

Mikroelektronikte Fırıl Fırıl Bir Esinti

Spintronik

Elektronun elektrik yükü taşıdığını herkes bilir, daha az bilinen ise bir de spinleri olduğudur. Spin yabancı bir sözcük ve sevimli bir Türkçe karşılığı var, fırıl. Yine de yerli bilimsel kaynaklarımızda spin sözcüğü çok daha yaygın. Elektronun bir spine sahip olabileceği savı ilk olarak 1921 yılında Compton tarafından, belli bir dayanağı olmadan ileri sürülüyor. Esas öneri ise 1925 yılında iki genç lisansüstü öğrenci, Goudsmit ve Uhlenbeck tarafından yapılıyor. Bunda çok önemli bir pay da, bu önerilerini, biraz da oldu bittiye getirip, yayımlanması için dergiye gönderen hocaları Ehrenfest'e ait. Aslında Goudsmit ve Uhlenbeck'in tereddütleri altında hiç te yabana atılmayacak sorunlar yatıyor: Örneğin, yapılan kaba hesaplar elektronun "yüzeyindeki" dönme hızının, ışık hızının çok üzerinde olmasını gerektiren ve dolayısıyla görecelik kuramıyla çelişen bir sonuca yol açıyor. Elektronun spini konusundaki esas destek, 1929 yılında Dirac'ın meşhur göreceli kuantum mekanik denklemiyle geliyor. Bu denklem, elektronun aynen Goudsmit ve Uhlenbeck'in önerdiği gibi 1/2 spine sahip olmasını şart koşuyor. Yani, spin nihai olarak görecelikle ilintili ve ister istemez akla gelen, fırıl fırıl dönen minnacık yüklü fırıldak modeli bizi yanılgılara itiyor. Bu nedenle, yoğun madde fizikçileri elektronu, spinli, noktasal bir yük olarak düşünüp, spin ve elektrik yükünün nereden geldiği sorusuna girmiyorlar. Yalnız şunu belirtmekte yarar var ki, elektronun yükü ne derece yerleşmiş bir fiziksel nicelikse, spinin de varlığı o derece kuşku götürmez durumda.

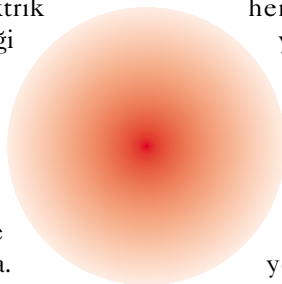
Kuantum mekaniğinin bir sonucu olarak elektron spini, seçilen bir eksene göre, aşağı ve yukarı olmak üzere ancak iki konuma sahip olabiliyor. Bir elektron demetindeki bu iki spin konumunu ayırtmak istersek, prensip olarak bu oldukça basit. Gereken, elektron demetini, aynı Stern-Gerlach deneyinde olduğu gibi uzayda değişen bir manyetik alandan geçirmek (Şekil 1). Elektronun spininden dolayı olan içsel manyetik momentinin, dış manyetik alanla etkileşmesi sonucunda yol açtığı iki farklı sapma açısı, demeti aşağı ve yukarı spin kutuplarına ayırtmış oluyor.

Spine İade-i İtibar

Spin açısından 20. yüzyılın oldukça sönük geçtiği söylenebilir. Dev elektronik endüstrisine göre, elektronun spini sadece gereksiz bir ayrıntıydı. Yani devre elemanlarının çalışma prensibi açısından, akımın nasıl bir spin dağılımı içerdiği önemsizdi ve esas nicelik, geçen akım miktarıydı. Dolayısıyla herhangi bir transistör ya da yongada dolaşan elektronlar rasgele bir spine sahip durumdaydı. Fakat yarıiletken teknolojisinde 0.1 mikronluk boyutlara inilmesiyle bütün alışılmış yöntemler kapasitelerinin

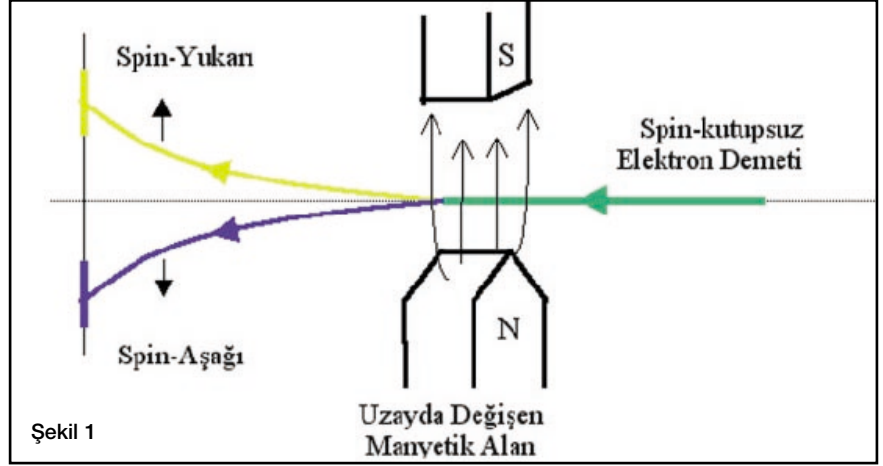
sonuna kadar zorlanıyor. Bunun doğrudan bir sonucu olarak da artık kullandığımız bilgisayarların hızlarını ona katlamak eskisi gibi kolay değil. Tıkanıklığı aşmak için yeni bir yaklaşıma gerek var. Uzun yıllardır gündemde olan bir öneri, elektronların yerine fotonları koyma şeklindeki, tüm-optik (all-optical) yaklaşımı. Gerçekten fotonlar bilginin iletilmesine son derece uygun özelliklere sahipler. Çevreleriyle az etkileştikleri için gürültüye daha az maruz kalmaları nedeniyle haberleşme ağlarımız tamamen fotonlara dayalı: Fiber-optik ağlar, radyolinkler vs. Ama bilginin işlenmesi gerektiğinde, yani bilgisayarın içinde, fotonlara dayalı tüm-optik yaklaşımı hala emekleme evresinde.

Yeni umudumuz ise spintronik! Bu adlandırma altında yaşı, beşten bile küçük. Mantiği gayet basit: Elektronun yüküyle bilgiyi taşımak veya işlemek yerine, bu işi spiniyle yapmak. En önemli dayanağı da spinin dış etkilere çok daha bağımsız olması ve daha küçük boyutlu ve dolayısıyla daha hızlı devre elemanlarına olarak tanınması.



Yeni Gözde, Metaller

Şu haliyle spintronik, yapıtaşı olarak yarıiletkenlere değil de, metallere sırtını yaslamış durumda. Bilindiği gibi yarıiletken elektroniği, değerlik (valance) ve iletim kuşaklarındaki deşik ve elektron olarak adlandırılan iki taşıyıcı türüne dayalı. Öte yandan spintronik, iki değişik spin kutubuyla (yukarı ve aşağı), bu iki çeşit taşıyıcı rolünü gerçekleştiriyor. Bu yönde ilk önemli deneysel gelişmeler 1980'lerin ortalarında, metallerde istenilen spin kutubunda taşıyıcı oluşturulabilmesiyle sağlanmış durumda. Bu noktada metallerin yarıiletkenlere göre önemli üstünlükleri olduğunu vurgulamakta yarar var. Bu, özellikle devre eleman uzunlukları küçüldükçe daha da ağır basıyor. Metaller ve yarıiletkenlerdeki serbest taşıyıcı yoğunlukları arasında büyük bir uçurum var: Metaller için bu, Avogadro sayısı (10^{23}) mertebesindeyken, en yüksek düzeyde katılanmış yarıiletkenlerde bile bunun ancak onbinde birine ulaşılabiliniyor. Bu durumda 0.01 mikron kenar uzunluğundaki bir yarıiletken hacimde en fazla 10 elektron bulunabiliyor, bu da akım yoğunluğu açısından yeterli değil. Küçük ebatlarda çıkan bir diğer sorun da yarıiletkenlerde oluşan yüzey elektronik seviyelerinin, cihaz işleyişinde git gide daha baskın olmaları. Oysa böyle bir durum metallerde söz konusu değil. Özetle, daha küçük ebatlarda, metaller yarıiletkenlere göre daha iyi performans sağlıyorlar ve daha da önemlisi, aşağıda görülece-



Şekil 1

ği gibi, geçiş grubu metalllerinde oldukça yaygın olan ferromanyetik özellik, spintronik uygulamalarında kilit rolü oynuyor.

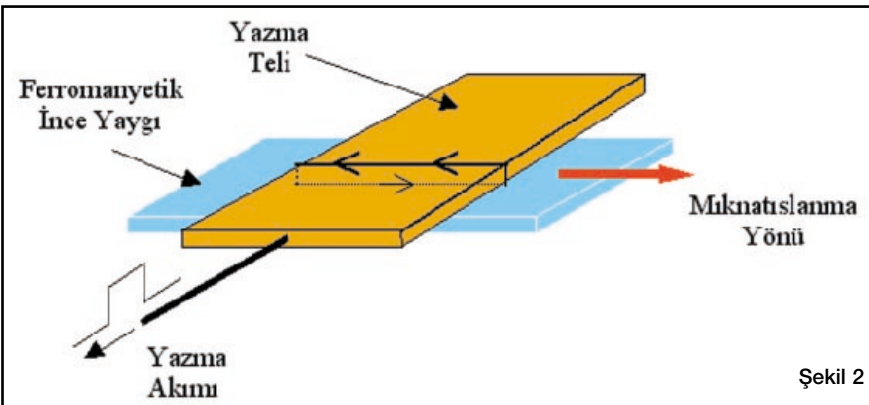
Belleklerden Asla Silinmeyecek

Spintroniğin şu aşamada en umut vaat eden uygulaması bellek yongalarında. İnce yaygı (thin film) ferromanyetik malzemeler kullanılarak, elektron spinleriyle 0 ve 1'ler saklamak mümkün ve normal RAM belleklerin aksine bu saklanan bilgi hiç sürekli enerji olmaksızın saklı kalıyor. Bu belleklerin yazma ve okuma hızları, normal yarıiletken RAM belleklerle yarışır hale gelmek üzere. Dolayısıyla, spintronik, yakın gelecekte, bilgisayarlarımızda mevcut sabit disk ve RAM belleklerin yerini tutabilecek tek bir bellek yerleştirmek amacıyla. Çok yavaş erişim hızlı sabit diskten kurtulmanın güzel bir yanı da artık bilgisayarımızı açar açmaz çalışır hale gelecek olması. Bu yönde ilk gaye, maliyeti 200 doların altında 1 GB'lık spintronik

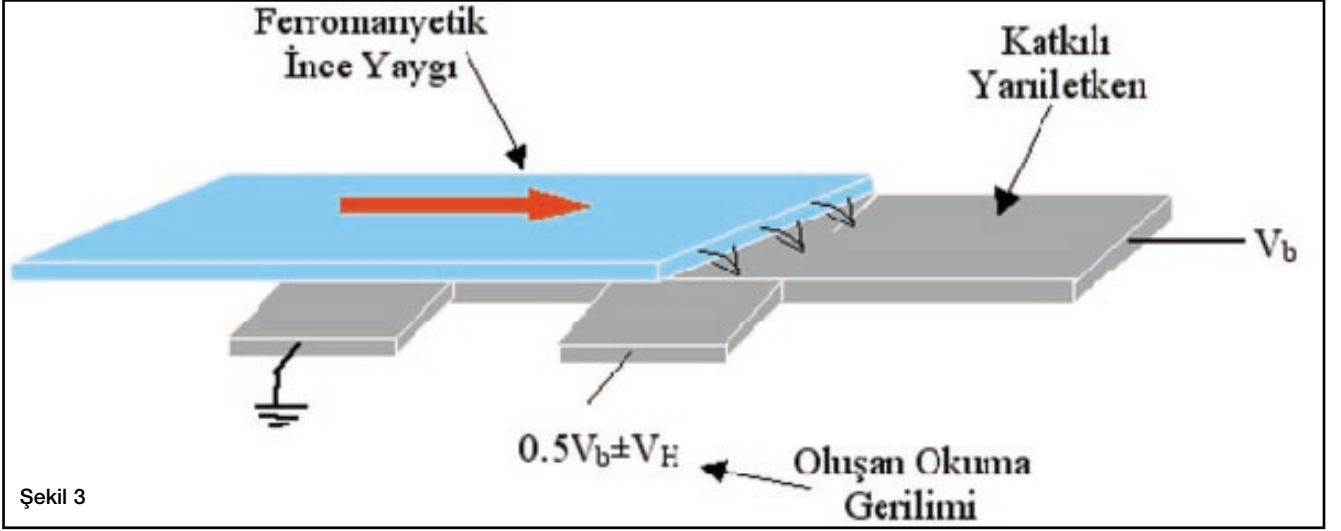
RAM bellekler üretebilmek; bu hedef, hem hızlı erişimli statik RAM cephesinde, hem de yüksek yoğunluklu dinamik RAM cephesinde söz sahibi olmaya imkan tanıyor. Spintronik bellekleri çekici hale getiren diğer bir nitelik de, yoğun radyasyon altında faaliyetlerine devam edebilmeleri. Bu, yüklü parçacık bombardımanı altında çalışmak zorunda olan uydularda çok aranan bir özellik.

Peki, Nasıl Çalışıyor?

Bu belleklere bir bilgi yazmak için yapılan, ferromanyetik ince yaygının üzerinden istenilen yönde yeterli miktarda bir akım geçirip, indüksiyon sayesinde mıknatıslanmayı sağlamak (Şekil 2). Saklanmış bilgiyi okuma konusunda ise değişik yaklaşımlar mevcut. En üstün görünen yöntem, melez ferromanyetik-yarıiletken yapısına dayanıyor (Şekil 3). Görüldüğü gibi, ferromanyetik ince yaygının ucundaki saçak manyetik alanı, hemen altındaki yarıiletkenine dik olarak geliyor. Katılanmış yarıiletkendeki serbest taşıyıcılar, bu manyetik alan ve dış besleme gerilimi (V_b) altında, Hall olayı olarak bilinen Lorentz kuvvetine maruz kalarak, yan yüzeyde bir Hall gerilimine neden oluyorlar. Bu gerilimin değeri, üstte bulunan manyetik alanın yönüne, yani saklanan 1 ya da 0'a göre değişiyor. Bu yapının en güzel yanı, performansının ebatlar küçüldükçe daha da artması. Yapılan ölçmeler, yazma/okuma çevriminin 10 nanosaniyenin altında tamamlan-



Şekil 2



Şekil 3

dığını göstermiş durumda. Yazma akımı, 1 miliamper ve yazmada harcanan güç ise onlarca mikrowatt düzeyinde.

Yarıiletkenlere Yan Bakmak Kimin Haddine

Metallerin spintronik için son derece uygun bir malzeme olmalarına karşın, yarıiletkenlere dayalı milyarlarca dolarlık elektronik endüstrisine ters düşüyorlar. Elektronik cihazlarımızda yarıiletkenlerin tercih sebeplerinin başında, değişik katkılama oranlarındaki taşıyıcılara (hem elektron, hem deşik) olanak tanıyarak, isteğe göre şekillenebilir olmaları geliyor. Bu nedenle, spintronik geleceği açısından, yarıiletkenlerin oyuna bir şekilde dahil etmesi kaçınılmaz. Bu noktada ise sorunlar çıkmaya başlıyor. Başlıca sorun, yarıiletkenlere spin-kutuplu taşıyıcı aşılama gözlemlenmiş. Ferromanyetik metaller ile yarıiletkenler arasındaki eklem Schottky diyodu olarak davranması, bu aşılama (injection) yüzdesini %1'in de altlarında sınırlamakta. Fakat son bir yıl içinde iki ayrı grup, ferromanyetik metal yerine manganez katkılı GaAs gibi yarıiletken ferromanyetikler kullanarak %90 spin-kutuplu taşıyıcı aşılama başardıklarını açıkladılar. Görünen, yeni yöntemler bulunarak yarıiletken teknolojisinin spintronikle uyumlu hale getirilebileceği yönünde.

Daha Kişilik Sahibi Bir Spin

Şimdiye kadar sözünü ettiğimiz uygulamalar, aslında manyetoelektronik olarak adlandırılmaya daha uygun. Gerçek spintronik iddiası ise hiçbir manyetik alan ve/veya manyetik malzemeye dahi gerek duymadan elektron spinine dayalı bir düzen oluşturmak. Spini, manyetik alan altındaki edilgen konumundan çıkaran uygulamalara geçmekle, kuantum mekaniğin zengin ve şaşırtıcı dünyasına girmeye başlıyoruz. En ilgi çekici araştırma konusu kuantum bilişim dalında. Burada amaç, doğrudan 1 ya da 0'lık bitlerle işlem yapmak yerine, kuantum-bitlerle (qubit) yani, 1 ve 0'ı temsil eden kuantum hallerinin (örneğin, spin yukarı ve aşağı) doğrusal bir bileşiminde çalışmak şeklinde. (Bu noktada, modern fizik folklorunun vazgeçilmez kahramanlarından Schrödinger'in kedisi yine karşımıza çıkıyor; her zamanki gibi sağduyumuzla çelişen, yarı ölü, yarı diri haliyle.) Kuantum bilgisayarları esas gücüne, bir çeşit paralel işlemci gibi, birçok qubiti, çevre etkilerinden yalıtıp, kendi içinde dolaşık (entangled) bir halde saklayıp işlem yapabilmesiyle ulaşıyor. Bu tür bir yaklaşımın, klasik bilgisayarların çözmekte çok zorlandıkları veya yavaş oldukları problemlerde (büyük bir sayıyı asal çarpanlarına ayırma gibi) veya şifreleme konularında önemli üstünlükler sağlaması bekleniyor. Tabii hemen akla, kuantum bilgisayarının nasıl bir fiziksel sistem üzerinde gerçekleştirilebileceği sorusu geliyor. Çevreyle az etkileşmesi nedeniyle, işte

spine çok uygun bir iş sahası. Yalnız kuantum bilişim konusu son derece kısıtlayıcı koşullar içeriyor ve üzerinde daha çok fazla kafa yorulması gereken noktalar var.

Spine biçilen bir diğer kaftan da, yeniden-yapılanabilir mantık (reprogrammable logic) devrelerinde. Halihazırda bu mümkün değil. Ama gerçekleşirse, devrim yaratabilecek bir konu. Örneğin, bir hesabın ortasındasınız, ve yazılım, kalan kısmı daha verimli hale getirecek şekilde gerekli mantık devrelerini, manyetik alan veya kapı gerilimlerini değiştirerek, nanosaniyeler içinde yeniden yapılandırabilecek. Donanıma gelecek bu esneklik sayesinde, artık tamamen yazılımın egemenliğinde evrensel bir yonganın gündeme gelmesi söz konusu. Yalnız vurgulanması gereken nokta, bellekteki durumun aksine, bu son uygulamaların bazılarının ancak sıvı helyum sıcaklığı (4.2 Kelvin) gibi prototiplerde gerçekleştirilebildiği, bazı fikirlerin de henüz bilim-kurgu sınırlarında olduğu. Sonuç olarak, önümüzdeki yıllar bize, fırl esintisinin elektroniğe taze bir kan mı getireceğini, yoksa birçok benzeri gibi, pek gün yüzü görmeden, sine-i millete ya da daha doğrusu sine-i mikroelektronik mi döneceğini gösterecek.

Ceyhan Bulutay
Bilkent Üniversitesi, Fizik Bölümü

Kaynaklar
IEEE Spectrum, Şubat 2000, sf. 33-40.
<http://www.newscientist.com/ns/980228/features.html>
Nature, 27 Nisan 2000, sf. 918-920.
Science, 27 Kasım 1998, sf. 1660-1663.
Physics Today, Haziran 1999, sf. 33-38.
<http://xxx.lanl.gov/ps/cond-mat/0006369>
<http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph219/>
<http://www.rdmag.com/archives/features/07ibm.htm>