kifejlesztett mérési elrendezéssel felvett spektrális transzmittancia adatokat értékeltem ki, melyek különböző oldatokból létrehozott vékony folyadékhártyák vastagságmérésének céljából lettek felvéve. A folyadékhártyákat 10 illetve 18 mikron átmérőjű 2-2 fűvóka hozta létre oly módon, hogy a fűvókákból kilépő folyadéksugarak ütköztek, és a folyadéksugarak síkjára merőleges síkban ultravékony folyadékhártya alakult ki. A hártya előállításához desztillált vizet, illetve különböző koncentrációjú izopropanol-víz oldatokat használtak.

A spektrális transzmittancia görbék kiértékelésével megállapítottam, hogy a létrejött folyadékhártyák vastagsága a hártyák szimmetriatengelyén a mérhető tartományon 220 és 900 nm között változott a HP modell által meghatározott görbe mentén 4%-os hibahatáron belül. Ez egyúttal azt is jelentette, hogy igazoltam, hogy a folyadék anyagi minőségét jellemző állandóktól – úgy, mint sűrűség, felületi feszültség és viszkozitás – a folyadékhártya vastagsága nem függ, ahogyan azt a HP modell is leírja. Továbbá meghatároztam a használt kísérleti elrendezés térbeli felbontását, és megállapítottam, hogy a berendezés nem teljesen optimális beállítása miatt asztigmia lép fel a folyadékhártyára leképezett fényfolt esetében. Erre alapozva javaslatot tettem a vastagságmérési elrendezés módosítására azzal, hogy a jól beállított optikai szál és lencse rendszerének apró változtatása helyett a folyadékhártya mozgatásával keressék meg a megfelelő képsíkot.

6. Irodalomjegyzék

- [1] M. Ekimova; W. Quevedo; M. Faubel; P. Wernet, E. T. J. Nibbering, „A liquid flatjet system for solution phase soft-x-ray spectroscopy”, *Structural Dynamics*, **2**, 054301 (2015).
- [2] G. Galinis; J. Strucka; J. C. T. Barnard; A. Braun; R. A. Smith; J. P. Marangos, „Micrometer-thickness liquid sheet jets flowing in vacuum”, *Review of Scientific Instruments*, **88**, 083117 (2017).
- [3] J. D. Koralek; J. B. Kim; P. Brůža; Ch. B. Curry; Z. Chen; H. A. Bechtel; A. A. Cordones; P. Sperling; S. Toleikis; J. F. Kern; S. P. Moeller; S. H. Glenzer; D. P. DePonte, „Generation and characterization of ultrathin free-flowing liquid sheets”, *Nature Communications*, **9**, 1353 (2018).
- [4] C. J. Crissman; M. Mo; Z. Chen; J. Yang; D. A. Huyke; S. H. Glenzer, K. Ledbetter; J. P. F. Nunes; M. Ling; H. Wang; X. Shen; X. Wang; D. P. DePonte, „Sub-micron thick liquid sheets produced by isotropically etched glass nozzles”, *Lab on a Chip*, **22**, 1365 (2022).
- [5] M. Füle, A. P. Kovács, T. Gilinger, M. Karnok, P. Gaál, S. Figul, G. Marowsky, K. Osvay; „Development of an ultrathin liquid sheet target for laser ion acceleration at high repetition rates in the kHz-range”, *Cambridge University Press*, 2024 (<https://doi.org/10.1017/hpl.2024.19>)
- [6] D. Hasson; R. E. Peck, „Thickness distribution in a sheet formed by impinging jets”, *A.I.Ch.E. Journal*, 752, 1964.
- [7] P. D. T. Huibers; D. O. Shah, „Multispectral Determination of Soap Film Thickness”, *Langmuir*, 13, 5995-5998 (1997).
- [8] M. Born, E. Wolf, „Principles of Optics” 7. kiadás, 7.6. fejezet, Cambridge University Press (2019)
- [9] A. P. Kovács; M. Karnok; T. Gilinger; M. Füle; P. Gaál; S. Figul; G. Marowski; K. Osvay, „Characterisation of an ultrathin liquid leaf target for ion acceleration”, *ELI Workshop on Advanced Technologies* (2023)
- [10] V. I. Kuchuk; I. Yu. Shirokova; E. V. Golikova, „Physiochemical Properties of Water-Alcohol Mixtures of a Homological Series of Lower Aliphatic Alcohols”, *Glass Physics and Chemistry*, 38, 460-465 (2012).
- [11] J. H. Gladstone; J. Dale, „On the Influence of temperature on the refraction of light”, *Philos. Trans. R. Soc. London*, 148, 887-902 (1858).

7. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Kovács Attila Pálnak, a rengeteg segítséget és a felém mutatott végtelen türelmét. Köszönöm Karnok Máténak, hogy a hELios laborban folytatott mérések alkalmával barátsággal fogadott, és minden kérdésemre szívesen válaszolt.

A projektet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a Nemzeti Laboratóriumok Program keretén belül (NKFIH-877-2/2020, NKFIH-476-4/2021, és NKFIH-476-16/2021)

8. Nyilatkozat

Alulírott, Tóth Noémi, fizika BSc szakos hallgató, kijelentem, hogy a TDK dolgozatomban ismertettek saját munkám eredményei, és minden felhasznált, nem saját munkából származó eredmény esetén hivatkozással jelöltem annak forrását.

Dátum (Szeged, 2024. 06. 16)

Tóth Noémi

aláírás