

Mérőrendszer fejlesztése elektromos térrel kontrollált mágneses rendeződés optikai vizsgálatához

TDK dolgozat

Szász Bence

Konzulensek:
Dr. Szaller Dávid
Farkas Viktor



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Fizika Tanszék

2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja	3
2.1. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kristályszerkezete	3
2.2. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ mágneses tulajdonságai	3
2.3. $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ THz abszorpciójának mágneses és elektromos terekkel történő vezérlése	7
2.4. A Sm^{3+} ion elektronszerkezete	10
3. Korábbi mérési eredményeim	12
3.1. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ elektronpálya átmeneteinek vizsgálata külső elektromos és mágneses terekben	12
3.2. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kollektív spingerjsztéseinek vizsgálata külső elektromos és mágneses térben	13
4. A minták előkészítése	16
5. A kísérletekhez fejlesztett mérőrendszer	17
5.1. Nagyfeszültségű kapcsolóüzemű tápegység	17
5.2. A mérőrendszert irányító mikrokontroller kódja	21
5.3. A függvénygenerátor, az 5 voltos stabilizátor és a sorkimenő transzformátor meghajtója	22
5.4. Sorkimenő transzformátor	22
5.5. Alacsony hőmérsékletű nagyfeszültségű mérőrendszer fejlesztése	24
6. A tápegység karakterizálása	26
6.1. Tranziens jelenségek karakterizálása	26
6.2. A kimenő feszültség spektruma	27
7. Kriosztát tervezése nagy mágneses terű mérésekhez	29
8. Összefoglalás	33

1. Bevezetés

A modern szilárdtestfizikai kutatásokat a tudományos érdeklődésen túl, sokszor az elektronikai és számítástechnikai alkalmazások lehetősége motiválja. A szigetelő mágnesekben kialakuló változatos mágneses rendeződési formák, ezen belül a kompenzált antiferromágneses rend, ilyen célú alkalmazására az elmúlt években számos javaslat született [1, 2]. Az antiferromágnesek alkalmazását számos előnyös tulajdonságuk (gyors dinamika, szórt mágneses terekkel szembeni robusztusság) ellenére néhány kihívás is nehezíti: a kis méretű, antiferromágnesesen rendezett tartományok (domének) detektálása és manipulálása kihívást jelentenek.

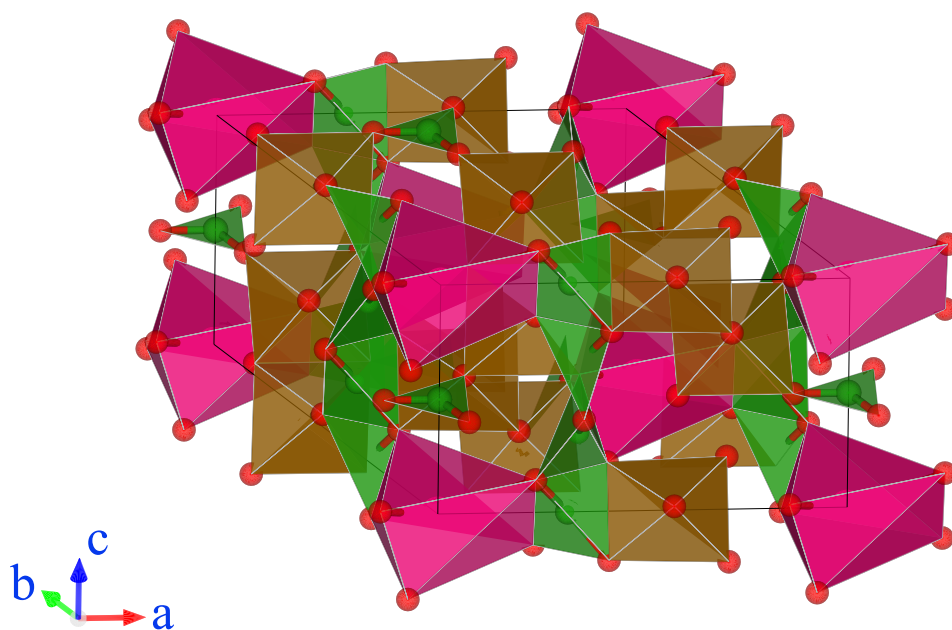
Értékes információt nyerhetünk a mágneses rendről, annak kollektív mágneses gerjesztéseinek (spin hullámok, magnonok) vizsgálatával. A gerjesztési frekvenciák és a rezonanciák elnyelési erősségének ismeretében következtethetünk a spin rendre illetve az azt stabilizáló kölcsönhatások erősségére.

A kutatás fő motivációja az egyszerre mágneses rendeződést és elektromos polarizációt mutató, magnetoelektromos anyagok optikai gerjesztéseinek vizsgálata nagy mágneses és elektromos térben. TDK munkám keretében egy megfizethető nagyfeszültségű programozható tápegységet építettem. Ennek segítségével magneto-elektromos anyagok ferro-elektromos és mágneses rendeződését lehet befolyásolni és a kialakuló alapállapot optikai gerjesztéseink elektromos- és mágneses tér függését lehet vizsgálni. Így a dolgozat célkitűzésének megvalósítása során egy olyan, nemzetközi szinten is egyedülálló mérőrendszert készítettem, amely alacsony hőmérsékleten is lehetővé teszi nagy mágneses és elektromos terek egyidejű alkalmazását. Emellett nagy látószögű optikai hozzáférést biztosít, módot nyújtva a magnetoelektromos anyagok optikai tulajdonságainak széles spektrális tartományban történő vizsgálatára.

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja

2.1. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kristályszerkezete

A ritkaföldfém-vas-borátok az úgynevezett királis kristályok csoportjába tartoznak, melyek kristályrácsát nem lehet tükörképével fedésbe hozni. Magas hőmérsékleten a ritkaföldfém-vas-borátok $R32$ tércsoportba tartozó trigonális szerkezetben kristályosodnak, középpontos szimmetriával nem rendelkeznek. Az általam vizsgált kristály felépítése a 2.1. ábrán látható. A Sm^{3+} ionokat a c kristálytani iránnyal párhuzamos tengelyű trigonális prizmat alkotó O^{2-} ionok veszik körbe. A ritkaföldfém kristálytani pozíciójának a szimmetriája D_3 , mely a teljes kristály pontcsoportja is [3].



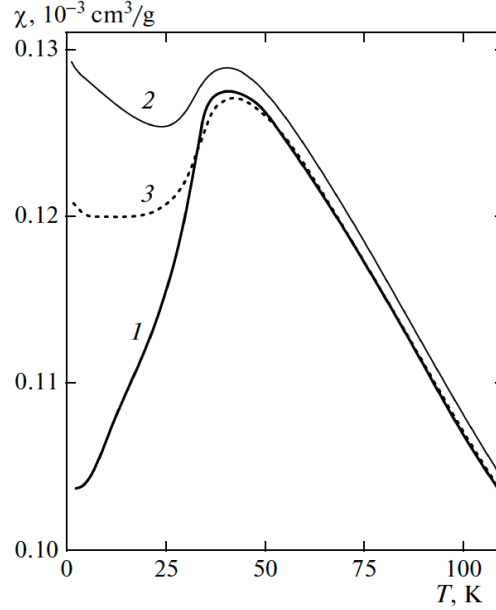
2.1. ábra. $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kristály szerkezete. A Sm-momentumok **magenta** színnel és a Fe-site-ok **halvány narancssárgával**, a B-ionok **zölddel**, az oxigének pedig **pirossal** vannak jelölve. Az ábrát a [4] adatbázis alapján VESTA Softwarrel készítettem.

2.2. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ mágneses tulajdonságai

A ritkaföldfém-vas-borátokban Fe^{3+} ionok $S=5/2$ spinjei antiferromágnesesen rendeződnek 30 – 40 K alatt. Az egytengelyű mágneses anizotropia előjelét a ritkaföldfém ionok fajtája határozza meg: a könnyű-tengelyű (easy-axis) vegyületekben, pl. $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$,

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja

a momentumok a c tengellyel párhuzamosan, míg a könnyű-síkú (easy-plane) változatokban, pl. $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$, arra merőleges síkban helyezkednek el. Az általam vizsgált $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ esetén, a Hund-szabályok alapján, a Sm^{3+} ionok 5 db 4f elektronjának spin és pályamomentumai: $S=5/2$ és $L=5$, melyből a teljes pályamomentum $J=5/2$. Ezt az elektronállapotot a spektroszkópiában a $^6H_{5/2}$ szimbólummal jelöljük, amely $^{2S+1}L_J$ konvenciónak megfelelően adja meg az impulzusmomentumokat.



2.2. ábra. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ mágneses szuszceptibilitásának hőmérsékletfüggése [5]. A kristály mágnesezettségét (M) mérték $H = 1 \text{ kOe}$ nagyságú, c tengelyre merőleges (1) és párhuzamos (2) H mágneses térerősség esetén, a szuszceptibilitás ennek mágneses tér szerinti deriváltja. A (3)-as görbe a $H \approx 10 \text{ kOe}$ nagyságú mágneses térerősség esetén történő mérés eredménye, ahol a mágneses tér hatására újrarendeződnek a vas ionok spinjei az ab síkban, és merőlegesen lesznek a mágneses térre.

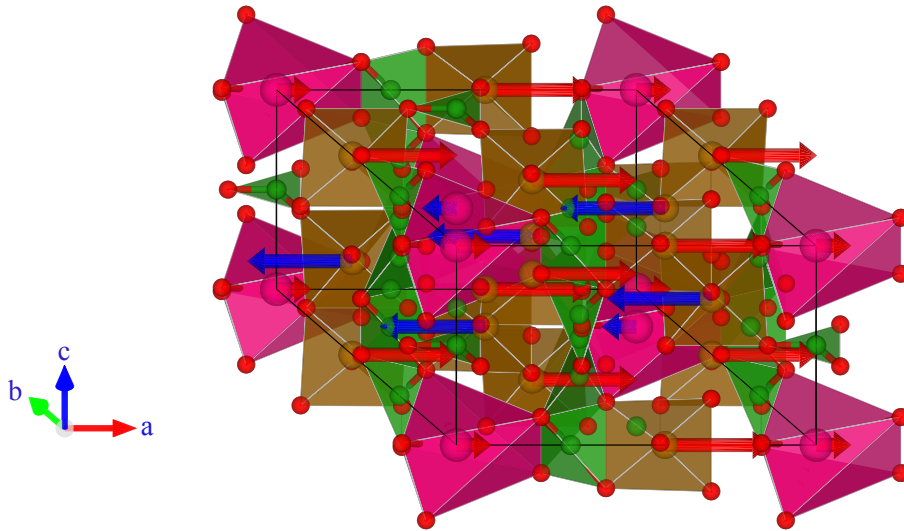
A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ paramágneses fázisában a szuszceptibilitás közel izotróp (2.2. ábra) és követi a Curie-Weiss törvényt. Körülbelül 40 K alatt a szuszceptibilitás csökkeni kezd, majd anizotróppá válik $T_N \approx 33 \text{ K}$ körül [5]. A c tengelyre merőleges irányban mért szuszceptibilitás lényegesen gyorsabban csökken alacsony hőmérsékletek felé, mint a c tengellyel párhuzamos komponens, mely könnyű-síkú anizotrópiára utal. A szuszceptibilitás anizotrópiáját a momentumok irányfüggő eloszlása határozza meg, amit a c tengelyre merőleges síkbeli trigonális anizotrópia és/vagy az indukált magneto-elasztikus anizotrópia szabnak meg. $H \approx 10 \text{ kOe}$ nagyságú mágneses tér hatására a spinek a síkon belül elfordulnak és merőlegesen állnak be a térerősségre, mely egy transzverzális szuszceptibilitást eredményez.

A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ mágneses szerkezetét neutronszerkezeti kísérlettel határozták meg [6]. A mágneses szerkezet meghatározásához a feltételezett szerkezet szabad paramétereit illesztik a mért diffrakciós mintázatra. Ehhez a finomításhoz felhasználták a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ionok mágneses formfaktorait. A vas ionok mágneses momentumai ferromágnesesen ren-

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja

deződnek egy ab síkbeli rétegen belül úgy, hogy c irányban a rétegek között viszont antiferromágneses rendeződés van. A finomításnál használt első modellben a Sm és a Fe spinjei párhuzamosak egymással. Az illesztésből meghatározott mágneses momentumok Bohr-mageton (μ_B) egységekben, 1.7 K-en, $\mu_{\text{Fe}} = 4.2(1)\mu_B$ és $\mu_{\text{Sm}} = 0.24(4)\mu_B$ [6].

A modell további finomítása szerint a Fe és a Sm mágneses momentumai kb. 70° -kal vannak elforgatva egymáshoz képest (lásd 2.3. ábra) így $\mu_{\text{Fe}} = 4.2(1)\mu_B$ és $\mu_{\text{Sm}} = 0.8(2)\mu_B$ adódik. A finomítást tovább analizálva azt találták, hogy minden modell, amiben a Sm teljes momentuma (μ_{Total}) $0.5\mu_B < \mu_{\text{Total}} < 1.4\mu_B$ tartományba esik, hasonlóan jól leírja a diffrakciós mérések eredményeit, így a Sm momentuma bizonytalan. Minden esetben a 90° és 60° közötti dőlés jobban preferált, mint a kollineáris párhuzamos elrendezés. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ neutronszerkezetéből meghatározott mágneses struktúrája a 2.3 ábrán látható. A szamárium helyek mágneses momentumait, a jobb láthatóság érdekében, kétszer akkorának ábrázoltam.

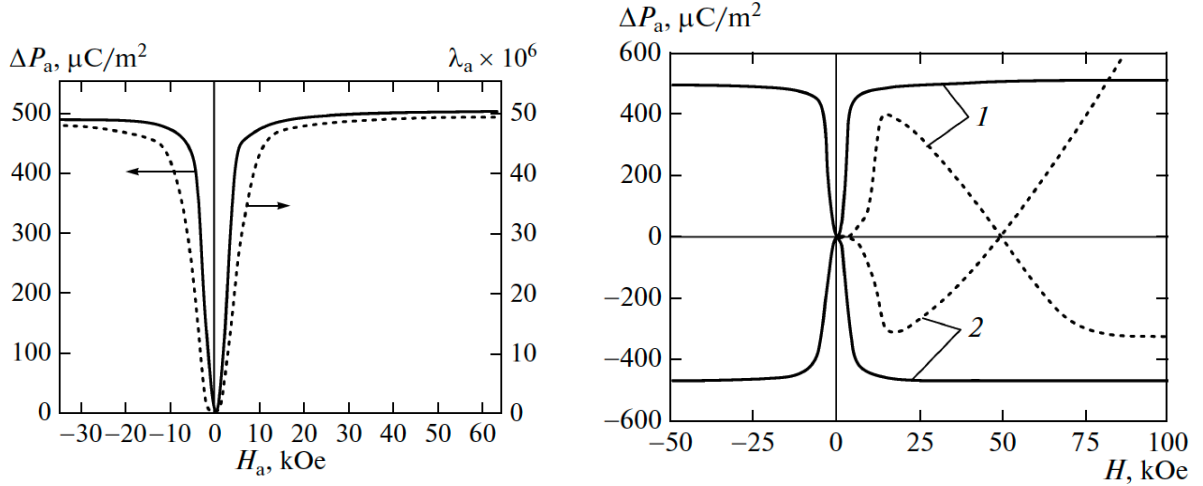


2.3. ábra. $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ mágneses szerkezete. A Sm-ionok környezetét **magenta** színnel és a Fe-rács helyeket **halvány narancssárgával**, a B-ionokat **zölddel**, az oxigéneket pedig **pirossal** jelöltem. Az antiferromágneses szerkezetet az ionok mágneses momentumainak megfelelő piros és kék nyilak jelzik. A [6] neutron diffrakciós kísérletnek megfelelően, a Sm momentumokat rövidebb, míg a domináns Fe momentumokat hosszabb nyíllal ábrázoltam. Az ábrát a VESTA szoftverrel készítettem.

A ritkaföldfém-vas-borátok királis kristályszerkezetüknek köszönhetően magnetoelektromos effektust mutatnak, azaz külső mágneses tér elektromos polarizációt indukál bennük. Mivel ezen keresztteffektus során az időtükrözésben páratlan, axiál vektorként transzformálódó mágneses tér időtükrözésre invariáns elektromos polarizációt hoz létre, ezért a magnetoelektromos csatolás csak akkor jelenhet meg, ha mind az időtükrözési, mind pedig az inverziós szimmetria sérül. A könnyű-tengelyű anizotrópiával rendelkező vasborátok mágneses tér által indukált polarizációja nem nagyobb, mint párszor $10 \mu\text{C}/\text{m}^2$, míg a könnyű-síkú anizotrópia esetén az több $100\text{--}1000 \mu\text{C}/\text{m}^2$ -et is elérhet. Az elektromos polarizáció ΔP_a és a mágneses tér hatására bekövetkező relatív hosszváltozás, a

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja

λ_a magnetostrikció, mágneses térfüggése $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ -ban a 2.4a. ábrán látható. 10 kOe-nél kisebb mágneses tér esetén mind a polarizáció, mind a magnetostrikció gyors növekedést mutat, melyet az antiferromágneses domének kis terekben történő átrendeződésének tulajdonítanak. Hasonló kis terű viselkedést figyeltek meg más könnyű-síkú vas-borátban is, például a $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ esetén (2.4b. ábra jobb oldala).



2.4. ábra. A bal oldali ábrán a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ egykristály mágneses tér által indukált polarizációja ΔP_a (folytonos görbe), és a magnetostrikciója $\lambda_a = u_{xx}$ (szaggatott görbe) látható, a tengely irányú mágneses tér hatására [5]. A jobb oldali ábrán a tengely menti longitudinális mágneses tér (1) és b tengely menti transzverzális mágneses tér (2) hatására indukált polarizáció ΔP_a látható, $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ (szaggatott görbe) és $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ esetén (folytonos görbe) [5]

A ferroelektromos polarizációhoz és magnetostrikcióhoz mind a vas spinekhez rendelt $\mathbf{L}$ antiferromágneses rendparaméter, mind a ritkaföldfémek m_i mágneses momentumai hozzájárulnak. Az anyag szimmetriája az alábbi alakú magnetoelektromos csatolást engedi meg, mely tartalmazza mind a vas, mind pedig a ritkaföldfém ionok járulékait:

$$P_x = c_1 L_y L_x + c_2 (L_x^2 - L_y^2) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 [c_3 (m_{ix}^2 - m_{iy}^2) + c_5 m_{iz} m_{iy}] \quad [5] \quad (2.1)$$

$$u_{xx} - u_{yy} = b_1 L_y L_z + b_2 (L_x^2 - L_y^2) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 [b_3 (m_{ix}^2 - m_{iy}^2) + b_4 m_{iz} m_{iy}] \quad [5] \quad (2.2)$$

Az összegzés a két ritkaföldfém alrácra vonatkozik ($i = 1, 2$), az alsó indexek (x, y, z) pedig kristálytani irányokra utalnak (a, b, c) . A b_i , c_i együtthatók az (2.1) és (2.2) egyenletekben azonos invariánsokra vonatkoznak. Az (2.1) és (2.2) egyenleteket vizsgálva azt a következtetést vonhatjuk le, hogy kis terekben, amíg különböző antiferromágneses domének találhatók a mintában, az $\mathbf{L}$ vektor eloszlása hexagonális mintázatot követ, és

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja

a polarizáció zérus. Azonban, ha az antiferromágneses doméneket például külső térrel rendezzük, akkor véges polarizáció (és magnetostríkciónak) jelenik meg. Például $\mathbf{H} \parallel x$ irányban alkalmazott mágneses tér rá merőleges L_y antiferromágnességet és véges $-c_2$ polarizációt preferál. Ezzel szemben, ha 90° -kal elforgatjuk a teret, $\mathbf{H} \parallel y$ irányba, akkor L_x antiferromágnesség stabil, és a P_x polarizáció előjelet vált. A 2.4b. ábra szerint, a szamárium és neodímium magnetoelektromos tulajdonságai kis mágneses terek esetén nagyon hasonlóak, azonban nagyobb terekben eltérőek. $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ -ban a mágneses tér által indukált polarizáció telítésbe megy 20 kOe-en és változatlan marad nagy terekig, míg $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$ -ben a polarizáció előjelet vált 50 kOe felett. A jelenség megértéséhez egy olyan modellt javasoltak, melyben a ritkaföldfémekre ható effektív tér tartalmazza a $\mathbf{H}$ külső mágneses teret és a kicserélődési kölcsönhatás effektív terét $\mathbf{H}_{\text{Fe-R}}$ [5]. Az utóbbi teret a vas alrendszer hozza létre, így külső térre merőleges. Amikor a külső mágneses tér kiegyenlíti a kicserélődési kölcsönhatás effektív terét, és az $m_{ix}^2 - m_{iy}^2$ -el arányos tagok előjelet váltanak, akkor a magnetoelektromos polarizáció is előjelet vált. A kritikus külső mágneses tér értékét, aminél előjelet vált a magnetoelektromos polarizáció, a ritkaföldfém ion Zeeman-energiájának és a Fe-R kicserélődési kölcsönhatásnak az aránya határozza meg. Ennek a nagysága [5]:

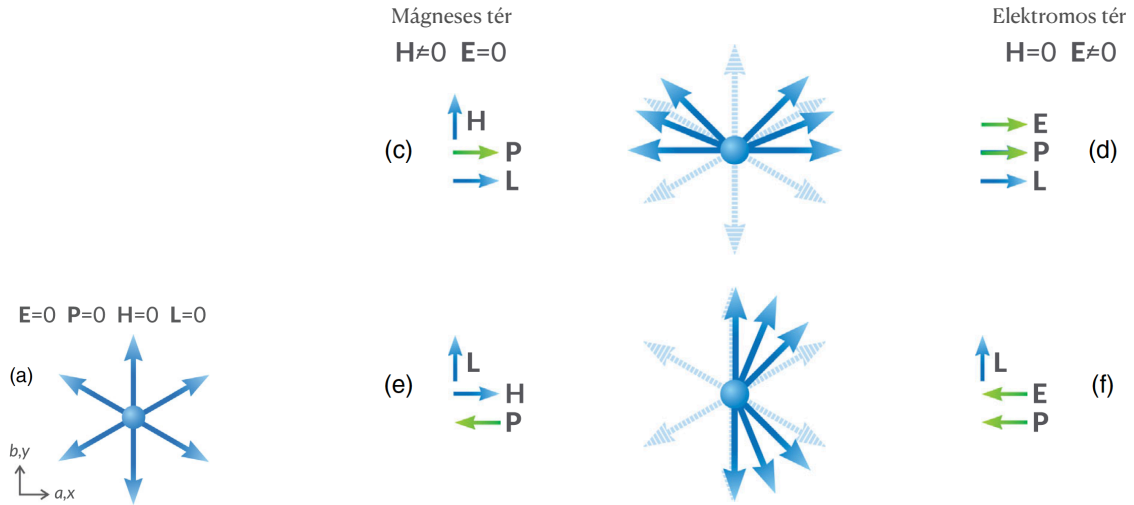
$$H_c^{Sm} = H_{\text{Fe-R}}^{\text{Nd}} \frac{g_{\text{Sm}} - 1}{g_{\text{Sm}}} \frac{g_{\text{Nd}}}{g_{\text{Nd}} - 1} \approx 300 \text{ kOe},$$

mely jóval nagyobb, mit az eddigi kísérletekben alkalmazott mágneses tér.

2.3. $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ THz abszorpciójának mágneses és elektromos terekkel történő vezérlése

$\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ csatolt Fe-Sm antiferromágneses rezonanciáját terahertz (THz) transzmissziós spektroszkópiával detektálták [7]. A különböző fénypolarizáció mellett végzett abszorpciós mérésekből meghatározták, hogy a rezonancia mágneses dipól-aktív, és az antiferromágneses $\mathbf{L}$ vektorra merőleges oszcilláló mágneses térrel gerjeszthető.

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja

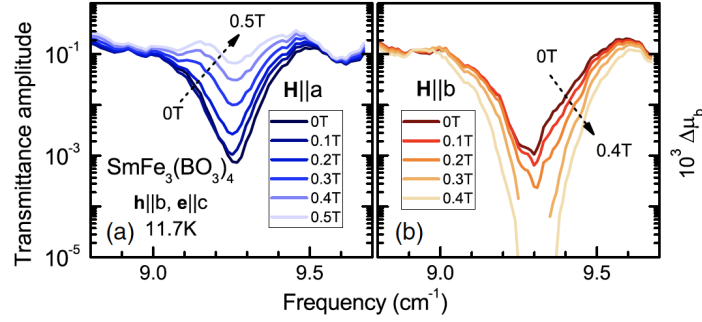


2.5. ábra. Elektromos és mágneses rendeződés ritkaföldfém-vas-borátokban.

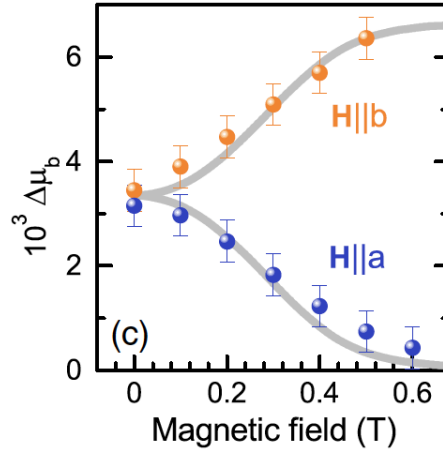
(a) Fe spinek (kék nyilak) homogén eloszlása az ab síkban, állandó mágneses ($\mathbf{H}$) és elektromos ($\mathbf{E}$) tér hiányában. A nyilak a minta különböző doménjeit reprezentálják. Ebben az esetben mind az $\mathbf{L}$ antiferromágneses vektor mind pedig $\mathbf{P}$ eredő statikus polarizáció nulla. $\mathbf{H} \parallel b$ mágneses mező (c) és $\mathbf{E} \uparrow \uparrow a$ elektromos tér (d) által indukált $\mathbf{P} \uparrow \uparrow a$ és $\mathbf{L} \parallel a$. A mágneses tér 90° -al történő elfordítása $\mathbf{H} \parallel a$ irányba (e), vagy az elektromos tér előjelének megfordítása $\mathbf{E} \downarrow \downarrow a$ (f) a statikus polarizáció és antiferromágneses vektor irányának felcserélését eredményezi [7].

A 2.5a. ábrán látható, hogy külső mágneses tér nélkül a lokális mágneses momentumok homogén módon oszlanak el az ab síkban. Ez azt jelenti, hogy átlagosan a mágneses momentumok 50%-át gerjeszti az ab síkban lineárisan polarizált elektromágneses sugárzás. Ez nagy mértékben megváltozik, ha mágneses vagy elektromos térbe helyezzük a mintát. Ahogy a 2.5c–f. ábrákon látható a külső terek megszüntetik a mágneses momentumok homogén eloszlását az ab síkban. Ez egyrészt az antiferromágneses rend mágneses szuszceptibilitás anizotrópiájának illetve az előző fejezet (2.1)-es képletével tárgyalt magnetoelektromos csatolásnak köszönhető. A külső mágneses illetve elektromos terek megtörik az ab sík izotrópiáját és inhomogénné teszik a domének eloszlását. Ennek következtében a módus intenzitását megváltoztatják, anizotróppá teszik. A 2.6a. és a 2.6b. ábrák azt demonstrálják, hogy a rezonáns mágneses gerjesztés optikai abszorpciójának erőssége vagy csökkenthető, vagy növelhető, a külső mágneses tér irányától függően.

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja



2.6. ábra. Magnon gerjesztés manipulációja mágneses térrel. (a) A magnon gerjesztés intenzitásának csökkentése a tengely irányú külső mágneses térrel. (b) Módus intenzitásának növekedése b tengellyel párhuzamos mágneses térrel. [7]



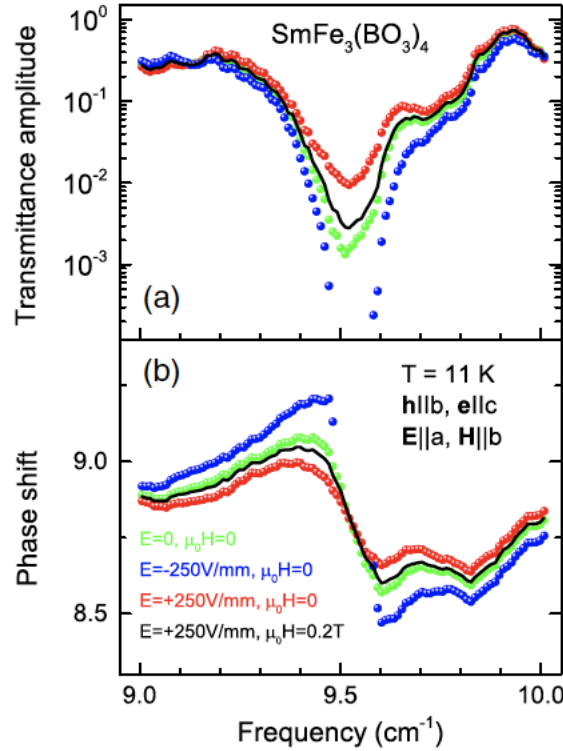
2.7. ábra. A módusok intenzitásának mágneses térfüggése [7]

A 2.7. ábrán a és b irányú mágneses terek hatásának összehasonlítása látható, azt tapasztalták, hogy a mágneses tér a módusok intenzitását azonos mértékben növeli és csökkenti azonos mágneses tér nagyság esetén ezek irányától függően.

Mivel legalább 0.5 T nagyságú tér szükséges ahhoz, hogy a mágneses momentumokat teljesen rendezzük, ezért ezen a térskálán változik az abszorpció. A módus intenzitása, a $\mathbf{H} = 0$ esethez képest, dupla intenzitás értéken telítődik (2.6b. ábra). A 2.5. ábrán láttaknak megfelelően negatív vagy pozitív statikus elektromos polarizáció hozható létre mágneses vagy elektromos terekkel az a kristálytani tengely mentén. Ez adta az ötletet a mágneses gerjesztések elektromos térrel történő vezérléséhez. Szintén a 2.5 ábrának megfelelően, ha állandó feszültséget kapcsolunk az a tengely mentén a mintára, akkor a két lehetséges elektromos polarizáció egyikét részesítené előnyben. A külső terekkel kiválasztott antiferromágneses állapot iránya meghatározza a gerjesztés kiválasztási szabályait, ami felhasználható lehet a dinamikus mágneses tulajdonságok elektromos térrel történő vezérlésére. A mágneses gerjesztés elektromos térrel történő vezérlésével kapcsolatos eredmények a 2.8 ábrán találhatók, melyek a THz transzmisszió amplitúdójának és

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja

fázistolásának elektromos és mágneses térfüggését mutatják. A 2.8. ábrán a terahertz (THz) transzmisszió amplitúdójának és fázistolásának elektromos és mágneses térfüggése figyelhető meg. Az elektromos tér hatására az amplitúdó több mint egy nagyságrenddel változik. A rezonanciafrekvenciához közeli nagy változások ellenére a rezonanciától távol nem detektálható változás. Ennek a rezonanciának kicsi a járuléka a relatív mágneses permeabilitáshoz, ezért az optika úthossz változása $\Delta l \sim 1 \times 10^{-2}$ mm nagyságúra tehető, ami a terahertzes mérés technikával már nem mérhető.



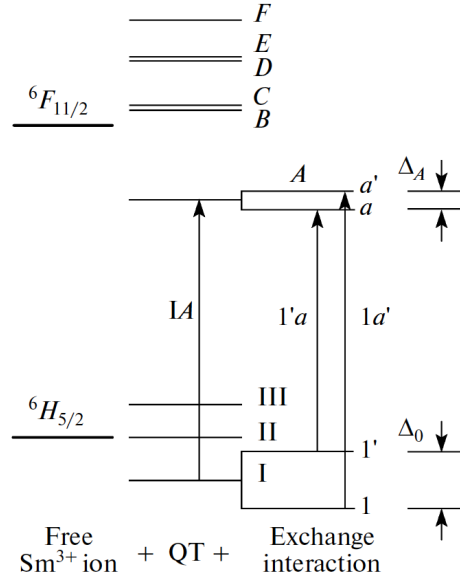
2.8. ábra. Magnon manipulációja statikus elektromos térrel $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ -ban. (a) Transzmittancia amplitúdó és (b) fázistolás spektrum elektromos térben. Színmagyarázat: zöld - kezdő állapot, kék - negatív elektromos tér, piros - pozitív elektromos tér, fekete vonal - egy külső mágneses tér kompenzálhatja az elektromos tér hatását. [7]

2.4. A Sm^{3+} ion elektronszerkezete

A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai tulajdonságainak megértéséhez először áttekintem a Sm^{3+} ion gerjesztéseit. A szabad Sm^{3+} ion $^6H_{5/2}$ alapállapotú elektron konfigurációja a szomszédos O^{2-} ionok kristályterében felhasad három darab kétszeresen degenerált nívóra (dublett). Hőmérsékletfüggő spektroszkópiai mérések tanulsága szerint az alapállapot fölött további két dublett található 135 cm^{-1} és 220 cm^{-1} gerjesztési energiánál (lásd 2.9. ábra) [3]. A hőmérséklet csökkentésével a gerjesztett állapotok betöltése csökken, ezért az azokról induló optikai átmenetek intenzitása is csökken. A szabad ion gerjesztett állapotai, az alapállapothoz hasonlóan, felhasadnak a kristálytérben, ami miatt az átmenetek finomszerkezettel rendelkeznek. Ezek vizsgálatára az optikai spektroszkópia kiválóan alkalmas,

2. Motiváció: a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ optikai gerjesztéseinek elektromos kontrollja

melynek segítségével tanulmányozták a multipletek közötti átmenetek pozícióját, finomszerkezetét [3]. A mágneseesen rendezett fázisban a Fe ionok lokális mágnesees terében a Sm^{3+} ion dublettjei tovább hasadnak, ahogy ezt a 2.9. ábra mutatja. A g -faktor ismeretében ennek segítségével mérhető a kicserélődési tér.



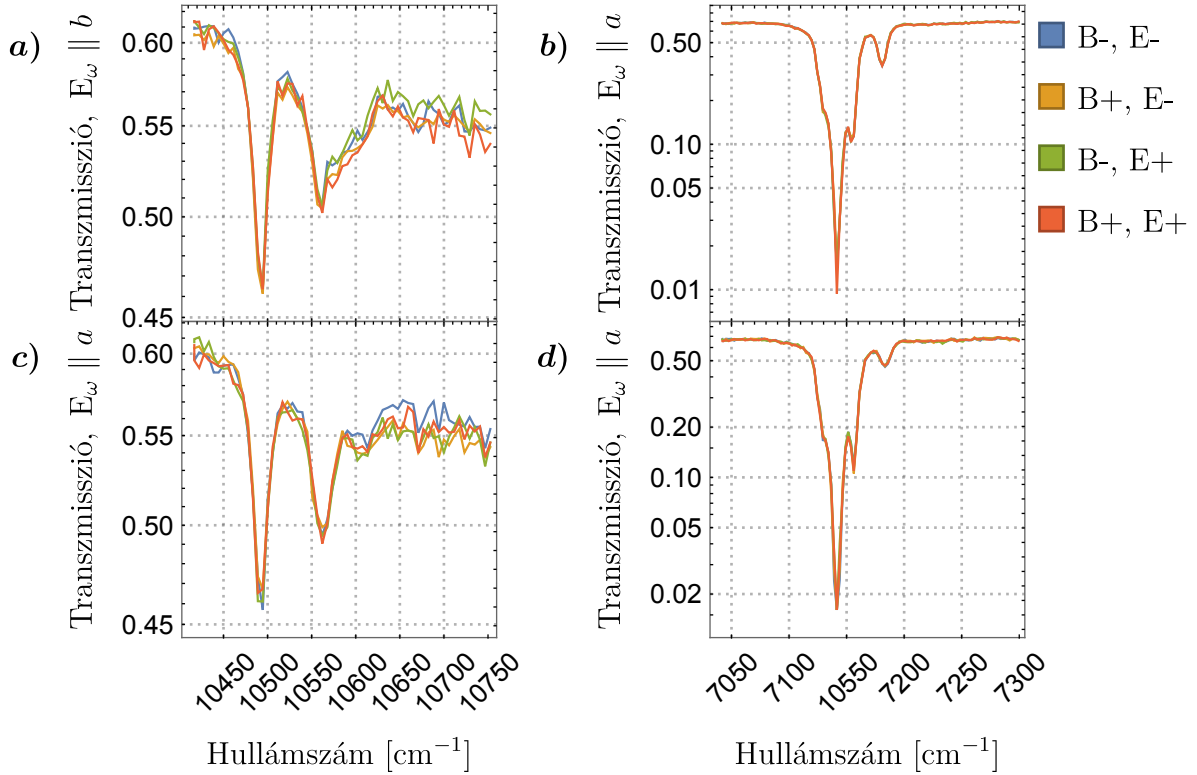
2.9. ábra. Sm^{3+} ion dublettjeinek felhasadása alap ($^6H_{5/2}$) és gerjesztett ($^6F_{11/2}$) állapotban, a vas ionok lokális terében, a mágneseesen rendezett fázisban. [3]

3. Korábbi mérési eredményeim

A dolgozatom keretein belül egy nagyfeszültségű programozható tápegységet építettem. Ennek a szükségességét előző méréseim indukálták, melyeket ebben a fejezetben prezentálok, a fejlesztés és a kísérletek kontextusba helyezésének érdekében.

3.1. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ elektronpálya átmeneteinek vizsgálata külső elektromos és mágneses terekben

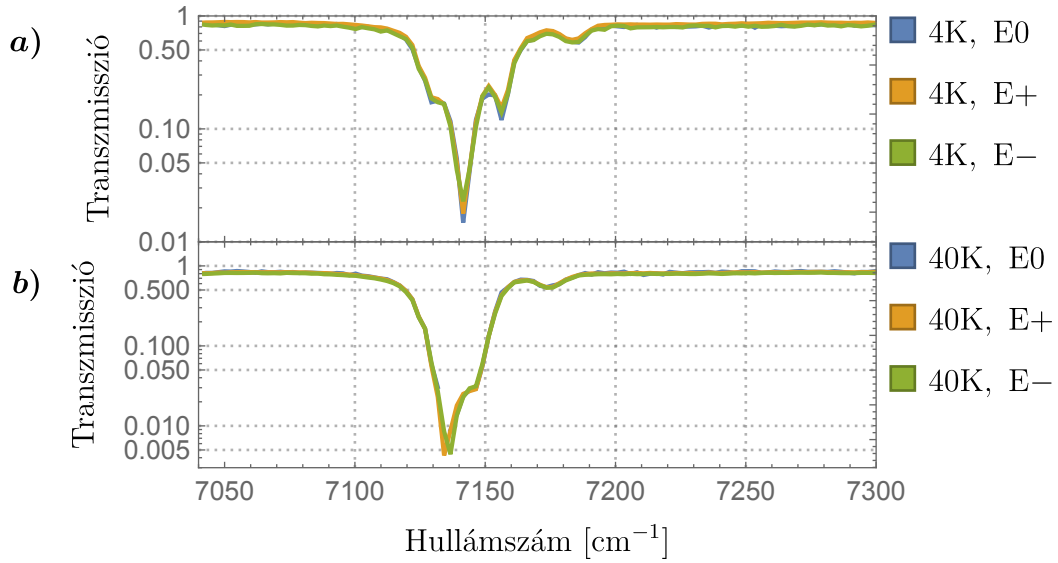
A BSc szakdolgozatom keretén belül végzett mérésekben az antiferromágneses doméneket gyenge külső elektromos és mágneses terekkel (3.1. ábra), vagy csak elektromos terekkel (3.2. ábra) kíséreltem meg befolyásolni. A méréseket közeli infravörös tartományon végeztem, transzmissziós elrendezésben, egy Czerny-Turner monokromátoros spektrométert használva.



3.1. ábra. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ polarizált transzmissziós spektrumai a ${}^6F_{5/2}$ és ${}^6F_{11/2}$ f-f átmenetek közelében 4 K-en. Az alkalmazott elektromos és mágneses terek nagysága ± 300 V ($E_{\pm}$) illetve 0 V (E_0), és ± 250 mT voltak. Az **a)** és **c)** panelen a ${}^6F_{11/2}$ f-f átmenet közelében az $E_{\omega} \parallel b$ és $E_{\omega} \parallel a$ irányban polarizált fénnel, 4 K-en mért transzmissziós spektrumok láthatóak. A **b)** és **d)** panelen a ${}^6F_{5/2}$ f-f átmenet közelében az $E_{\omega} \parallel a$ és $E_{\omega} \parallel b$ irányban polarizált fénnel, 4 K-en mért transzmissziós spektrumok láthatóak. [8]

A $\pm B$ és $\pm E$ terek összes lehetséges előjel kombinációja mellett megmértem a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ polarizált transzmissziós spektrumát. Ezzel a módszerrel a minta transzmissziója mellett

a polarizációfüggő abszorpcióját, azaz a lineáris dikroizmust is tanulmányoztam. Az alkalmazott mágneses és elektromos terek nagysága 250 mT illetve 150 kV/m (a tápegység amit alkalmaztam 1 kV feszültséget tudott kiadni) volt. A külső terek nem változtatták meg a transzmisszió értékét, illetve a lineáris dikroizmust, annak ellenére, hogy a 2.6. és a 2.8. ábrán látható mérések alapján arra számítottunk, hogy megfelelő a mágneses és elektromos terek nagysága ahhoz, hogy az antiferromágneses doméneket jelentősen átrendezze. Ezt követően megvizsgáltam, hogy csak elektromos terek segítségével lehetséges-e a domének eloszlását befolyásolni. A mérési eredményei a 3.2. ábrán láthatók.

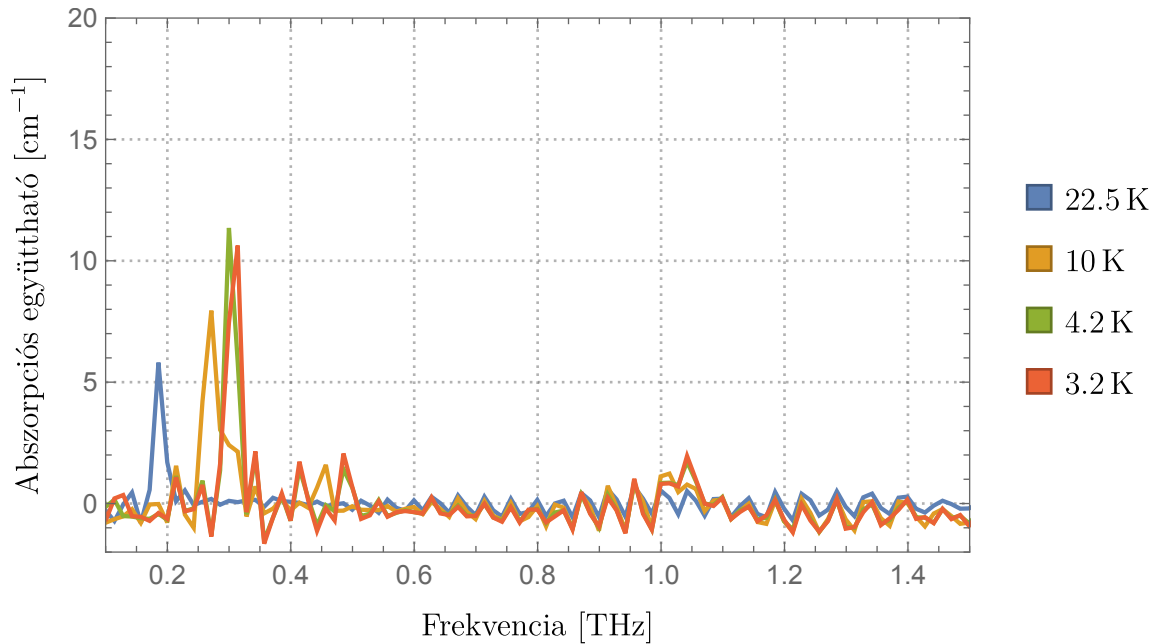


3.2. ábra. Antiferromágneses domének vezérlésére tett kísérlet, elektromos térrel. A méréseket a ${}^6F_{5/2}$ f-f gerjesztés közelében végeztem, különböző elektromos terek esetén, 4 K-en **a)**, és 40 K-en **b)**. Az alkalmazott feszültség nagysága ± 300 V volt. [8]

A 3.2b. ábrán azt láthatjuk, hogy az alkalmazott elektromos terek nem okoznak változást a transzmissziós spektrumban. Tehát bár a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ -ban megfigyeltünk egy az antiferromágneses rend által indukált lineáris dikroizmust, azt az irodalomban közölt mágneses és elektromos terekkel nem tudtuk befolyásolni. Ennek magyarázata lehet, hogy a mintában található szennyeződések, mechanikai feszültség rögzítik a mágneses doméneket, melynek megértése további kísérleteket igényel.

3.2. A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kollektív spingerjsztéseinek vizsgálata külső elektromos és mágneses térben

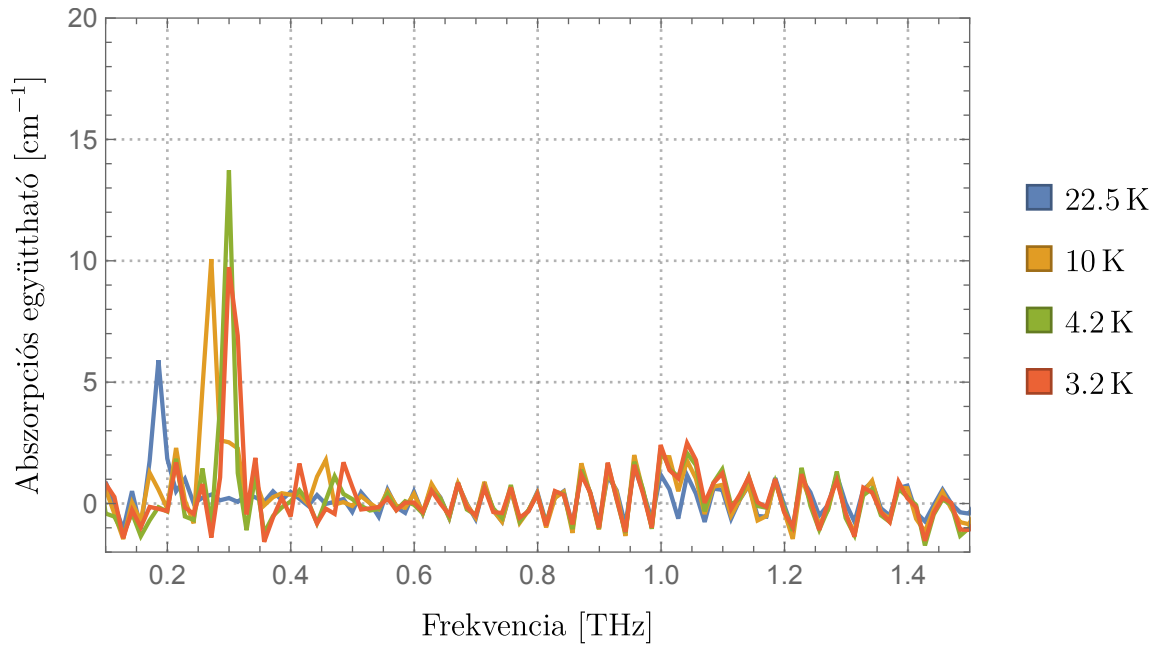
A $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kristály kollektív mágneses gerjesztéseit, magnonjait időfelbontott transzmissziós terahertz spektroszkópiai módszerrel, alacsony hőmérsékleten tanulmányoztam. A gerjesztési módusok hőmérsékletfüggése mellett azok alacsony mágneses térrel történő befolyásolhatóságát vizsgáltam, és eredményeimet egy korábbi TDK dolgozatban [9] ismerttettem.



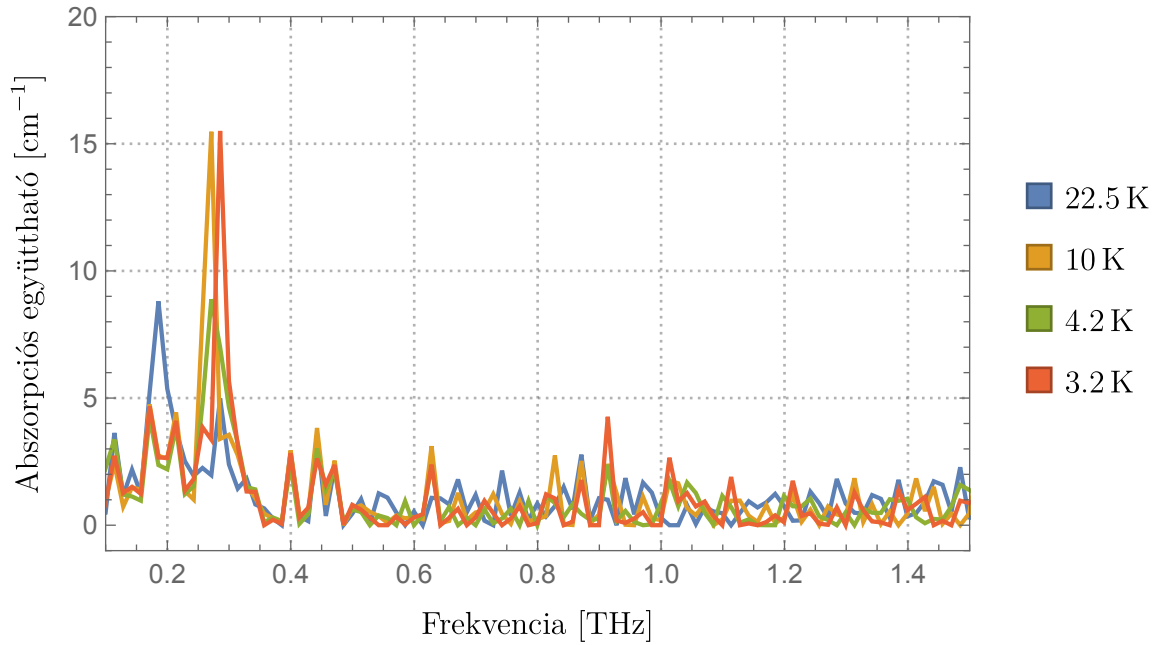
3.3. ábra. A minta abszorpciós együtthatója különböző hőmérsékleteken. [9]

A nyers adatok értelmezéséhez kiszámítottam a kristály mágneses abszorpcióját, azaz a paramágneses fázisban, $T=35$ K-en mért referencia transzmisszió spektrumhoz viszonyított relatív transzmisszióból kapható abszorpciós együtthatót. Ezzel a módszerrel az abszorpciós együttható mágneses rendeződés hatására történő megváltozását határoztam meg. A nulla mágneses térben történt mérés eredményei a (3.3.) ábrán láthatóak. A különböző amplitúdójú csúcsok annak köszönhetőek, hogy a felbontás instrumentálisan limitált.

Az abszorpciós spektrumokban két gerjesztést figyeltem meg: 3,2 K-en egy gerjesztést 0,32 THz-en és egy további szélesebb és gyengébb gerjesztést 1,05 THz-en. Az irodalom alapján a 0,32 THz-es módust a könnyű-síkú antiferromágneses szerkezet optikai magnon gerjesztésével azonosíthatunk [10]. A másik gerjesztése ennek a szerkezetnek egy kvázi-Goldstone módus, aminek a gerjesztési energiája lényegesen kisebb, mint a vizsgált frekvencia tartomány, így a kísérleteimben nem jelenik meg. A szakirodalomban nem szereplő, általam elsőként megfigyelt nagy frekvenciás, 1,05 THz-es rezonancia megjelenése a kollineáris antiferromágnesestől kissé eltérő, gyenge helikális modulációval rendelkező mágneses szerkezetre utal.



3.4. ábra. A minta abszorpciós együtthatója, $\mathbf{H} \perp \mathbf{E}(\omega)$ mágneses térben, különböző hőmérsékleteken. [9]



3.5. ábra. A minta abszorpciós együtthatója, $\mathbf{H} \parallel \mathbf{E}(\omega)$ mágneses térben, különböző hőmérsékleteken.[9]

Kiszámítottam a minta abszorpciós együtthatóját $\mathbf{H} \perp \mathbf{E}(\omega)$ és $\mathbf{H} \parallel \mathbf{E}(\omega)$ mágneses terek esetén is, melyeket rendre a 3.4 és 3.5 ábrákon mutatok be. $\mathbf{H} \perp \mathbf{E}(\omega)$ esetben nem

végeztem mérést a paramágneses fázisban, ezért a következő módszerrel határoztam meg a mágneses fázisban megjelenő abszorpciót: Adott frekvencián a különböző hőmérsékleteken (22.5, 10, 4.2, 3.2 K-en mért adatok) mért transzmisszió amplitúdók maximumát vettem, így meghatároztam a maximális intenzitást. Ez a módszer akkor működik, ha a mágneses rezonanciák a hőmérséklet változtatással jobban eltolódnak, mint a csúcsok szélessége.

A spektrumok eltérő kiértékeléséből fakadó eltéréseken kívül a rezonanciák erőssége azonos. Bár a 3.5 ábrán a csúcsintenzitások nagyobbak, mint az 3.4 ábrán. A paramágneses fázishoz közeli 22.5 K-en mért spektrumból látszik, hogy az 3.5 ábrán valószínűleg a kiértékelési módszer miatt megjelenik egy véges alapvonal 0.3 THz környékén. Kísérleteim tanulsága szerint az alkalmazott 200 mT és 80 mT mágneses terek az ab síkban nem elég erősek, hogy mérhető változást okozzanak az abszorpciós spektrumban (lásd 3.3, 3.4 és 3.5 ábrák). Külső elektromos térrel viszont már kisebb mágneses tér is elegendő lehet a minta terahertz abszorpció spektrumának gerjesztésére.

Így korábbi kísérleteim konklúziója, hogy a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ minta magnetoelektromos csatolásának optikai vizsgálatához a korábban alkalmazottnál erősebb elektromos és mágneses terekre van szükség. Ezért jelen dolgozatom célja a Fizika Tanszék Optikai Spektroszkópia Laborjában az alacsonyhőmérsékletű optikai kísérletekben elérhető elektromos és mágneses terek nagyságrendi növelése. Ehhez egy nagyfeszültségű tápegységet és egy szupravezető mágnesbe helyezhető optikai kriosztátot fejlesztettem.

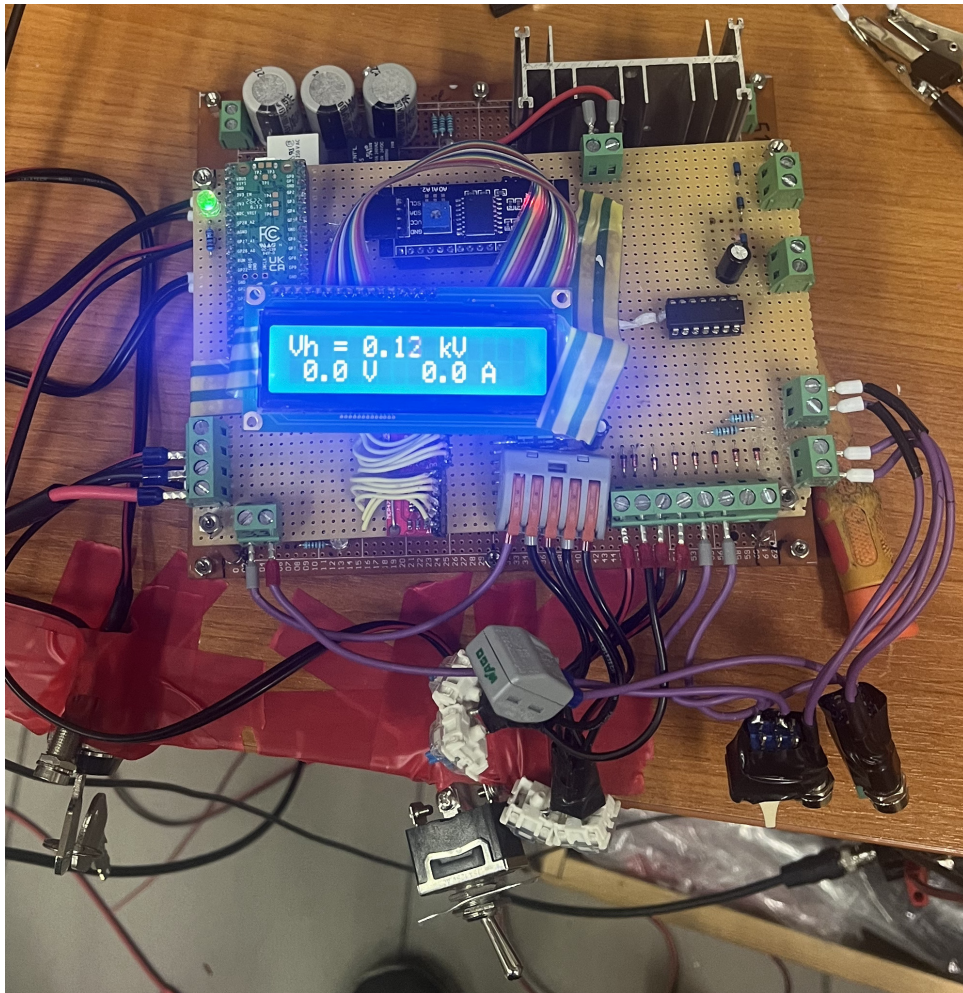
4. A minták előkészítése

A nagyfeszültségű anyagvizsgálatok során, hidegujjas kriosztátban végzett kísérletek esetében különösen fontos szerepe van a hővezetés biztosításának és a nagyfeszültségű kábelek megfelelő szigetelésének. Ehhez elengedhetetlen, hogy a minta vörösréz mintatartóra való rögzítése során olyan szigetelőréteget alkalmazzunk, amely nemcsak kiváló hővezetési tulajdonságokkal rendelkezik, hanem optikai átlátszósága révén transzmissziós optikai vizsgálatokat is lehetővé tesz. Ilyen tulajdonságokkal bírnak például a gyémánt és a zafír, amelyek mindkét kritériumnak megfelelnek: elektromosan szigetelők, kiváló hővezetők, valamint az átlátszóságuk révén a fény széles hullámhossztartományban szabadon áthatol rajtuk. Jelen mérési elrendezésemben fél milliméter vastagságú zafír lapkát alkalmaztam, amely ideális választásnak bizonyult, mivel ezzel a nagyfeszültségű elektródák és a mintatartó közötti elektromos izoláció, valamint a megfelelő hőátadás egyaránt biztosított. A mintataróhoz mind a zafír darabot mind a mintát Ge varnish ragasztóval rögzítettem. Az elektródákat a mintatartóhoz ezüst pasztával rögzítettem. Fontos megjegyezni, hogy a nagyfeszültségű mérésekre az alacsony nyomású hélium hőcserélő gázzal hűtött mintatartó kriosztátok nem alkalmasak, hiszen a feszültség az alacsonynyomású héliumot is képes ionizálni.

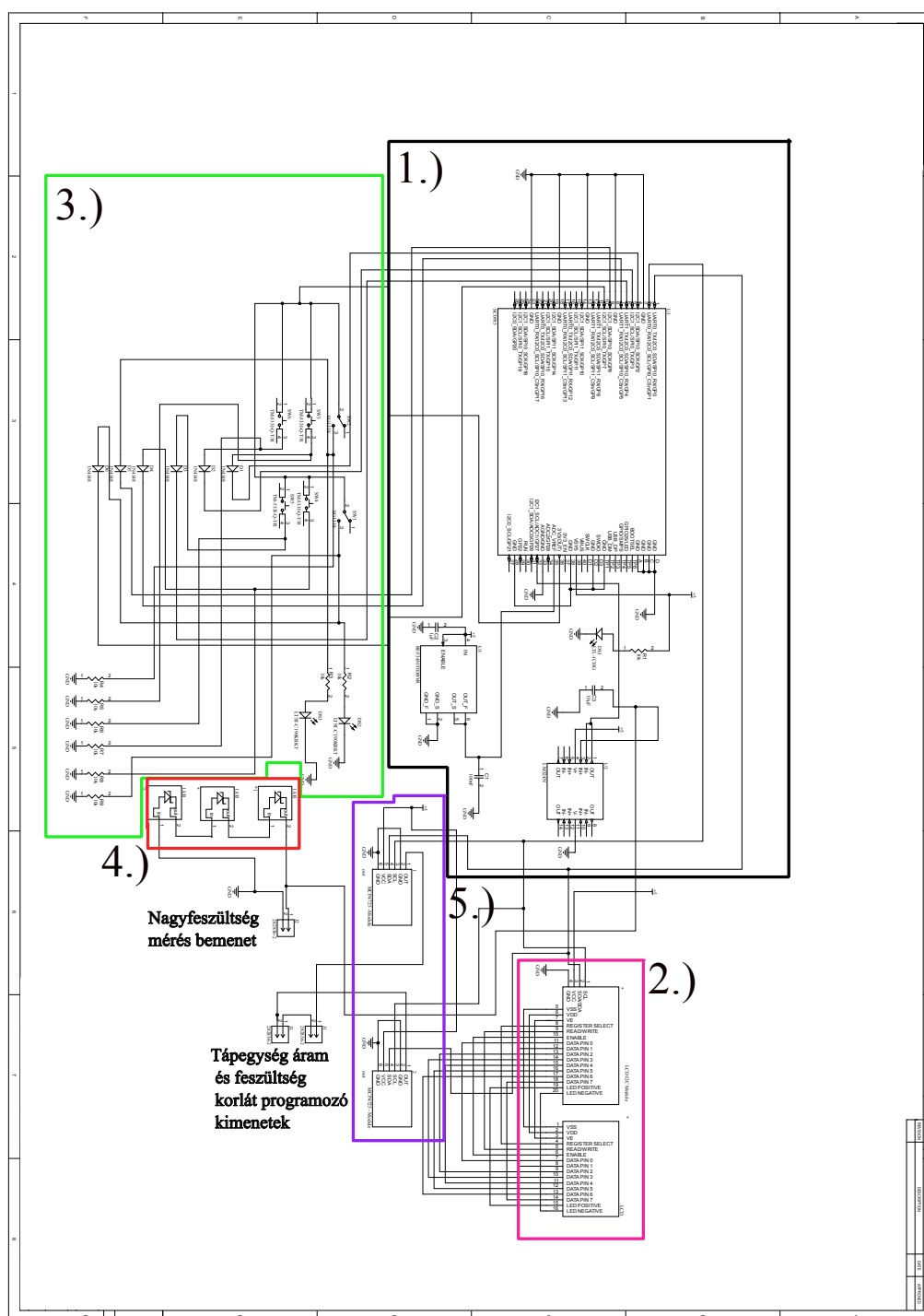
5. A kísérletekhez fejlesztett mérőrendszer

5.1. Nagyfeszültségű kapcsolóüzemű tápegység

A tápegység alap ötletét Ammar Ahmed Khan Muhammad Wasif és Muhammad Sabieh Anwar által készített nagyfeszültségű tápegység adta [11]. Az általam készített mérőrendszer ennek egy teljes újragondolása, kiküszöböli az ő tápegységük problémáit viszont szintén egy sorkimenő transzformátort használok a nagyfeszültség előállításához. A mérőrendszerhez egy Raspberry pi pico mikrokontroller által irányított vezérlő egységet, egy függvénygenerátort, egy áramforrást, egy nagyfeszültségű transzformátor meghajtót és a nagyfeszültség visszamérésére szolgáló speciális feszültségosztót terveztem. Ezek két nyomtatott áramköri lapon(NYÁK-on) helyezkednek el, amik a következő ábrákon láthatóak.

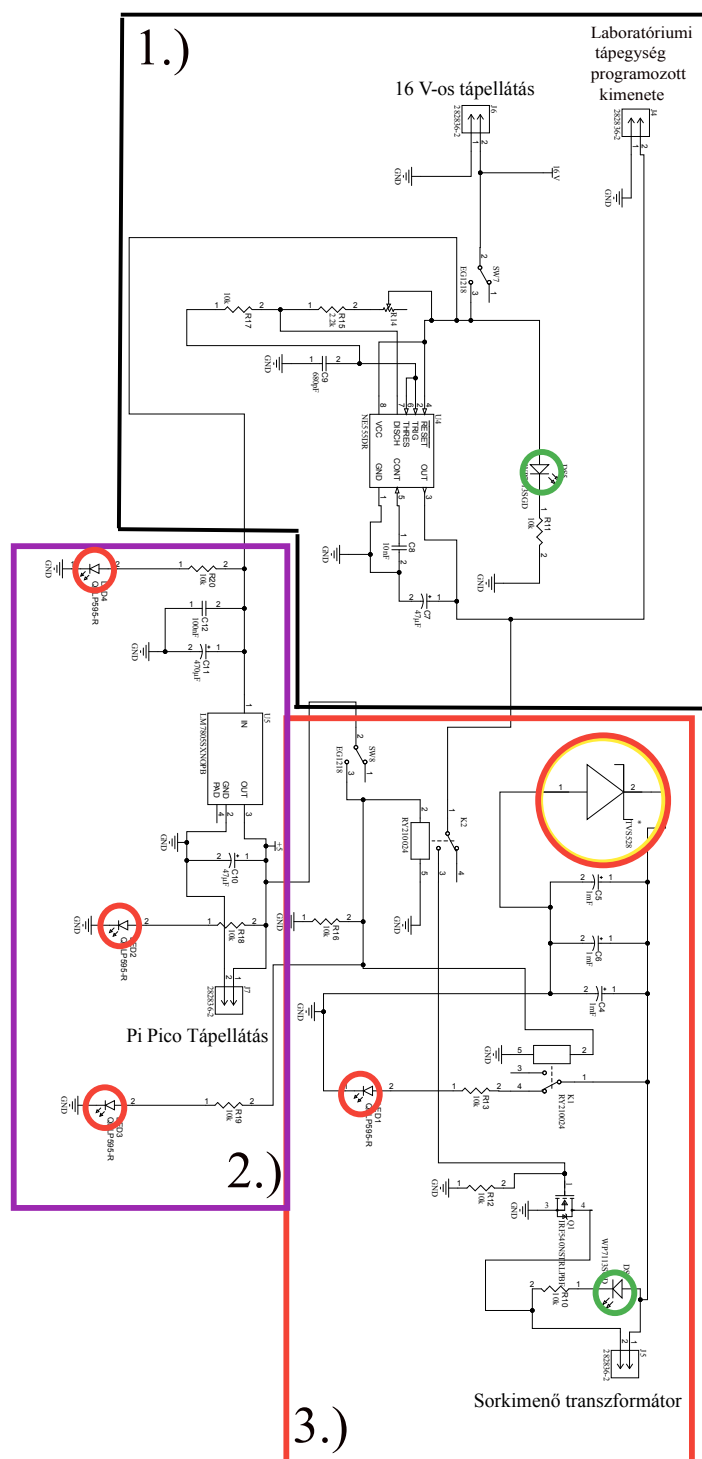


5.1. ábra. Az összeállított teljes áramkör



5.2. ábra. NYÁK1: A mikrokontrollert tartalmazó vezérlő és mérő áramkör kapcsolási rajza. 1.) A Pi Pico mikrokontroller, a 3 V-os referencia feszültségforrás precízebb feszültségméréshez és a mikrokontroller feszültségmérést végző egységéhez az Analóg Digitális Konverteréhez (ADC) impedancia illesztést végző követő erősítő. 2.) LCD kijelző és LCD kijelző I2C interface. 3.) Kezelő szervek. Feszültség és áramkorlát állító gombok, korlát inkrementációs érték tízszerező kapcsolók. 4.) 3 V-os ADC védő Zener dióda. 5.) Digitál Analóg Konverterek (DAC), amikkel a laboratóriumi tápegység áram és feszültség korlátjának állítását tettem lehetővé. Az ábrát Altium Designer 365 for Students programmal készítettem. A színes csoportok nélküli ábra a függelékekben megtalálható.

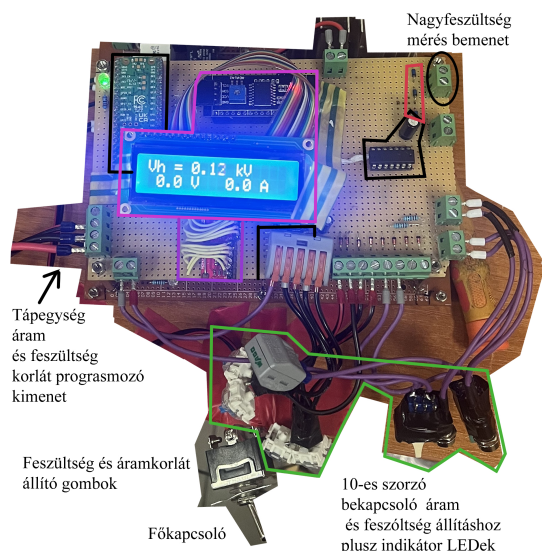
5. A kísérletekhez fejlesztett mérőrendszer



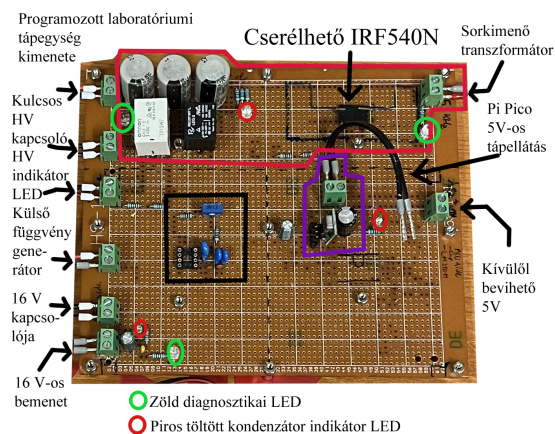
5.3. ábra. NYÁK2: Mosfet meghajtó és függvénygenerátor. 1) NE555 alapú függvénygenerátor. 2.) 5 V-os feszültség stabilizátor, a bemenő 16 V-os feszültségből 5 V-ot állít elő ami tápellátást biztosít a mikrokontrollernek és a további aktív alkatrészeknek. 3.) A Mosfet alapú meghajtó, relés védelmi áramkörök és kondenzátor bank. Az áramkörben találhatók még piros és zöld LED-ek. A pirosak töltött kondenzátor veszélyét jelezik és egyben kisütik ezeket a kondenzátorokat. A zöld LED-ek pedig tápellátás meglétét jelző diagnosztikai jelzők. Található még egy piros-sárga kerettel jelölt TVS dióda a rendszerben, ez a hirtelen teljesítmény változástól óvja meg a rendszert.

5. A kísérletekhez fejlesztett mérőrendszer

NYÁK1

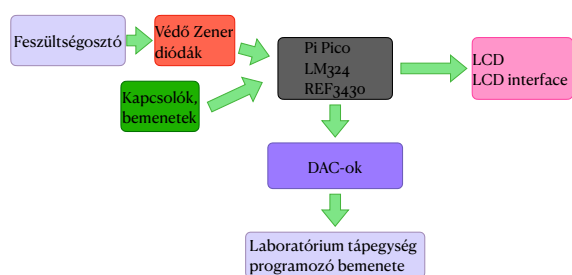


NYÁK2

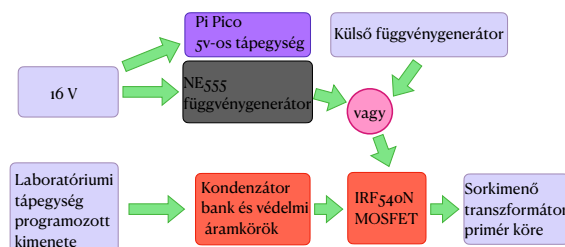


5.4. ábra. A NYÁK-ok különböző funkcionális elemeinek megjelenése a megépített NYÁK-okon az 5.2. és az 5.2 ábrák kapcsolási rajzainak színezése alapján.

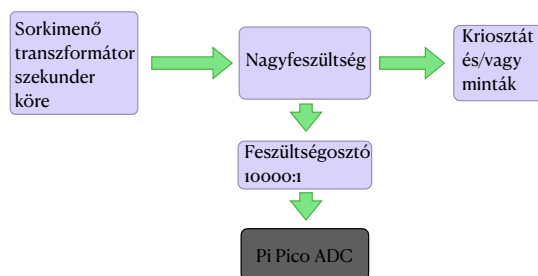
NYÁK1



NYÁK2



A sorkimenő transzformátor nagyfeszültségű oldala:



5.5. ábra. A nagyfeszültségű tápegység különböző elemeinek funkcionális blokkdiagrammja, a színezés megegyezik a 5.2, 5.3, 5.4 ábrák kapcsolási rajzainak színezésével.

Most pedig a blokkdiagrammokat használva bemutatom az eszköz működését. Az első NYÁK-on látható a Pi Pico(fekete) és a különböző perifériák(zöld) amivel parancsok adhatóak a mikrokontrollernek, melyeket továbbít a mérőrendszerben szereplő programozható laboratóriumi tápegységnek. A kimenő feszültség és áram érték megjelenítésére egy digitális kijelzőt, kézi beállítására manuális gombokat alkalmaztam (5.2. ábra, zöld szín). A gyorsabb beállítás érdekében beépítettem két kapcsót, mellyekkel az állítási lépések tízszeresére növelhetők, ezek veszélyre figyelmeztető piros lámpával is fel vannak szerelve (5.2. ábra, zöld szín).

A NYÁK-okon visszatérő motívum a vészjelző LEDek illetve a helyzetjelző LEDek jelenléte. A piros színű LEDek veszélyre figyelmeztetnek: nagyfeszültség be van kapcsolva, nagy kapacitású kondenzátorok fel vannak töltve, a zöld LEDek pedig arra figyelmeztetnek, hogy áram alatt vannak az eszközök, csatlakoztatva vannak, fő feladatuk hiba keresése és lokalizása az áramkörben(5.4. ábra, NYÁK2, zöld és piros karikák). Az első áramkörnél 3 Inter-Integrated Circuit (I2C) protokollal kommunikáló eszközt építettem be. Ezek kifejezetten hatékonyak, hiszen négy kimenetet használnak csak kommunikációhoz amiből minden eszköz ugyanazt a négyet használja. Ebből két kábel 5 voltot és földelést kapnak az eszközök, a másik kettőn pedig órajelet és utasításokat. Az órajel miatt szinkronban kapja minden eszköz a feladatot. Ezek az eszközök: 2 db MCP4725-ös Digitál analóg converter (DAC) különböző elérési címre konfigurálva(lila szín), és egy LCD kijelző I2C adapter(rózsaszín). NYÁK1-en található még egy REF3430TIDBVR 3 voltos referencia feszültségforrás(fekete szín). Ez a Pi Pico referencia bemenetére csatlakozik így pontosabb feszültségmérést tesz lehetővé. Másik alkatrész ami fontos tagja a feszültségmérőláncnak az egy követőerősítő (LM324), a mért jel impedancia illesztésének érdekében(fekete szín), illetve 3 db 1 voltos Zener dióda(piros szín) ami a Pi pico analóg-digitális konverterét hivatott védeni. Ezen kívül az áramkör tartalmaz még kondenzátorokat a jel simítására és nagyfrekvenciás zavarok szűrésére, elnyomására, illetve stabil áramszint biztosítására. A NYÁK1-en használt kapcsolók gateron blue-k [12], ezek nagy terhelésre tervezett kapcsoló gombok, több mint 10 000 000 használatra vannak tesztelve. A kapcsolók sorba vannak kötve 1N4148-as gyors diódákkal, ezzel biztosítva, hogy csak egy irányban folyik az áram. A kapcsolók Pi pico bemenet felőli oldalait 10 kΩ-os ellenállásokkal a földeléshez csatlakoztattam, ezzel biztosítva, hogy amikor ki vannak kapcsolva akkor jól definiált logikai LOW értéket mutassanak. Emellett ez a megoldás megakadályozza a véletlen állapotváltozást a bemeneten és csökkenti az érzékenységet az elektromos zajokra és interferenciára.

5.2. A mérőrendszert irányító mikrokontroller kódja

A mikrokontroller kódjai a dolgozat végén a függelékben megtalálhatók.

A leglényegesebb része a kódnak, hogy a feszültség és áram állítás megszakítás bemenetek(interruptok) használatával van megírva, így ha bármikor megnyomódik egy gomb, az annak megfelelő feladat lesz az első ami azután lefut, addig az összes többi parancs vár, ezzel is növelve az eszköz biztonságosságát.

A vezérlő kód legfontosabb része hogy a táppal lehetőség van akár non-lineáris feszültség sweepra. Ehhez csak egy csv fileban meg kell adni az egymás után kiadni szándékozott feszültség áram párokat(voltban és amperben), illetve definiálni kell egy megfelelő idő állandót(sweep_delay) amíg ezeken az értékeken fog maradni a program, illetve a isSweep

változót igazra kell állítani. Ez a méréstechnika hihetetlenül fontos főleg olyan esetekben ahol fizikai jelenségek feszültségfüggésének vizsgálata a cél, mint a mi esetünkben a $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ vizsgálatának esetén is.

5.3. A függvénygenerátor, az 5 voltos stabilizátor és a sorkimenő transzformátor meghajtója

Ebben az alfejezetben NYÁK2 működését fogom ismertetni, ehhez 5.3, 5.4 és 7.5 ábrákat fogom használni. Az áramkörben található egy NE555-ös IC-n alapuló astabil fokozatú függvénygenerátor(fekete). Ez 16 voltról üzemel, erre az értékre ki is fogok térni a transzformátor meghajtó MOSFET tárgyalásánál. Van lehetőség a rendszerbe kívülről függvénygenerátor jelet bevinni(5.4. ábra) A főkapcsolót felkapcsolva kapja meg az áramkör a működéshez szükséges feszültséget. A függvénygenerátor frekvenciáját egy $10\text{ k}\Omega$ nagyságú trimmer potenciométerrel lehet precízen állítani. A frekvencia állítás célja megtalálni a rendszer rezonancia frekvenciáját, így tovább növelve a hatásfokot és csökkentve az áramfelvételt. Következő elem egy LM7805-ös IC. A következő áramköri elem, az LM7805-ös IC(lila), Ez egy 5.5-36 V bemenő feszültségből állít elő 5 V, 1 A-es kimenetet, ami meghajtja a pi pico-t illetve a különböző IC-eket és reléket. Ha ez az alkatrész meghiúsodik van lehetőség kívülről is bevinni 5 DC feszültséget(5.4NYÁK2). A rendszerbe kívülről csatlakozik egy állítható laboratóriumi tápegység. Van a rendszerben egy kulccsal üzemeltethető kapcsoló, ez ha ki van kapcsolva akkor a kondenzátorokra(piros) párhuzamosan van egy kisütő ellenállás meg egy piros lámpa kapcsolva, ezzel jelezve ha a kondenzátor feszültség alatt van, illetve ezzel le is vezetve ezt a feszültséget. A kulcs elfrodításával két távíró relé is bekapcsol, az egyik kiköti a kisütő ellenállást a kondenzátorbankról, a másik pedig rákapcsolja a MOSFET(piros) Gate elektródájára a négyszögjeles gerjesztést ezzel effektíve bekapcsolva a nagyfeszültségű kimenetet. Ezen felül bekapcsol még egy piros LED-et hogy a nagyfeszültségű kimenet be van kapcsolva. Található még a kondenzátorral párhuzamosan, fordított polaritással bekötve egy TVS528-as zener dióda. Ez túlfeszültség elleni védelem céljából van az áramkörben. Így a dióda védi az áramkört a káros túlfeszültségek ellen, amelyek a kondenzátorbankra vagy a kapcsolódó áramköri elemekre kerülhetnek, 28 V fölötti feszültség tuskék esetén földre kapcsolja ezeket. A MOSFET hajtja meg a transzformátort ebben a tápegységben. Én IRF540N N csatornás MOSFET-et választottam erre a célra, ez egy nagyteljesítményű gyors MOSFET. Mivel N csatornás ezért a földre kell kötni a drain terminálját és a source terminálját pedig a primer körhöz. A kimenetén található egy diagnosztikai zöld LED, ezzel és egy elérhető külső frekvenciagenerátoros bemenettel tesztelhető alacsony frekvencián hogy az áramkör működik. A MOSFET nyitó feszültsége 12V, de a NE555 IC nem ideális négyszögjelet állít elő, mivel az NE555 IC nem a legjobb minőségű négyszögjelet állítja elő ezért a teljes kinyitáshoz 16 V-os amplitúdójú négyszögjel volt szükséges. Külső jelgenerátorról meghajtva az volt a tapasztalat hogy elég a 12 V.

5.4. Sorkimenő transzformátor

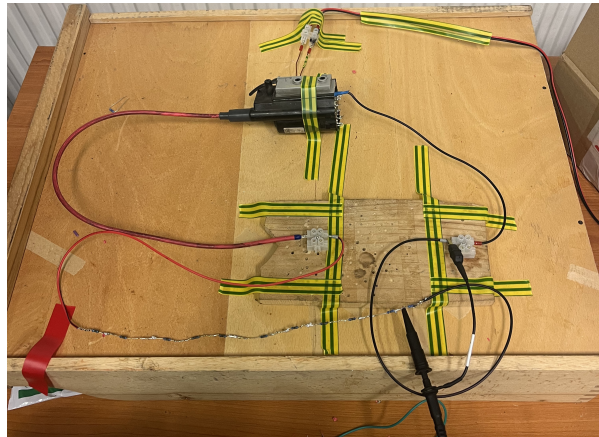
A tápegység legfontosabb eleme a sorkimenő transzformátor. A sorkimenő transzformátorok (angolul flyback transformers) olyan speciális transzformátorok, amelyek nagy feszültségű, de alacsony áramerősségű kimenetet biztosítanak, így egy ilyen transzor-

mátort választottam a kis méretű mintára kapcsolandó elektromos tér előállításához. A hagyományos transzformátoroktól eltérően a sorkimenő transzformátorokat gyakran impulzusüzemben használják, és nagyfeszültségű jeleket állítanak elő rövid időtartamú, nagyfrekvenciás impulzusokkal.

A transzformátor működése során a primer tekercsben létrejövő mágneses tér indukál egy feszültséget a szekunder tekercsben. A sorkimenő transzformátorok azonban különböznek az átlagos, folyamatos üzemű transzformátoroktól, mivel ezek rövid idejű feszültségimpulzusokat állítanak elő, ami lehetővé teszi, hogy a kimeneti feszültség igen nagy legyen, ugyanakkor a kimeneti áram kicsi maradjon. Ez a működési mechanizmus teszi ideálissá őket olyan alkalmazásokhoz, ahol a magas elektromos tér előállítása a cél, de az áram minimalizálása szükséges az eszköz vagy minta védelme érdekében. Ebben az esetben én saját magam készítettem egy primér kört. Az általam használt, ferrit maggal rendelkező sorkimenő transzformátor primer körét sajátkezűleg készítettem, így maximalizálni tudtam a kimeneti feszültséget.

A sorkimenő transzformátorok ferritmagjában általában van egy kis légrés. Ennek a légrésnek fontos szerepe van a transzformátor működésében és hatékonyságában, különösen a kimeneti feszültség stabilitása szempontjából. A lég rés lehetővé teszi, hogy a mágneses mag nagyobb energiát tároljon. A sorkimenő transzformátorok impulzusüzemben működnek, ahol a primer tekercsben lévő mágneses tér gyorsan felépül és lecseng. A lég rés hozzáadásával a mag nagyobb mágneses energiasűrűséget képes tárolni anélkül, hogy telítésbe kerülne. Ez különösen fontos a nagyfeszültségű impulzusok előállításakor. A légrés csökkenti a mágneses mag permeabilitását, így segít elkerülni a mag telítését nagy primer áram esetén is. Ha a mag telítetté válik, az a transzformátor teljesítményének csökkenéséhez és jelentős hőtermeléshez vezethet. A lég rés tehát stabilabb működést biztosít, különösen impulzusüzemben. A lég rés jelenléte stabilabb kimeneti feszültséget eredményez, mivel csökkenti a mágneses tér intenzitásának változásait. Ezzel minimalizálhatók a túlzott feszültség-ingadozások, ami különösen fontos a precíz alkalmazások esetében, ahol nagyfeszültséget kell fenntartani alacsony áramerősség mellett. Ezért a sorkimenő transzformátorok légrése hozzájárul a rendszer hatékonyságához és biztonságához, főleg ott, ahol nagyfeszültségű, alacsony áramerősségű impulzusokra van szükség.

A sorkimenő transzformátorok kimeneti áramerőssége általában a milliamper (mA) , még akkor is, ha a kimeneti feszültség eléri a több ezer voltot. Ennek az az oka, hogy a kimeneti impedanciájuk nagyon magas, így a generált áram is alacsony marad. Ez különösen előnyös lehet a vékony, kis méretű minták elektromos térrel való stimulálásánál, ahol az áram jelentős növekedése akár károsodást is okozhatna. Ezen felül a kis áramerősség csökkenti a hőtermelést és az energiafogyasztást is, ami hozzájárul a transzformátor hatékony működéséhez és hosszabb élettartamához. A transzformátor a kimenetén tartalmaz egy beépített egyenirányító nagyteljesítményű diódát, így az egyenirányításról nem kell gondoskodnunk.



5.6. ábra. Az áramkör utolsó nagyfeszültségű oldal, ez tartalmazza a sorkimenő transzformátort illetve a két végei között egy 10000:1-es feszültségosztót(pontosabban annak prototípusát).

A transzformátor kimenetére terveztem még egy speciális 10000:1 arányú feszültségosztót a kimenő feszültség Pi Picoval történő visszaméréséhez(10M + 1k méretű a két ellenállás). Ez a következő ábrán látható(5.7. ábra):

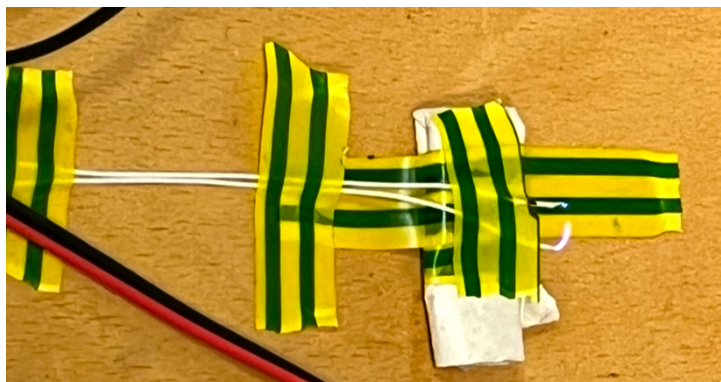


5.7. ábra. Az 10000:1-hez arányú feszültségosztó.

A feszültségosztóban 10 darab 1M Ω és 1 darab 1k Ω ellenállás van sorba kötve, a nagy ellenállás azért van tíz darabból hogy a teljesítmény tűrését növeljem az eszköznek. Beszerelés után a nyákot epoxy ragasztóval szigeteltem le így érintésvédelemről is gondoskodva, az áramkör többi részénél is ez volt az eljárás ahol szigetelésre volt szükség a nagyfeszültségű oldalon mint például a sorkimenő transzformátor többi lábának a szigetelésénél is epoxy ragasztót használtam.

5.5. Alacsony hőmérsékletű nagyfeszültségű mérőrendszer fejlesztése

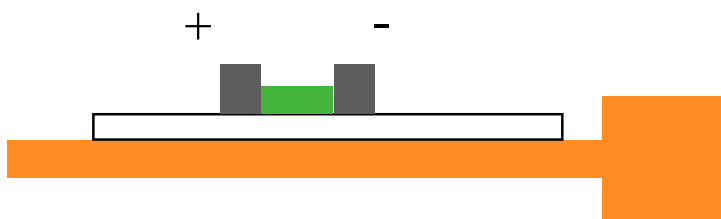
A sorkimenő kimenetét vékony teflonszigetelésű kábellel vezetem be a hidegujjas kriosztátba. Az egységes hőmérsékleti profil érdekében a kriosztát magja körül sokszor körbetekerem a vezetékeket. A kábeleket szobahőmérsékleten teszteltem és a szigetelésük kibírta a 20 kV-ot. Ez a teszt az 5.8. ábrán látható.



5.8. ábra. Teflonnal szigetelt vezeték átütésének tesztelése.

A teflon ebben a tesztben kiváló indikátorként működik, mivel ha a feszültség átütne, az megégetné a szigetelést, amely elszíneződne, így jelezve, hogy a vezeték szigetelése nem megfelelő az adott feszültségtartományban. Ezzel szemben a tapasztalatom az volt, ahogyan az 5.8. ábrán is látható, hogy még akkor is, ha a vezetékeket nagyon közel helyezem egymáshoz, csak a végükön, ahol a vezetők levegővel érintkeznek, történik átütés.

A kriosztáthoz terveztem egy nagyfeszültséggel kompatibilis mintatartót is ami a 5.9. ábrán látható:



5.9. ábra. Nagyfeszültségű mintatartó

A + és - jelek jelölik hogy a nagyfeszültségű teflonszigetelésű vezeték csatlakozási pontjait. A mintatartó alapvetően a jó hővezetés érdekében vörös rézből van (narancssárga), ezen elektromos szigetelés érdekében egy fél milliméter vastag zafír lemez található ami mellett hogy szigetelő nagyon jó hővezető is egyben. Erre a minta(zöld) Ge Varnish-al van ráragasztva, illetve a zafír darab is Ge Varnish-al van rögzítve a mintatartóhoz. Az elektródákat pedig ezüst pasztával ragasztottam a mintatartóba. Fontos itt megjegyezni hogy alacsony hőmérsékletű nagyfeszültségű mérések elvégzésére csakis hidegújjas kriosztátban van lehetőség, hiszen a héliumáramos kriosztátokban a hélium ionizálódik a feszültség hatására, ezzel akár kárt téve a mintában is. Ezzel szemben a hidegújjas esetben vákuum veszi körbe a mintát ami nagyon jó szigetelőnek számít.

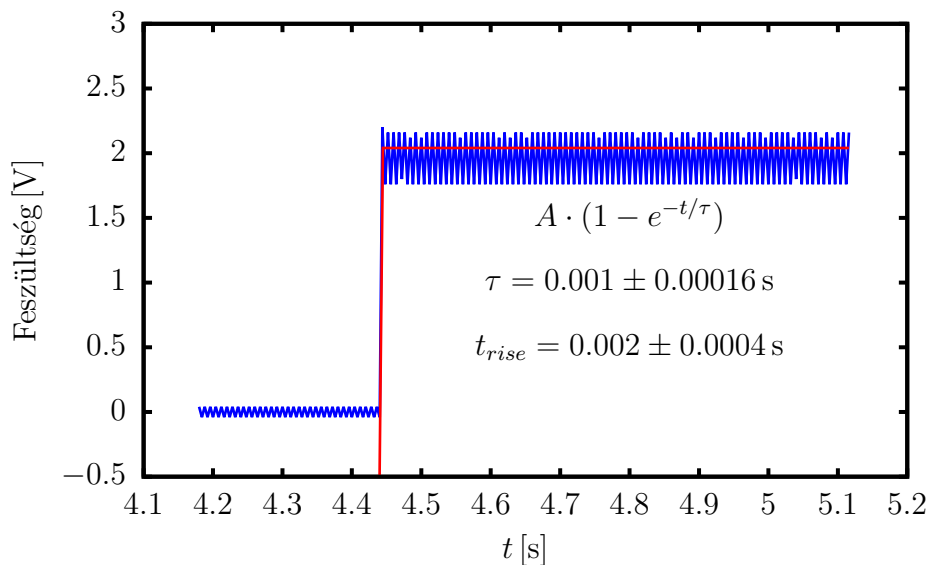
6. A tápegység karakterizálása

Ebben a fejezetben a tranziens jelenségeket vizsgáltam a tápegység ki és bekapcsolásánál hiszen ezek nagyban befolyásolhatják a minták élettartamát. Megmértem a tápegység feszültségének felfutási és kisülési idejét (rise és fall time), illetve az abszolút maximum feszültség és áram értékeket amiket még tolerál. Ezenfelül a tápegység időfüggő kimeneti jelének Fourier-transzformálásával elemeztem a jel spektrumát. A nagyfeszültségű jel mérhető tartományba konvertálásához egy feszültségosztót építettem (5.7. ábra).

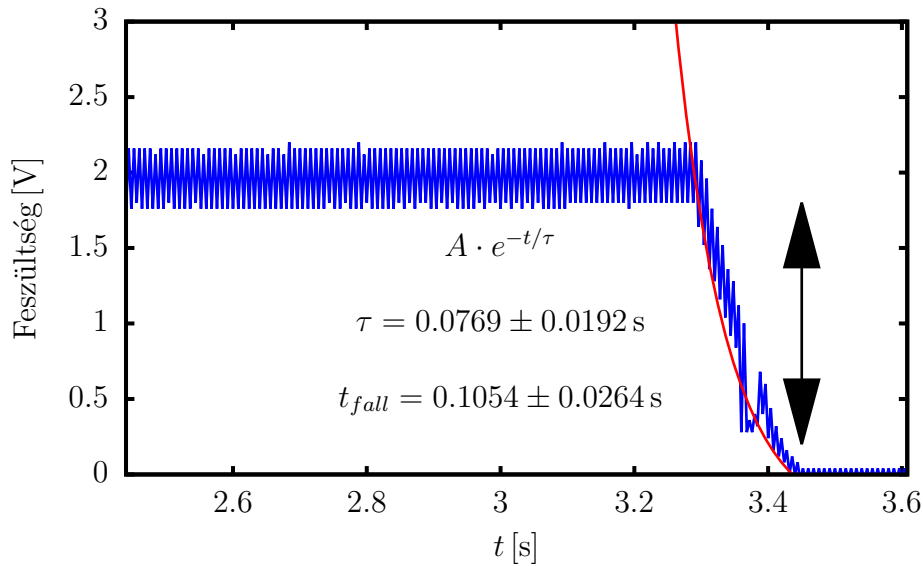
A méréshez a TBS1064-es Tektronix oscilloscope-ot használtam.

6.1. Tranziens jelenségek karakterizálása

A méréseket oszcilloszkóppal végeztem. Ezek a következő ábrákon (6.1. ábra, 6.2. ábra) láthatóak. Az ábrázoláshoz GNUplotot használtam. Illesztés segítségével meghatároztam a tranziens jelenségek időállandóit. Szintén meghatároztam az áramkör elektronikában releváns τ időállandóit is. A τ azt az időt jelöli rise time esetén amíg a jel a maximum érték 10%-áról 90%-ra ugrik vagy fall time esetén amíg a jel a maximum érték 90%-áról 10%-ra esik.



6.1. ábra. Felfutási idő mérése, a mért felfutási idő érték $2 \pm 0.4 \text{ ms}$ volt. A $\tau = 1 \pm 0.2 \text{ s}$ -nak adódott.



6.2. ábra. Kisülési idő meghatározása, a mért kisülési idő érték $105 \pm 26 \text{ ms}$ volt. A $\tau = 77 \pm 20 \text{ ms}$ -nak adódott.

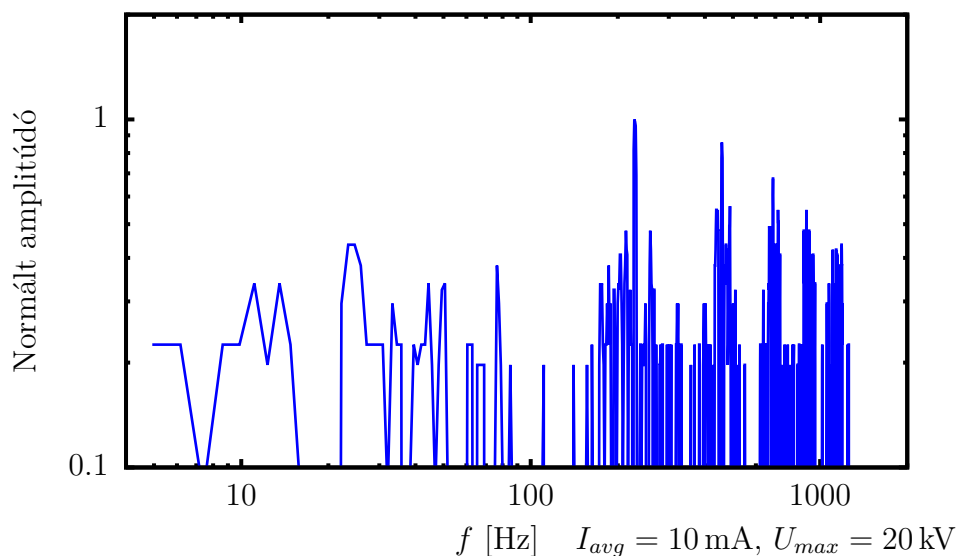
A méréseket úgy végeztem, hogy a rendszerben lévő kondenzátor bankra rákapcsoltam a Delta tápegység feszültségét, és utána a kulcsos kapcsolóval a MOSFET-re engedtem a meghajtó négyszögjelet. Látható, hogy a jelben megjelenik egy alacsony frekvenciájú zaj. Ez a 100 Hz-es zavar a a hálózati 50 Hz felharmonikusa. A zavar amplitúdója $\approx 7\%$ -a a feszültségnek. Ez a zavar a nagyfeszültségű oldalon is jelentkezik, viszont mivel a nagyfeszültséget arra tervezem, hogy elektromos térbe helyezzem a szigetelő antiferromágneses mintákat így ez effektíve olyan, mintha egy kondenzátort töltenék ezért ez a zavar nem befolyásolja jelentősen a minta álltal érzékelt elektromos teret, hiszen a minta az elektromos tér átlagát fogja érezni. A jövőben a mérések minőségének javításának az érdekében egy (akár aktív) felüláteresztő szűrőt érdemes beépíteni a sorkimenő transzformátor bemenetére, ezzel eliminálni a zavart ami ráült a jelre.

Biztonsági okokból különösen fontos, hogy a nagyfeszültséget bekapcsoló kulcsos kapcsolót minden esetben kikapcsoljuk, mielőtt az áramkört ki-vagy bekapcsoljuk. Az általam meghajtáshoz használt delta tápegység sajnos ki-bekapcsolásnál egy kis ideig nagy feszültséget és áramot ad ki, emiatt a nagyfeszültségű kimeneten nagyfeszültségű tüske keletkezik, ami még a feszültségosztón és a Zener diódákon keresztül is tönkretelheti a mikrokontroller ADC-jét.

6.2. A kimenő feszültség spektruma

Oszcilloszkóp segítségével egy 1:10000 osztású $10 \text{ M}\Omega$ nagyságú feszültségosztón egy 10-es osztású oszcilloszkóp fejjel felvettem a nagyfeszültségű kimenet jelét az idő függvényében. Ezt követően kiszámítottam a jel Fourier-transzformáltját modern Rust programozási környezetben. A feszültségosztó az áramvédelem miatt olyan nagy ellenállású illetve ezért is 10-es osztású oszcilloszkóp mérőfejet használok. A mérés hossza 1 s volt és 64-es átlagolást használtam.

Az ábrázoláshoz gnuplot programot használtam.



6.3. ábra. A nagyfeszültségű tápegység mért kimeneti spektruma.

A tápegység kimeneti feszültsége 1-20 kV között állítható, a felvett maximális teljesítménye 90 W. A kimenő árama 10 mA körül van. Itt fontos megjegyezni, hogy a minták effektíve szigetelőként fognak működni így amíg ez az érték nem nagyon nagy, addig a konkrét értéke nem releváns. A kimeneti spektrumot elemezve a hálózati 50 Hz felharmonikusainál figyelhetők meg csúcsok, melyek a tranziens jelek vizsgálatánál látott oszcillációknak feleltethetők meg. Magas frekvencián megjelenő zajok pedig a kapcsoló üzemennek tulajdonítható illetve parazita kapacitásoknak és parazitív induktivitásoknak amik az általam tekert primér tekercsből következnek.

Látható mind az időfelbontott tranziens- mind a spektroszkópiai mérésekből hogy a tápegység megfelelően működik. Tesztméréseim során 20 kV körüli érték is elérhető volt. Ezen felül a maximális áramkorlátot 3,4 A-ben határoztam meg, amit az IRF540N MOSFET szab meg. Ennél nagyobb áramerősség esetén a MOSFET gyorsan felmelegszik (még hatékony hűtés mellett is), és idővel meghibásodhat. Emiatt a kimeneti feszültséget is ez az áramkorlát határozza meg, mivel a nagyobb kimeneti feszültség eléréséhez arányosan nagyobb teljesítmény szükséges. A tápegység felvett maximális teljesítménye a mérések során 75 és 80 W közé tehető, függ az éppen alkalmazott IRF540N-től (parazitív kapacitás) és az alkalmazott frekvencia generátortól (a négyszögjel minőségén keresztül). A kiindulásként használt [11] tápegységhez képest nagyjából másfélszer akkora teljesítményt vesz fel általam megvalósított tápegység. A minta tápegységhez képest biztonsági funkciókkal láttam el az áramkört, továbbá jelstabilizátorokat, diagnosztikai és figyelmeztető LED-eket, valamint kikapcsolás utáni automatikus kapacitáskisütőt építettem be. Ezen felül lehetővé tettem a digitális és programozható üzemeltetést is. Egy hasonló tulajdonságú tápegység Kínából is nagyjából egy nagyságrenddel drágább mint az általam készített műszer, a Yangzhou Idealteck Electronics 40kV-ig állítható programozható tápegysége ami átlagosan 10 mA-t képes leadni maximum, az 2000 USD-be kerül [13], míg az én eszközöm az alkatrészek rendelkezésre állásától és piaci áraktól függően sem került többé 120 USD-től.

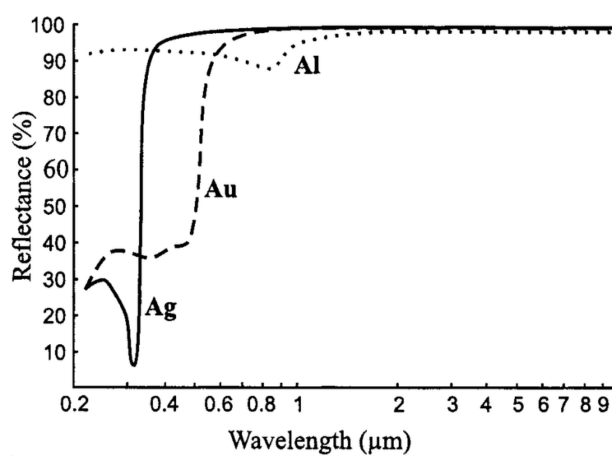
7. Kriosztát tervezése nagy mágneses terű mérésekhez

A 3.1 fejezetben ismertetett méréseket nagyságrendekkel nagyobb mágneses és elektromos terekben tervezem megismételni. Ehhez a külső mágneses teret a Fizika Tanszék Optikai Spektroszkópia laboratóriumában rendelkezésre álló 9 T mágneses terű, szobahőmérsékletű mintaterű szupravezető Janis mágnes biztosítja. Az alacsony mintahőmérséklet biztosításához a mágnesfuratához illeszkedő optikai kriosztát vákuumköpenyt és hővédő pajzsot terveztem.



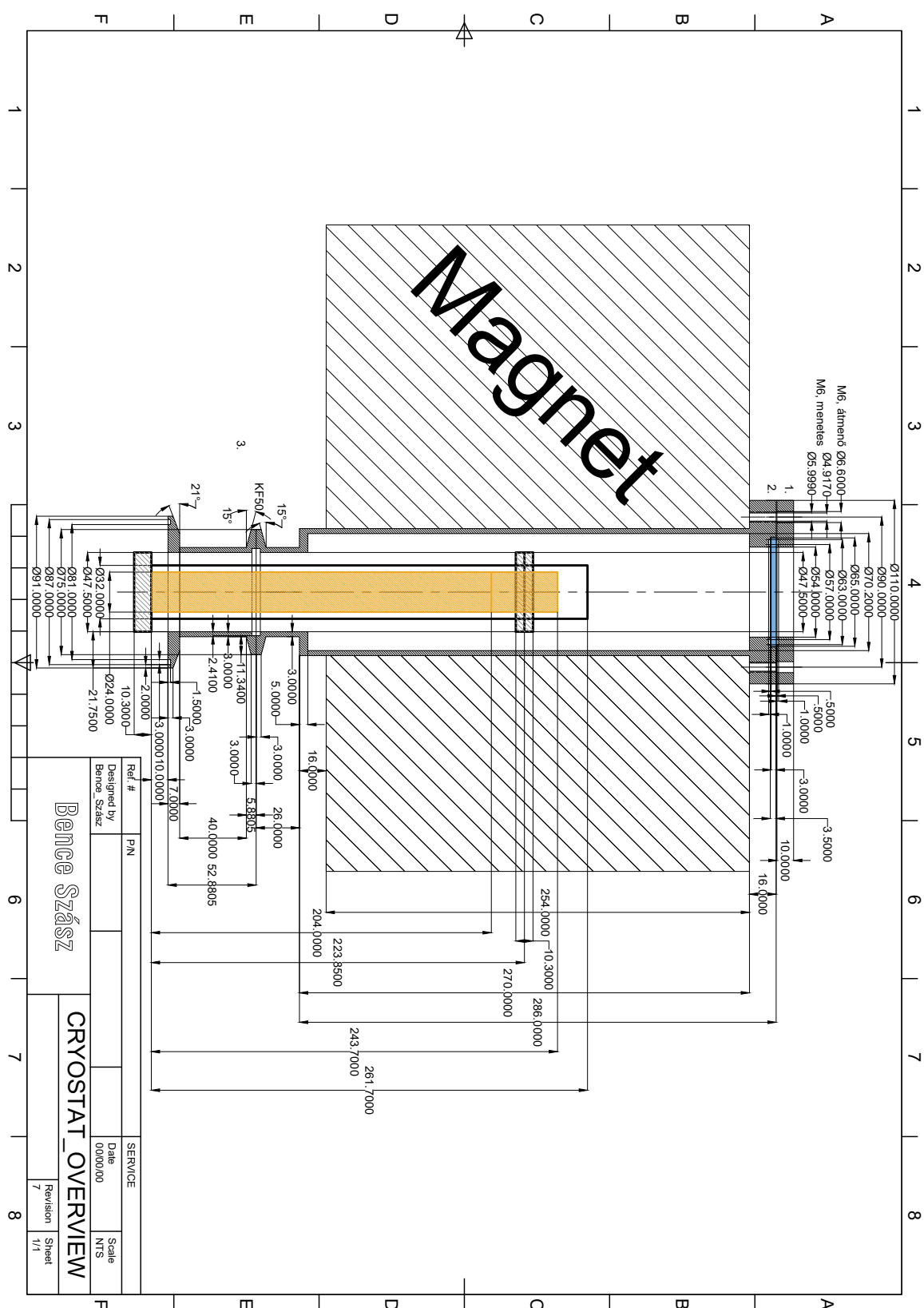
7.1. ábra. Janis állítható kriomágnes

A mágneses térben történő transzmissziós mérési elrendezéshez a kriosztát köpeny speciális kialakítása szükséges. Ehhez egy, a mágnes belsejébe illeszkedő kriosztátköpenyt és egy sugárzásvédő pajzsot terveztem. A pajzsot tükörtartókkal láttam el, amelyek lehetővé teszik a transzmissziós mérési elrendezést. A mérésekhez ezüst tükröket fogok felragasztani ezekre a tükörtartókra, mivel ebben a közeli infra tartományban ez az egyik legjobb tükrök ami elérhető (nagyobb reflektancia mint az Al tükröknek, viszont olcsóbb sokkal mint az Au tükrök), illetve ha később terahertz spektroszkópiával tervezek mérni, akkor is megfelelő lesz.



7.2. ábra. Al, Ag és Au tükrök reflektancia spektruma [14]

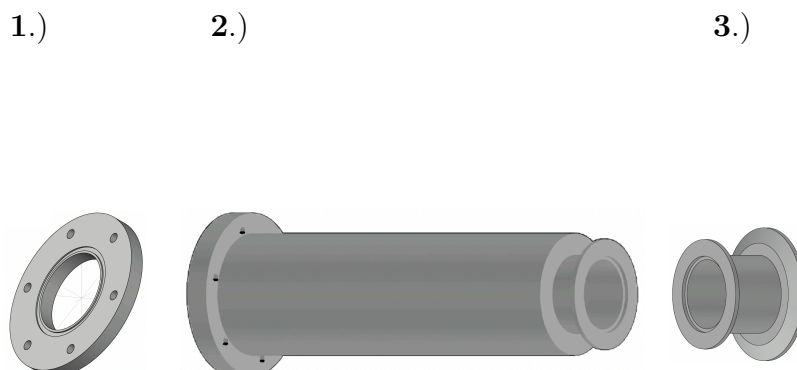
7. Kriosztát tervezése nagy mágneses terű mérésekhez



7.3. ábra. Az általam tervezett kriosztát áttekintő ábrája. Négy fő része van, felülről lefelé haladva: fény belépő ablak leszorítógyűrű, kriosztát test, KF50-es szűkítő, sugárzási pajzs a felszerelt tükrőtartóval.

7. Kriosztát tervezése nagy mágneses terű mérésekhez

Most a 7.3. ábrán látható elemek funkcióját fogom elemezni. Az általam tervezett kriosztátköpeny 3 részből áll:



7.4. ábra. Az általam tervezett kriosztát köpeny. A műszaki rajzok megtalálhatóak a Függelék D fejezetében.

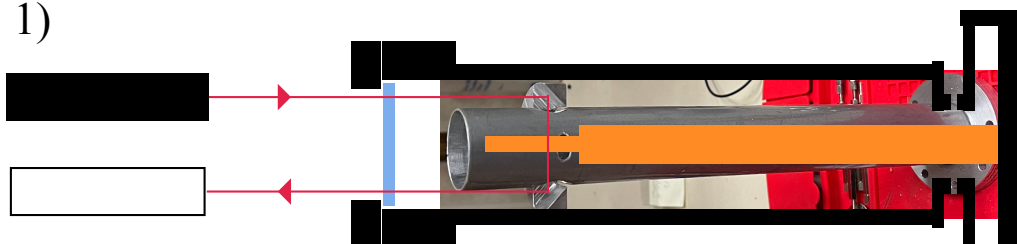
A 7.4 1.). ábrán látható elem funkciója hogy O-gyűrűk segítségével a fény be és kilépő ablakát a kriosztátra szorítsa, ennek anyaga sárgaréz. A következő képen a mágnes belsejébe illeszkedő kriosztát test látható (7.4 2.). ábra). Ezt úgy méreteztem, hogy maximáljam a rendelkezésre álló helyet jövőbeli kriosztáton belüli optikai utak tervezésére és építésére. A vége ennek az elemnek túllóg a mágnesen, így a szorítógyűrű mérete nem korlátozza a krió méretét, nem kell annak is bele férni a mágnes belsejébe. A kriosztát test standard ISO-KF50-es csatlakozóban végződik. Ez a standard csatlakozó hasznos lesz a jövőben ha más kriosztáttal vagy vákuum rendszerrel terveznénk használni ugyanezt az elrendezést. Ez a csatlakozó viszont még nem kompatibilis a mérésekhez használt Janis kriosztáttal így kell még egy átalakító. Ez a 7.43.). ábrán látható. Ez az elem illeszti be a meglévő Janis vékony kriosztátot a mérőrendszerünkbe. Az utolsó elem a kriosztát belsejébe menő sugárzási pajzs ami a kriosztát ablakain belépő hőmérsékleti sugárzást hivatott csökkenteni. Én ezt átterveztem és felszereltem rá egy félkör alakú elemet ami tükrök felragasztására alkalmas bevágásokkal rendelkezik, így téve lehetővé a transzmissziós méréseket.

I.



II.

1)



2)

7.5. ábra. A saját tervezésű tükörtartó és a sugárzási pajzs amire felszereltem. A I. ábrán csak a sugárzási pajzs és a tükörtartó látható laboratóriumi körülmények között. A II.-es ábrán pedig a 7.4. ábrán látható általam tervezett kriosztátköpeny elemei is fel vannak tüntetve illetve piros vonallal be van jelölve a transzmissziós elrendezés esetén alkalmazott fényút. 1) jelöli a fényforrást polarizátorokat és a szűrőket 2)-es pedig a polarizátorokat a detektort és a detektorra fókuszáló optikai elemeket.

Jelenleg a gyártáshoz szükséges anyagok beszerzése folyamatban van. Már csak a 7.4. ábrán látható 2.)-es elemhez kell beszerezni a nyersanyagokat, ami jelen esetben rozsdamentes acél, mivel keményforrasztással ez összekapcsolható saját magával vagy akár sárgaréz elemekkel is vákuumtömören, a két anyag hasonló hőtágulási karakterisztikája miatt.

8. Összefoglalás

A méréseim során megismerkedtem a fizikai mérőrendszerek tervezésével, mind áramköri mind mechanikai szempontból. Megtanultam régebbi és újabb laboratóriumi eszközökkel is kommunikálni és vezérelni őket. Optikai kriosztátot terveztem, illetve kifejlesztettem egy olcsó nagyfeszültségű transzformátor alapú tápegységet. Ezen eredmények a jövőben lehetővé teszik majd még több nagyterű mérés elvégzését, jelentősen elősegítve a ritkaföldfém-vasborátok mágneses(és elektromos) tulajdonságainak feltérképezését. A programozhatósága miatt remélem még sokáig használatban lesz a tápegység amit készítettem és a mérőrendszer amit terveztem.

Függelék A: A Pi Pico mikrokontroller vezérlő kódjai

A Pi Pico microPython nyelven is képes kommunikálni, a mérőrendszer építésekor én ezt használtam. A következő kódok szükségesek a Pi Pico és a rendszer vezérléséhez:

Main.py

```

1  from machine import I2C, Pin, ADC
2  from time import sleep
3  from pico_i2c_lcd import I2cLcd
4
5  # Set up I2C for the LCD and MCP4725
6  i2c = I2C(0, sda=Pin(0), scl=Pin(1), freq=400000)
7
8  # Define the I2C addresses
9  LCD_I2C_ADDR = 0x27 # Address for the LCD
10 MCP4725_ADDR1 = 0x61 # Address for the first MCP4725
11 MCP4725_ADDR2 = 0x60 # Address for the second MCP4725
12
13 # Global vectors for LCD display
14 lcd_row1 = ['_'] * 16 # Assuming the LCD has 16 characters
    per row
15 lcd_row2 = ['_'] * 16
16
17 LCD_ROWS = 2
18 LCD_COLS = 16
19
20 # Initialize the LCD
21 lcd = I2cLcd(i2c, LCD_I2C_ADDR, LCD_ROWS, LCD_COLS)
22
23 # Initialize ADC on pin A2 (Pin 28)
24 adc = ADC(Pin(28))
25
26 # Set reference voltages
27 VREF_ADC = 3.0 # Reference voltage for ADC readings
28 VREF_DAC = 5.0 # Reference voltage for DAC output
29 correction = 1.0 # Possible correction in case the ADC is
    not precise enough
30
31 # Configure GPIO pins for the switches with pull-down
    resistors
32 switch_dac1_inc = Pin(2, Pin.IN, Pin.PULL_DOWN) # GP4 to
    increase DAC 1

```

```

33 switch_dac1_dec = Pin(3, Pin.IN, Pin.PULL_DOWN) # GP5 to
    decrease DAC 1
34 switch_dac2_inc = Pin(4, Pin.IN, Pin.PULL_DOWN) # GP2 to
    increase DAC 2
35 switch_dac2_dec = Pin(5, Pin.IN, Pin.PULL_DOWN) # GP3 to
    decrease DAC 2
36 switch_dac1_multiplier = Pin(7, Pin.IN, Pin.PULL_DOWN) # GP7
    for multiplier on DAC 1
37 switch_dac2_multiplier = Pin(8, Pin.IN, Pin.PULL_DOWN) # GP8
    for multiplier on DAC 2
38
39 # Track the current DAC output values for both DACs
40 dac_value1 = 0 # Start at 0 for DAC 1
41 dac_value2 = 0 # Start at 0 for DAC 2
42 increment_dac1 = 14 # Increment by 5 units each time for DAC
    1
43 #increment_dac2 = 5 # Increment by 14 units each time for
    DAC 2 0.01 A precision
44 increment_dac2 = 40
45
46 increment_dac1_base = 14 # Increment by 5 units each time
    for DAC 1
47 #increment_dac2_base = 5 # Increment by 14 units each time
    for DAC 2 0.01 A precision
48 increment_dac2_base = 40
49
50 increment_dac1_10 = 137
51 #increment_dac2_10 = 40 0.1 A steps
52 increment_dac2_10 = 410
53
54 # Define unique multipliers for each DAC
55 MULTIPLIER_DAC1 = 6 # Example multiplier for DAC 1
56 MULTIPLIER_DAC2 = 2 # Example multiplier for DAC 2
57
58 # Flags to prevent repeated increments when holding down
    buttons
59 dac1_inc_flag = False
60 dac1_dec_flag = False
61 dac2_inc_flag = False
62 dac2_dec_flag = False
63
64 # Multiplier flags
65 dac1_multiplier_active = False
66 dac2_multiplier_active = False
67
68 # Function to convert ADC reading to voltage

```

```

69 def read_voltage(adc_value):
70     conversion_factor = VREF_ADC / 65535
71     return adc_value * conversion_factor * correction
72
73 # Function to update a specific position in the LCD row
74 def update_lcd_row(row, position, character):
75     if row == 1:
76         lcd_row1[position] = character
77     elif row == 2:
78         lcd_row2[position] = character
79
80
81 def set_dac_value(address, value, label):
82     # Ensure value is within the valid range (0 to 4095)
83     value = max(0, min(value, 4095))
84
85     # Convert the DAC value to voltage using the DAC's 5V
      reference
86     output_voltage = (value / 4095) * VREF_DAC
87
88     # Apply unique multiplier based on DAC address
89     if address == MCP4725_ADDR1:
90         output_adjusted = output_voltage * MULTIPLIER_DAC1
91         unit = "V"
92     elif address == MCP4725_ADDR2:
93         output_adjusted = output_voltage * MULTIPLIER_DAC2
94         unit = "A"
95
96     # Print the adjusted output for verification
97     print(f"DAC_{(Addr_{address})}_Adjusted_Output:_{
      output_adjusted:.2f}_{unit}")
98
99     # Construct the data array for the MCP4725
100     data = bytearray([(value >> 8) & 0xFF, value & 0xFF])
101     i2c.writeto(address, data)
102
103     # Format output for the LCD
104     if address == MCP4725_ADDR1:
105         formatted_output = "{:.1f}_V".format(output_adjusted)
106         # One decimal place for DAC 1
107         lcd_row2[1:len(formatted_output)+1] = list(
            formatted_output) # Convert string to list for
            assignment
108         lcd_row2[0] = '_' # Ensure the first position is
            empty
109     elif address == MCP4725_ADDR2:

```

```

109     formatted_output = "{:.1f} A".format(output_adjusted)
        # One decimal places for DAC 2
110     #formatted_output = "{:.2f} A".format(output_adjusted)
        # Two decimal places for DAC 2 for higher
        precision
111     lcd_row2[9:9+len(formatted_output)] = list(
        formatted_output) # Convert string to list for
        assignment
112     lcd_row2[0] = ' ' # Ensure the first position is
        empty
113
114
115
116
117 # Unified interrupt handler for all buttons
118 def button_handler(pin):
119     global dac_value1, dac_value2
120     global increment_dac1, increment_dac2
121     global dac1_inc_flag, dac1_dec_flag, dac2_inc_flag,
        dac2_dec_flag
122
123     # Handle DAC 1 increment
124     if pin == switch_dac1_inc:
125         if pin.value() == 1 and not dac1_inc_flag:
126             if dac_value1 + increment_dac1 <= 4095:
127                 dac_value1 += increment_dac1
128                 set_dac_value(MCP4725_ADDR1, dac_value1, "I")
129                 dac1_inc_flag = True # Prevent repeated
                    increments
130             elif pin.value() == 0:
131                 dac1_inc_flag = False # Reset flag on release
132
133     # Handle DAC 1 decrement
134     elif pin == switch_dac1_dec:
135         if pin.value() == 1 and not dac1_dec_flag:
136             if dac_value1 - increment_dac1 >= 0:
137                 dac_value1 -= increment_dac1
138                 set_dac_value(MCP4725_ADDR1, dac_value1, "I")
139                 dac1_dec_flag = True
140             elif pin.value() == 0:
141                 dac1_dec_flag = False
142
143     # Handle DAC 2 increment
144     elif pin == switch_dac2_inc:
145         if pin.value() == 1 and not dac2_inc_flag:
146             if dac_value2 + increment_dac2 <= 4095:

```

```

147         dac_value2 += increment_dac2
148         set_dac_value(MCP4725_ADDR2, dac_value2, "V")
149         dac2_inc_flag = True
150     elif pin.value() == 0:
151         dac2_inc_flag = False
152
153     # Handle DAC 2 decrement
154     elif pin == switch_dac2_dec:
155         if pin.value() == 1 and not dac2_dec_flag:
156             if dac_value2 - increment_dac2 >= 0:
157                 dac_value2 -= increment_dac2
158                 set_dac_value(MCP4725_ADDR2, dac_value2, "V")
159                 dac2_dec_flag = True
160         elif pin.value() == 0:
161             dac2_dec_flag = False
162
163
164 # Function to read the sweep values from a CSV file without
    using the csv module
165 def read_sweep_values(filename):
166     sweep_values = []
167     with open(filename, 'r') as csvfile:
168         header = csvfile.readline() # Skip header line
169         for line in csvfile:
170             # Strip whitespace and split by comma
171             row = line.strip().split(',')
172             if len(row) == 2:
173                 try:
174                     dac1_voltage = float(row[0])
175                     dac2_voltage = float(row[1])
176                     sweep_values.append((dac1_voltage,
177                                         dac2_voltage))
178                 except ValueError:
179                     print("Invalid voltage values in row:",
180                           row)
181
182     return sweep_values
183
184
185 # Attach interrupts to the switches for increment/decrement
186 switch_dac1_inc.irq(trigger=Pin.IRQ_RISING | Pin.IRQ_FALLING,
187                     handler=button_handler)
188 switch_dac1_dec.irq(trigger=Pin.IRQ_RISING | Pin.IRQ_FALLING,
189                     handler=button_handler)

```

```

188 switch_dac2_inc.irq(trigger=Pin.IRQ_RISING | Pin.IRQ_FALLING,
    handler=button_handler)
189 switch_dac2_dec.irq(trigger=Pin.IRQ_RISING | Pin.IRQ_FALLING,
    handler=button_handler)
190
191 # Define variables for sweep functionality
192 isSweep = False # Set to True to perform sweep, False to
    operate normally
193 sweep_delay = 2.0 # Time in seconds to wait for each DAC
    voltage pair
194 sweep_values = []
195
196 # Read sweep values from the CSV file if isSweep is True
197 if isSweep:
198     sweep_values = read_sweep_values('list.csv')
199
200 # Index for the current sweep value
201 current_sweep_index = 0
202
203 try:
204     # Set initial DAC output to 0 on startup and display it
    for both DACs
205     set_dac_value(MCP4725_ADDR1, 0, "I")
206     set_dac_value(MCP4725_ADDR2, 0, "V")
207
208     # Main loop
209     while True:
210         # Check multiplier switches
211         dac1_multiplier_active = switch_dac1_multiplier.value
            () == 1
212         dac2_multiplier_active = switch_dac2_multiplier.value
            () == 1
213
214         # Update increment values based on multiplier states
215         increment_dac1 = increment_dac1_10 if
            dac1_multiplier_active else increment_dac1_base
216         increment_dac2 = increment_dac2_10 if
            dac2_multiplier_active else increment_dac2_base
217 # Always update the voltage display
218 adc_value = adc.read_u16() # Read ADC value (16-bit)
219 voltage = read_voltage(adc_value)
220 formatted_voltage = "Vh{}_{:02f}kV".format(10 *
    voltage) # Update voltage display
221 for i, char in enumerate(formatted_voltage):
222     update_lcd_row(1, i, char) # Update first row
        with the measured voltage

```

```

223
224     # Update the display with the changed characters for
        the voltage
225     lcd.move_to(0, 0)  # Move to the beginning of the
        first row
226     lcd.putstr(''.join(lcd_row1))  # Write formatted
        output for ADC voltage
227
228     if isSweep:
229         if current_sweep_index < len(sweep_values):
230             # Get current DAC values from the sweep list
231             dac1_voltage, dac2_voltage = sweep_values[
                current_sweep_index]
232             if dac1_voltage > 29.9:
233                 dac1_voltage = 29.9
234             if dac2_voltage > 10:
235                 dac1_voltage = 10
236             if dac1_voltage < 0:
237                 dac1_voltage = 0
238             if dac2_voltage < 0:
239                 dac1_voltage = 0
240             # Convert voltages to DAC values
241             dac_value1 = int((dac1_voltage * 137)) #
                1/(6*5/4095) = 137
242             dac_value2 = int((dac2_voltage * 410))#
                1/(2*5/4095) = 410
243
244             # Set DAC values
245             set_dac_value(MCP4725_ADDR1, dac_value1, "I")
246             set_dac_value(MCP4725_ADDR2, dac_value2, "V")
247
248             # Update the second LCD row with the current
                sweep values
249             # Format the output for both DACs
250             formatted_output1 = "{:.1f} V".format(
                dac1_voltage)  # DAC1 voltage display
251             formatted_output2 = "{:.1f} A".format(
                dac2_voltage)  # DAC2 current display
252
253             # Clear the second row and set the formatted
                outputs
254             lcd_row2[0] = ' '  # Ensure the first
                position is empty
255             lcd_row2[1:len(formatted_output1)+1] = list(
                formatted_output1)  # Fill in DAC1 voltage

```

```

256         lcd_row2[9:9+len(formatted_output2)] = list(
257             formatted_output2) # Fill in DAC2 current
258
259     # Write updated values to the LCD
260     lcd.move_to(0, 1)
261     lcd.putstr(''.join(lcd_row2)) # Update the
262         second row
263
264     # Increment index for the next sweep value
265     current_sweep_index += 1
266     # Sleep for the defined delay to allow for
267         changes to take effect
268     sleep(sweep_delay)
269
270 else:
271     # Normal operation code goes here (ADC reading,
272         etc.)
273     adc_value = adc.read_u16() # Read ADC value (16-
274         bit)
275     voltage = read_voltage(adc_value)
276     formatted_voltage = "Vh_{}_{: .2f}_kV".format(10 *
277         voltage) # Update voltage display
278     for i, char in enumerate(formatted_voltage):
279         update_lcd_row(1, i, char) # Update first
280             row with the measured voltage
281
282     # Update the display with the changed characters
283     lcd.move_to(0, 0) # Move to the beginning of the
284         first row
285     lcd.putstr(''.join(lcd_row1)) # Write formatted
286         output for ADC voltage
287     lcd.move_to(0, 1) # Move to the beginning of the
288         second row
289     lcd.putstr(''.join(lcd_row2)) # Write formatted
290         output for DACs
291
292 except KeyboardInterrupt:
293     # Clean up on exit with Ctrl+C
294     del i2c

```

LCD kezelő kódok, `lcd_api.py` és `pico_i2c_lcd.py`

Ezek a kódok [15] oldalról származnak, apró módosításokkal.

`list.csv`

Ezt a file-t használva lehet beállítavi voltage és feszültség sweepet. AZ első oszlop voltban van a második pedig amperben.

```
1      DAC1_Voltage , DAC2_Voltage
2      0.0 , 0.0
3      10.0 , 0.5
4      20.0 , 1.0
5      30.0 , 1.5
6      40.0 , 2.0
```

Függelék B: A mérések kiértékeléséhez használt Rust kódok

A mérések kiértékelését és Fourier-transzformációt Rust nyelven végeztem el. Ennek több oka is volt, hogy nem például Pythonra esett a választásom. A Rust egy viszonylag új nyelv ami csak nem régiben kezdett teret hódítani kutatási területeken. A Rust kiemelkedően gyors és memóriahatékony, mivel alacsony szintű nyelvként közvetlenül gépi kódra fordítja a programot, minimalizálva a futási időt és memóriakezelési költségeket. Mivel nincs szükség futásidejű garbage collectionre, a kódban előre optimalizálhatók az erőforrások, és ezáltal csökkenthetők a váratlan késleltetések. A Rust továbbá biztosítja a memóriabiztonságot, így elkerülhetők a memóriahozzáférési hibák, amelyek nagy adatmennyiségek feldolgozása közben gyakran előfordulhatnak Pythonban. Python gyors prototípus-készítésre kiváló, de Rust a teljesítménykritikus, pontos méréselemzésben és a real-time számításokban mutatja meg az igazi erejét.

Mentett adatok egységes alakra hozása

```

1 use csv::{ReaderBuilder, WriterBuilder};
2 use std::error::Error;
3 use std::fs::File;
4 use std::path::{Path, PathBuf};
5
6 fn main() -> Result<(), Box<dyn Error>> {
7     // Path to the original CSV file
8     let file_path = "path";
9
10    // Number of rows and columns to ignore
11    let n_rows_to_skip = 3; // Modify this as needed
12    let n_columns_to_skip_front = 3; // Modify this as
        needed
13    let n_columns_to_skip_back = 1; // Modify this as
        needed
14
15    // Open the CSV file
16    let file = File::open(file_path)?;
17
18    // Create a CSV reader
19    let mut rdr = ReaderBuilder::new().has_headers(true).
        from_reader(file);
20
21    // Initialize a 2D vector to store the data
22    let mut records: Vec<Vec<f64>> = Vec::new();
23
24    // Skip the first 'n' rows
25    for _ in 0..n_rows_to_skip {
26        rdr.records().next(); // Skip each record
27    }
28
29    // Read the remaining records (rows)
30    for result in rdr.records() {
31        let record = result?;
32
33        // Skip the first 'n' columns from the record and the
            last 'n' columns
34        let row: Vec<f64> = record.iter()
            .skip(n_columns_to_skip_front) // Skip the first
                'n' columns
35        .take(record.len() - n_columns_to_skip_front -
            n_columns_to_skip_back) // Skip the last 'n'
                columns
36        .map(|s| {

```

```

38         let trimmed_value = s.trim(); // Trim spaces
39         match trimmed_value.parse::<f64>() {
40             Ok(value) => value, // If parsing
                                   succeeds, store the value
41             Err(_) => {
42                 eprintln!("Failed to parse value: {}",
43                             , trimmed_value);
44                 0.0 // If parsing fails, set the
45                     value to 0.0 (or handle as needed)
46             }
47         }
48     })
49     .collect();
50
51 // Add the row to the records vector
52 records.push(row);
53 }
54
55 // Print the first 5 rows (or as many as exist)
56 let num_rows = records.len().min(5);
57 for i in 0..num_rows {
58     println!("{:?}", records[i]);
59 }
60
61 // Extract the folder from the original file path
62 let folder_path = Path::new(file_path)
63     .parent() // Get the parent directory (folder)
64     .unwrap_or_else(|| Path::new(".")); // Default to
65     current directory if no parent found
66
67 // Prepare output file name in the same folder
68 let output_file_name = Path::new(file_path)
69     .file_stem() // Get the file name without extension
70     .map(|stem| format!("{}", _cleaned.csv", stem.
71         to_string_lossy())) // Append "_cleaned"
72     .unwrap_or_else(|| "cleaned_output.csv".to_string());
73
74 // Combine the folder path with the new file name
75 let output_path = folder_path.join(output_file_name);
76
77 // Create the output file
78 let output_file = File::create(&output_path)?;
79 let mut wtr = WriterBuilder::new().from_writer(
80     output_file);
81
82 // Write the cleaned records to the new CSV

```

```
78     for row in records {
79         let string_row: Vec<String> = row.iter().map(|&v| v.
            to_string()).collect();
80         wtr.write_record(string_row)?;
81     }
82
83     // Print the output path after cloning
84     println!("Cleaned data has been saved to: {}",
        output_path.display());
85
86     Ok(())
87 }
```

Fast Fourier Transzformációt elvégző program

```

1 use csv::{ReaderBuilder, WriterBuilder};
2 use num_complex::Complex;
3 use rustfft::{FftPlanner, num_complex::Complex32};
4 use std::error::Error;
5 use std::fs::File;
6 use std::path::{Path, PathBuf};
7
8 fn main() -> Result<(), Box<dyn Error>> {
9     // Path to the original CSV file
10    let file_path = "/Users/szaszbence/Labor/2024/tdk/hv_1/
        F0002CH1_cleaned.csv";
11
12    // Open the CSV file
13    let file = File::open(file_path)?;
14
15    // Create a CSV reader
16    let mut rdr = ReaderBuilder::new().has_headers(true).
        from_reader(file);
17
18    // Vectors to store the time and y values
19    let mut time_values: Vec<f32> = Vec::new();
20    let mut y_values: Vec<f32> = Vec::new();
21
22    // Read the CSV records
23    for result in rdr.records() {
24        let record = result?;
25
26        // Parse time and y values (assume columns 1 and 2
27        // are t and y)
28        if let (Some(t_str), Some(y_str)) = (record.get(0),
29        record.get(1)) {
30            if let (Ok(t), Ok(y)) = (t_str.parse::<f32>(),
31            y_str.parse::<f32>()) {
32                time_values.push(t);
33                y_values.push(y);
34            }
35        }
36    }
37
38    // Ensure there is data before proceeding
39    if time_values.is_empty() || y_values.is_empty() {
40        return Err("The CSV file does not contain any valid
41        data.".into());
42    }

```

```

39
40 // Check if we have at least 2 data points to calculate
    sampling rate
41 if time_values.len() < 2 {
42     return Err("The CSV file must have at least two time
        values to calculate the sampling rate.".into());
43 }
44
45 // Perform FFT on the y values (assuming the time step is
    constant)
46 let n = y_values.len();
47 let mut planner = FftPlanner::new();
48 let fft = planner.plan_fft_forward(n);
49
50 // Convert y values into complex numbers (real part is y,
    imaginary part is 0)
51 let mut input: Vec<Complex32> = y_values.iter().map(|&v|
    Complex32::new(v, 0.0)).collect();
52
53 // Perform the FFT
54 fft.process(&mut input); // Fixed: Remove second argument
55
56 // Calculate frequency axis (assuming uniform sampling
    rate)
57 let sampling_rate = 1.0 / (time_values[1] - time_values
    [0]); // Sampling rate is 1 / (t[1] - t[0])
58
59 // Generate the frequency axis
60 let mut frequency_values: Vec<f32> = Vec::new();
61 for i in 0..n {
62     frequency_values.push(i as f32 * sampling_rate / n as
        f32);
63 }
64
65 // Calculate amplitude (magnitude of the complex numbers)
66 let amplitude_values: Vec<f32> = input.iter().map(|c| c.
    norm()).collect();
67
68 // Extract the folder path from the original file
69 let folder_path = Path::new(file_path)
70     .parent() // Get the parent directory (folder)
71     .unwrap_or_else(|| Path::new(".")); // Default to
        current directory if no parent found
72
73 // Prepare output file name in the same folder
74 let output_file_name = Path::new(file_path)

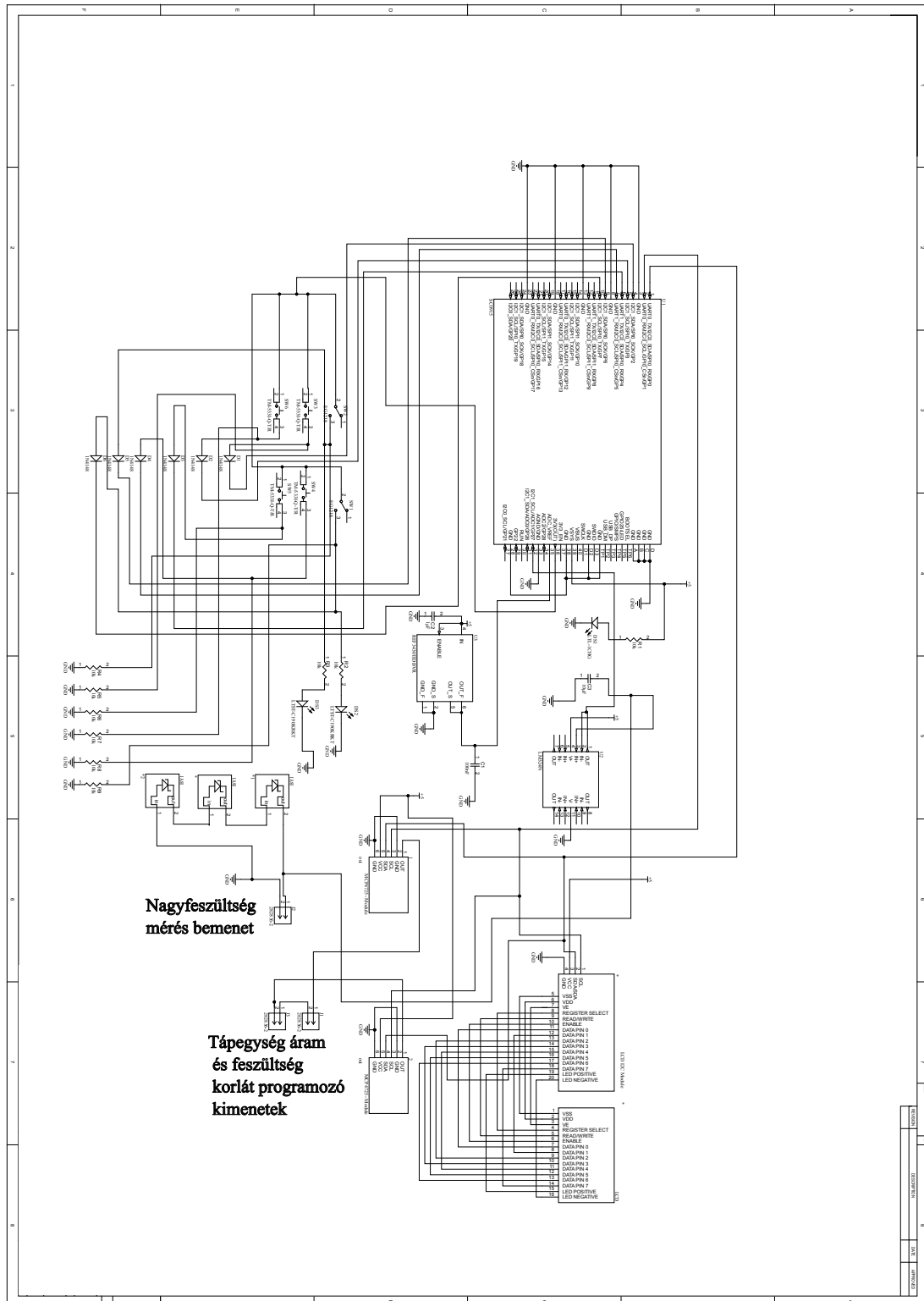
```

```

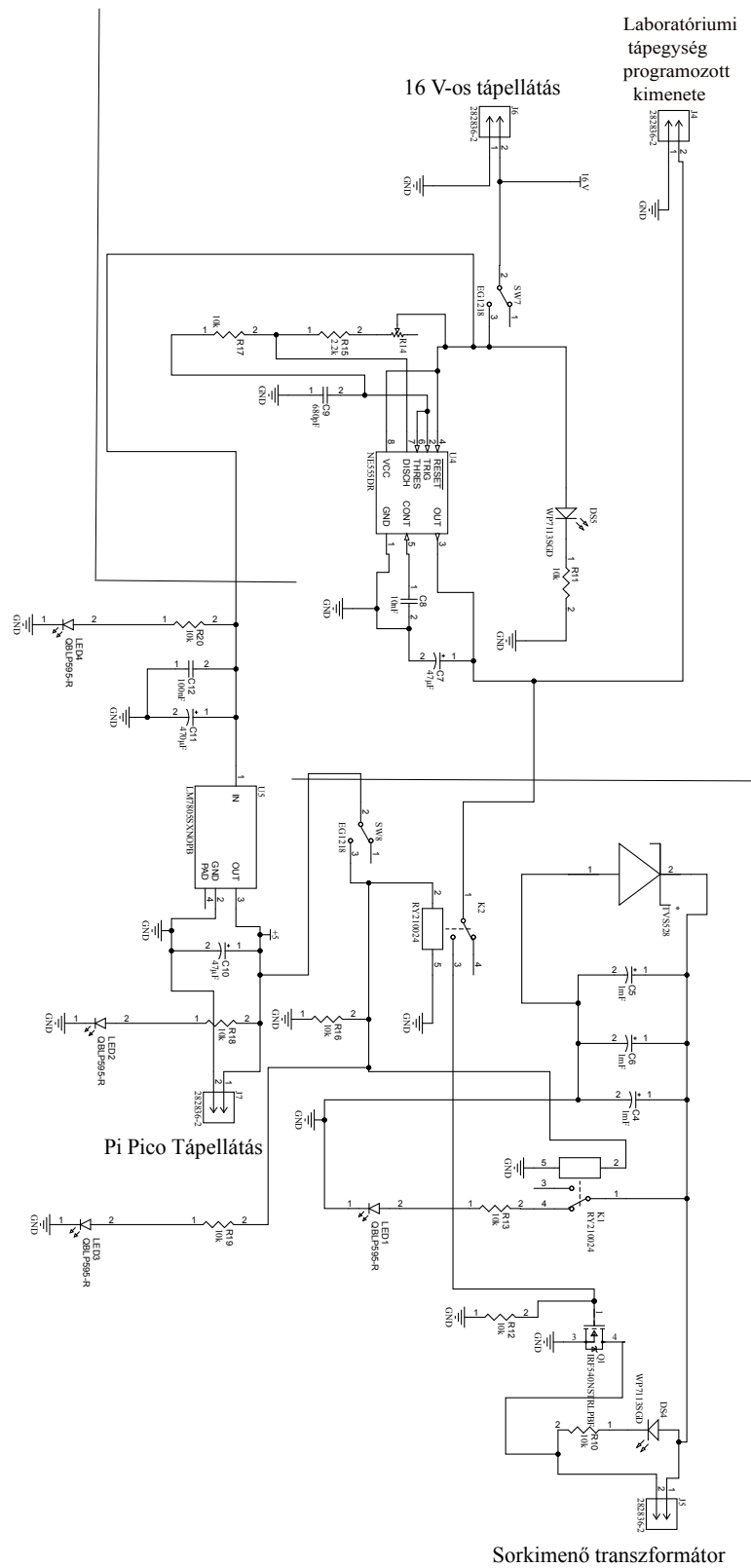
75     .file_stem() // Get the file name without extension
76     .map(|stem| format!("{}",_fft.csv", stem.
           to_string_lossy())) // Append "_fft"
77     .unwrap_or_else(|| "fft_output.csv".to_string());
78
79 // Combine the folder path with the new file name
80 let output_path = folder_path.join(output_file_name);
81
82 // Create the output file
83 let output_file = File::create(&output_path)?;
84 let mut wtr = WriterBuilder::new().from_writer(
           output_file);
85
86 // Write the frequency and amplitude data to the CSV
87 wtr.write_record(&["Frequency(Hz)", "Amplitude"])?;
88
89 for (freq, amp) in frequency_values.iter().zip(
           amplitude_values.iter()) {
90     wtr.write_record(&[freq.to_string(), amp.to_string()
           ])?;
91 }
92
93 // Print the output path
94 println!("FFT_data_has_been_saved_to:{}", output_path.
           display());
95
96 Ok(())
97 }

```

Függelék C: Kapcsolási rajzok

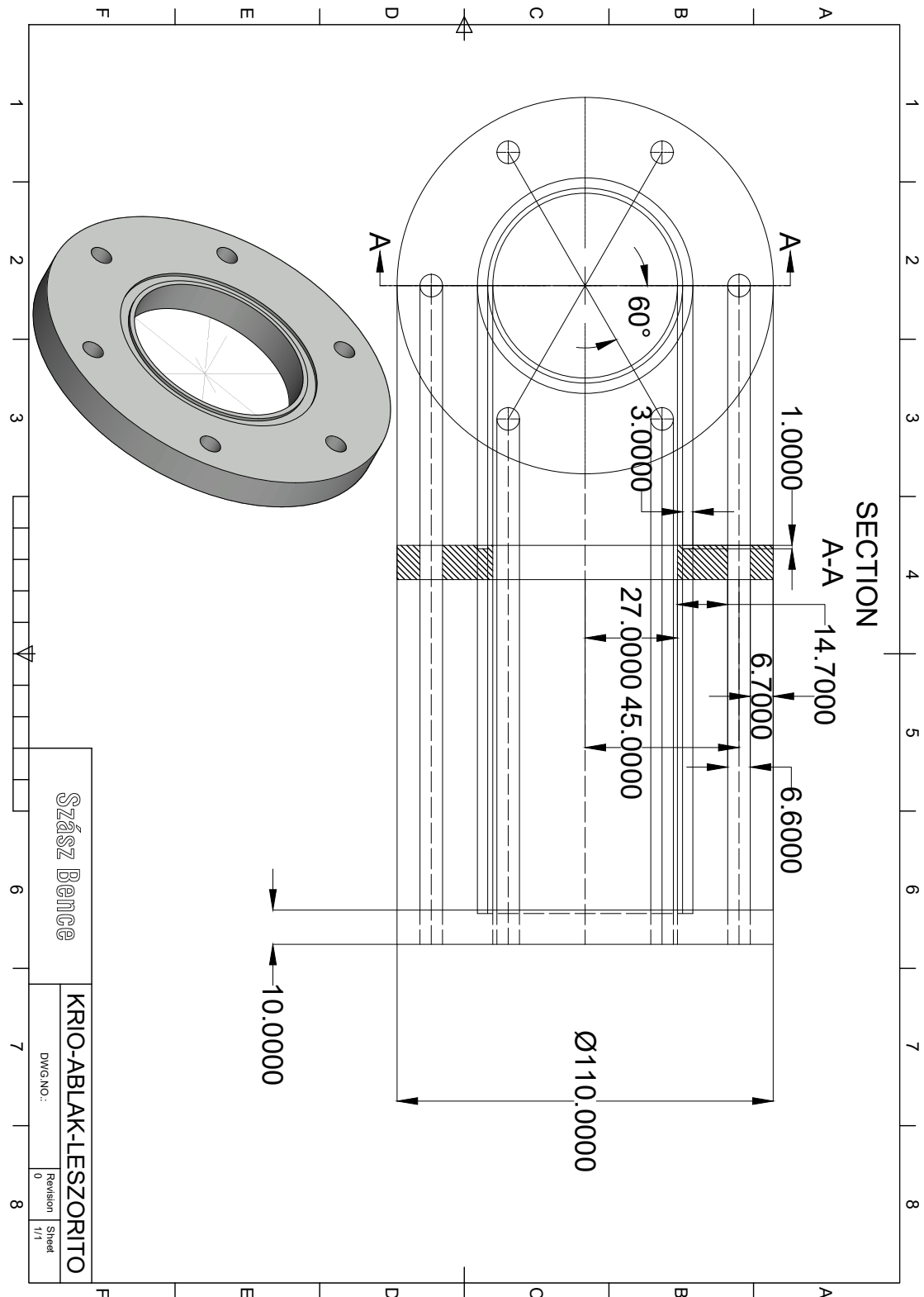


Mikrokontrolleres vezérlő áramkör

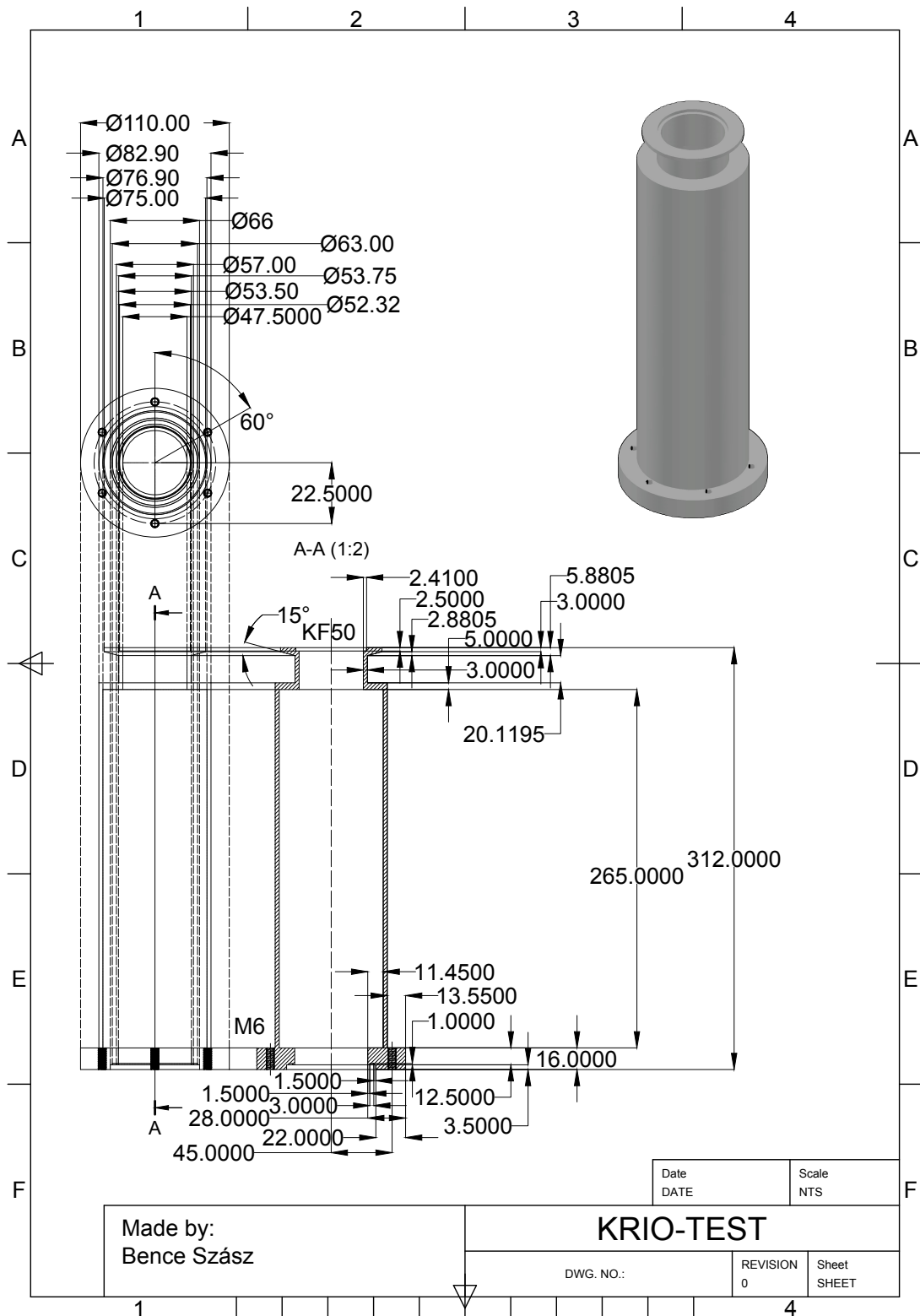


Sorkimenő transzformátor meghajtó és 5 V-os feszültségforrás áramkör

Függelék D: Műszaki rajzok



Fény belépő ablak leszorító gyűrűje



Kriosztát test

Saját eredmények összefoglalása

Probléma: Nagy elektromos (és mágneses) térrel kontrollált mágneses rendeződés vizsgálata antiferromágneses mintákon. Ehhez új felszerelés és műszerek szükségesek.

Előzmények: Korábbi méréseimhez csak kisebb elektromos és mágneses tereket használhattam, nagyobb terekkel új jelenségeket lehetne tanulmányozni.

Cél: Számítógépvezérelt mérőrendszer fejlesztése, amely nagy elektromos és mágneses (vagy mindkettő) térben is képes transzmissziós optikai mérésekre.

Saját eredmények:

1. Mágneses- és kristályszerkezet szemléltetéséhez ábrák készítése Vesta programban
2. Új számítógéppel vezérelhető nagyfeszültségű tápegység készítése
 - Pi Pico mikrokontroller használatának megtanulása
 - I2C kommunikációs protokoll használatának elsajátítása
 - LCD kijelző használatának elsajátítása
 - Laboratóriumi tápegység analóg programozásának megismerése
 - Digitál analóg konverter használatának megismerése
 - N-csatornás teljesítmény Mosfet használatának elsajátítása
 - Nagyfeszültségű feszültségű ismeretek elsajátítása az áramkör tervezéséhez
 - Sorkimenő transzformátor működésének elsajátítása és megértése
 - Új saját primér kör készítése a sorkimenő transzformátorhoz
 - Speciális nagyfeszültségű feszültségosztó készítése a nagyfeszültség visszaméréséhez
 - Pi Pico mikrokontrolleres vezérlő áramkör tervezése. Az áramkör visszaméri a nagyfeszültséget illetve segítségével kézikézi vagy program által állítható a laboratóriumi tápegység feszültség és áramkorlátja.
 - A Pi Pico-s vezérlő áramkör megvalósítása
 - Vezérlőkód és Fourier-transzformációs Rust kód készítése kiértékeléshez
 - Altium Designer elektronikai tervező program használatának elsajátítása
 - Nagyfeszültségű tápegység meghajtó, IRF540N Mosfetet használó áramkör tervezése és megvalósítása
 - Biztonságvédelmi megfontolások alkalmazása az áramkörökben, érintésvédelem, kondenzátorok automatikus lemerítése, védelmi kapcsolók és indikátor LED-ek használata.
 - Áramkör tesztelése kriosztáthoz hasonló elrendezésben
3. Nagyfeszültségű mintatartó tervezése
4. Kriosztát és optikai út tervezése nagy mágneses terű transzmissziós mérésekhez
 - AutoCAD software használatának megismerése
 - Kriosztát tervezéséhez szükséges anyagtudományi ismeretek elsajátítása
 - Kriosztát megtervezése
 - Transzmissziós mérésekhez tükrötartó tervezése
 - Reflexiós adatok alapján megfelelő tükrök kiválasztása, optikai út tervezése

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a konzulenseimnek, Szaller Dávidnak, a témában nyújtott mind elméleti, mind kísérleti iránymutatásért és segítségért, illetve Farkas Viktornak, a mikroelektronikában és mikrokontroller alkalmazásban nyújtott iránymutatásáért. Szeretném megköszönni a NKFI Hivatalnak, hogy a TDK elkészítését az OTKA FK 135003 sz. pályázaton keresztül támogatta. Ezen felül még köszönettel tartozok I. A. Gudim és L. N. Bezmaternykh kutatóknak a mérésekhez használt $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kristály növesztéséért.

Hivatkozások

- [1] T. Jungwirth és tsai. “Antiferromagnetic spintronics”. *Nature Nanotechnology* 11.3 (2016. márc.), 231–241. old. ISSN: 1748-3395. DOI: 10.1038/nnano.2016.18. URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.18>.
- [2] P. Němec és tsai. “Antiferromagnetic opto-spintronics”. *Nature Physics* 14.3 (2018. márc.), 229–241. old. ISSN: 1745-2481. DOI: 10.1038/s41567-018-0051-x. URL: <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0051-x>.
- [3] M. N. Popova és tsai. “Crystal field and exchange interactions in the $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ multiferroic”. *J. Exp. Theor. Phys.* 118.1 (2014. jan.), 111–123. old. DOI: 10.1134/S1063776114010142. URL: <https://doi.org/10.1134/S1063776114010142>.
- [4] *The materials project*. <https://next-gen.materialsproject.org/>. 2023. URL: <https://next-gen.materialsproject.org/>.
- [5] Yu. F. Popov és tsai. “Peculiarities in the magnetic, magnetoelectric, and magnetoelastic properties of $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ multiferroic”. *J. Exp. Theor. Phys.* 111.2 (2010), 199–203. old. DOI: 10.1134/S1063776110080066. URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063776110080066>.
- [6] C. Ritter és tsai. “Determination of the magnetic structure of $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ by neutron diffraction: comparison with other $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ iron borates”. *J. Phys.: Condens. Matter* 24.38 (2012), 386002. old. URL: <http://stacks.iop.org/0953-8984/24/i=38/a=386002>.
- [7] A. M. Kuzmenko és tsai. “Switching of Magnons by Electric and Magnetic Fields in Multiferroic Borates”. *Phys. Rev. Lett.* 120 (2 2018. jan.), 27203. old. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.027203. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.120.027203>.
- [8] Bence Szász. “TDKAntiferromágneses domének optikai vizsgálata **$\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$** -ban”. Komplex Mágnes Szerkezetek Kutatócsoport. Szakdolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2022.
- [9] Bence Szász. “Antiferromágneses domének optikai vizsgálata **$\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$** -ban”. Komplex Mágnes Szerkezetek Kutatócsoport. TDK dolgozat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2022.
- [10] A. M. Kuz'menko és tsai. “Effects of the interaction between R and Fe modes of the magnetic resonance in $\text{RFe}_3(\text{BO}_3)_4$ rare-earth iron borates”. *JETP Letters* 94.4 (2011. okt.), 294. old. ISSN: 1090-6487. DOI: 10.1134/S0021364011160119. URL: <https://doi.org/10.1134/S0021364011160119>.
- [11] Muhammad Ammar Ahmed Khan és Muhammad Sabieh Anwar Wasif. *High Voltage Power Supply (1 to 20 KV)*. Accessed: 2024-12-30. n.d. URL: https://physlab.lums.edu.pk/images/2/24/Hv_power_supply.pdf.
- [12] Gateron. *SPEC-KS-9C10B060NN-X14-G Blue Pro Switch*. https://cdn.shopify.com/s/files/1/0565/8070/2297/files/SPEC-KS-9C10B060NN-X14-G_Blue_Pro_Switch.pdf?v=1670916070. Accessed: 2025-01-03. 2023.

- [13] Ltd. Yangzhou Idealtek Electronics Co. *High Precision Low Ripple High Stability Laboratory High Voltage Power Supply with 100kV 1kW Variable HV Output*. https://kyjsyz.en.made-in-china.com/product/hBAJpfsk0Erj/China-High-Precision-Low-Ripple-High-Stability-Laboratory-High-Voltage-Power-Supply-with-100kv-1kw-Variable-Hv-Output.html?pv_id=1igi76kpt12c&faw_id=1igi76lqre0c. Accessed: 2025-01-02.
- [14] J.H. Correia, M. Bartek és Reinoud Wolffenbuttel. “High-selectivity single-chip spectrometer in silicon for operation in visible part of the spectrum”. *Electron Devices, IEEE Transactions on* 47 (2000. ápr.), 553–559. old. DOI: 10.1109/16.824727.
- [15] Dave Hylands. *python_lcd*. https://github.com/dhylands/python_lcd. GitHub repository. 2023. URL: https://github.com/dhylands/python_lcd.