

SPINHULLÁM ALAPÚ ARCHITEKTÚRÁK

Papp Ádám

A PhD disszertáció tézisei

Témavezető:
Csurgay Árpád

Konzulensek a Notre Dame Egyetemen:
Wolfgang Porod
Csaba György



Pázmány Péter Katolikus Egyetem
Információs Technológiai és Bionikai Kar
Budapest, 2017

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	1
2. MÓDSZEREK	4
3. TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	8
A DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK . . .	19
IRODALOMJEGYZÉK	22

1. FEJEZET

BEVEZETÉS

A mágnességen alapuló számítóeszközök az elmúlt évtizedben az egyik legfontosabb jelöltté váltak a CMOS technológia kiváltására, illetve kiegészítésére. A mai számítóeszközök többnyire elektromos jeleket, illetve töltéseket használnak, a spinek szinte kizárólag csak információ tárolására szolgálnak. Ugyanakkor már többször igazolták, hogy a mágnesezettség ([1], [2]) és a spinhullám amplitúdó/fázis ([3], [4], [5], [6], [7]) is használható információ továbbításra és feldolgozásra.

A spinen alapuló eszközökre jellemző az alacsony disszipáció, közepes-magas sebesség és kis méret, emellett általában nincs szükség különleges anyagok használatára, vagy rendkívül nagy kihívást jelentő fabrikációs lépésekre. A spinhullámok a mágneses közegek terjedő zavarai, tipikusan ferromágneses illetve ferrimágneses anyagokban. A spinhullámok számos tulajdonságukban különböznek az elektromágneses hullámoktól. A spinhullámok nemlineáris hullámok, csak mágneses anyagokban terjednek, viszonylag kis hullámhosszuk van (akár $\lambda < 100$ nm) az 1-100 GHz frekvenciatartományban. Ezek a tulajdonságok különösen vonzóvá teszik a spinhullámokat chipre integrált alkalmazásra. Az eddigiekben folytatott kutatások főleg egy új, spinhullámokon alapuló logikai kapcsoló létrehozására

irányultak, amely a mai CMOS alapú kapukat válthatná le. Ugyanakkor, spinhullámok alkalmazhatók analóg számítógép architektúrák megvalósítására is, illetve hullámokkal történő számításra, akár a lineáris tartományban, vagy kihasználva a nagyobb amplitúdók nemlinearitását. A jelenleg zajló kutatások jó összefoglalói: [8] és [9].

Különösen vonzó alkalmazási területet jelenthetnek a spinhullámok számára a jelfeldolgozási feladatok. A lineáris transzformációk ezen feladatok számításigényének igen jelentős részét teszik ki, melyek többnyire nagymértékben párhuzamosíthatók. Ezen típusfeladatok gyorsítására több dedikált hardvertípus létezik, ilyenek a digitális jelfeldolgozó chipek (DSP) vagy a grafikai gyorsító chipek (GPU). Ezek az eszközök CMOS technológiára épülnek, speciális, korlátozott utasítás-készlettel rendelkeznek, és egy adott feladattípusra vannak optimalizálva. Tipikus alkalmazási területek például a képfeldolgozás, adatbányászat, spektrumanalízis. Ezen feladattípusok esetében különösen jól alkalmazhatók lehetnek a hullám alapú számítási modellek a Boolean típusú logikai modellek helyett. A hullám alapú számítási modellek kihasználják a hullámterjedés párhuzamos természetét, és hullámok lineáris interferenciáját felhasználva végzik a számításokat. Az információ mind a hullám fázisával, mind az amplitúdójával reprezentálható, térbeli vagy időbeli jelként. A hullámok interferenciamintázata különböző típusú lineáris transzformációk megvalósítására használható. Ezen hullámok fizikai megvalósulása lehet bármilyen lineáris vagy közel lineáris hullámjelenség, például elektromágneses hullámok vagy spinhullámok. Az általunk

vizsgált fizikai reprezentáció a spinhullámok, és megmutatjuk, hogy a hullámokon alapuló számítási algoritmusok spinhullámokkal is megvalósíthatók, illetve bemutatjuk ennek előnyeit és hátrányait.

2. FEJEZET

MÓDSZEREK

A spinhullám alapú számítóeszközök megvalósíthatóságát mikromágneses szimulációk segítségével vizsgáltuk. A mágneses jelenségek modellezésére a mikromágneses modellt alkalmaztuk, amely egy klasszikus leírása a mágnességnek, és a pár nanométer feletti mérettartományban érvényes. Eredményeink igazolására kísérleti vizsgálatokat is tervezünk, ennek első lépéseként Brillouin Light Scattering méréseket végeztünk mágneses filmekben terjedő spinhullámokon.

Az anyagok mágneses tulajdonságainak elsődleges forrása az anyagot felépítő elemi részecskék spinjei, illetve az elektronpályák mágneses momentuma. Ezen mágneses momentumok térbeli eloszlását egy $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ vektormezővel írjuk le. Egy mágneses momentumra ható mágneses tér forgatónyomatéket fejt ki arra. Ez a mágneses tér lehet egy külső tér, például egy áram keltette mágneses tér, vagy a mágneses anyagban található többi mágneses momentum mágneses tere. Ez utóbbit lemágnesező térnek nevezzük, mivel a lemágnesező tér energiája akkor minimális, ha a mágneses momentumok egymással ellenkező irányba mutatnak, így a terek kioltják egymást.

Egy másik fontos jelenség a kicserélési kölcsönhatás, amely egy az elemi részecskék szintjén ható tisztán kvantum jelenség.

Ferromágneses anyagokban a kicserélési energia minimális, ha a spinek párhuzamosak egymással, és maximális, ha ellenkező irányba mutatnak. A kicserélési kölcsönhatás tehát a spineket a mágneses anyagokban azonos irányba fordítja, ez az oka a mágneses domének kialakulásának. Ugyan a kicserélési kölcsönhatás kvantum hatás, leírható egy klasszikus térként is a pár nanométer fölötti mérettartományban.

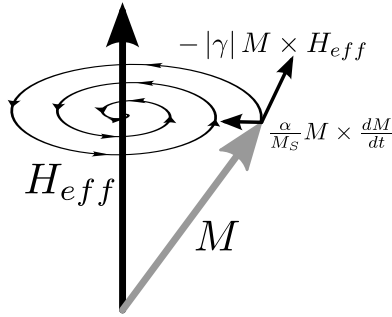
Az effektív mágneses tér $\mathbf{H}_{eff}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}_{ext} + \mathbf{H}_{demag} + \mathbf{H}_{exch} + \mathbf{H}_{aniso}$ a fent leírt terek összegeként adódik, melyek mindegyike hat a mágnesezettségre $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$.

A mágneses tér által kifejtett forgatónyomaték a mágneses momentumokat a tér iránya körüli precesszióra készíti, melynek frekvenciája a Larmor frekvencia. Ez a precesszió addig tartana, amíg a tér hat, ugyanakkor a valóságban mindig jelen van valamilyen formájú csillapítás, melynek hatására a mágneses momentum spirális pályán a tér irányába beáll (lásd 2.1. ábra). Ezt a folyamatot a Landau-Lifshitz-Gilbert egyenlet írja le:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -|\gamma|\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_S} \left(\mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) \quad (2.1)$$

ahol γ a Gilbert giromágneses arány, α a csillapítási tényező és $M_S = |\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)|$ a szaturációs mágnesezettség. A jobb oldal első tagja a precessziót írja le, a második tag a csillapítást.

A Landau-Lifshitz-Gilbert egyenlet analitikus megoldása csak egyszerű esetekben lehetséges, bonyolultabb struktúrák esetében numerikus megoldás alkalmazható. A legtöbb szimulációhoz a széles körben használt OOMMF [10] mikromágneses szimulációs szoftvert használtuk. Nagyobb felbontású diszkreti-



2.1. ábra. A mágneses momentum precessiója az effektív tér körül.

záció esetén célszerű GPU-val gyorsított szimulátort alkalmazni, mint például a bizonyos szimulációkhoz általunk is használt MuMax3 [11].

Az anyagot felépítő részecskék spinjei közötti csatoláson keresztül a mágnesezettség megváltozásai spinhullámok formájában terjednek. Két alapvető kölcsönhatás játszik szerepet a spinek között: a lemágnesező tér és a kicserélési kölcsönhatás. Ennek megfelelően szokás megkülönböztetni a spinhullámok típusait aszerint, hogy melyik kölcsönhatás a domináns. Ugyan mindkét kölcsönhatás szerepet játszik a spinek közötti csatolásban, rövid hullámhosszok esetén a kicserélési kölcsönhatás sokkal erősebb, míg hosszú hullámhosszok esetében a kicserélési kölcsönhatás elhanyagolható a lemágnesező tér hatásához képest. Ebben a munkában csak vékony mágneses filmekben terjedő hullámokat vizsgáltunk, mivel ezek a planáris technológiával kompatibilisek.

Az optikai hullámokkal szemben a spinhullámoknak nemlineáris a diszperziós összefüggése, és csak egy adott vágási frekvencia fölött terjednek. Ez a vágási frekvencia tipikusan pár gigahertz körüli, tehát a spinhullám alapú eszközök működési tartománya a pár gigahertztől akár egy terahertzig is terjedhet, bár ilyen magas frekvenciákhoz nagyon magas mágneses terekre lenne szükség.

3. FEJEZET

TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Ebben a disszertációban egy új típusú, spinhullám alapú számítási módra teszünk javaslatot. Megmutattuk, hogy az optikai számítógép elvei jól alkalmazhatók spinhullámok esetében is, és a már kidolgozott architektúrák átalakíthatók spinhullámokra is. Ez a megközelítés az eddigiektől abban különbözik, hogy a spinhullám interferenciát használja összetett feladatok megoldására, úgy mint lineáris transzformációk, frekvenciatartománybeli szűrés és spektrális dekompozíció. A szakirodalomban fellelhető spinhullám alapú eszközök többsége a spinhullámokat bináris logikai kapukban használja. A mi megközelítésünk minimalizálja a mágneses–elektromos jelek konverziós költségét azzal, hogy számos logikai kapu funkcióját valósítja meg egyetlen lépésben.

Számítóeszközök építésére a spinhullámok számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek az elektromágneses hullámokhoz képest. A legtöbb mai kommunikációs csatorna és számítógépeszköz frekvenciája a pár gigahertz tartományba esik. Ezeken a frekvenciákon a spinhullámok hullámhossza mikrométer körüli, ami lehetővé teszi a kompakt integrációt anélkül, hogy más frekvenciatartományba kellene transzformálni a jelet. Más megközelítésben a spinhullámok mikrohullámú frekvencián

az optikai hullámokkal megegyező hullámhosszal rendelkeznek, mely egy különlegesen jó párosítást jelenthet számos alkalmazásban.

További kihívásokat jelent még a spinhullám alapú számítóeszközök megvalósításában az elektromos-mágneses konverzió, az alacsony csillapítású mágneses anyagok integrációja CMOS-szal, illetve a hatékony magas frekvenciás kiszolgáló (I/O) áramkörök tervezése. A bemutatott eszközök kísérleti demonstrációja megvalósíthatónak tűnik a jelenleg elérhető mérési technológiák felhasználásával, azonban még számos probléma megoldásra vár ahhoz, hogy az eszközök a jelenlegi technológiákkal versenyképesek lehessenek.

Az alábbiakban összegzem új tudományos eredményeim, téziseim:

I. Tézis – Megmutattam, hogy az alapvető optikai építőelemek elvben megvalósíthatók spinhullámok számára is. A megtervezett eszközök működését mikromágneses szimulációkkal igazoltam.

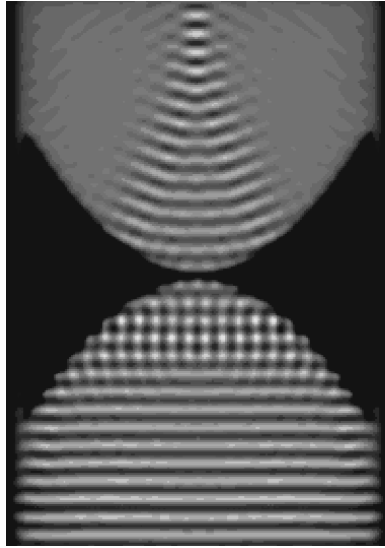
Megvalósíthatósági tanulmányt készítettem az optikai számítógépekben alkalmazott építőelemek spinhullámokkal történő alkalmazásáról. Megvizsgáltam a koherens spinhullám források és fázistolók megvalósíthatósági lehetőségeit, melyek a legalapvetőbb elemei a hullám alapú számítóeszközöknek. A lencsék és tükrök szinte minden optikai eszközben megtalálhatók, mikromágneses szimulációkkal igazoltam, hogy spinhullámok számára is megvalósíthatók ezek az elemek.

Tükrök létrehozhatók spinhullámok számára a mágneses közeg paramétereinek ugrásszerű változásaival, legegyszerűbb esetben az anyag mintázásával. Fázistolók készíthetők a spin-

hullámok diszperziós tulajdonságainak manipulálásával. Ez lehetséges az anyag változtatásával a film vastagságának megváltoztatásával, vagy egy külső mágneses térrel. A diszperziós összefüggés ismeretében definiálhatunk egy relatív reflexiós tényezőt két közeg határán, melyet az optikában megszokott módon használhatunk eszközök tervezésére. Egy fontos példa erre a lencse, a 3.1 ábra egy spinhullám lencse által fókuszált hullámok mikromágneses szimulációját mutatja. Ebben a példában a lencse létrehozására egy mágneses teret alkalmaztam egy lencse formájú régióban. Hasonlóképpen fázistoló rácsok is megvalósíthatók. Egy másik típusú, gradient index spinhullám lencsét is terveztem és működését mikromágneses szimulációval igazoltam.

II. Tézis – Megmutattam a spinhullám lencse Fourier transzformációra történő alkalmazásának lehetőségét. Mikromágneses szimulációkkal igazoltam az eszköz működését többféle lencse alkalmazása esetén.

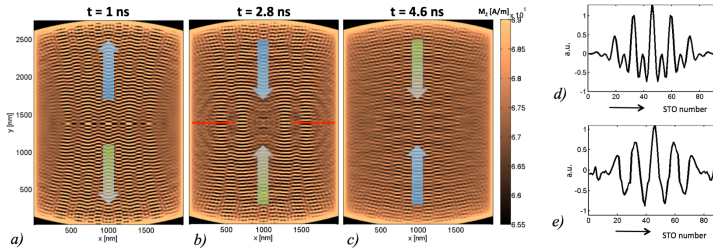
A lencsék Fourier transzformációra történő alkalmazásának lehetősége optikából jól ismert. Ezt az elvet felhasználva terveztem egy spinhullám alapú Fourier transzformációs eszközt. Megvizsgáltam a különböző típusú lencsék/tükrök használatának lehetőségét, összehasonlítottam ezek előnyeit, illetve hátrányait. Ezekben az eszközökben a bemeneti adatok térben vannak reprezentálva egy optikai rácsként (vagy ekvivalens Huygens forrásokként), és lehetnek a spinhullám amplitúdóba vagy fázisba kódolva. Megmutattam, hogy a megtervezett lencsékből többet alkalmazva Fourier térbeli szűrést lehet végrehajtani a bemeneti vektoron. Ezt szemlélteti a 3.2 ábra, melyen parabol-



3.1. ábra. Egy mikromágneses szimuláció pillanatképe, mely a spinhullám lencse fókuszálását mutatja egy $1 \times 1.5 \mu\text{m}$ méretű Permalloy filmben. A síkhullám forrása a kép alján található, melyet a lencse a kép tetején látható pontba fókuszál. A fekete konkáv lencse alakú területen $B = 1.6 \text{ T}$ mágneses teret alkalmaztam.

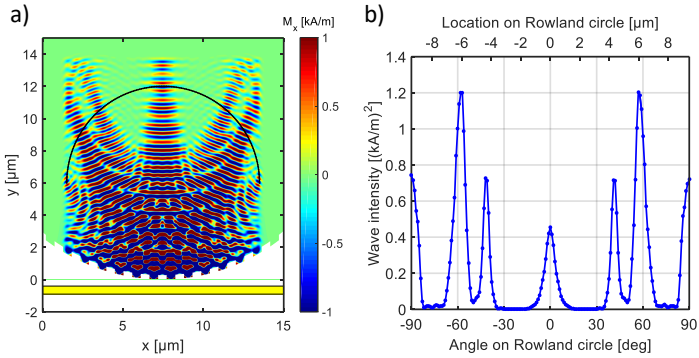
kus tükröket alkalmaztam a lencsék helyett. A szűrés a két tükör közötti fókusz síkban történik, megvalósítására spinpolarizált áramot alkalmaztam, mely a megfelelő konfigurációban lokálisan megnöveli a csillapítást a mágneses filmben, így szűrve ki a nem kívánt komponenseket.

III. Tézis – Javaslatot tettem egy új típusú, spinhullám alapú mikrohullámú spektrométerre. Az elrendezés hasonlít a Rowland spektrográfra, de spinhullámokkal megvalósítva. Mikromágneses szimulációkkal igazoltam az eszköz működését.



3.2. ábra. Fourier térbeli szűrés egy dupla tükör elrendezésben. a) A spinhullámok gerjesztése és terjedése. b) A szűrő bekapcsolása a visszavert hullámok érkezésekor. c) A szűrt hullámok újra visszaverődnek a fókuszszíkba, kiolvasás. d) Bemenet. e) Kimenet (szűrve).

A Rowland spektrográf egy a röntgenhullámoknál széles körben alkalmazott elrendezés, ehhez hasonló elveken alapuló eszközt terveztem spinhullámokra. Ez ugyan hasonló alapelveken működik mint a lencse alapú Fourier transzformáció, de több jelentős különbség is van. Ebben az elrendezésben a bemenet egy időbeli mikrohullámú jel és egy fix rács hozza létre az interferenciamintázatot. Jelentős egyszerűsítés az, hogy ebben az elrendezésben nincs szükség lencsére, mivel a fókuszálást a rács körív formája végzi. Az általam tervezett eszközben a rács egy harmadik funkciót is ellát: ez a spinhullámok forrása is. A bemeneti mikrohullámú jelet egy stripline antennára vezetjük, melynek mágneses tere spinhullámokat kelt a mellette fekvő mágneses film rács mintázatú szélén. A különböző frekvenciakomponensek fókuszpontjai az úgynevezett Rowland kör mentén helyezkednek el. A mikromágneses szimuláció eredményeit a 3.3 ábra szemlélteti.

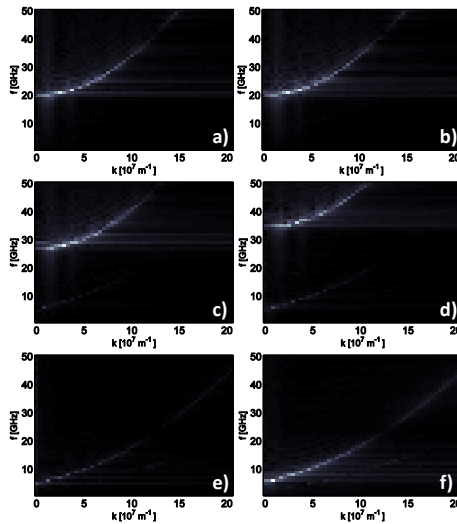


3.3. ábra. Spinhullám alapú Rowland spektrométer mikromágneses szimulációja. a) Pillanatkép a spinhullámok terjedéséről, a fókuszpontok a Rowland körön (fekete) az $f_1 = 10$ GHz és $f_2 = 10.25$ GHz frekvenciákhoz tartoznak. A sárga sáv alul az antennt jelöli. b) Spinhullám amplitúdó a Rowland kör mentén.

IV. Tézis – Mikromágneses szimulációk segítségével vizsgáltam a kölcsönhatást YIG (yttrium-iron garnet) és Permalloy rétegek között. Az eredményeket felhasználva javaslatot tettem egy új módszerre spinhullámok keltéséhez szigetelőkben spin-torque oszcillátorokkal.

Mikromágneses szimulációk segítségével vizsgáltam a kölcsönhatást szigetelő és vezető mágneses filmek között. A két rendszer együttes használata fontos lehet, mivel spinpolarizált áramokkal csak vezetőkben lehet hullámokat keltetni, azonban a legkisebb csillapítású anyagokat a szigetelők között találjuk, pl.: YIG. A szimulációk alapján megállapítottam, hogy két módus jelenik meg a YIG rétegben, az egyik a Permalloyhoz, a másik a YIG-hez tartozó, ugyanakkor az utóbbit erősen befolyásolja a két

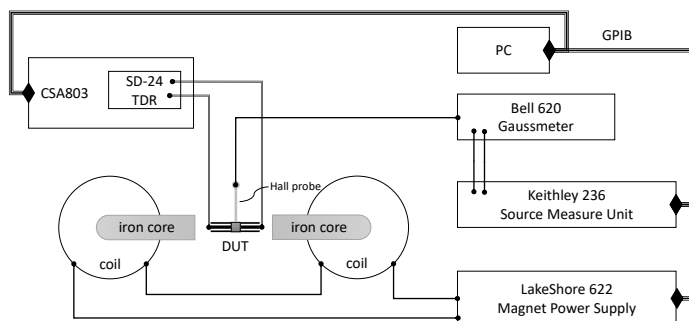
réteg közötti kicserélési csatolás mértéke, amit a 3.4 ábra is mutat. Ez a paraméter erősen függ a találkozó felületek minőségétől és a gyártási paramétereiktől. Ezek alapján megterveztem és szimulációkkal igazoltam egy lehetséges elrendezést, melyben a hullámok a Permalloy rétegben keletkeznek, és ebből a YIG rétegbe csatolódnak át.



3.4. ábra. Szimulációval kiszámított diszperziós görbék YIG-Py csatolt rétegekben. a) YIG film. b) $A_{\text{interface}} = 0 \text{ J/m}$ c) $A_{\text{interface}} = 0.5 \cdot 10^{-12} \text{ J/m}$ d) $A_{\text{interface}} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ J/m}$ e) $A_{\text{interface}} = 6 \cdot 10^{-12} \text{ J/m}$ f) Permalloy film.

V. Tézis – Megterveztem és felépítettem egy ferromágneses rezonancia mérőállomást egy time domain reflektométerre építve. Méréseket végeztem YIG filmek szaturációs mágnesszettségének és csillapítási tényezőjének meghatározására.

A ferromágneses rezonancia (FMR) mérése egy fontos karakterizációs eszköz mágneses anyagok szaturációs mágnesszettségének és csillapítási tényezőjének meghatározására. A két legelterjedtebb elrendezés FMR mérésre a hagyományos FMR és a VNA-FMR. A hagyományos FMR egy üregrezonátoron alapul és egyetlen frekvencián használható, ezzel szemben a VNA-FMR egy vector network analyzert (VNA) használ, mely nagy frekvenciafelbontásra és sávszélességre képes. Mindkét elrendezésben a változtatható külső mágneses teret egy elektromágnes hozza létre.



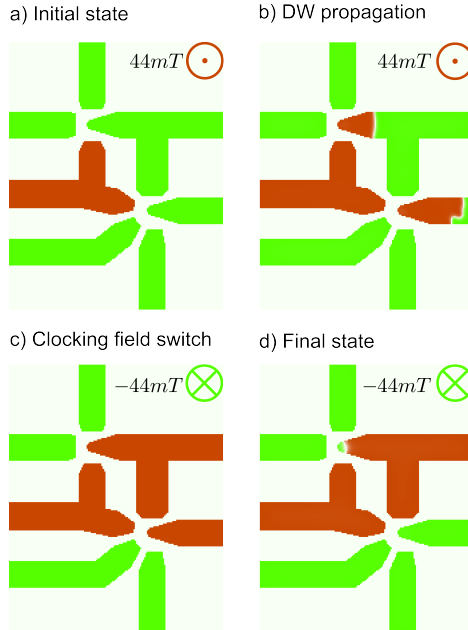
3.5. ábra. Az FMR mérési elrendezés vázlata.

Az általam tervezett és megépített FMR elrendezés leginkább a VNA-FMR-ra hasonlít, de VNA helyett egy time domain reflectometer-re (TDR) épül. A TDR és VNA elvben ekvivalens eredményt adnak, melyek között a Fourier transzformáció teremt kapcsolatot. Ugyanakkor, a gyakorlatban jelentős különbségek vannak a két eszköz dinamikatartományában. Mivel egy TDR eszköz sokkal olcsóbban beszerezhető, megvizsgáltam a TDR használatának lehetőségét FMR mérésekhez. A mérési elrendezésben egy régi Tektronix CSA803 oszcilloszkópot használtam, mely egy 20 GHz sávszélességű TDR mérőfejjel rendelkezett. A mérési elrendezés vázlata a 3.5 ábrán látható. A mérés automatizálására egy szkriptet írtam, mely GPIB porton keresztül vezérelt minden berendezést. A mágneses teret is ez a szkript vezérelte egy visszacsatolt szabályozókörrrel, így a mágneses teret a Hall szenzor pontosságának (0.5 G) megfelelően tudtam szabályozni.

Az elrendezés segítségével FMR méréseket végeztem YIG filmeken, amiket Hadrian Aquino készített (Notre Dame Egyetem, USA). Az eredmények tiszták és reálisak, de emellett az elrendezés korlátai is láthatóvá váltak. A TDR jelek véges hossza miatt korlátozott frekvenciafelbontás érhető csak el, ugyan ez nem volt fontos szempont az általunk végzett mérésekben, a mágneses tér léptetésének nagy felbontása elegendő volt. A másik, fontosabb korlátozás a jel-zaj viszonyban mutatkozik meg. Ugyan az elvégzett mérések esetén ez megfelelő volt, kisebb méretű, illetve nagyon vékony mágneses minták esetén már sokkal kevésbé tiszta jelet kapnánk.

VI. Tézis – Javaslato t tettem egy új, threshold gate alapú nanomágneses logika eszközre. Az eszköz újdonsága, hogy doménfalvezetőket használ jeltovábbításra, illetve threshold gate kapukat a hagyományos majority gate alapú logikák helyett. Az eszköz működését egy példán keresztül mikromágneses szimulációkkal igazoltam.

Ezek az eredmények ugyan nem spinhullám alapú eszközök-höz kapcsolódnak, de szintén a mágneses számítóeszközök kategóriába tartoznak. A nanomágneses logikák újfajta eszközök, melyekben a jel kétállapotú nanoméretű mágnesek között terjed a mágneses tér csatolása által. A logika majority gate kapukra épül. Az én javaslatom a doménfalvezetők használata nanomágnesek helyett a jel továbbítására, illetve három egyforma bemenet helyett több, eltérő együtthatójú bemenet megvalósítása egyetlen kapun belül. A 3.6 ábra egy ezek alapján threshold gate alapon tervezett full adder eszköz szimulációját mutatja be. Ahogy a nanomágneses logikák esetében is, itt is egy külső mágneses tér kapcsolása szolgáltatja az órajelet, azonban ebben az esetben sokkal kevesebb ciklusra van szükség ugyanazon funkció megvalósításához, valamint az eszköz mérete is jelentősen lecsökken.



3.6. ábra. Pillanatképek a threshold gate alapú full adder mikromágneses szimulációjából. A zöld szín jelöli a -1 állapotot, $(A, B, -S)$, a piros a $+1$ állapot $(C_{in}, -C_{out})$.

A DISSZERTÁCIÓHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

1. G. Csaba, A. **Papp**, J. Chisum, W. Porod, and G. Bernstein, „Methods and apparatus for spin wave-based spectrum analyzers,” U.S. Patent Application, 2017.
2. A. **Papp**, W. Porod, A. I. Csurgay, and G. Csaba, „Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference,” *accepted to Scientific Reports*, 2017.
3. G. Csaba, A. **Papp**, and W. Porod, „Perspectives of using spin waves for computing and signal processing,” *Physics Letters A*, Mar. 2017.
4. S. Breitzkreutz-von Gamm, A. **Papp**, E. Egel, C. Meier, C. Yilmaz, L. Heis, W. Porod, and G. Csaba, „Design of On-Chip Readout Circuitry for Spin-Wave Devices,” *IEEE Magnetics Letters*, vol. 8, pp. 1–4, 2017.
5. A. **Papp**, W. Porod, E. Song, and G. Csaba, „Wave-based signal processing devices using spin waves,” in *CNNA 2016 15th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications*. Dresden, Germany: VDE Verlag GmbH, Aug. 2016.
6. A. **Papp**, G. Csaba, and W. Porod, „Optically-inspired computing based on spin waves,” in *2016 IEEE International Conference on Rebooting Computing (ICRC)*. San Diego, CA, USA: IEEE, Oct. 2016, pp. 1–4.

7. —, „Signal processing by spin-wave interference,” in *Proceedings of International Conference on Microwave Magnetics*, Tuscaloosa, AL, USA, Jun. 2016.
8. E. Albisetti, D. Petti, M. Pancaldi, M. Madami, S. Tacchi, J. Curtis, W. P. King, A. **Papp**, G. Csaba, W. Porod, P. Vavassori, E. Riedo, and R. Bertacco, „Nanopatterning reconfigurable magnetic landscapes via thermally assisted scanning probe lithography,” *Nature Nanotechnology*, Mar. 2016.
9. G. Csaba, A. **Papp**, W. Porod, and R. Yeniceri, „Non-boolean computing based on linear waves and oscillators,” in *Solid State Device Research Conference (ESSDERC), 2015 45th European*. Graz, Austria: IEEE, 2015, pp. 101–104.
10. A. **Papp**, G. Csaba, and W. Porod, „Short-wavelength spin-wave generation by a microstrip line,” in *Computational Electronics (IWCE), 2015 International Workshop on*. West Lafayette, IN, USA: IEEE, Sep. 2015, pp. 1–3.
11. A. **Papp**, W. Porod, and G. Csaba, „Hybrid yttrium iron garnet-ferromagnet structures for spin-wave devices,” *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 17, p. 17E101, May 2015.
12. A. **Papp**, M. T. Niemier, A. Csurgay, M. Becherer, S. Breitkreutz, J. Kiermaier, I. Eichwald, X. S. Hu, X. Ju, W. Porod, and G. Csaba, „Threshold Gate-Based Circuits From Nanomagnetic Logic,” *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 13, no. 5, pp. 990–996, Sep. 2014.
13. A. **Papp**, G. Csaba, G. I. Bourianoff, and W. Porod, „Spin-Wave-Based Computing Devices,” in *Nanotechnology (IEEE-NANO), 2014 IEEE 14th International Conference on*, Toronto, ON, Canada, Aug. 2014.
14. G. Csaba, A. **Papp**, and W. Porod, „Signal processing with optically-inspired algorithms,” in *CNNA 2014 14th Interna-*

tional Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications. Notre Dame, IN, USA: IEEE, Jul. 2014, pp. 1–2.

15. S. Breitzkreutz, I. Eichwald, J. Kiermaier, A. **Papp**, G. Csaba, M. Niemier, W. Porod, D. Schmitt-Landsiedel, and M. Becherer, „1-Bit Full Adder in Perpendicular Nanomagnetic Logic using a Novel 5-Input Majority Gate,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 75, p. 05001, 2014.
16. G. Csaba, A. **Papp**, and W. Porod, „Spin-wave based realization of optical computing primitives,” *Journal of Applied Physics*, vol. 115, no. 17, p. 17C741, May 2014.
17. —, „Holographic algorithms for on-chip, non-boolean computing,” in *Computational Electronics (IWCE), 2014 International Workshop on.* Paris: IEEE, Jun. 2014, pp. 1–2.
18. A. **Papp**, G. Csaba, and W. Porod, „Non-Boolean Computing Using Spin Waves,” in *Abstracts of IWCE*, Nara, Japan, Jun. 2013, pp. 78–79.
19. G. Csaba, A. **Papp**, A. Csurgay, and W. Porod, „Simulation of domain-wall assisted magnetic ordering,” in *Abstracts of IWCE*, Madison, USA, May 2012, pp. 261–262.

IRODALOMJEGYZÉK

1. A. Imre, G. Csaba, L. Ji, A. Orlov, G. H. Bernstein, and W. Porod, „Majority Logic Gate for Magnetic Quantum-Dot Cellular Automata,” *Science*, vol. 311, no. 5758, pp. 205–208, Jan. 2006.
2. I. Eichwald, S. Breikreutz, G. Ziemys, G. Csaba, W. Porod, and M. Becherer, „Majority logic gate for 3d magnetic computing,” *Nanotechnology*, vol. 25, no. 33, p. 335202, Aug. 2014.
3. A. Khitun and K. L. Wang, „Nano scale computational architectures with Spin Wave Bus,” *Superlattices and Microstructures*, vol. 38, no. 3, pp. 184–200, Sep. 2005.
4. G. Csaba, M. Pufall, D. E. Nikonov, G. I. Bourianoff, A. Horvath, T. Roska, and W. Porod, „Spin torque oscillator models for applications in associative memories.” *IEEE*, Aug. 2012, pp. 1–2.
5. G. Csaba and W. Porod, „Computational Study of Spin-Torque Oscillator Interactions for Non-Boolean Computing Applications,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 4447–4451, Jul. 2013.
6. A. V. Chumak, A. A. Serga, and B. Hillebrands, „Magnon transistor for all-magnon data processing,” *Nature Communications*, vol. 5, p. 4700, Aug. 2014.

7. T. Schneider *et al.*, „Realization of spin-wave logic gates,” *Applied Physics Letters*, vol. 92, 2008.
8. A. V. Chumak, V. Vasyuchka, A. Serga, and B. Hillebrands, „Magnon spintronics,” *Nature Physics*, vol. 11, no. 6, pp. 453–461, Jun. 2015.
9. G. Csaba, A. Papp, and W. Porod, „Perspectives of using spin waves for computing and signal processing,” *Physics Letters A*, Mar. 2017.
10. M. J. Donahue and D. G. Porter, *OOMMF User's Guide, Version 1.2a3*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999, interagency Report NISTIR 6376. [Online]. Available: <http://math.nist.gov/oommf/>
11. A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, and B. Van Waeyenberge, „The design and verification of MuMax3,” *AIP Advances*, vol. 4, no. 10, p. 107133, Oct. 2014.