

# SPİNTRONİKTE YENİ BİR MALZEME: GRAFİN

Doğada en yaygın elementlerden biri olan karbon sunduğu yeniliklerle bilim ve teknoloji dünyasını meşgul etmeye devam ediyor. Organik dünyanın temel yapıtaşı olmasının yanı sıra, karbon atomları sadece dizilimlerini değiştirerek elmadan grafit, futbol topu biçiminde küresel C60 moleküllerinden, karbon nanotüplere kadar çok değişik formlarda ve özelliklerle karşımıza çıkıyor. Bu aileye yakın zamanda yeni bir üye daha katıldı: Grafın. Aslında grafın, grafiti oluşturan tabakaların herbirine verilen isim. Karbon atomlarının bir düzlem üzerinde balpeteği görünümünde dizilişle oluşan grafını 'yeni' kılan ise 2004 yılında Novoselov ve arkadaşları tarafından ilk kez kolay bir yöntemle izole edilip elektronik özelliklerinin ölçülebilmesi. Sonrasında yoğunlaşan deneysel ve kuramsal çalışmaların sonucunda grafının spintronik (spin elektronu) uygulamaları açısından da ilginç bir malzeme olabileceği görülmüştür. Bu yazıda spintronik ve grafındaki uygulamalarından bahsedilecektir.

1891 yılında İrlandalı fizikçi George Stoney elektrik deneni olgunun bir temel yapıtaşının olması gerektiğini düşünmüş ve bunu elektron olarak adlandırmıştı. 1860'lardan itibaren telefon telgraf gibi ilk örneklerini sunan elektronik 1897 yılında elektronun J.J. Thomson tarafından keşfi ile oldukça hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. Elektronun yük ve kütle gibi temel özelliklerinin tam olarak anlaşılması ile oldukça işlevsel elektronik devre elemanlarının da geliştirilmesi sağlanmıştır. 1947 yılında Bardeen, Brattain ve Schockley'in Bell laboratuvarlarında ürettikleri tranzistör ise entegre devre elemanları ve mikro işlemcilerin geliştirilmesi sürecinde anahtar rolü oynamıştır. Radyodan televizyona, hesap makinelerinden araç fren sistemlerine kadar her alanda hayatımıza giren tranzistörler özellikle bilgi işleme tek-

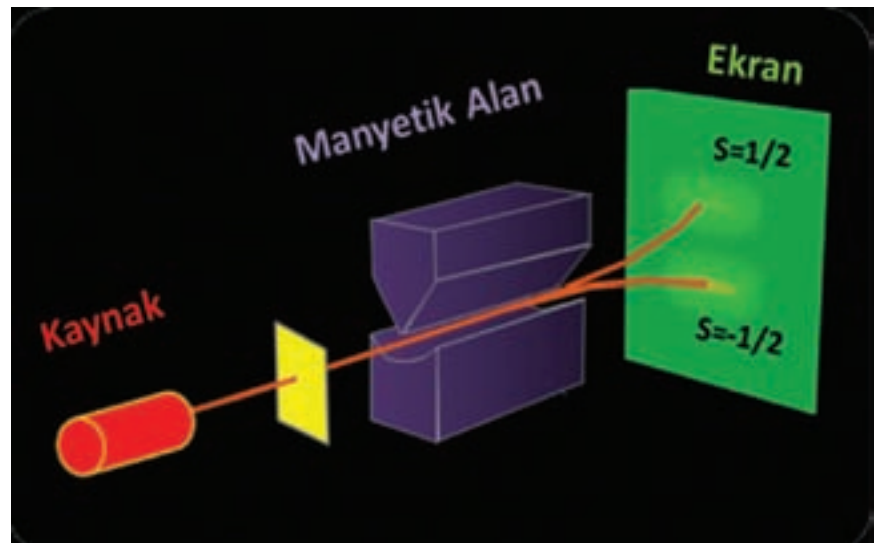
nolojisine getirdikleri ile 20. yüzyıla damgasını vurmuştur. Geçici hafızasında en çok 200 sayıyı saklayabilen ilk bilgisayar örneği, 30 ton ağırlığındaki ENIAC'ın yaptığı hesaplardan çok daha fazlası günümüzde birkaç gramlık hesap makineleri ile yapılabilmektedir. ENIAC altı bayan operatörün çıkartıp taktığı fişler ile işlem yaparken artık insansız makinelerin her alanda yerlerini aldıklarını görüyoruz.

'Teknolojide varılan bu nokta son durak mıdır' sorusuna nanoteknoloji çalışmalarını yürüten bilim adamları yepyeni buluşları ve araştırmaları ile hayır yanıtını vermektedirler. Bir yandan nano boyutlarda yapılar ve cihazlar inşa edilirken bir yandan da bu boyutlarda etkili olacak kuantum etkilerini de hesaplara dahil ederek yeni nesil araçların tasarımı yapılmaktadır. Nanoteknoloji araştırmalarında son yirmi yıl içerisinde oldukça mesafe kateden spin elektronu, elektronun sahip olduğu spin özelliğini klasik elektroniğe adapte ederek nanoboyutlardaki yeni nesil cihazlar için sürpriz işlevler öngörmektedir. Daha şimdiden sentezlenmesi başarılı olan nanotranzistörlere eklenecek spin bağımlı

özellikler ile spintronikün günlük hayatımıza girmesi çok da uzak görünmemektedir.

## Spin

1921 yılında Otto Stern ve Walter Gerlach'ın nötr gümüş atomları ile yaptıkları ilginç deneyde spin her ne kadar kendileri tarafından keşfedilememiş olsa da elektron spininin anlaşılmasındaki yolu açan deney olmuştur. 1924 yılında W. Pauli tarafından "iki değerli kuantum serbestlik derecesi" olarak adlandırılan bu ilginç özellik ilk olarak 1925 yılında S.A. Goudsmit ve G. Uhlenbeck tarafından elektronun sahip olduğu bir tür dönme hareketi (spin) olarak açıklanmıştır. Böylece elektronun sahip olduğu manyetik momentin aşağı ve yukarı yönelimli durumları bir dönme açıl momentumu ile doğrudan ilişkilendirilmiş oluyordu. Elektronun da tıpkı dünya gibi kendi etrafında döndüğünü varsayan, klasik fizik çerçevesindeki bu açıklama tamamen kuantum mekaniğin bir özelliği olan spini tanımlamakta yetersizdir. Elektronu hızla dönen, elektrik yüklü küçük bir küre



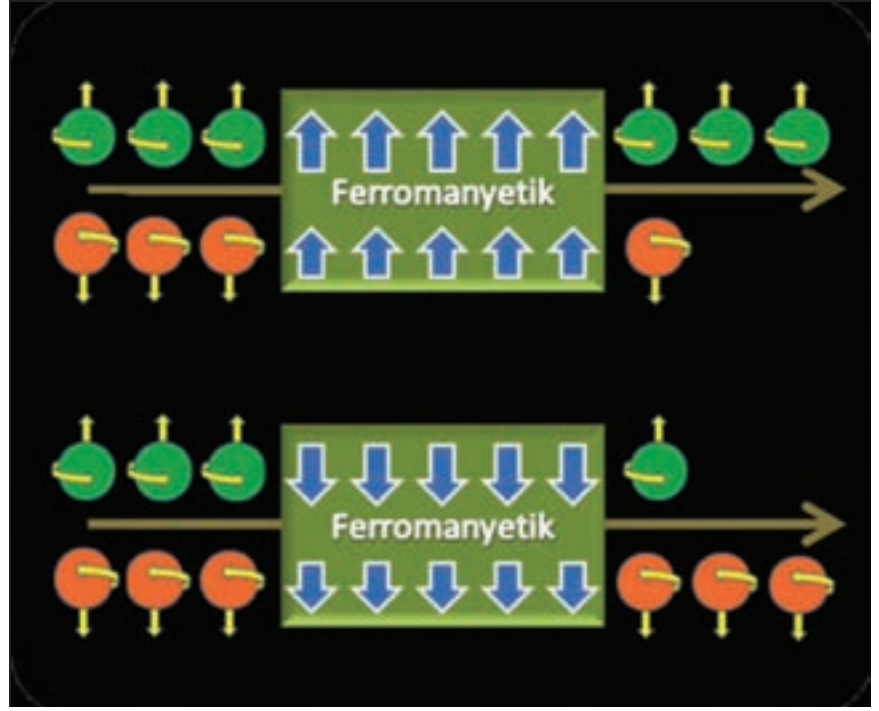
Şekil 1 Stern-Gerlach deney düzeneği. Kaynaktan çıkan atomlar düzgün olmayan manyetik alan bölgesinden geçerken spin manyetik momentlerinin değerine göre ayrışarak ekran üzerinde iki farklı öbek oluşturur.

olarak resmeden bu modelde, deneysel olarak ölçülen spin manyetik momentini sağlayacak dönme hızları özel göreliliğin ortaya koyduğu sağlam teoriler ile çelişmektedir. Bu durumda, aslında kendi etrafında dönmeyen, noktasal bir parçacık olan ama yine de bir çeşit içsel açısal momentuma sahip elektron fikri, klasik fizik ile düşünmeye alışmış beyinlerimiz için en makul olanıdır. Daha sonra T.E. Phipps ve J.B. Taylor tarafından hidrojen atomları ile yapılan deneyler ile de net olarak gözlenen elektron spininin modern kuantum mekaniği ile açıklanması 1927 yılında W. Pauli tarafından yapılmıştır. Elektronun görelî hareket denklemlerini çözen P.A.M. Dirac ise 1928 yılında spin özelliğinin göreceli kuantum mekanik formülasyonunda doğal olarak ortaya çıktığını göstermiştir. Böylece Thomson ve Dirac'ın çalışmaları arasında geçen otuz yıllık sürecin sonunda elektron bütün temel özellikleri ile anlaşılması olarak teknolojinin hizmetine sunulmuş oluyordu.

## Elektronikte Spin

Günümüzde kullanılan elektronik cihazların neredeyse tümü yarıiletkenlere ve bunlar üzerinden akan elektrik akımının kontrolü esasına dayanmaktadır. Spintronik ise tam bu noktada elektronun spin özelliğini de kullanarak manyetizma yolu ile yarıiletken teknolojisine yeni kontrol mekanizmaları önermektedir.

Her elektron "yukarı" ve "aşağı" olarak adlandırılabilen iki spin durumundan birinde bulunur. Manyetik ve elektrik alanlar ile elektronun spin durumlarını seçmek ve değiştirmek mümkündür. Yarıiletkenler üzerinden akan akımların varlığı ve yokluğu ile oluşturulan 1 ve 0' lar bu iki spin durumunun kullanılması ile de oluşturulabilir. Ünlü fizikçi Sir Neville Mott, iki kanallı akım modeli ile bir ferromanyetiğin aşağı ve yukarı spin durumlarına sahip elektronlar ile farklı büyüklüklerde etkileşeceğini teorik olarak ortaya koyarak 1930'lu yıllarda spintroniğin temellerini atan kişi olmuştur. Bir ferromanyetikten geçirilen akımda spin simetrisi bozulur ve ferromanyet ile aynı manyetik moment yönelimine sahip elektronlar daha büyük geçiş olasılığına sahip



Şekil 2 Ferromanyetik bir maddeden aşağı ve yukarı spinli elektronların geçişleri. Malzemenin mıknatıslanma yönüyle uyumlu spin durumunda olan elektronlar daha az direnç görürler.

olurlar. Bu da ferromanyetikten çıkan akımın daha çok bir spin durumuna sahip elektronlardan oluşması anlamına gelir. Yarıiletken bir malzemeye ferromanyetik özellikler kazandırılabilirse üzerinden geçecek spin kutuplu akımların kontrolü, sadece elektrik alan uygulanarak yapılabilecektir. Bu tip manyetik yarıiletken malzemelerin geleneksel yarıiletken teknolojisine entegrasyonu görece kolay olacaktır. GaAs gibi iyi bilinen yarı iletkenlerin Mn, Cr, Fe, Ni, Co gibi ferromanyetik atomlar ile katılanması sonucu elde edilen ferromanyetik yarıiletkenler hazır durumdadır. Bunlara ek olarak yarımetal malzemelerde sistemin, elektronların bir spin durumu için metalik iken diğer spin durumu için yalıtkan karakterli oluşu nano boyutlarda bu tür malzemelerin sentezlenmesi yönündeki çalışmaları hızlandırmıştır. Ferromagnetlere kıyasla yarımetalik malzemeler sağladıkları %100 spin polarizasyonu ile ideal spin süzgeçleri olarak kullanılabilirler. Katkılı yarıiletkenlerin kazandıkları manyetik moment yönelimini ancak 40K (-233°C) gibi düşük sıcaklıklarda koruyabilmesi spintronik aygıtların uygulamaya geçişinin önündeki en büyük zorluktur. Bununla birlikte ZnTe yarıiletkenine katılan Cr atomları ile oda sıcaklığında çalışmaya aday ferromanye-

tik yarıiletkenler 2003 yılı içerisinde bilim dünyasına duyurulmuştur.

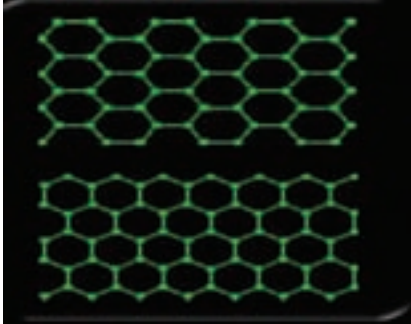
## Grafinin Spintronik Özellikleri

Elmasın dünyanın en sert maddelerinden biri yapan karbon atomları aynı zamanda kurşun kalemlerin ucundaki yumuşak grafitin de tek yapıtaşıdır. Elmasa mükemmel bir yalıtkan olma özelliği sağlayan karbon, grafitin ise iyi bir iletken olmasını sağlar. Periyodik tabloyu üzerine inşa ettiğimiz karbon atomları bir yandan farklı dizilimleri ile farklı özellikler sunarken bir yandan da sentezlenmesi son zamanlarda başarılı grafit gibi yeni üyeleri ile nanoteknolojiye de yön verecek gibi görünmektedir.

Grafitin tek tek tabakalar halinde ayrılması ile elde edilen grafit, bir atom kadarlık kalınlığı ile iki boyutlu olarak sentezlenmiş materyaller içerisinde en ince olanıdır. İdeal olarak düz ve zigzag biçimli kenarlara sahip grafitin şeritleri farklı elektronik yapıları ve taşıdıkları spin bağımlı özellikler ile ilgi çekmektedir. Elektrotlar arasında yerleştirilen grafitin şeritler ile yapılmış deneyler ve kuramsal hesaplamalar bunların grafitte göre oldukça farklı özelliklerinin olduğunu ortaya koy-

muştur. Grafinin elektronik yapısı üzerine yapılan çalışmalar zigzag kenar biçimli grafin şeritlerin kenar bölgelerinde yerleşmiş olan elektron durumlarının zıt spinler taşıdıklarını göstermiştir. Fermi seviyesi civarında yer alan bu elektron durumları, grafin şerit üzerinden geçen bir akımın taşıyıcılarının kenardaki bu elektronlar olacağını söylemektedir. Karbon atomlarının hibritleşme durumları ele alınarak anlaşılacak bu kenar elektron durumları düz kenar biçimli grafin şeritlerde ise bulunmamaktadır.

Bugünkü teknolojinin ürünlerinde kullanılan çipler çoğunlukla birkaç mikrometrelik bakır bağlantılardan meydana gelmektedir. Daha küçük bilgisayarlar daha küçük çipler ve bu da daha küçük bağlantılar anlamına gelmektedir. Bu ise bakır bağlantılarda daha büyük dirençlerin meydana gelmesi ve cihazın ısınarak bilgi transferinin yavaşlaması yani cihazın etkinliğinin azalması anlamına gelmektedir. Oluşan iyi metalik özelliğe sahip olan

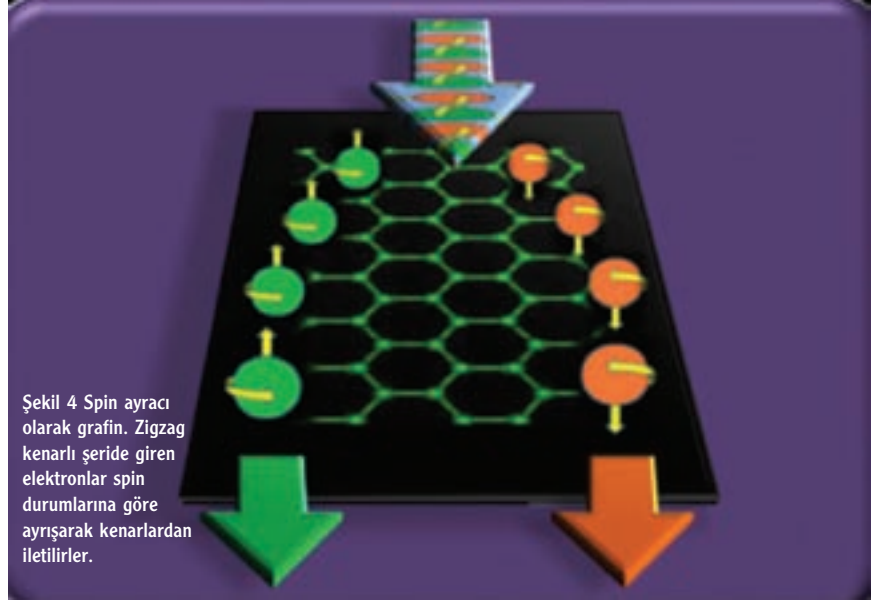


Şekil 3 Düz ve zigzag kenarlı grafin şeritleri. Nanoboyutlarda malzemenin özellikleri bileşimlerinin yanısıra atomların dizilişlerine de bağlıdır.

grafinin nanoşerit bağlantıların seri olarak sentezlenebilmesi ile varolan çiple- rin de yakın gelecekte birkaç nanometre boyutlarına kadar küçüleceğini söyleyebiliriz. Bununla beraber, oda sıcaklığında elektronların grafin üzerinde ışık hızının 1/100'üne varan çok yüksek hızlarda ve neredeyse dirençsiz hareket ediyor olmaları grafin bağlantılı çiplerin geleceğin bilgisayarlarında bakırın tahtına iyi bir aday olduğunu söylemektedir.

## Spin Hall Etkisi

1879 yılında Amerikalı fizikçi Edwin Hall doktora çalışması esnasında manyetik alan doğrultusu ile belli bir



Şekil 4 Spin ayracı olarak grafin. Zigzag kenarlı şeride giren elektronlar spin durumlarına göre ayrılarak kenarlardan iletilirler.

açı yapacak şekilde yerleştirilmiş bir iletken akım geçirilmesi ile ilginç bir şekilde akıma dik yönde bir potansiyel farkı oluştuğunu farketmişti. Bu etki ile iletkenin kenarlarına doğru hareketlenen elektronların meydana getirdiği karakteristik bir akım ve direnç deneylerde açıkça gözleniyordu. Bir yıl sonra çalışmanın yayınlanması ile dünyaya duyurulan bu ilginç olgu Hall etkisi olarak bilinmektedir. Meydana gelen Hall akımının kuantumlu oluşu ise 1980 yılında Klaus von Klitzing tarafından keşfedilmiş ve bu da kuantum Hall etkisi olarak adlandırılmıştır. Hall tarafından ince altın tabakalar kullanılarak yapılmış olan deneyler bugüne değin birçok metal ve yarıiletken için tekrarlanarak çeşitli alanlarda teknolojiye adapte edilmesi sağlanmıştır. Oluşan Hall akımının kuvvetli bir şekilde dış alana bağımlı olması, bu alanın kontrolü ile sağlanan akımlar sayesinde açılıp kapanacak devre elemanları iyi birer sensor olurlar. Artık gündelik hayatta kullanılır hale gelmiş olan Hall etkisi bilgisayarlarımızın yazıcılarında, disk sürücülerinde, otomobillerin takometrelerinde, park sensörlerinde ve fren sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Spintronik alanında yaptığı çalışmaları ile bilinen David Awschalom ve grubu tarafından 2004 yılında yapılan bir çalışma ile GaAs yarıiletkeninin 20 K gibi oldukça düşük sıcaklıklara soğutulması ile farklı spine sahip elektronların iletimi sağlayan materyalin farklı kenarlarına yöneltilen gözlenmiştir. Bu olgu spin Hall etkisi olarak adlandırılır. Materyalin çok düşük sıcaklıklarda gösterdiği bu davranış sayesinde bir ferromanyetiğe gerek duymaksızın aşağı-yukarı spin durumlarının iletken üzerinde ayrılması sağlanmıştır. Awschalom ve arka-

daşları tarafından 2006 yılında yapılan çalışma ile ZnSe bileşiğinde oda sıcaklığında spin Hall etkisinin gözlenmiş olduğunu biliyoruz. Spintronik çalışmalarının son gözdesi grafinde oda sıcaklığında kuantum Hall etkisi Novoselov ve grubu tarafından 2006 yılında gözlenmiştir. Buna ek olarak ise yapılmış olan teorik çalışmalar zigzag kenarlı grafin şeritlerde aşağı ve yukarı spinli durumların ayrıldığı yarı-metalik taban durumunun varlığını öngörmektedir ki bu spin Hall etkisinin deneysel olarak gözlenebileceği anlamına gelmektedir. Bunlara ek olarak spin etkilerinin halihazırdaki silikon teknolojisine uygulanabilirliği de 2007 yılında yapılan çalışmalar ile gündeme gelmiştir. Son beş yıl içerisinde uluslararası bilimsel dergilerde yayınlanan yüzlerce çalışma bilim dünyasının grafine olan ilgisini açıkça göstermektedir.

20. yüzyıl içerisinde inanılmaz bir hızla ilerleyen teknoloji klasik dünyanın sınırlarını aşmış moleküler boyutlarda kendine yeni çalışma alanları yaratmaktadır. Nanoteknolojinin yükselen çalışma alanlarından spintronik ise kuantum dünyasının ilgi çekici üyesi spin teknolojiye adapte ederek öngördüğü yeni nesil cihazlar ile hayal gücünün sınırlarını zorlamaktadır. Teknolojiye uygulanabilirliği yüksek olan grafin gibi dikkat çekici özelliklere sahip malzemelerin artık sentezlenebiliyor olması yakın gelecekte insanlığın nanoteknolojiyi daha yaygın olarak kullanmaya başlayacağını söylemektedir.

Hasan Şahin  
Bilkent Üniversitesi Malzeme Bilimi ve  
Nanoteknoloji Programı

Doç. Dr. R. Tuğrul Senger  
Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü ve UNAM -  
Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Enstitüsü