

# Eksiltelen Boyutlar ve Yeni Teknolojiler

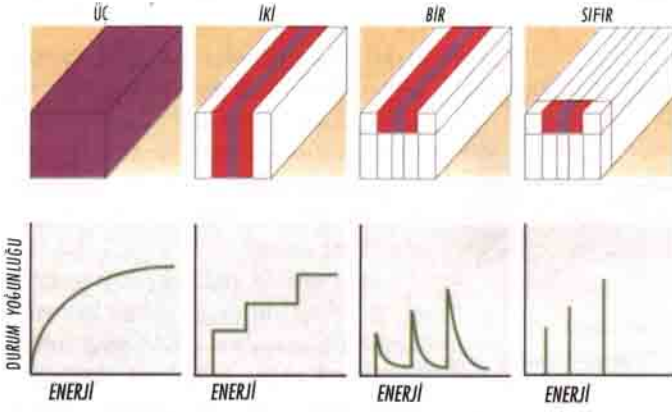
*Yıl 1989; Red Bank, New Jersey'de bir cuma gecesinin geç saatleri... Bell İletişim Araştırma Laboratuvarları (Bellcore) koridorlarında sessizlik hakim. Küçük bir laboratuvarında genç bir kadın bir dizi grafiğin bilgisayar ekranındaki yeşil parlaklığı altında yalnız başına çalışmaktadır. Hemen arkasındaki Argon lazerinden çıkan mavi-yeşil bir ışık huzmesi zikzaklar çize çize masanın üzerindeki merceklerden geçerek paslanmaz çelik bir silindir içine girip kaybolmaktadır. Buharlar tüten borudan akan sıvı helyum ile doldurulmakta olan bu silindirin içinde ulaşılan beş kekinden daha düşük sıcaklıkta, ışın doğrudan hedefini bulmaktadır: Yalnızca birkaç mm'lik, düz ve siyah bir karenin ortasındaki mikroskobik bir leke. Mavi-yeşil lazer tarafından uyarılan leke, yanıtını ısı ve muhteşem bir kırmızı noktacak belirir.*

*Her ne kadar sırtı dönük te olsa bu ışık oyunu Maria Brasil için büyük bir merak konusuydu. Leke ne kadar ışık yaymaktaydı? Hangi dalgaboyunda yaymaktaydı? Yanıtlar, Brasil'in bilgisayar ekranında yavaş yavaş biriken verilerden çıktı. Gördükleri, arkadaşlarını pek keyiflendirecekti. Çünkü lekeden çıkan ışınlar tam da yaratıcıları tarafından öngörülen frekanstaydı.*

**M**ADDENİN atom yapısının kuantum mekaniğinin yasaları yardımıyla incelenmesi yeni bir konu değildir. Ancak, yarı-iletken maddelerin elektronik yapılarının laboratuvarında tek tek atomlar işlenerek düzenlenmesi son yıllarda ortaya çıkan, çarpıcı teknolojik gelişmelerden birisi olmuştur. Önceleri atomları tek tek hareket ettirmek bir laboratuvar eğlencesi gibi görülürken, artık aynı cinsten veya farklı birkaç cinsten ibaret olan atomları bir ince katman veya bir

eğri üzerine dizerek yeni yapıların oluşturulması pratikte giderek önem kazanan bir uygulama haline dönmüş durumda. Araştırmacılar, artık bir-iki atom kalınlığındaki katmanların yapılarını ve bileşenlerini tam olarak kontrol edebilmekte ve böylece istenen elektronik nitelikleri taşıyan bir bileşimi tasarlayıp laboratuvarında yapabilmektedirler.

İlk kez 1989'da ABD'de Bell İletişim Araştırma Laboratuvarları'nda (Bellcore) bu yeni teknolojiler ile oluşturulan tipik bir kırmızı-ışık yayıcısındaki (red-light emitter) elektronlar ince katmanlar için-



Bir malzemenin boyutları, malzemeyi daha yüksek enerjili elektronlara sahip başka bir malzemenin iki katmanı arasında sıkıştırmak yoluyla eksiltilebilir. Bu sınırlama, elektronun durum yoğunluğunu ya da belirli enerji düzeylerini değiştirir (solda).

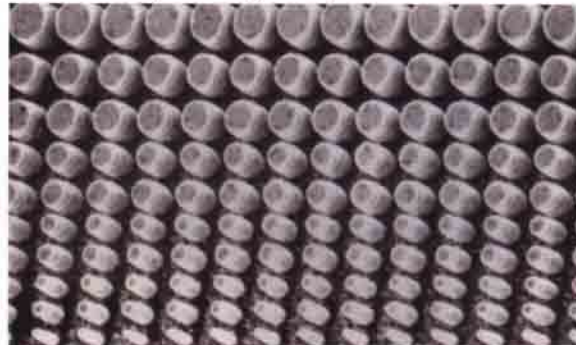
de harekete kısıtlandırılmışlardır. Bir kırmızı-ışık yayıcısı, 6 mikron yüksekliğinde, 1 mikron çapında katmanlı, silindirik yapıya sahip, minik bir yüzeyden yayıcı lazerdir. Lazer etkisi, bu silindirik yapının merkezindeki kuantum kuyusuna ait bağlı durum enerjisinden kaynaklanmaktadır. Katmanlar aynı zamanda ayna işlevi görmekte ve silindir ekseninde boyunca lazer ışığının sürekli yansımalarını sağlamaktadırlar. Bellcore'da yapılmış olan bu mikrolazerler, tabanlarındaki saydam katmandan geçen birkaç miliwatt gücünde kızılötesi ışık yayabilmektedirler.

Bellcore'un bir kum tanesinden daha küçük olan kırmızı-ışık yayıcısı, "kuantum cihazları" olarak anılacak olan optik ve elektronik cihazlar için yepyeni bir dönemin ilk habercisiydiler. Aslında son yıllarda maddenin atomik boyutta izlenmesi ve işlenmesi konusunda şaşırtıcı gelişmeler olmuş, hatta California'daki IBM Almaden Araştırma Merkezindeki araştırmacılar, Taramalı Tünelleme Mikroskopunu (TTM) kullanarak firmalarının isimlerini Ksenon atomlarıyla yazmayı başarmışlardı.

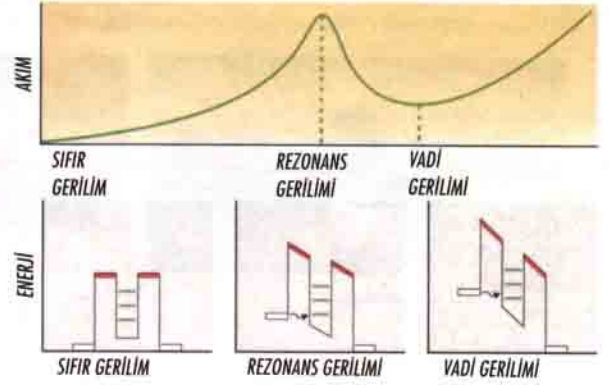
Bir kırmızı-ışık yayıcısında veya genelde bir kuantum cihazında görülen lazer etkisinden sorumlu olan kuantum kuyusu, yarı-iletken içerisinde elektronların hareketini kısıtlayarak oluşturulmaktadır. Aslında elektronlar yarı-iletken malzeme içerisinde fiziksel engellerle sınırlandırılmamışlardır. Elektronların hareketini bir düzleme kısıtlamak için yapılan; yüksek enerjili elektronlara sahip iki malzeme dilimi arasına düşük enerjili elektronlarla dolu bir malzeme sıkıştırma. Kuantum

sınırlandırması adı verilen bu süreç ile iki boyutlu bir yüzeyden daha düşük boyutlu yapılar elde etmek de mümkün. Bellcore'un ışık yayıcısındaki ince düzlemler yalnızca iki boyutludur. Bu düzlemlerden kesilecek bir şerit, tek boyutlu bir tel olacaktır. Ulaşılabilecek en son küçülme de; tek boyutlu bu tellerden sıfır boyutlu kuantum noktaları oluşturmak olacaktır.

Kuantum sınırlandırması adı verilen bu süreçle, bir malzemenin boyutunu eksiltmek, malzeme içindeki elektronları kısıtlanmamış haldeki enerji durumlarından farklı enerji düzeylerinde bulunmaya zorlar. "Kuantum Cihazları" araştırmalarının temelinde de olağan dışı elektron enerji düzeylerine sahip malzemeler oluşturmak yatıyor. Araştırmacılar, bir yapının fiziksel boyutunu kontrol ederek, elektronun enerji spektrumunda öngörülebilir değişiklikler gerçekleştirmektedirler. Bu yolla, yaratılan malzemenin elektronik özelliklerini istenilen niteliklere harfi harfine ayarlamak olanaklı hale gelmektedir. Boyut sayısı azaldıkça da bu ayarlama daha kesin olmaktadır. Bu aşamada sıfır boyutlu bir kuantum noktası, sipariş üzerine hazırlanmış bir atom gibi düşünülebilir.



Bellcore'da üretilen mikroskopik lazerler



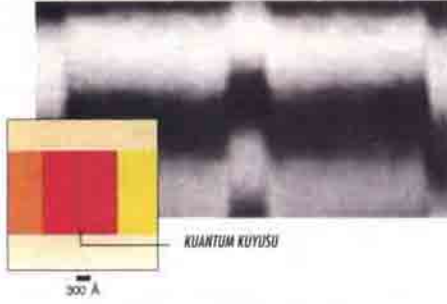
Şekilde, yeşil enerji düzeyleriyle gösterilen ve bir kuantum kuyusu tarafından iletilen akım (sağda), gelen elektronların enerji düzeyleri eşitlendiğinde ya da kuantum kuyusunun bir enerji düzeyiyle rezonansa geldiğinde tepe noktasına ulaşır.

Bu modern simya sayesinde, elektronik ve optik cihazlar alanında yepyeni bir yol açılmış oluyor. Şu anda bilgisayarda kullanılan basit ikili sistemli elektronik anahtarlama yöntemi yerine çoklu sistemli anahtarlama artık bir düşügedir. Yani çok daha güçlü bir bilgisayar mantık yapısı oluşturulacak, inanılmaz derecede hızlı ve küçük entegre devrelerin yapıtaşları geliştirilecektir. Elektronik endüstrisi ve entegre devreler ortak bir kaderi paylaşır görünüyolar. Devreler küçüldükçe endüstri büyümekte ve bu gelişimin, daha çok devrenin tek bir çipin üzerine sığdırılmasına kadar süreceği söylenmektedir. Bazı araştırmacılar "Tek bir çipin üzerinde süper bilgisayar" oluşturmaktan dahi söz etmektedirler. Bir diğer amaç da, yüksek verimlilikte minik lazerler üretebilmek. Böylelikle şu anda fiberoptik kablolarda taşınan bilgilerden çok daha büyük miktarda bilgiyi iletmek mümkün olacaktır. Bu düzeyde bir veri iletişimi sayesinde akıl almaz miktarlarda video, bilgisayar ve iletişim servisi doğrudan evlere ve işyerlerine yapılabilecektir. Ve en önemlisi, bu yeni tür elektronik cihazlarla yeni tip lazerlerin bir arada kullanılması sonucu uzun zamandır hayalleri kurulan fotonlarla elektronları buluşturan optoelektronik devreler geliştirilecektir. Bu da yine bilgisayarlar ile iletişim devreleri için daha güçlü elemanlar demektir.

Bellcore laboratuvarları, bu konuda çalışan tek kuruluş değildir. Amerikan Ulusal Bilim Vakfı (NSF) Santa Barbara'daki California Üniversitesi'nde kuantum araştırmalarına yönelik bir merkezi desteklemektedir. IBM ve



**İKİ BOYUT: KUANTUM KUYUSU** Spectra Diyod Laboratuvarları'nda üretilen bu lazerde birlikte tek bir kuantum kuyusu (altta solda) kullanıldığında lazer etkisi artırılmış olur. Katılanmış dış katmanlar, sonradan birleşen ve ışık yayan elektronlar ile desikleri kuantum kuyusuna enjekte ederler. Kuantum kuyusu, kendisini saran katmanlara göre daha az alüminyum içerdiği için band aralığı daha düşük bir malzemedir.



- GALYUM ARSENİT
- ALÜMİNYUM GALYUM ARSENİT
- ALÜMİNYUM GALYUM ARSENİT EKŞİ KATKILANMIŞ
- ALÜMİNYUM GALYUM ARSENİT ARTI KATKILANMIŞ

AT&T Bell laboratuvarları -diğerleri arasında- önemli gelişmeler gösteren kuruluşlardır. Almanya, İngiltere, Fransa ve tabii ki Japonya'daki araştırmacılar da bu alanda çok önemli adımlar atmaktadırlar. Ve tüm araştırmacıların yüz yüze geldikleri temel konu, Kuantum kuyularını, tellerini ve noktalarını tüm bu yeni malzemeleri işleyen cihazlar haline dönüştürebilmektir.

## Boyut Sayısını Eksiltmek

Amaçları; elektronları boyutsal olarak sınırlı alanlara hapseden yapılar oluşturmak olan IBM'den Leroy Chang ve arkadaşlarına göre; bir elektroniği iki boyutta sınırlandırmak herşeyi değiştirir.

Daha az boyutlu bir malzeme yaratılabilmek için, araştırmacılar kuantum mekaniği ile ilgilenmelidirler. Herhangi bir üç boyutlu yarı-iletken, elektrik gerilimi uygulanarak malzemeye enerji yüklendiğinde elektronlar, sürekli bir enerji aralığında farklı enerji düzeylerinde yer alabilirler. Bu nedenle araştırmacılar, belirledikleri bir enerji düzeyine ayarlama yapamamakta ve karşılıklarına çıkan durumu (enerji düzeylerini) kabullenmek zorunda kalmaktadırlar. Burada kuantum mekaniğine göre elektronların hem parçacık hem de dalga niteliklerini aynı anda taşıdıklarını hatırlayalım. Elektronların dalga niteliklerini belirleyen değişken  $2,423 \times 10^{-10}$  cm değerindeki Compton dalgaboyudur.

Üç boyutlu bir dikdörtgenler prizması şeklinde bir yarı-iletken malzeme, karşılıklı iki yüzeyi arasında bastırarak sıkıştırırsak ve kalınlığını bir elektron dalgaboyu mertebesine kadar düşürürsek, elektronları etkin olarak bir düzlem içerisinde harekete sınırlamış oluruz. Üç boyutlu bir dikdörtgen prizma

içine sınırlanmış elektronların enerji spektrumları bilinmektedir. Yukarıdaki gibi iki boyutlu bir yapı içine sınırlandırılacak elektronların enerji spektrumu bundan farklı çıkmaktadır. Yani elektronlar bir düzeyden diğerine, üç boyutlu yapıdaki sürekli enerji spektrumundan farklı olarak, adım benzeri bir şekilde geçmek zorundadır. Aynı şekilde iki boyutlu bir yapıdan tek boyutlu başka bir yapıya geçildiğinde de enerji spektrumu değişmektedir. Bu yolla ulaşılabilecek en düşük boyut olan sıfır boyut, bir kuantum nokta yapısına karşılık gelir.

Katmanların hangi kalınlıkta, hangi enerji düzeyini yükledikleri üzerinde sürdürülen çalışmalar ile araştırmacılar, malzemenin elektronik karakterini tam olarak tasarımılabilmektedirler.

## İki Boyut: Kuantum Kuyusu

1974 yılında IBM çalışanları tarafından bulunan bazı malzemeler, daha önceden öngörülen kuantumlu enerji düzeylerine sahip olmaları nedeniyle, kuantum sınırlandırmasının bir göstergesiydiler. Zamanla Raymond Dingle ve Bell Laboratuvarlarındaki arkadaşları, oluşturdukları tek bir kuantum kuyusuna lazer ışığı tuttular ve malzemenin

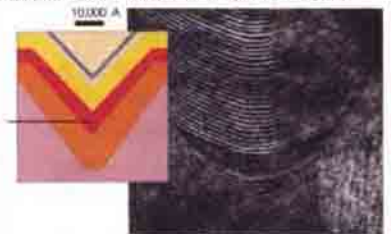
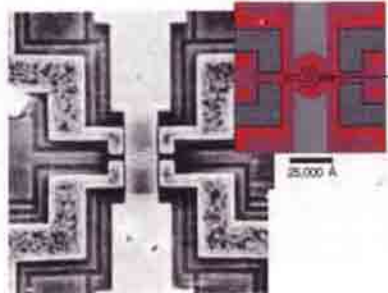
farklı ama öngörülen frekanslarda ışık soğurduğunu buldular. Bu kuantum sınırlandırmasının bir başka göstergesidir. Bundan kısa bir süre sonra Esaki ve Chang tarafından ilk gerçek kuantum kuyusu cihazı üretilebildi: Bir rezonans tünelleme diyodu.

Aynı yıllarda diğer birçok araştırmacı, elektronların dikey olarak katmanlanmış bir malzeme içinde, katmandan bir diğer katmana düşey doğrultuda hareketi yerine, yatay iki katmanın arakesitiyle belirlenen düzlem içinde harekete sınırlandıkları iki boyutlu elektron gazları (2BEG) ile ilgilendiler. Böyle 2BEG'lerde yalnızca birkaç Kelvin sıcaklıkta elektronlar çok yüksek hızlara ulaşabilmekte, dolayısıyla en hızlı transistörlerin temelini oluşturmaktadırlar.

1980'li yılların başında araştırmacılar, yüksek duyarlılıkta fabrikasyon araçlarıyla donanmış olarak kuantum kuyuları problemlerine geri döndüler. Kuantum kuyularından lazer gibi yararlanabilmek için yeni cihazlar tasarlamaya başladılar. Yani kuantum kuyuları, elektriksel veya optik olarak uyarıldıklarında ışık yayan yarı-iletken lazerler gibi davranmalıydılar. Bir kuantum kuyusunu lazer haline getirmenin çok önemli bir avantajı vardır. Böyle bir cihaz, herhangi bir standart lazerin gerektirdiğinden çok daha küçük bir akımla beslenerek çok daha verimli bir şekilde ışık verilmektedir ve bu "kuantum lazerleri" çok daha az ısınmaktadır. Bu özellik, kuantum lazerlerinin fiziksel boyutlarının küçüklüğü ile beraber değerlendirildiğinde pek çok bu farklı türde cihazın hep birlikte küçük bir bölgede birarada çalışabileceği anlamına gelir. Böylece, yüzeyden ışık yayıcılar kuantum kuyularıyla birlikte işleyerek, optoelektronik cihazların temel taşları haline gelebilirler.



**TEK BOYUT: KUANTUM TELİ** IBM'de yapılmış olan ve bir manyetik alanda elektriksel ölçümler yapmak için kullanılan kuantum tel halkası, saydam bir metal katman ile örtülmüştür (altta solda). Bellcore'da üretilen kuantum telleri, yarı-iletken bileşenin içindeki V-sekinde bir oluğun en alt kısmına yerleştirilmiştir (altta sağda).



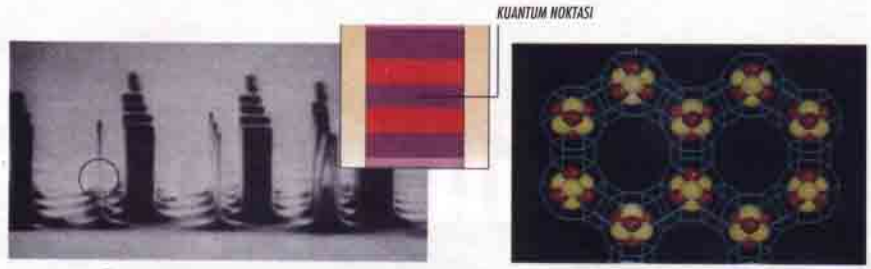
- GALYUM ARSENİT
- ALÜMİNYUM GALYUM ARSENİT
- GALYUM ARSENİT EKŞİ KATKILANMIŞ
- GALYUM ARSENİT ARTI KATKILANMIŞ
- ALÜMİNYUM GALYUM ARSENİT EKŞİ KATKILANMIŞ
- ALÜMİNYUM GALYUM ARSENİT ARTI KATKILANMIŞ
- METAL



Bir kuantum noktası içeren, indiyum fosfit yarı-iletken yapı. Bu yapıya gerilim uygulandığında elektronlar, indiyum galyum arsenitten yapılmış olan, şekilde de koyu morla gösterilen ağız bölgesinde tutulurlar. Elektronlar, bu şekilde sınırlandıklarında alışılmışın dışında özellikler göstermektedir.

Bellcore laboratuvarları gibi kuantum kuyularıyla ilgili araştırmalar yürüten Texas Instrument Laboratuvarları'nda, transistörlerle ilgili çalışmalar da sürdürülmekte. Boyuttan dolayı, kuantum mekaniği ilkelerine göre çalışan bir transistör, standart transistörlerden daha az enerjiye gereksinmekte ve kuantum mekaniğinin yasalarına özgü etkilerle daha çok kontrol olanağı sağlanabilmektedir.

Entegre devre tasarımcılarının temel hedefi, çiplerin boyutlarını, daha küçük transistörler ve anahtarlar yardımıyla küçültmektir. Ancak, devre boyutları elektron dalgaboyunun altına düştüğü zaman bu tür cihazlarda elektronların denetimi zor olmaktadır. Bu sorunların çözümüne yönelik çalışmalar yürüten Texas Instruments Şirketi, yakın gelecekte karmaşık mantık kullanan devre tasarımları geliştirebilmeyi umuyor. Bu da bugünkü örneklerinden kat kat küçük cihazlar yapmayı olası kılacak.



**SIFIR BOYUT: KUANTUM NOKTASI** AT&T Araştırmacıları tarafından üretilen noktalar altta solda, IBM'de üretilen ve kapasitör olarak kullanılabilen noktalar ise altta sağda görülmüyor. Bu tür yapılarda elektronlar, alüminyum arsenit ve alüminyum galyum arsenit katmanları arasındaki arakesitte sınırlanırlar. Transistör olarak kullanılabilen, Texas Instruments'in nokta dizileri, üstte solda görülmüyor.



- GALYUM ARSENİT
- ALÜMİNYUM GALYUM ARSENİT
- GALYUM ARSENİT EKSI KATKILANMIŞ
- İNDİYUM FOSFIT
- İNDİYUM GALYUM ARSENİT
- METAL

### Tek Boyut: Kuantum Teli

İki boyutun vaad ettiği bu türden yeni teknolojilere "bir" ve "sıfır" boyutlar çok daha üstün nitelikler ekleyecektir. Örneğin kuantum lazerleri; iki boyutlu örneklerine oranla çok daha düşük akımla çalışabilmekte ve çok daha az ısı yaymaktadırlar.

Laboratuvarda bir kuantum teli oluşturmanın bir yöntemi, basit olarak söyleysek, yarı-iletken bir malzeme üzerine V-şeklinde bir oluk açıp daha sonra V'nin tabanını daha küçük band aralığına sahip başka bir malzemeyi biriktirerek doldurmaktan ibarettir. Böylece oluşturulan lazerler; 0,65 mA'lık akım verildiğinde bile oda sıcaklığında ışınım yayabilmektedirler ki, bu standart lazerlerle karşılaştırıldığında son derece küçük bir akım şiddetidir.

### Sıfır Boyut: Kuantum Noktası

Boyutlardaki küçülmenin son durağında sıfır boyutlu kuantum noktaları bulunuyor. Aslında, yarı-iletken teknolojisi ile kuantum noktaları yapmak, karmaşıklığı üstel olarak artan bir çalışma gibi görünmekte. Ayrıca araştırmacılar, tek tek kuantum noktalarının kendi başlarına pek yararlı olmayacaklarını düşünmekte. Bu nedenle kuantum nokta kümeleri üreterek bunları yeni cihazlarla birleştirmenin yollarını arıyorlar.

Birçok üniversite ve kuruluştaki araştırmacılar, kuantum noktaları üretmek konusunda öncü çalışmalar yaptılar. İskoçya'da Glasgow Üniversitesi, Hollanda'da Delft Üniversitesi

ve ABD'de Texas Instruments başarılar elde etmiş gruplar arasındadır. Tek bir kuantum noktasını 1988 yılında elde eden TI çalışanları, herhangi bir diğer aletten yalıtılmış olması dolayısıyla "kuantum nokta işe yaramadı ama çalışıyor" dediler.

TI şirketindeki araştırmacılara göre en önemli sorun, kuantum noktalarının bir diğeriyle temasını sağlamak. Eğer bu başarılırsa, her bir kuantum noktası bir bilgisayar elemanı olarak yerleştirilebilir. Böyle her noktasının çok sayıda enerji düzeyi olması nedeniyle tek bir nokta, bir kaç normal transistörün yerini alabilir.

Bütün bu çalışmaları yürüten araştırmacıların ortak kanısı boyutlardaki eksilmenin süreceği ve sonunda kuantum noktalarına ulaşılacağı.

Noktaya ne zaman varılacağı konusu belirsiz, ancak zaman da gittikçe daralıyor. Yeryüzündeki iletişim ağlarını kuranlar, hatlardan daha fazla veri iletebilmek için çok daha verimli lazerler yapma zorunluluğunu duyuyorlar. Çip üreticileri kısa bir süre içinde artık, çiplerin üzerine ek sistemler yüklemek için geleneksel yöntemlerin yetersiz kalacağını söylemekte. Araştırmacılar, bir yenilik bulmak için "zamanın artık geldiği" nin bilincindedir.

İlhami Buğdaycı

Kaynak: Corcoran, E., "Diminishing Dimensions", Scientific American, Kasım 1990