

# KUANTUM ETKİSİ AYGITI: YARININ TRANSİSTORU MÜ?<

Robert T.BATE

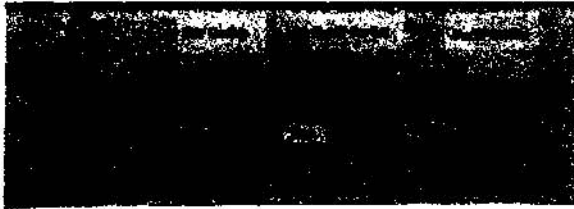
Çev: F. Levent Değertekin\*\*

Alışılmış tümleşik devre elemanları, ancak işlevlerini bozan etkiler meydana çıkmayacak kadar küçültülebilir. Bu boyut sınırının ötesine yeni bir tür yarı iletken aygıtlarla geçilebilir.

Elektronik endüstrisi ve tümleşik devreler ters bir kaderi paylaşıyorlar. Devreler küçüldükçe endüstri büyüyor ve bu büyüme, tek bir yonga üzerine daha fazla devre sığdırılabildiği sürece devam edecek. Ancak genel kanı ve dikkatli analizler belki de önümüzdeki on yıl içinde boyutlarındaki küçülmenin devre teknolojisinin sınırlarını aşacağına gösteriyor. Uygulamadaki sınırlamalar asılsa bile, devre elemanlarının davranışlarını yöneten fizik kanunları bu elemanların boyutlarına çok temel bazı sınırlamalar getirmektedir. Elektronik endüstrisi genişlemesini sürdürmek için yeni bir teknolojik devrime gereksinim duyuyor.



KUANTUM YONGA standart yonga elemanlarına göre 100 defa daha küçük boyutlara sahiptir. Akım negatif katkı (n-katkılı) bir galyum arsenit bloktan diğerine bir alüminyum galyum arsenit tabakanın, galyum arsenit bir kübün ve daha sonra başka bir alüminyum galyum arsenit tabakanın içinden geçerek akar. Bu boyuttaki tabakalarda ortaya çıkan kuantum-mekanik etkiler nedeniyle bir kuantum aygıtın ilettiği okım uygulanan gerilime son derece duyarlıdır ve bundan dolayı çok iyi kontrol edilebilir.



Texas Instrumentsta görevli bir fizikçi olarak, yarı iletken aygıtlar için yeni bir buluş sahası yaratmanın kaçınılmazlığının yıllardır farkındayım. Meslektaşım Pal-lab K. Chatterjee'nin 1982'de yayınladığı çalışması da boyutlardaki küçülmenin son noktasına ne kadar yaklaştığımızı belirtmesi nedeniyle endişelerimi artırmıştır. Bu konuda halâ bazı tartışmalar olmasına rağmen tahminler en küçük boyutların metrenin 100 ve 500 milyarda biri arasında değiştiğini gösteriyor. Problemi tartışırken çoğumuz aynı çözüme ulaşmaktayız: Alışılmış devrelerde boyutları sınırlayan pek çok görüngü, eskisine oranla çok etkili ve yetenekli yeni kuşak aygıtlarda kullanılabilir. Bu aygıtların işlevsel tabanı, yarıiletken teknolojisini atom içindeki parçacıkların dalga gibi davrandıkları, daha önce geçilmez sanılan bariyerlerden geçtikleri bir fizik alanına taşıyan, kuantum-mekaniksel etkilere dayanmaktadır, kuantum yarıiletken aygıtlarıyla bir süperbilgisayar devresinin tek bir yonga üzerine yerleştirilebileceğine inanmaktayım.

Kuantum aygıtlarının yapısı bugünün yongalarında kullanılan malzemelerden oluşturulmuştur: Katkılı ("doped") silikon, katkı ve katkısız galyum arsenit ve alüminyum galyum arsenit. Bugünkü tümleşik devrelerden yaklaşık 100 kat daha küçük olabildikleri için güvenilir bir aygıtın tasarlanması ve fabrikasyonu çok büyük bir çabayı ortaya çıkarmaktadır. Üretim yöntemleri oldukça ileri bir düzeye getirilmeli, iç bağlantı ve yerleştirme stratejileri boyuttaki azalmanın yaratacağı özel problemleri çözecek şekilde planlanmalıdır.

Ne kadar zor gözükürse gözüksün, her fonksiyonun maliyetinde on bin kat azalmaya neden olabilecek kuantum aygıtlarının gerçekleştirilmesi için harcanacak çabaların karşılığı alınacaktır. Bu düzenlemelerin yapılması, üretimin teknolojisi bilinmeyen yeni malzemelere geçilmesinden daha kolaydır. Texas Instrumentsla olduğu gibi diğer endüstri, devlet ve akademi laboratuvarlarındaki gelişmeler kuantum aygıtlarının elektronik endüstrisinin beklediği devrimi gerçekleştirebileceğini göstermektedir.



ALAN-ETKİSİ TRANSİSTÖRLERİ, bugün tümleşik devrelerin büyük kısmını oluşturmakta ve klasik fizik yasalarına göre çalışmaktadır. Silikon transistorda (üstte) geçit pozitif gerilim uygulandığında elektronlar kaynak ve pozitif

gerilimli akaç arasında akarlar. Geçit gerilimi iki n-katkılı bölge arasında bir çeşit elektron köprüsü yaratır; bu gerilim olmadığında pozitif katkı (p-Vatkılı) silikon kanaldaki elektronlar dağınık ve kanal geçilmez olur. Buna karşılık, galyum arsenit transistorda (altta) geçitte gerilim yokken iletken, fakat nefatif bir gerilim uygulanması durumunda elektronların kaynaktan akaca akışını kesmektedir.

\* özgün Metin: "The Quantum-Effect Device: Tomorrow's Transistor?"

Scientific American, Mart 1988, Cilt 258, Sayı 3.

\*\* ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü 3. sınıf öğrencisi.

Tümleşik devre elemanlarını küçültme çabası her devrenin işlevlerini gerçekleştirilmesi için gerekli süreyi ve maliyeti en alt düzeye indirme isteğinden kaynaklanmaktadır. Bir çok işlemler gerçekte anahtar gibi davranan transistörler tarafından yapılır. Bir transistörde hız, anahtarlama ve harcanan gücün kontrolündeki hassaslık, aygıt tarafından yapılan her işlem başına düşen maliyeti ve zamanı belirler. Kuantum ilkelerine dayalı bir transistör boyutları küçük olduğu için daha hızlı olabilir ve alışılmış transistörlere göre daha az güç harcayabilir, ayrıca kuantum fenomenine özgü bazı etkiler nedeniyle de çok yüksek kontrol olanağı yaratabilir.

Bu nitelikleri en iyi şekilde görebilmek için alışılmış transistörlerin performansı ile karşılaştırmak gerekir. Bugün en yaygın olarak kullanılan transistörler, alan etkisi transistörleri veya kısaca FETlerdir. Bu aygıtlar elektrik yükünün iletilmesini sağlayacak şekilde katkılanmış yarıiletken malzemelerden yapılmıştır. Yük taşıyıcıları negatif yük taşıyan elektronlar veya pozitif delik ("hole")lerdir. Yük taşıyıcı olarak elektron kullanan yarıiletkenlere negatif katkı ("n-doped") ve yükleri delikler yardımıyla taşıyan yarıiletkenlere ise pozitif katkı ("p-doped") denir. Silikon tümleşik devrelerin geleneksel malzemesi olmuştur, fakat daha hızlı olan galyum arsenit (GaAs) transistörler de yapılmıştır.

Bu iki tip transistörlerin yapıları pek farklı değildir (Şekil.) Tipik bir silikon FETle kaynak ("source") denilen n-katkılı bir bölge yine n-katkılı akaç ("drain") tan p- katkılı bir kanalla ayrılmıştır. Kanalın tepesine p- katkılı silikonla doğrudan teması önlemek için yalıtkan bir silikon oksitle ayrılmış durumda geçit ("gate") denilen metal bir elektrot vardır. (Buradaki met al-oksit-yarı iletken düzenlemesi n-MOS, p-MOS, ve MOSFET gibi bir çok kısaltmanın kaynağıdır). Akaca pozitif bir gerilim uygulandığında geçide de zayıf bir pozitif gerilim uygulanarak elektronlar geçidin altındaki silikon kanalda biriktirilir ve iki n- katkılı bölge arasında negatif yük taşıyıcı bir köprü oluşur. Terstenim ("inversion") tabakası denilen bu köprü j elektronların akaçtaki pozitif gerilime doğru akmasına olanak sağlar. Oluşan akım, geçit üzerindeki gerilimi kaldırarak yani terslenim tabakasındaki elektronları dağıtarak kesilebilir.

Galyum arsenit transistörde de bir geçit elektrodu, kaynak ve akaç olarak kullanılabilecek uçları vardır, fakat bu transistörde alt tabakadaki n- katkılı bölge sınırlanmamıştır. Geçit ve akaca pozitif bir gerilim uygulandığında elektronlar kaynaktan serbestçe akmaktadır, geçide negatif bir gerilim uygulanırsa altındaki elektronları itmekte ve iletim yolunu kapamaktadır.

Her iki transistörde de üç bağlantı ucu bulunmakta, geçit üzerindeki gerilim ayarlanarak anahtarlama yapılmaktadır. Bu aygıtlar şu andaki boyutlarda düzgün çalışmaktadır ancak boyutlardaki küçülmeye birlikte anahtarlama düzeyleri arasındaki ayırım ortadan, kalkmaktadır. Küçük ölçeklerde kaçak akım transistörlerin tamamen "açık" ("OFF") olmasını engellemekte aynı zamanda gereksiz güç harcanmasına neden olmaktadır. Yarıiletkenlerdeki bulaşık maddeler ve kristal yapıdaki bozukluklar elek-

tronların saçılmasını sağlayarak hem iletimi hem de anahtarlama hızını yavaşlatmaktadır. Bütün yararlarına rağmen bugünkü FET'in bir problemi vardır: Boyutlarının küçüldüğü ölçüde anahtarlama yeteneği de kötüleşmektedir.

Kuantum yarıiletken aygıtlar nitel olarak değişik şekilde çalışacakları için alışılmış transistörlerin hiç bir zaman ulaşamayacakları kadar küçük boyutlarda daha hassas ve etkili anahtarlama kontrolü vaat etmektedir. Bazı kuantum yarıiletken aygıtlar negatif çıkarım ("differential") direnci göstermektedir. Yani gerilim artırıldığında akımın azaldığı bazı gerilim aralıkları vardır. Akım-gerilim grafiği üzerinde, bu özellik akım tepesi ("peak") ve akım vadisi olarak gözükmektedir. (Şekil 2). Negatif çıkarım direnci, bir fizikçi için, çoğu zaman kuantum etkilerinin deneysel bir aygıtta çalışır durumda olduğunun tek göstergesidir.

Kuantum etkilerinin en can alıcı noktasının oluşturan kolay bulunmaz görüngü, elektronların dalgalı karakteridir. Kuantum kuramı elektronların dalga boylarıyla karşılaştırılabilir boyutlara hapsedildiği ya da sınırlandırıldığı zaman dalga gibi davranacağını söylemektedir. Bu nedenle kuantum aygıtlarının en az bir boyutu elektronun dalga boyuyla karşılaştırılabilir uzunlukta olmalıdır. Oda sıcaklığında galyum arsenit içinde bu dalga boyu sadece 200 Angstromdur. Elektronları sınırlayabilecek bariyerler fiziksel değil enerji bariyerleridir. Bütün elektronların sınırlı bir enerjisi vardır, ve enerji düzeyleri olduğu bilinir; kullanılabilir enerji düzeyleri maddenin ayırıcı özelliğidir. Küçük aralıklarla ayrılan enerji düzeylerine bant denir. Birçok katıda her banttaki enerji yüzeyleri o kadar iç içedir ki bunlar neredeyse sürekli, ve bu nedenle elektronlar çok küçük enerji artışlarıyla düzey değiştirebilirler.

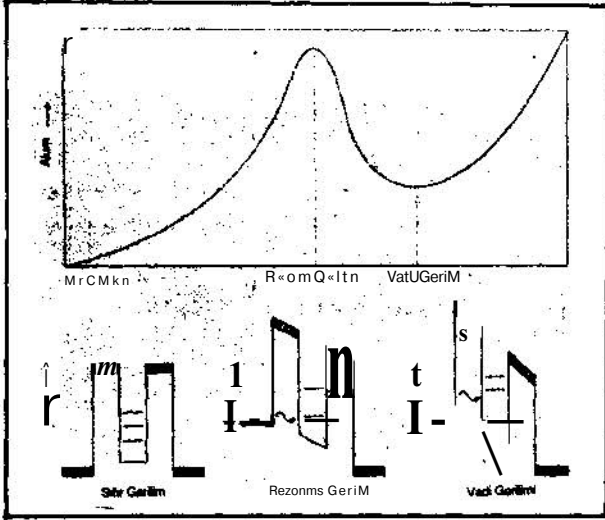
İki değişik madde arasında elektriğin iletilip iletilmeyeceğini enerji bantlarının göreceli konumları belirler. Bir elektronun bir maddeden diğerine enerji değişimi olmadan geçebilmesi için iki maddenin enerji bantlarının üstüste gelmesi gerekir. Özellikle, ilk maddede elektronların ortalama olarak bulunduğu düzeyin-Fermi düzeyi- ikinci maddedeki bir enerji bandına denk gelmesi gerekir. İkinci maddenin enerji bandı ilkinin Fermi düzeyinden yüksekse ikinci madde elektron hareketine karşı bariyer gibi davranır.

Örneğin, normal şartlarda alüminyum galyum arsenit (AlGaAs) n- katkılı galyum arsenitteki elektronlar için bir bariyer oluşturur. Elektronlar katkılı GaAs'ten AlGaAs'e geçemezler, çünkü AlGaAs'in iletim bandı ("conduction-band") GaAs'in Fermi düzeyinden çok daha yüksek bir enerji düzeyindedir. Ancak bariyerin fiziksel boyutları elektronların dalgalı yapısını ortaya çıkaracak şekilde değiştirilirse, elektron daha önce hareketine engel olan AlGaAs'in içinden tünelleme yapacaktır. Bundan dolayı iki katkılı GaAs tabakası arasında 200 Å'dan ince bir AlGaAs tabakası sandviçlenirse, elektronlar bu bariyerin içinde tünelleme yaparak diğer taraftaki GaAs'e ulaşacaklardır. Bu tünelleme bir çeşit kuantum etkisidir.

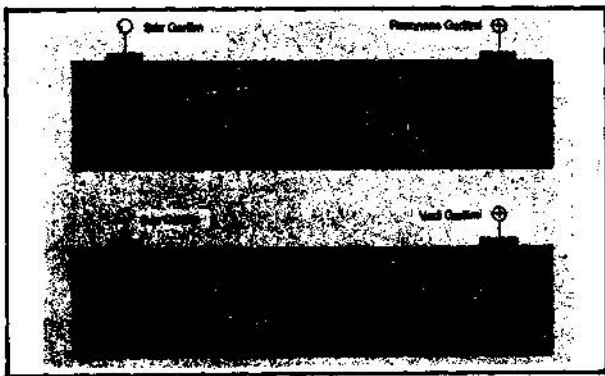
Bariyerler elektronları dalga boylarıyla karşılaştırabilir



1960'larda Watson Araştırma Merkezi'nde çalışanlar MOSFETlerin tersinim tabakasında tek boyutta kuantum sınırlaması olduğunu gördüler. Kuantum etkisinin aygıt üzerindeki etkileri çok az olduğundan bu kesifin tran-



Bir kauntum kuyusu aygıtının akım-gerilim karakteristiği galyum arsenit kayusunun enerji durumları yoğunluğu-nun kuantizasyonunu yansıtır. Böyle aygıtlar n-katlı galyum arsenit Özerkine uygulanan gerilimin arttığı sıra-da aygıt tarafından iletilen akımın azaldığı bir gerilim aralığı gösterirler. Bu durum bir gerilimde (rezonans gerilimi) n-katlı maddedeki elektronların ortalama enerjisi (sarı bandın üstü) kuyudaki kuantum durumlarından (kırmızı) biriyle çakışan bir düzeye gelir, fakat bu gerilimin üstünde katlı galyum arsenitin enerji bandı kuantum durumlarının arasında bulunur. Böylece rezonans geriliminde elektron (ok işaretli) alüminyum galyum arsenit enerji bariyerli içinden tünelleme yapabilirken, vadi geriliminde elektronun tünelleme yapabileceği hiç durum yoktur.



Temas noktalarından birine (üstte) rezonans gerilimi uygulandığında tünelleme yapan elektronlar (oklar) galyum arsenit kuantum kuyusu (kırmızı) içinde rezonans yaratırlar. Elektron dalgaları kuyu içinde leri geri yansır, akımı sayfanın üstündeki grafikte tepe oluşturacak şekilde artırır. Vadi geriliminde (altta) çok az tünelleme veya rezonans olur ve akım ani olarak azalır.

sistörün gelişmesine pek katkısı olmamıştır. Illinois Üniversitesinden Nick Holonyak Jr., kuantum kuyularını lazerlerin standart yapıtaşı olarak geliştirmiştir. 1970'lerde Esaki, Watson Araştırma Merkezi'nden Leroy L-Chang ve şu an Kuzey Carolina Tarımsal ve Teknik Üniversitesi'nde bulunan Raphael Tsu kuantum kuyularında rezonans tünellemesi üzerinde ilk deneyleri yaptılar. Kuantum etkileri yakın zamandaki modülasyon katlı FET'lere kadar transistörlerde kullanılmamıştır. Ancak bu aygıtlardaki kuantum kuyuları da sadece elektronların hareketliliğini artırmak için kullanılmıştır. Bunun dışında aygıt normal bir transistor gibi davranmaktadır.

Yüzeysel görünmekle birlikte bu gelişmeler kuantum yarıiletken aygıtların yapılması için gereken gelişmiş tekniklerin oluşmasına yardım etmiştir, böylece bu alana ilgi arttığında en azından deneysel yapıları gerçekleştirecek teknoloji elde bulunmaktaydı. Geçen dört senede sıfır boyutlu kuantum yapılarının gerçekleştirilmesi bütün dünyada araştırmacıların hedefi haline gelmiştir. AT&T, Bell Laboratuvarları, IBM, M.I.T., Cambridge Üniversitesi ve Philips Araştırma Laboratuvarları'nda silikon ve galyum arsenit aygıtlarında kuantum teli kullanılarak büyüklük kuantizasyonu ("size quantization") gösterilmiş, AT&T, Hughes Araştırma Laboratuvarları ve Glasgow Üniversitesi'nde de kuantum noktaları üretilmiş ve buralarda büyüklük kuantizasyonunun en açık belirtileri gözlenmiştir.

Kuantum noktalı bir yapısı olan, kullanılabilir bir yarıiletken aygıt henüz yapılmamıştır, fakat birkaç yıl içinde ilkörneklere görülmeye başlanacaktır. Devam etmekte olan araştırmaların hedeflerinden biri de halen çoğunlukla diyet olan aygıtların üçüncü bir bağlantılarla kuantum yapısını kullanılır hale getirerek üç terminalli aygıtlara çevirmektir. Böyle bir bağlantı yapıldığı takdirde kolayca aygıt üretilebilecek ve tünelleme ile ulaşılacak en yüksek anahtarlama hızına ulaşılacaktır. Ancak bu kadar ince tabakalar arasında güvenilir ve yapıyı bozmayan bağlantılar yapabilecek teknolojiyi tasarlamak için çok büyük yaratıcılık gerekmektedir.

Kuantum noktalarını küçük aralıklarla yanyana yerleştirerek elektronların bir noktadan diğerine-bir kuantize durumdan diğerine-tünelleme yapması da sağlanabilir. Bu düzenleme devre kontrolünde en son nokta olabilir, çünkü elektronların çıkış ve varış noktalarındaki enerji durumları kesinlikle belirlenebilir. Yine de asıl zorluk şu andaki yarıiletken ürünlerden yüzlerce defa küçük yapılar üretmek için gerekli müthiş çalışmadır. Bu derecedeki küçülme, endüstrinin kuantum aygıtlarını ticari varlıklar olarak görmesinden önce bağlantı ve yerleştirme ile ilgili çözülmesi gereken problemlere neden olacaktır.

Bu kadar çok sayıda araştırma grubunun bu problemleri teknoloji ile uğraşması, bu aygıtların müthiş potansiyelini ve gelecek yarıiletken devriminde yüklenecekleri büyük rolü göstermektedir. Bu gelişim içinde ortaya çıkacak harcama ve riskler hızlı gelişen elektronik endüstrisini yeniden yaşama döndürmek için göze alınmalıdır; ulaşılacak sonuçlar ancak tümleşik devrelere her bakımdan güvenen bir topluma yararlı olabilir.