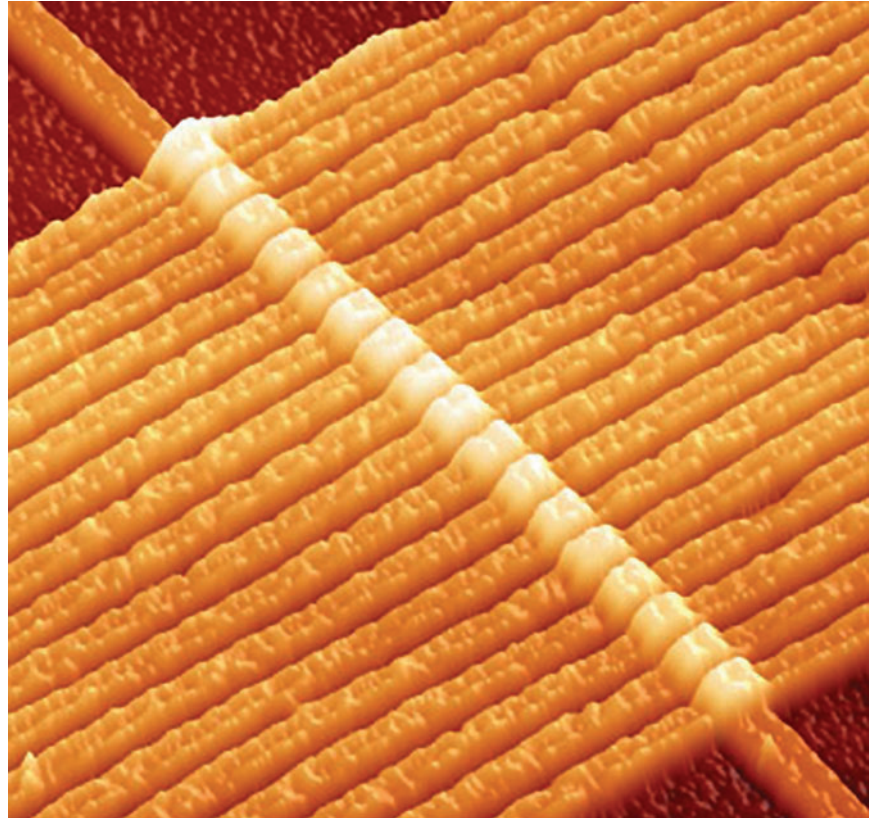


ELEKTRONİĞİN KAYIP DEVRE ELEMANI BULUNDU

MEMRİSTOR

Elektronikğin 3 temel elemanı vardır: Direnç, kapasitör (kondansatör) ve indüktör... 1971’de California Üniversitesi’nden Leon Chua adında bir mühendis, bu ailenin kayıp bir üyesinin daha olduğuna ilişkin kimi kuramsal öngörülerde bulunmuştu. Her ne kadar nasıl bulacağını bilmesede Chua bu “dördüncü element”in adını da koymuştu: Memristor. İngilizce “memory resistor” sözcüklerinden kısaltılarak oluşturulan bu ad, kuramsal olarak ileri sürülen ağıta çok uyuyordu. Aradan 37 yıl geçti, mühendislerin çabaları bu öngörüğü doğruladı. Geçtiğimiz aylarda HP’den bir grup araştırmacı memristorun gizini açığa çıkaracak keşiflerini duyurdu ve bu buluşlarını da ünlü Nature dergisinde yayımladı. Memristorun mucitlerine göre buluşun hem kısa hem de uzun vadede küçük bilgisayar elemanlarından sinir ağlarına kadar birçok alanda uygulaması olacak.

Memristorun öyküsü 37 yıl öncesine dayanıyor. O zamanlar da bugün olduğu gibi elektrik mühendislerinin elinde üç adet edilgen temel devre elemanı vardı; elektrik yükünü toplayan kapasitör, elektrik akımına karşı direnç gösteren direnç ve akımı manyetik alana çeviren indüktör. Tüm elektronik hâlâ bu elemanlara dayanıyor aslında. Ancak 1971’de doğrusal olmayan devre kuramının öncülerinden Leon Chua, bu elemanlardaki yük ve akı arasındaki ilişkiyi incelerken, memristoru, yani dördüncü elemanı öne sürdü. Leon Chua, ünlü memristor makalesini yayımladığında, Berkeley Elektrik Mühendisliği Bölümü’ndeki görevine henüz başlamıştı. Makalesinin başlığı “Kayıp Devre Elemanı: Memristor” idi. Chua, makalesinde direnç, kapasitör ve indüktör gibi temel devre elemanlarına benzer, iki terminalli, “kayıp” bir elemanın olduğuna ilişkin kanıtlar sunuyordu. Bir direncin gerilimle akım arasındaki ilişkiyi vermesi gibi, memristorun da benzer bir bağıntıyı manyetik



akı ile yük arasında vereceğini söylüyordu. Bunun anlamı, memristorun aslında içinden geçen akıma bağlı olarak değeri değişen bir direnç gibi davranıyordu. Ancak memristor akım geçip gittikten ve bittikten sonra dahi bu değeri aklında tutabiliyordu.

Bugün geriye dönüp baktığında Chua şöyle diyor: “Elektronik kuramcılar yıllardır yanlış değişken çiftini, yani gerilim ve yükü kullanıyorlardı. Oysa elektronik kuramının kayıp bölümü yük ile akı çiftiydi. Durum aslında Aristo’nun hareket yasasına benziyor; o da yanlıştır, çünkü kuvvetin hızla orantılı olması gerektiğini söyler. Bu yasa 2000 yıl boyunca insanları yanılttı, ta ki Newton çıkıp Aristo’nun yanlış değişkenleri kullandığını söyleyene kadar. Newton, kuvvetin hızla değil, hızdaki değişimle, yani ivmeyle orantılı olduğunu söylemişti. Tam da günümüzdeki elektronik devre kuramındakiyle aynı durum. Tüm

elektronik ders kitapları yanlış değişkenleri (gerilim ve yük) kullanmayı öğretiyor ki bu da kimi belirsizlikleri ve tuhaflıkları açıklayamıyor. Oysa öğretmeleri gereken, gerilimdeki ya da akıdaki değişim ile yük arasındaki bağıntı”. Memristorun, devre tasarımı arenasına girmesini aslında bir anlamda periyodik tabloya yeni bir elementin girmesine benzetiyor şimdi Chua. Hatta ona göre tüm elektronik mühendisliği ders kitaplarının değişmesi gerekiyor!

Chua, dört temel devre değişkenini (akım, gerilim, yük ve manyetik akı) çiftler halinde birbirine bağlayan 6 değişik matematiksel bağıntı olduğunu söylemişti. Bu bağıntılardan birisi öteki iki değişkenin tanımından belirlenebiliyor (yük, akımın zamana göre türevi alınarak elde ediliyor) ve bir başkasıysa Faraday’ın indüksiyon yasasından bulunuyor (akı, gerilimin zamana göre türevi alınarak bulunabiliyor). Dolay-

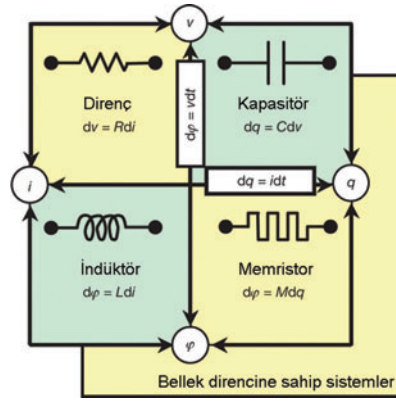
siyla kalan bağıntıların belirlediği dört temel eleman olmalı. İşte memristorda, Chua'ya göre bir memristans, (İngilizce "memory resistance" sözcüklerinden geliyor) yani bellek direnci bulunmalı. M harfiyle gösterilen bu direnç, yani memristans yük ve akı arasındaki $d\varphi = Mdq$ bağıntısıyla ifade ediliyor.

Memristans aslında bir elektronik bileşenin temel özelliği. Eğer elektrik yükü bir devre boyunca bir yönde akarsa, devrenin o bileşenin direnci artacaktır ve eğer elektrik yükü devrede ters yönde akarsa, direnç düşecektir. Uygulanan gerilimi kesip yük akışı durdurulursa, bileşen daha önce taşıdığı direnci "hatırlayacak" ve yük akışı yeniden başladığında devrenin direnci en son hatırladığı halinden başlayacaktır.

İdeal bir memristor, memristans özelliğini ifade etmek için yapılmış, edilgen, iki terminalli bir elektronik aygıt. Ancak pratikte saf bir memristor yapmak çok zor, çünkü her aygıt çok az da olsa bir başka özellik taşıyor. Örneğin, tüm indüktörler dirence sahipler, benzer şekilde memristorun da kapasitansı var.

1971'de anılmaya başlanan bu kuramsal aygıt, yıllarca kâğıt üzerinde matematiksel bir oyuncak olarak kalmıştı. Aradan 35 yıl geçtikten sonra, HP'den Stanley Williams ve grubu moleküler elektronik üzerine çalışırken yaptıkları bir aygıtın tuhaf davranışlarını fark etti. Sonra ekipten Greg Snider, Chua'nın 1971'deki çalışmasını buldu. Williams birkaç yıl boyunca Chua'nın makalesini tekrar tekrar okudu ve bir süre sonra buldukları moleküler aygıtın aslında, yıllar önce Chua'nın söylediği memristor olduğunu fark etti.

Chua'nın, memristor gibi bir elema-



Dirençler ve memristorlar, bellek direncine sahip sistemler olarak tanımlanan çok daha genel bir dinamik aygıtlar sınıfının alt gruplarıdır. R, C, L ve M, tanımlandıkları denklemler içerisinde bağımsız değişkenlerin fonksiyonları olabilirler. Örneğin elektrik yüküne bağlı bir memristor tek değerli bir $M(q)$ fonksiyonu ile tanımlanabilir. Burada R direnç, C kapasitans, L indüktans ve M Memristans, yani bellek direncidir.

nın çok sayıda ilginç ve değerli devre özelliği olduğunu göstermesine karşın, HP grubunun bu çalışmasına kadar kimse kullanışlı fiziksel bir modelini geliştirememişti. Nature dergisindeki makalelerinde Williams ve ekibi, memristorun özellikle nano ölçekteki sistemlerde doğal olarak kendini gösterdiğini söylüyor. Bu da şimdide değin kimsenin onu neden fark edemediğini açıklıyor.

Aklımda!

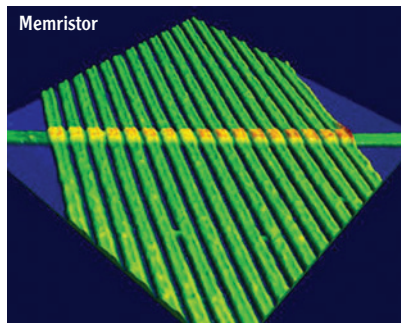
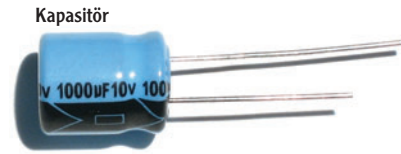
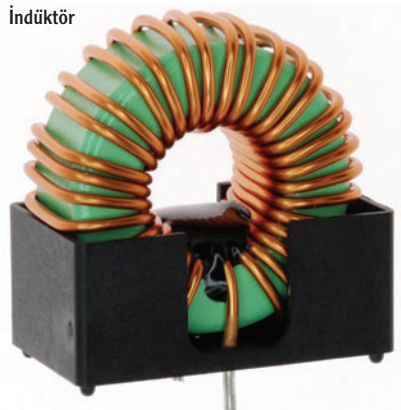
Memristorun öteki temel devre elemanlarından en önemli farkı, geçmişindeki belleği de taşıyor olması ve unutmaması. Devrenin gerilimini kestiğinizde memristor ne kadar gerilim uygulandığını ve ne kadar süreyle uygulandığını hatırlamayı sürdürüyor. Bu özelliği, öteki üç temel elemanın bir araya getirilecek herhangi bir kombinasyo-

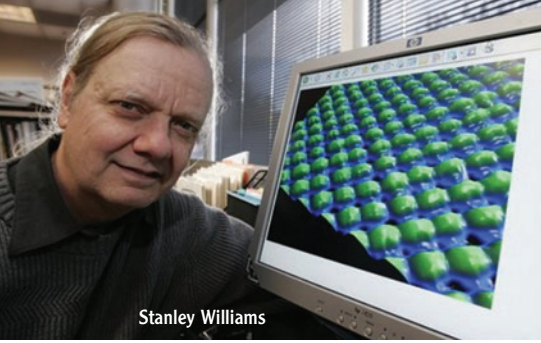
nuyla yapmanın olanağı yok. Zaten bu nedenle memristor dördüncü ve ayrı bir devre elemanı olarak anılıyor.

Memristorun temelinde yatan 'bellek direnci' kavramı ilginç bir olgu. Direnç, içinden su geçen bir hortuma benzetilebilir. Hortumun iç çapının büyüklüğü suyun akışına karşı direncini belirler. Çap ne kadar darsa hortumun suya karşı direnci de o kadar büyük olacak, genişledikçe direnci azalacak ve su hem daha çok hem de daha rahat akacaktır. Normal dirençlerde bu hortumun iç çapı değişmez. Ancak memristorda durum farklı; içinden geçen suyun miktarına bağlı olarak genişliyor ya da daralıyor. Eğer suyu hortumun içinden tek bir yönde akıtırsanız hortumun iç çapı genişliyor, yani direnci azalıyor ve bununla da yetinmeyip bir de bunu unutmuyor, belleğinde tutuyor. Suyun akışını kestiğinizdeyse, hortumun bu genişlemiş hali değişmiyor, yani geriye dönüş yok, en son ne kadar akım geçmiş ve ona göre biçim almışsa o durumda kalıyor.

Memristorun belleğinin yardımı olacağı epey alan var: Örneğin herhangi bir nedenle yeniden başlatılmak zorunda kalan bilgisayarlar. Çalışmakta olan bir bilgisayarın yeniden başlatılması durumunda, kapanmadan önceki bilgi uçup gidiyor. Ancak memristor, gerilimi anımsayabildiğinden, memristorlu bir bilgisayarda böyle sorunlar olmayacakmış gibi görünüyor. "Tüm Word belgelerinizi, Excell dosyalarınızı açık bırakıp bilgisayarınızı kapatabilirsiniz. İster bir fincan kahve almaya gidin, isterseniz iki haftalığına tatile çıkın" diyor Williams, "Döndüğünüzde bilgisayarınızı açın, her şey bıraktığınız gibi olacak".

Peki, neden kimse bellek direnci görmüyor? Chua aslında ortaya attığı kavramı kanıtlamak için 1970'li yıllarda, kaba saba da olsa bir memristor üretmişti. Chua'nın memristoru dirençler, kapasitörler, indüktörler ve yükselteçlerin bir kombinasyonundan oluşuyordu. Ancak bellek direnci, bir malzemenin özelliği olarak, yakın zamana kadar kullanılmayacak, hatta fark edilemeyecek kadar zayıftı. Chua da o zamanlar fark edememişti. Bellek direnci, malzemenin öteki özelliklerinin arasında kaybolmuş sayılırdı; yalnızca malzemeye ya da aygıta nano ölçekte baktığınızda fark edebileceğiniz bir özellikti.





Stanley Williams

Kimse de bu zamana değin bakmamıştı ve böyle bir şey yokmuş gibi davranılmıştı. Bir şeyin yokluğundan haberdar değilseniz, zaten ona gereksiniminiz yok demektir. Dolayısıyla hiçbir mühendis de çıkıp “keşke elimde bir memristor olsaydı da şöyle yapsaydım” dememişti. Hatta yıllardır devre tasarımı dersi veren akademisyenlerin çoğu birkaç hafta öncesine kadar bu sözcüğü duymamıştı bile.

Williams’a göre memristor neredeyse 50 yıldır bir yerlerde kendisini gösterip durmuş. Literatürde, akım-gerilim karakteristiği garip olan birçok makaleye rastladığını ve o makaleleri alıp incelediğini söylüyor ve ekliyor “Evet, bellek direnciydi bunlar ama nasıl yorumlayacaklarını bilememişler”.

Williams ayrıca Chua’nın devre denklemleri olmadan işlerin çok zor olduğunu da söylüyor ve “Komik bir durum, insanlar tüm yanlış devre denklemlerini kullanıyorlardı. Bu, bir çamaşır makinesinin motorunu alıp benzinli bir otomobile takıp neden çalışmadığını anlayamamaya benziyor”. diyor.

Williams ve ekibi ideal memristoru, titanyum dioksitte (TiO_2) bulmuş. Silikon gibi, titanyum dioksit de bir yarıiletken ve saf durumdayken direnci hayli yüksek. Ancak başka elementlerin yardımıyla iletken hale getirilebiliyor. TiO_2 ’yi iletken hale getirmek için kullanılan katkı elementleri şiddetli bir elektrik alanının altında kararlı olamıyorlar ve akım doğrultusunda sürüklenme eğiliminde oluyorlar. Bu hareketlilik aslında transistörler için pek zararlı bir şey olmasına karşın, memristoru çalıştıran şeyin ta kendisi. Bir yüzünde katkı elementlerinin olduğu ince bir TiO_2 katmanına bir başlangıç gerilimi uygulanması bu elementlerin saf TiO_2 bulunan öteki yüze doğru hareket etmesine neden olacak ki bu da direnci düşürecek. Ters yönde bir akım uygulanmasıyla da elementler yerleri-

ne geri dönecek ve bu da direnci yeniden arttıracak.

Williams ve ekibinin yaptığı şuydu: Üç nanometre (bir nanometre, bir metrenin milyarda biridir) kalınlığında bir TiO_2 katmanını iki platin katmanına yerleştirdiler. TiO_2 katmanının bir bölümünde, normalde oksijen atomlarının olması gerektiği artı yüklü boşluklar vardı. Ekip bu boşluklara yakın bir elektroda alternatif akım uygulayarak elektrodun artı ve eksi yük şeklinde salınmasını sağladı. Elektrot artı yüklükten yüklü boşlukları ittiriyor ve akımın ikinci elektroda doğru akmasını sağlıyordu. Akımı kestiklerindeyse boşluklar hareket etmeyi bırakıyor ve memristorun yüksek ya da düşük dirençli halinde kalmasını sağlıyordu.

HP laboratuvarları şimdi TiO_2 ve başka malzemelerden nasıl memristor üretebileceğinin yollarını ararken bir yandan da memristorun arkasındaki fiziği anlamaya uğraşılıyor. Ayrıca bir başka grup da aynı yonga üzerine hem memristor hem de silikon devreleri nasıl yerleştirebileceklerini bulmaya çalışıyor. HP’deki grubun elinde melez bir CMOS memristor yongası var ve laboratuvarlarındaki test aletinin üzerine “oturmuş” durumda. Bu alet testleri geçerse, yenilerinin yola çıkması hiç de gecikmeyecek.

Memristoru yaratan HP araştırmacıları, memristorlar ve bu tür aygıtlar için öncelikle iki uygulama görmüş. Birincisi, adının da ima ettiği gibi, kalıcı bir bellek. Böyle bir belleğin, örneğin elektrik kesilse bile veriyi unutmamak gibi, yararlı özellikleri var. Bunlar manyetik disklerden 1000 kat daha hızlı olacak ve çok daha az güç harcayacak.



Leon Chua

Memristorlara dayalı bellekler için dünyanın birçok yerinde araştırmacılar çalışıyor; yani bellek çubuklarına ciddi bir rakip geliyor. İşin en iyi yanı, bellek işlevi göreceği düşünülen birçok metal oksit var; bunlar da şimdiki yonga üretim fabrikalarında işlenip üretilmeye çok uygun. Dolayısıyla pek değişiklik yapmadan ya da yepyeni yatırımlara gerek kalmadan memristor üretimi kolaylıkla yapılabilecek.

Başka bir ilginç uygulama da yapay sinaps. Chua ilk makalelerinde sinapslarla önerdiği memristorlar arasındaki ilişkiye işaret etmiş ve bu konuyla ilgili birçok da araştırma yapmıştı. Bu da ilginç ve gelecek vaat eden değerli bir çalışma alanı gibi görünüyor. Williams da zaten amacı yapay sinir sistemi kurmak olan birçok nörobilim/mühendislik laboratuvarıyla iletişim halinde. Chua’nın da zamanında söylediği gibi, nöronlar arasındaki bağlantıyı sağlayan sinapsların kimi memristor benzeri davranışları olduğuna inanıyor. Dolayısıyla Williams da memristorun sinaps için en uygun elektronik aygıt olduğunu düşünüyor.

Araştırmacıların devre tasarımında öncelikle beklediği şey, memristor kullanılarak yeniden tasarlanan belli tür devrelerin daha ucuza mal olması ve daha az güç tüketmesi. Aslında Williams geleneksel devre tasarım elemanlarını memristorla bir araya getirerek Boole tarzından farklı hesap yapabilen aygıtlar üretmeyi umuyor. “Bir beyin üreteceğimizi ileri sürmüyoruz ama beyin gibi hesap yapabilecek bir şey istiyoruz” diyor.

Şimdilerde Berkeley’de onursal üye olarak görevini sürdüren memristorun yaratıcısı Chua, memristorun yapıldığını görmeye ömrünün yeteceğini düşünmüyormuş. Chua “Müthiş bir şey.” diyor ve ekliyor “Memristoru tümüyle unuttum”.

Memristorun yaratıcıları iddali; memristorun yalnızca var olan teknolojiyi yenisiyle değiştirmek anlamına gelmediğini, daha önce kimsenin aklına gelmeyecek türden yeni aygıtlar ailesinin yapımında kullanılacağını söylüyorlar.

İlhami Buğdaycı

Kaynaklar
<http://www.nature.com/nature/journal/v453/n7191/full/nature06932.html>
<http://www.sciam.com/article.cfm?id=missing-link-of-electronics&page=2>
<http://www.spectrum.ieee.org/may08/6207>