2. 2. MANYETİZMA ARAŞTIRMA GRUBU

Teknoloji geliştikçe değişik alanlarda kullanılan malzemelerin çok küçük boyutlarda kontrollü bir şekilde işlenmesi mümkün olmuş ve böylece çok daha hassas cihazların geliştirilebilmesi söz konusu olmuştur. Cihazların minyatürizasyonundaki gelişmeler öyle ilerlemiştir ki atomları teker teker dizerek **nano boyutta** cihaz inşa edebilecek düzeylere ulaşılmıştır.

Diğer yandan yapılan araştırmalar ve temel fiziksel kestirimler nano boyutlara inildikçe malzemelerin tüm fiziksel özelliklerinin değiştiğini ortaya koymuştur. Örneğin makroskopik boyuttaki maddelerin sertlik, kopma dayanımı, korozyona karşı dayanımı gibi mekanik özellikleri veya kimyasal reaksiyona girme aktiviteleri, elektriksel özellikleri ve hatta optik özellikleri nano boyuttaki aynı maddenin özelliklerinden şaşırtıcı düzeyde ayrılmaktadır. Örneğin nano boyuta inildiğinde beklenmedik bir şekilde malzemelerin renkleri bile değişmekte ve bu değişim nano boyuttaki malzemelerin geometrik boyutları ile bir tondan diğer tona doğru sürekli olarak kayabilmektedir.

Nano boyuttaki bu değişimin temel nedeni kuantum boyut etkisi denilen bir temel olgu ile ilgilidir. Yani malzemelerin birçok fiziksel özelliğini belirleyen elektronik yapılarında temel rolü oynayan elektronların dalga özelliği taşıması ve bu dalgaların dalga boylarının nano boyuttaki malzemelerin geometrik boyutları ile kıyaslanabilir hale gelmesi nano parçacığın özelliğinin değişimine neden olmaktadır. Buna ek olarak parçacıklar küçüldükçe bağlanma enerjileri farklı olan yüzeydeki atom sayılarının içerideki parçacık sayısına oranının giderek artması herhangi bir fiziksel parametre açısından parçacığı oluşturan atomlar üzerinden yapılan ortalamaların da değişimine neden olmaktadır. Bu durum bize parçacığın boyutlarını istenen oranda değiştirerek parçacığın herhangi bir fiziksel özelliğini karakterize eden parametreyi kontrol etme ve böylece kullanım açısından büyük esneklik kazanmamızı sağlamaktadır. Nano boyutlardaki bu değişimleri kullanan teknolojiler günümüzde **nanoteknoloji** olarak adlandırılmaktadır.

DNA araştırmalarından, kanserli hücrelerin imha edilmesine;

çok kullandığımız cihazların enerji ihtiyacının azaltılmasından, çok uzun ömürlü piller üretilmesine ve çevre dostu enerji sistemleri kullanılmasına;

az enerji harcayan ekranlardan, kuantum bilgisayarlarına;

çok hızlı ve çok büyük bilgi depolama kapasitelerine sahip sabit disklerden, yeni nesil manyetik transistörlere kadar birçok alanda nanoteknolojinin uygulaması vardır.

Ayrıca, uçak, uzay mekiği, askeri ve sivil amaçlı araçları dava hızlı ve güvenli hale getirmek için, bu tür araçların gövdelerinde kullanılmak üzere çok sağlam ve hafif malzemelerin üretilmesinde;

yiyeceklerin üretilmesi ve çok uzun süre zarar görmeden saklanmasında;

evlerde ve işyerlerinde kullanılan kendi kendini temizleyen seramik ve cam yüzeylerde;

lazerlerle hassas göz ameliyatlarında, tekstil ve kozmetikte dahi nanoteknoloji daha şimdiden çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

2014 yılında nanoteknolojinin yaklaşık 2.6 trilyon dolarlık bir pazara sahip olacağı tahmin edilmektedir. Bu küresel ekonomik pastadan pay alabilmek için daha şimdiden birçok ülke nanoteknolojiye sahip olabilmek için kıyasıya yarışmaktadır.

Bu amaçla nanoteknolojinin manyetizma alanındaki uygulamalarını araştırmak üzere bölümümüzdeki manyetizma araştırmaları 4 ana başlık altında toplanmıştır:

Nanomanyetizma
Spintronik
Manyetoelektrik
NQR ve NMR

2. 2. 1. NANOMANYETİZMA

Manyetizma geçmişi çok uzun olan bir konudur ve ilk önce pusula gibi basit cihazlarda insanların yönlerini bulmalarında kılavuzluk yaparak hizmete başlamıştır. Daha sonra elektrik ve manyetizma arasındaki sağlam ilişkinin keşfi ve bu olayın Maxwel denklemleri ile formüle edilmesiyle manyetik maddeler elektrik santrallerinde, elektrik motorlarında, telekomünikasyonda, bilgisayarlarda manyetik bilgi depolama ve benzeri birçok alanda teknolojik cihazların olmazsa olmaz temel dayanağı haline gelmişlerdir.

Küçük hacim, az enerji, daha fazla hafıza, daha hızlı bilgi depolama ve okuma (Üretici firmanın web sitesinden)

Günümüzde manyetik sensörlerde, bilgi depolama cihazlarında, bilgisayar sabit disklerin okuyucu ve yazıcı kafalarında, manyetik kartlarda, tek elektron cihazlarında, mikrodalga elektroniğinde, tıpta ve benzeri birçok teknolojik alanda nano yapılı manyetik malzemeler kullanılmaktadır. Bu zengin kullanım alanları aşağıda anlatılan etkilerden dolayı ortaya çıkmaktadır.

Manyetik Nanoparçacıklar

Manyetik malzemenin fiziksel ölçüleri her üç boyutta da küçültüldüğünde nanoparçacık denilen yapılara ulaşılır. Bu yapılarda manyetik özelliklerdeki değişim çok daha çarpıcı hale gelir. Örneğin makroskopik boyutlarda ferromanyetik olan bir malzeme belli bir kritik değerin altına kadar küçültüldüğünde paramanyetik gibi davranmaya başlar. Aslında atomların spinleri arasındaki etkileşmeler hala ferromanyetik olmasına ve bir parçacık içindeki tüm spinler birbirlerine paralel olmalarına rağmen, yani parçacıklar tek başlarına ferromagnetik olmalarına rağmen bu parçacıklardan oluşan tozun makroskopik mıknatıslanması paramanyetik bir malzemenin davranışına çok benzer. Çünkü makroskopik madde parçalanarak küçük parçacık haline getirildiğinde tozlar arasındaki etkileşme kırılır. Böylece komşu spinlerin desteğini kaybeden belli bir parçacığın toplam spini scaklığın bozucu

etkisine karşı kendini koruyup manyetik alan yönünde yönelimini sürdüremez. Parçacıkların her birisinin toplam mıknatıslanmasını temsil eden bu dev (etkin) spinlerin ortak davranışı süperparamanyetizma olarak adlandırılır. Yani makroskopik olarak ferromagnetik olan bir malzeme nano toz haline getirilip preslense bile paramanyetik gibi davranır.

Nanomanyetik parçacıklar manyetik açıdan tek domen özelliğine sahip olduklarından uygun büyüklüklerde yapıldıklarında ve bir yüzeye atomların kristalde dizildikleri gibi düzgün olarak dizilerek manyetik kayıt ortamı olarak kullanılmaları söz konusu olabilecektir. Süperparamanyetik malzemelerin kendine göre önemli daha birçok kullanım alanları vardır. Çünkü bu parçacıklar ile bilgi depolama kapasitesi mevcut duruma göre birkaç mertebe daha artabilecektir. Bu tozlar ferromanyetik bir düzene giremediğinden bir araya getirilseler bile manyetik kuvvetlerinin kaçınılmaz bir sonucu gibi gözüken bir araya gelip topaklanma olgusundan kurtulurlar. Yani bu manyetik tozlar uygun şartlarda sıvılar içinde homojen olarak dağılabilirler.

Manyetik nanoparçacıkların uygulama alanları

Manyetik parçacık içeren sıvılara ferrosıvı (ferrofluid) denir ve çok önemli uygulamaları vardır. Değişik ve zengin yeni fiziksel özelliklerinden ötürü, nanomanyetik parçacıkların, biyoloji ve biyotıp alanlarında protein ayrıştırma, vücutta ilaç taşıma ve ısıl tedavi işlemleri gibi önemli birçok alanda başarılı uygulamaları bulmaktadır.

Manyetik ölçümler için eksi 270 derece sıcaklığına kadar inebilen ve 2 Tesla manyetik alan üretebilen ESR cihazımız.

Manyetik nanoparçacıkların biyotıp uygulamaları arasında en göze çarpanı manyetik rezonans görüntülemede (MRI) kontrastı artırıcı olarak kullanılmalarıdır. MRI ile hücre takibi, manyetik kuvvet aracılığı ile biyomoleküllerin hücreler arası manipülasyonu ve kanserli hücreleri öldürecek olan ilaçların kaplanması ise hücre içinde nanomanyetik parçacıkların uygulamasına önemli örnekler arasında sayılabilir.

- MRI ile hücre izleme

Magnetik rezonans görüntüleme (MRI) insan vücudunun yüksek kaliteli olarak anatomik görüntüsünü çıkarabildiği için öncelikle teşhis amaçlı kullanılan bir tekniktir. Manyetik nanoparçacıklar uygun tekniklerle hasta hücrelere tutundurularak onların anlık durumları veya hareketleri hakkında güçlü MRI sinyalleri dolayısıyla değerli bilgi verirler.

- Hücreiçi manipülasyon

Hücre içindeki manyetik nanoparçacıkların dışarıdan uygulanabilen manyetik kuvvetle yönlendirilebilmeleri bunların sadece tutturuldukları hücredeki biyoaktif moleküllerin yerel olarak fonksiyonlarının hücrenin diğer bölgelerinden bağımsız olarak araştırılabilmelerine yardım ederler.

- Kanser tedavisinde uygulama

Diğer yandan bazı durumlarda manyetik nanoparçacıklar gerekli ilaçlarla birlikte uygun bir polimer ile kaplanıp nano kapsül yapılarak vücuda zerkedilebilir. Kapsülün manyetik özelliği ile dışarıdan manyetik kuvvet uygulanarak kapsüllenmiş ilacın vücudun gerekli yerine taşınması sağlanır ve sağlam bölgelerin gereksiz ilaç almalarının önüne geçilebilir. Bu durumda hasta bölgeye gerekli olan çok yüksek doz uygulama imkanı da doğar.

- Isıl tedavi

Manyetik nanoparçacıklar uygun şartlarda vücuda zerkedilerek manyetik kuvvetlerle vüdudun hasta bölgesinde yoğunlaştırılabilirler. Böylece uygulanan elektromanyetik alanlar manyetik nanoparçacıklar tarafından daha fazla soğrularak ısınır ve yalnızca hasta hücreler ısıtılıp öldülmüş olurlar.

Gene bulk malzemeler içine serpiştirilmiş manyetik küçük bölgelerin manyetik özellikleri de oldukça değişmektedir. Bu bölgelerin optik özellikleri de önemli oranda değişir. O nedenle manyeto-optik denilen bir olgu da bu malzemelerde oldukça farklılaşır. Bu özellikler optik uygulamalar için önemlidir. Bu parçacıkları uygulamada bu kadar kullanışlı kılan bu parçacıkların nano boyuta inildiğinde kazandıkları zengin ve yeni fiziksel özellikleridir.

Manyetik İnce filmler

Manyetik maddelerin boyutları bir yönde küçüldüğünde ince filmler elde edilir. Bu durumda yüzey etkileri giderek başat hale gelmeğe başlar. Ayrıca hacimli malzemelere göre filmler tabakalar halinde büyütüldüğünde hacmin içindeki yapılarda

da önemli değişimler gözlenebilir. Böylece film kalınlığı boyunca uyarılan manyetik spin dalgalarının boyu kontrol edilebilir. Manyetik anizotropiler de kontrol altına alınabilir. Ayrıca bu filmler değişik manyetik ve/veya manyetik olmayan tabakalardan oluşacak şekilde çok katlı olarak büyütüldüklerinde çok daha farklı özellikler ortaya çıkar. Bu özellikler için en çarpıcı örnek filmin elektriksel iletkenliğinin dış manyetik alanla değişmesidir. Böylece dış alan kontrollü bir şekilde değiştirilerek direnç istenen orana çekilebilir.

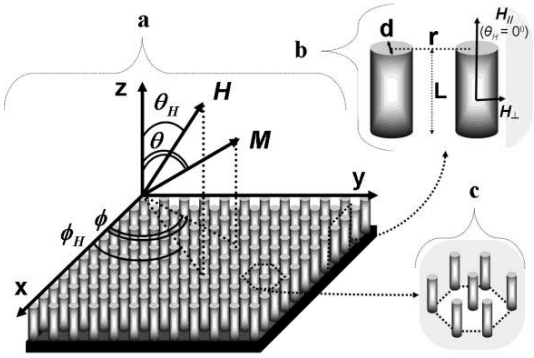
Nanoteller

Malzemenin büyüklüğü iki bağımsız doğrultuda nanometreler düzeyine indirildiğinde nanotel denilen yapılar elde edilir. Bu durumda telin fiziksel özellikleri büyük oranda anizotropi göstermeye başlar. Özellikle manyetik özellikleri tel eksenini özel doğrultu kabul edecek şekilde anizotropik davranış sergiler. Elektriksel iletkenliğinde de büyük değişimler olur. Bu yapılar çok katlı yapıldığında ve teller farklı malzemelerle kaplandığında fiziksel özellikleri değiştirilebilir. Bütün bu durumlar bu yapıların kullanım alanlarını daha da genişletir.

Manyetik nanoteller çok geniş bir alanda kullanılmaktadırlar. Bunlar arasında manyetik sensörler, kimyasal sensörler, meta-malzemeler, moleküler elektronik, dikine bilgi depolama, alan emisyonlu elektron kaynakları, nano-optik, dev manyeto-direnç gösteren çok katmanlı nano teller ve yüksek çözünürlüklü taramalı mikroskop ucu ilk akla gelenlerdir. Ayrıca tel boyunca uzayıp giden manyetik domenler bilgisayarların hafıza elemanı gibi çok ileri teknolojik konularda kullanım alanı bulur.

Nanoteller üzerine yapılan çalışmalar

Fe, Ni, Co saf metallerinin ve bunların alaşımlarından oluşan manyetik nanoteller üzerinde hem teorik ve hem de deneysel araştırmalar yapılmaktadır. Bunlardan bazıları alümina nano kalıp üzerine büyütülerek FMR, dc mıknatıslanma ve benzeri tekniklerle araştırılmıştır. Yandaki şekilde hazırlanan bu tellerin bazılarının resimleri ve FMR modeli için kullanılan geometri gösterilmiştir.



FMR modeli için kullanılan geometri ve eksen sistemlerinin göreceli durumları.

2. 2. 2. SPİNTRONİK

Spintronik, nanoteknolojinin en önemli araştırma ve uygulama alanlarından bir tanesidir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi günlük yaşamda çok kullandığımız bilgi depolama hafızalarının çok daha hızlı, az enerji harcayan ve eskilerine göre birçok fonksiyonu tek bir cihazla yapabilmemize imkân sağlayan;

Otomobillerde ve güvenlik sistemlerinde kullanılan sensörlerin bu günkü seviyesine gelmesinde büyük katkısı olan;

Günümüzde bilgisayarlarda ve birçok elektronik cihazda kullanılan yarıiletken transistörlerin ve LED'lerin (ışık saçıcı diyotların) çok daha verimli, hızlı ve az enerji gerektiren bir duruma getirilebilmesi için yoğun çalışmaların yapıldığı nanomanyetizma alanında, 80'li yıllardan itibaren önemli gelişmeler olmuştur.

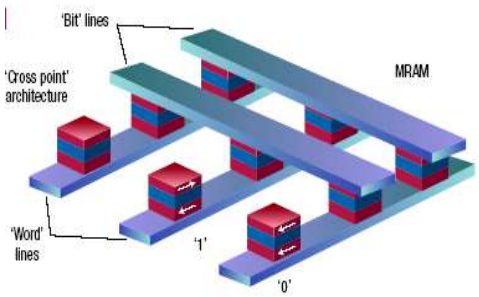
2007 yılında Albert Fert ve Peter Grünberg'e dev manyeto-direnci (GMR) keşiflerinden dolayı verilen Nobel Fizik Ödülü'yle spintronik hak ettiği ilginin zirve noktasına ulaşmıştır.

Spintronik cihazlar, malzemelerin yarıiletken ve manyetik özelliklerini bir arada kullanır. İşlem yapmak için elektronların yükünü kullanan yarıiletken cihazların en büyük avantajı hızlı olmalarıdır. Dezavantajları ise geçici bir hafızaya sahip olmalarıdır. Yani güç kaynağı kesildiğinde yarıiletken cihazdaki bilgi yok olmaktadır.

Elektronların spinlerini kullanarak bilgi depolayan manyetik hafızaların en büyük avantajı ise, güç kaynağı kapatıldığında dahi depolanan bilginin kaybolmaması ve istenildiğinde tekrar kullanılabilmesidir.

İşte **spintronik**, yarıiletken ve manyetik malzemelerin avantajlarını tek bir cihazda toplayarak;

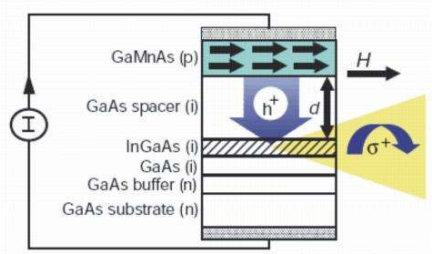
çok hızlı, az elektrik harcayan, kalıcı hafızaya sahip, geleneksel yarıiletken teknolojisine kolayca entegre edilebilen yeni nesil cihazlar üretmeyi amaçlamaktadır.

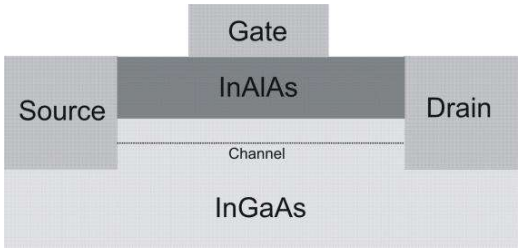


TMR prensibiyle çalışan manyetik RAM (MRAM) cihazının görüntüsü (Chappert et al., Nature Materials 6, November 2007).

Spintroniğin günümüzde kullanılan en meşhur örnekleri, bilgisayarlarda sabit disk okuyucu kafalarında ve manyetik RAM'lerde kullanılan, GMR ve TMR prensibiyle çalışan çok katlı nano yapılı manyetik ince filmlerdir.

Ayrıca, geleneksel yarıiletken transistor ve LED'lere göre çok daha verimli olan spin-transistörleri ve spin-LED'leri de, spintroniğin hedeflediği yeni nesil modern cihazların başında gelmektedir.





Manyetik yarıiletken kullanılarak hayata geçirilmesi planlanan spin-LED[1] (soldaki şekil) ve spin-transistörü[2] (sağdaki şekil) ([1] C. Liu, F. Yun, and H. Morkoc J. Mater. Sci.: Mater. in Electronics, vol. 16, p. 555, 2005. [2] S. Datta and B. Das Appl. Phys. Lett., vol. 56, p. 665, 1990.).

Nanomanyetizma ve spintronik, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü'nün çok önem verdiği çalışma alanlarından bir tanesidir. Bu amaçla, bölüm bünyesindeki birçok araştırmacı çok katlı nano yapılı manyetik malzemeler ve manyetik yarıiletkenlerin üretilmesi ve incelenmesi alanında çalışmaktadır. Yarımetalik kromdioksit (CrO_2), Fe ve Co katkılanmış TiO_2, Co katkılanmış ZnO ve çok ince manyetik heteroyapılar (örneğin Fe/GaAs, CoO/Fe/MgO) bunlardan bazılarıdır.

2. 2. 3. MANYETOELEKTRİK MALZEMELER

Ferromanyetik ve ferroelektrik özellikler içeren çok fonksiyonlu ince film ve değişik nanoyapılar dinamik rastgele erişimli hafıza (DRAM), kalıcı ve güvenli hafıza (NV-RAM) teknolojisinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadırlar. Son yıllarda bu hafıza elemanlarının performansının artırılması için mükemmele yakın yarımetalik özellik gösteren malzemeler, hem manyetik ve hemde yarıiletken özellik gösteren (magnetic semiconductors) malzemeler, ince film ferroelektrik perovskiteler, ferromanyetik-ferroelektrik (multiferroik) komposit yapılar geliştirilmiştir. Bu tür yapılar değişik fiziksel özellikleri bir araya toplayıp değişik kombinasyonlarını kullanarak elde edilen malzemenin fonksiyonunu (çok fonksiyonlu olarak) artırmaktadır.

Bu konuda en önemli problemlerden birisi, spintronik yani spine bağımlı direnç esasında özellikler gösteren malzemelerde manyetik etkinin elektrik alanı aracılığı ile yönetilmesi problemidir. Spintronik cihazların tasarımı ve geliştirilmesindeki şimdiki yoğun çalışmalar gelecek bilişim teknolojilerinde hafıza ve mantık fonksiyonlarını bir arada barındıran yeni nesil aygıtların ortaya çıkması ile ilişkilidir. Bu durumlarda GMR va TMR yapılarda spin transferi ile, cihaza enjekte edilmiş spin akımı cihazdaki mıknatıslanma dönüşümünü gerçekleştiren manyetik alanı önemli ölçüde etkiler. Gerekli yüksek akım yoğunlukları manyetik alanları daha yüksek oranda “bozar” ve bu da böyle bir çekici meselede problemler çıkarır. Bu nedenle manyeto-direnç sistemlerinde manyetik yapının elektrik alanla kontrolü gibi bir mesele ortaya çıkıyor. Yani, bilgi depolamada yüksek yoğunluk talebi sonuçta mıknatıslanmanın manyetik alan ile değil, başka yöntemlerle kontrolü problemini ortaya çıkarmıştır. Manyetoelektronik ve spintronikte son gelişmeler, özellikle manyetik yarıiletkenlerde taşıyıcı etkileri ve colossal manyeto-direnç bileşimlerde yüksek korelasyonlu etkiler manyetik özelliklerin elektrik alanı ile kontrolüne ilgiyi daha da artırmıştır.

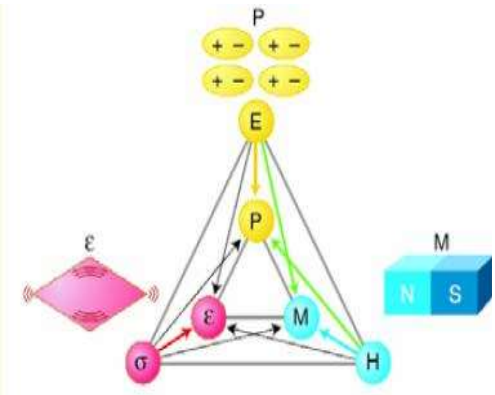
Bu açıdan, hem spine dayalı manyeto-direnç, hem de multiferroik özelliklere sahip olmakla manyetoelektrik etkiler belirten çok fonksiyonlu malzeme ve yapıların geliştirilmesi çok önemlidir. Araştırma grubunun amacı böyle malzemelerin yapımı, incelenmesi ve çağımızın bilişim teknolojilerinde kullanılmak üzere geliştirilmesidir.

60’lı yılların başından multiferroik kristallerin yoğun şekilde incelenmesine rağmen, pratik uygulamalar için multiferroik tek krsital yapılı malzemelerin seçimi çok sınırlı olmuştur. Çok az sayıda malzeme oda sıcaklığında böyle özelliklere sahip

olmuştur. Aynı zamanda, hemen hemen tüm malzemelerde bu etki uygulamalar için çok zayıftır. Bunun nedeni Hill tarafından izah edilmiştir. Onun söylediği gibi, ferroelektrik düzeni ve polarizasyonu oluşturan iyonların merkezden kayma özelliği kısmen dolmuş *d* seviyesine sahip iyonlar için geçersizdir. Halbuki sözü edilen bu özellik manyetik düzenlemenin oluşumu için şarttır.

Ancak, daha sonra araştırıcılar ME etkiler gösterecek yapay ferroelektrik ve ferromanyetik heteroyapıların üretilebileceğini gösterdiler (Ueda, 1999). Böyle yapılarda en önemli olgu manyetik ve elektrik özellikleri birbirine bağlayan başka bir aracı etkinin olmasıdır. Güçlü ME etkisinin, güçlü manyetostriksiyon ve piezoelektrik özelliklere sahip ferromanyetik ve ferroelektrik elemanlardan oluşan kompozit yapılarda mevcut olduğu görülmüştür.

Böyle yapılarda ME etki magnetostriktif ve piezoelektrik elemanlar arasında esnek etkileşim aracılığı ile gerçekleşiyor. Genel olarak, böylece manyetoelektrik etkileşmenin bileşenleri şekildeki gibi gösterilebilir. Elektriksel ve manyetik etkiler arasındaki etkileşmeye bir de esnek özellikler eklenmiş oluyor. Bunun da sonucunda farklı nitelikli (ferroelektrik ve ferromanyetik) malzemeler arasındaki etkileşim piezoelektrik ve magnetostriksiyon etkileri ve onların sonucu olarak ortaya çıkan deformasyon aracılığı ile gerçekleşir.



Magnetoelektrik etkinin bileşenleri

Grubun çalışmaları çerçevesinde değişik nano-ölçekli ferromanyetik-nonmanyetik, ve/veya ferroelektrik-dielektrik malzemelere dayalı ince film, çok katlı filmler ve kompozitler, tek kristaller araştırılmakta ve çok fonksiyonlu spintronik-manyetoelektrik işleve sahip olacak yeni nesil cihazlar için etkin yapılar geliştirilmektedir. Bu malzeme ve yapıların yapısal, manyeto-direnç, manyetik rezonans, mıknatıslanma, elektriksel, dielektrik, ferroelektrik, manyetoelektrik özellikleri inecelenmektedir.

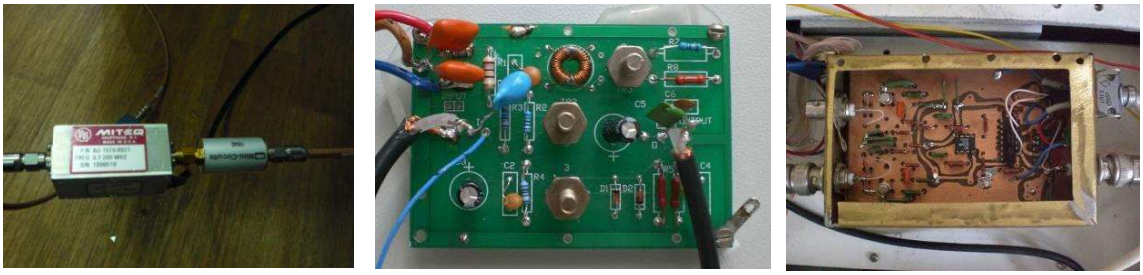
2. 2. 4. NQR ve NMR

NQR tekniği, kuadrupol (yani küresel olmayan) bir çekirdek ile komşu yüklerin (özellikle valans elektronlarının) ürettiği kristal elektrik alan (CEF) gradyentinin elektrostatik etkileşmesine dayanmaktadır. Kristal elektrik alan etkisiyle bir çekirdeğin enerji seviyeleri yarılır. Radyofrekans bölgesinde elektromanyetik alan bu seviyeler arasında geçişlere sebep olur. Radyofrekans değeri birkaç kHz ile yüzlerce MHz aralığında değişebilir ve kuadrupol çekirdek ile maddenin türüne bağlıdır. Bu geçişlere karşılık gelen NQR spektrumu, insanın parmak izi gibi herhangi bir kimyasal bileşiğin kendine has karakteristik bir özelliğidir. Bu yüzden kuadrupol rezonansı, kristal yapılı birçok katı maddenin tespitine imkân sağlar.

Laboratuvarımızdaki *Apollo Tecmag* NMR/NQR konsolu (sağda) ve iki tane *Tomco* güç yükselteci.

NQR özellikle yasal olmayan maddelerin (uyuşturucu, patlayıcı) tespitine olanak sağlanmaktadır. Uyuşturucuların ve patlayıcıların tespit edilmesini sağlayan ^{14}N çekirdeğidir. Hemen hemen bilinen tüm patlayıcılar, uyuşturucular ve hatta bazı ilaçların yapısında azot vardır. Bu maddelerin NQR sinyalleri 400 kHz – 5.5 MHz gibi bir frekans aralığına düşer.

NQR kara mayını tespit sistemlerinin çeşitli prototipleri ABD, Rusya Federasyonu, İngiltere ve bazı diğer ülkelerde geliştirilmektedir. Örneğin, *Quantum Magnetics* (QM) şirketi geliştirdiği mayın tarama cihazının 20 ^{o}C sıcaklıkta TNT için yaklaşık 20 saniye ve RDX için birkaç saniye tarama süresinde çok yüksek tespit olasılığı ve yanlış alarmı reddetme ihtimali ile çalıştığını iddia etmiştir.



NMR/NQR deneyleri yapmak için kullandığımız ön yükselteçler. *Miteq AU-1579-9555* (solda), kendi laboratuvarımızda geliştirdiğimiz tek kanallı devre (ortada) ve iki frekanslı NQR deneyleri için kendi laboratuvarımızda geliştirdiğimiz iki kanallı devre (sağda).

Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) olayında ise, incelenen maddenin çekirdek manyetik momentlerinin enerji seviyeleri, manyetik alan etkisiyle birbirinden ayrılır ve bunların arasındaki farklara göre uygun frekansta radyo dalga ışını verilir. Manyetik enerji seviyeleri arasında radyo dalga etkisiyle uyarılan geçişin sonucunda manyetik rezonans sinyali dedekte edilir ve incelenen madde konusunda kimyasal ve fiziksel bilgi verir. Dolayısıyla, NMR sinyali incelenen maddenin hangi kimyasal bileşenlerden oluştuğunu, sıvı veya katı halde olup olmadığını, yoğunluğu/viskozitesi hakkında bilgi vermektedir. Büyük biyolojik moleküller, organik kimyasallar ve inorganik kompleksler içeren birçok farklı malzemelerin analizinde, NMR spektrometresi kimyasal örneklerin kimliğinin belirlenmesinde ve yapı tayininde yaygın olarak kullanılan analitik tekniktir.

Çoğu düşük manyetik alan NMR/NQR uygulamaları spin-spin (T_2) ve/veya spin-örgü (T_1) durulma zamanlarının ölçümlerini içerir. Bu durulma zamanları viskosite, yüzey alanı ve nem miktarı gibi spesifik fiziksel özellikler ile ilişkilidir. Diğer uygulamalar ise farklı T_2 karakteristik değerleri ile ayırt edilebilen malzeme bileşenlerinin konsantrasyonları hakkında bilgi elde etmek için serbest indüksiyon durulması (FID-free induction decay) veya spin-yankı analizlerini içerir. Son zamanlarda, düşük alan NMR spektrometresini gıda ürünleri, ilaç ve petrokimyasallar endüstrisinde de kullanma çabaları gözlenmektedir. Örnek uygulamalar nem, yağ, hidrojen ve flor miktarının belirlenmesini kapsar.

Düşük alan NMR spektrometreleri gıda, polimer, petrol ve ilaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılabilmektedir. Yukarıda bahsedilen kaynaklardan görüldüğü gibi polimerlerin yoğunluk, viskosite, kristalleşme ölçümleri ve kaya özü incelemelerinde, çeşitli tozların nem miktarı, diş macunundaki florür miktarı ve yiyeceklerdeki yağ/su oranını belirlenmesinde uygulanması mümkündür.

Literatür incelendiğinde, NMR yöntemine dayalı test ve kontrol cihazlarının (analizörlerinin) çeşitli sanayi üretim alanlarında kullanılması üzerine yapılan araştırmaların arttığı ve bu da konuya olan ilginin gittikçe arttığı görülmektedir.

Türkiye'de NMR analizörü gibi cihazlarının üretilmesi ülkemizin çağdaş ve teknolojiye dayalı sanayisinin gelişmesine katkıda bulunacaktır. Bu cihazların maliyetleri yüksek, kontrol ve bakımları yetersiz olduğundan ve yerli üretim şartlarına adapte edilmemesinden dolayı NMR analizörleri Türk sanayisinde hala çok kısıtlı sayıda kullanılmaktadır. Bazı özel sanayi prosesleri için NMR analizörlerin özel şekilde tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir. NMR analizörün gıda, ilaç ve kimya sanayisinde, tıpta, petrol rafinelerinde gibi çeşitli alanlarda kullanması öngörülmektedir.

Geliştirilen yeni uzaktan deteksiyon ünitesi.

Portatif NMR Cihazları için Mıknatıs Tasarımı

Sabit mıknatıslar için Halbach tasarımı özellikle portatif NMR cihazlarında kullanımı için ilgi çekicidir. İdeal bir Halbach magnet tasarımı, analitik denklemlerle yönelmiş ve konumlanmış eşit mıknatıslanmaya sahip çubuk mıknatıslarla kurulur. Örneğin 4, 16, 24 vb mıknatıs parçalarından oluşan bir Halbach tasarımı magnetler arasında iyi bir uyumla homojen bir manyetik alan oluşturabilir. Özellikle NMR uygulamaları için bu tasarım aşağıdaki avantajlara sahiptir:

1. Yüksek manyetik alan homojenliği
2. Optimum mıknatıslanma kullanımı

3. Enine manyetik alan yönü (NMR'da tercih edilen selenoid bobinleri kullanma imkanı)
4. Farklı uygulamalar açısından örnek boşluğunun büyük yapılabilmesi
5. Çok küçük alan sapması
6. Aynı ve basit kalıcı mıknatıslardan yapılabilmesi
7. Mekanik sağlamlık

4 tane sabit mıknatıslı Halbach magneti (soldaki resim). Halbach mıknatıs sistemi toplanmış ve içine örnek tüpü konmuş durumda (sağdaki resim).

Yapılan Deneysel Çalışmalar

Laboratuarımızda NQR/NMR deneyleri yapmak için deneysel düzenek kurularak çeşitli patlayıcı ve başka azot bazlı ($NaNO_2$, HMT, $BiCl_3$, $SbCl_3$) maddelerinin NQR ölçümleri yapılmıştır. NQR'da sinyal-gürültü oranını arttırmak için çoklu puls zincirleri, çift rezonans, optimal filtreleme teknikleri üzerine araştırmalar yapılmaktadır.

Geliştirilen mıknatıs ile birlikte ve bölümümüzdeki ESR laboratuarındaki magnetlerden faydalanarak HMT, $NaNO_2$, ürea ve bazı sıvı maddeler için düşük alan çekirdek manyetik rezonans (NMR) tespit teknikleri konusunda da deneyler yapılmaktadır.

Laboratuarımızda ayrıca portatif bir NMR cihazı yapılması planlanmaktadır. Yapılması planlanan NMR cihazı **yeni patent** için potansiyel vaat etmektedir. NMR cihazının prototipin yapmak için çok homojen manyetik alan sağlayan bir mıknatıs konfigürasyonu tasarlanmakta ve gerekli elektronik devreler geliştirilmektedir.

Geliştirilecek NMR analizörünün çok geniş teknoloji alanlarında sanayi üretim yöntemlerini etkilemesi beklenmektedir. ***Muhtemel kullanım alanları aşağıda verilmiştir.***

Gıda sanayi

- Nem, yağ, protein ve şeker oranını belirleme
- Alkollü ürünlerde alkol bileşiminin analizi
- Gıda bileşimlerinin katı yağ ve sıvı oranlarını belirleme
- Tohumların yağ ve nem oranının belirlenmesi
- Donma süreçlerinin incelenmesi
- Süt ürünlerinde değişik katkı maddelerin oranını belirleme

Tıp

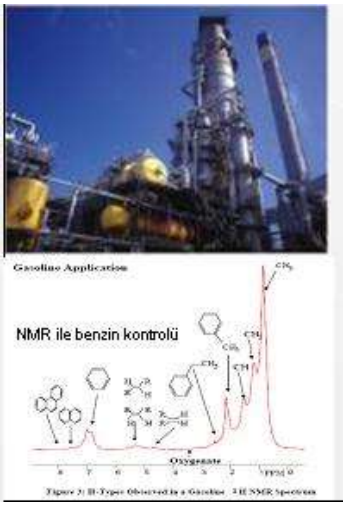
- Tıbbi incelemeler esnasında vücudun dokusu ve biyolojik sıvılardaki yağ, nem, şeker ve tuz oranını belirleme
- Onkolojik hastalıkların erken teşhisi

Eczacılık ve kozmetik sanayi

- Örneklerin bağlı ve serbest su oranlarının belirlenmesi
- Katalizörlerin nem oranın kontrol etme
- Eczacılık tozlarında nem ve yağ oranını belirlemek
- Sıvı, toz, minerallerde difüzyon hızının belirlenmesi
- Sıvıların viskozite ölçümü
- Alkol temizliği kontrolü

Yakıt sanayi

- Petrol çıkarma ve pompalama sürecinin "online" kontrolü
- Yağların hidrojenleşme kontrolü
- Ham petrolün de-emulsiyon işleminin kontrolü
- Petrol araştırma sürecinde petrol içeren toprakların gözenekliliğini belirleme
- Sıvı ve katı yakıtta hidrojen oranını belirleme
- Yağlama materyallerde karbonhidrat bileşenleri oranını belirleme



- Taş kayaların (toprak) gözenekliliğini belirleme
- Yağların viskozitesini kontrol etme

Polimer sanayi

- Polietilen yoğunluğunu belirlemek
- Birleşme (kaynak) noktalarının yoğunluğunu kontrol etmek
- Lifli polimerlerin yağ ve nem oranını belirlemek
- Polipropilenin ksilol oranını belirlemek
- Polimer reaksiyonlarda bileşenlerin oranını belirlemek
- Lastik ürünlerin katı faz oranını belirlemek
- Naylonda cam faz oranını belirlemek
- Polimerleşme reaksiyonu kontrolü
- Polimerleşme sürecinde viskoziti kontrolü

Selüloz ve tekstil sanayi

- Selüloz ve ağaç materyallarda bağlı ve serbest su oranını belirleme
- Polisakarinlerin kristalleşme derecesini belirleme
- Ağaç ve selülozda gözeneklerin yayılmasını belirleme
- Kumaş ve iplerde nem, gözeneklilik ve yumuşatıcı oranını belirleme

Temel Bilimsel Araştırmalar

- Kimyasal bileşiklerin değişik çeşitlerinde moleküler yapının tayin edilmesi
- Farklı moleküller arasındaki (enzim-substrate, sabun-su) etkileşimlerde sıvı ve molekül arasındaki moleküler hareketin belirlenmesi
- Katalizörlerin nem oranının kontrol edilmesi
- Sıvı, toz ve minerallerde difüzyon hızın belirlenmesi
- Proteinlerin üç boyutlu yapılarının belirlenmesi
- Küçük moleküllerin büyük moleküllere bağlanması