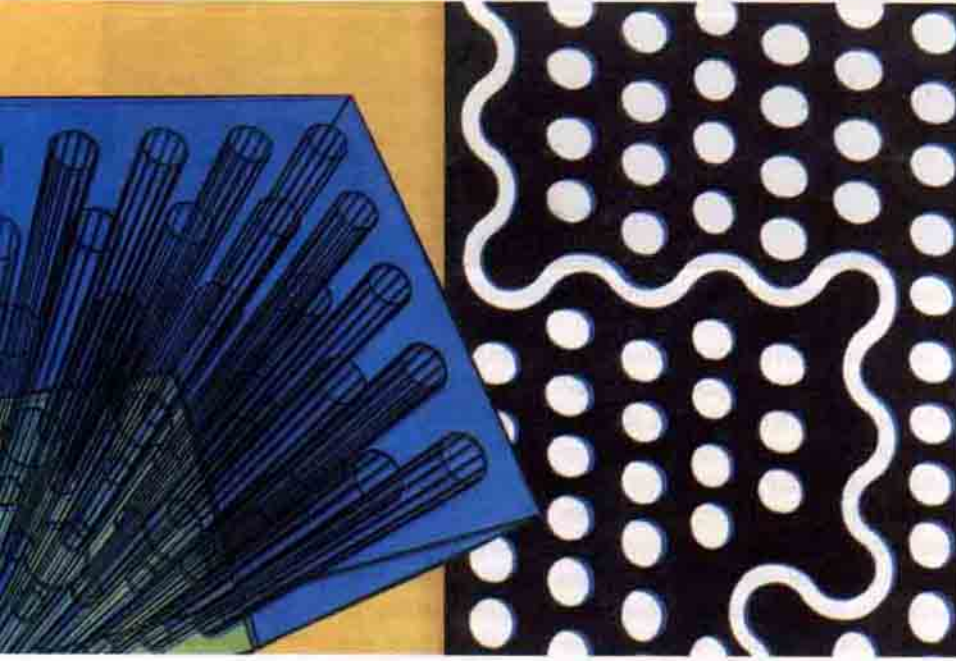


Optoelektronikte Yeni Bir Adım... Fotonik Kristaller



Band aralığı, elektronların yalnızca parçacık gibi değil, silikon atomlarını saçan dalgalar gibi de davranmaları yüzünden oluşur. Atomlar, kristal örgünün her kısmında düzenli bir yapı sergiler ve belli elektron enerjilerinde, elektron saçan dalgalar birbirlerini yok eder. Bu da, o enerjide elektron bulunma olasılığını ortadan kaldırır. Başka bir deyişle, elektronların sahip olabilecekleri enerjiler arasında farklar vardır.

İlke olarak, aynı yönde devinen ışığı durduracak hiçbir şey yoktur. Ancak bunun işe yaraması için, fotonik kristalin periyodik örgüsünün boyutlarının ışığın dalgaboyuyla orantılı olması gerekir. Modern optik iletişim sistemleri 1.3 ve 1.5 mikrometredeki kızılaltına yakın dalgaboylarında işlevseldir. Yani örgü, bu dalgaboylarında, yaklaşık 0.5 mikrometrelik bir alana gereksinim duyar; bu da, sıradan kristallerin örgü alanından binlerce kez daha fazladır. Bu rakam, atom ya da molekülle kıyaslandığında büyük olsa da, ortalama insan saçı çapının yaklaşık yüzde biri kadardır. Hatta, çip yapımcıları tarafından geliştirilen litograf teknikleriyle bile bu kadar küçük ölçekte, üç boyutlu bir yapı oluşturmak oldukça zor. Bu işi olabilirdiğince kolay hale getirebilmek amacıyla, dalgaboyları 1 cm civarında olan mikrodalgalar için ilk fotonik kristaller oluşturulmaya çalışılıyor. Mikrodalgalarla çalışan fotonik bir kristalin de, milimetrelerle ölçülen bir örgüsü olmalı.

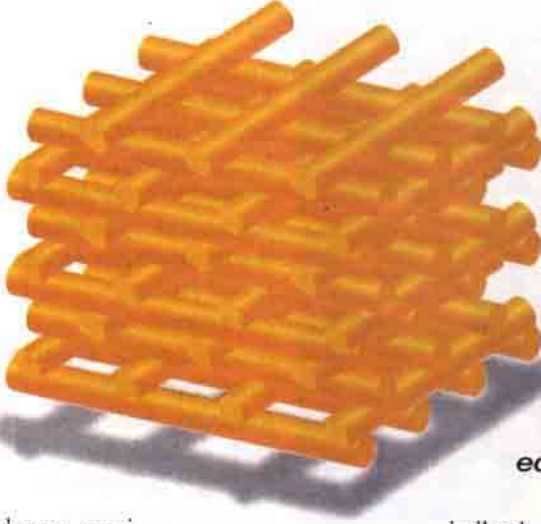
İlk fotonik kristali New Jersey'deki bir telekomünikasyon araştırma şirketinde çalışan Eli Yablonovitch 1991 yılında oluşturmayı başardı. Yablonovitch bunu akla gelebilecek en basit yöntemle yapmıştı. Stycast-12 olarak bilinen ticari bir malzemeden alınan katı haldeki bir levhayla işe başlayan Yablonovitch, blokun üst yüzeyinde üç grup uzun ve eğimli delik açmak için sıradan bir matkap kullandı. Stycast-12'nin seçilmesinin nedeni mikrodalgalara geçişten olmasındı. Açılan delikler, yüzeyin altında üç boyutlu, periyodik ve karmaşık bir

YARI-İLETKENLER olmasaydı modern dünya farklı olurdu herhalde. Çünkü onlar olmadan, bilgisayar çipleri, internet, hatta diskçalar ya da transistörlü radyolar bile olmayacaktı. Yarı-iletkenler, gündelik yaşamımızdaki yerlerini hak ediyorlar. Çünkü onlar sayesinde, elektrik akımları (dolayısıyla elektronların hareketi) üzerinde hızlı ve kesin kontrol sağlanabiliyor. Ancak, kontrol edilen tek parçacık elektron olmayabilir. Fizikçiler, fotonlara da (ışığı oluşturan parçacıklar) aynı yöntemi uygulayabileceklerine inanıyorlar. Çünkü, elektronlar için yarı-iletkenler neyse, fotonik kristal olarak adlandırılan malzemenin de fotonlar için aynı anlamı taşıdığı düşünülüyor. Şimdilerde, teoride işe yarar gözükken bu fikrin uygulanabilirliği araştırılıyor.

Gerçekte uygulamaya ilişkin sorunların çözümü oldukça zor. Silikon, kolay bulunabilen doğal bir malzeme, ama fotonik kristal, belli aralıktaki frekansları geçirmeyecek biçimde üretilmesi gereken karmaşık bir yapı. Ancak, kristalin yapısında bir kusur olduğunda oldukça ilginç bir tablo ortaya çıkıyor.

"Yasak" frekanstaki ışık, kristalin kusurlu kesiminde hapsolüyor ve başka hiçbir yere hareket edemiyor. Bu şekilde hapsolmüş ışık, minyatür bir lazer ya da fotonik anahtar için bir temel oluşturabilir. Kusurlu kısmın oluşturduğu hat, ışığın bir cihazdan diğerine aktarılmasında kesin sonuç veren bir dalga kılavuzu işlevi görebilir.

Peki, yarı-iletkenler ve onların optik benzerleri nasıl işliyor? Saf yarı-iletken kristalde, elektronlarda olmayan belli enerji aralıkları vardır. Bu yasak bölge, band aralığı olarak adlandırılıyor. Band aralığından daha düşük seviyedeki tüm enerji durumları doludur. Elektronların madde çevresinde devinebilmelerinin koşulu, farklı enerji düzeylerine geçiş yapmaları olduğundan, bu durumda devinimleri ve dolayısıyla malzemenin iletkenliği kısıtlanmış olur. Yarı-iletkene tekil atomik katkılar eklendiğinde, band aralığında yeni, lokalize enerji durumları oluşur. Bu durumlarda, elektronların tam olarak ne zaman ve nerede devinebileceklerini tanımlamak yoluyla silikonun elektronik özelliklerini kontrol etmek mümkün olabilir.



Kesilen ve ince silikon levhalar üzerine konan şeritlerin üst üste yerleştirilmesiyle oluşan bu yapının kullanılmasıyla, 600 mikrometre dalgaboyuyla ışığı dışarıda bırakan üç boyutlu fotonik bir kristal elde edilebilir.

desen, yani fotonik kristal yapısı oluşturarak kesiyordu. Sadece delikleri açmak bile, maddeyi, mikrodalgaları yansıtabilecek mükemmel bir ayna haline getirir.

Axel Scherer ile birlikte çalışan Yablonovitch, şu sıralar, oluşan yapının büyüklüğünü mikrometre düzeyine indirmeye çalışıyor. Katı maddelerde küçük delikler açmak için kullanılacak çeşitli litografi ve oyma teknikleri var. Ancak, hedeflenen çap küçüldükçe, onu kontrol etmek de zorlaşır; özellikle de birkaç mikrometreden biraz derin delikler açmak söz konusuysa... Geçtiğimiz yaz Girit'te yapılan bilimsel toplantıda Yablonovitch, çalışma grubunun, galyum arsenid levhasının üst katmanlarından birkaçına mikrometrelik delikler açmayı başardığını belirtmişti. Şu anda da, bütün bir yapı oluşturabilmek için kullandıkları yöntemi iyileştirmeye çalışıyorlar.

Çapraz Hatlar

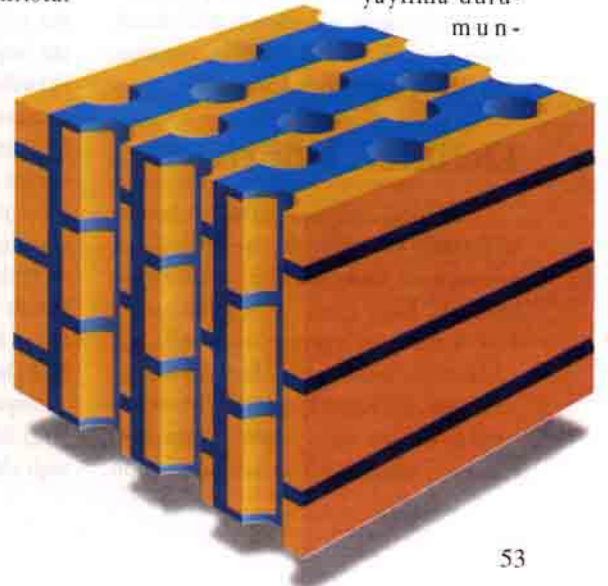
Almanya, Mainz'de bulunan Mikro-teknoloji Enstitüsü'nden Gregor Feiertag ve meslektaşları ise galyum arsenid yerine, genelde X-ışını litografisinde kullanılan polimetilakrilat polimeri yeğliyorlar. Bu maddenin kırılma indisi görece az olduğundan, madde ve hava arasındaki zıtlık, fotonların etkin biçimde saçılmaları ve tam bir fotonik band aralığı oluşturmaları için yeterli değil. Feiertag ve çalışma grubu da, Yablonovitch'in yaptığı gibi, delikler açarak onları daha yüksek kırılma indisi olan bir maddeyle doldurdular. Ardından, dış yüzeyi çıkardılar ve geriye, dalgaboyu 200 mikrometre olan ışık için fotonik kristal gibi davranan bir çapraz kolon ağı kaldı. Yani, Yablonovitch'in hava kullandığı aşamada, Feiertag'ın grubu katı bir madde

kullandı. Araştırmacılar, Feiertag'ın elde ettiği birkaç mikrometre uzunluğundaki kolonları geliştirmeye çalışıyorlar.

Öte yandan, Iowa Eyalet Üniversitesi'nden Kai-Ming Ho ve meslektaşları daha farklı bir yaklaşımı benimsediler. Malzemeden kestikleri ince şeritleri ince silikon levhalar üzerine yerleştirdiler. Ardından bu şeritleri, ikincisi ilkiyle dik açı yapacak şekilde üst üste dizdiler. Üçüncü katman da aynı şekilde kurgulandı, fakat bir çıkıntı oluşturması sağlandı. Sonuçta elde ettikleri, 600 mikrometre, yani, üç boyutlu bir kristal için gereken asgari dalgaboyuyla ışığı dışarıda bırakan üç boyutlu fotonik bir kristaldi.

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (MIT) çalışanlar ise daha farklı bir yöntem izliyorlar. Hedef, ideal yapıyı aramak ve uygun bir ölçekte imal edilip edilemeyeceği üzerinde çalışmak yerine, var olan mikrolitografi tekniklerini kullanarak fotonik kristal oluşturmak. Bu amaçla ilk önce, malzemelerin arasındaki kesişmelerden ışığı yayacak iki boyutlu formlar oluşturmak için, litografi kullanarak silikon ve silikon dioksit gibi iki farklı malzemeyi üst üste koymayı planladılar. Üç boyutlu kristal

Silikon ve silikon dioksit gibi iki farklı malzemenin birleşimiyle, bu katmanlı yapı boyunca açılacak 0.33 mikrometre genişliğindeki dikey delikler, optik haberleşme sistemlerinde oldukça sıkça kullanılan 1.5 mikrometre dalgaboyundaki kızılaltı ışıkta çalışabilecek fotonik bir kristal oluşturabilir.



oluşturabilmek içinse, katmanlı yapı boyunca delikler açılacaktı. Sadece bir grup delik açılacağından ve bu delikler eğimli değil de dikey olacaklarından, işlem diğer delme tekniklerine kıyasla basitleşiyordu. On katmanın fotonik bir band aralığı oluşturmak için yeterli olacağı hesaplandı ve bu tasarım kullanılarak 1.5 mikrometre dalgaboyunda çalışabilecek bir kristal prototipi oluşturma çalışmalarına başladılar.

İnce Ayar Yapmak

Uygun band aralığında fotonik kristal oluşturmayı başardıktan sonraki adım, yapısal bir kusur oluşturmak için bazı malzemeleri eklemek ya da çıkarmak olmalı. Malzeme eklemek, enerjisi fotonik band aralığının neredeyse en üstündeki ışığı, malzeme çıkarmak ise alt sınıra yakın ışığı hapsedecektir. Eklenen ya da çıkarılan malzemenin boyutu değişimlenerek frekans ayarlanabilir.

Mikroboşluklar, oldukça etkin mikrolazer ve ışık salan diyotların elde edilmesine olanak sağlar. Bunun nede-nini kavrayabilmek için, boşluğa birkaç atom yerleştirildiğinde ne olduğunu anlamak gerek. Atomun içindeki elektronlar kesin tanımlı enerji seviyelerinde yer alabilir ve atom enerji soğurduğunda elektronlardan biri, bir sonraki enerji düzeyine atlayabilir. Eski düzeyine geri döndüğünde ise, frekansı iki düzey arasındaki enerji farkına karşılık gelen bir ışık salar. Aynı şekilde, lazerde kendiliğinden yayılan bazı fotonlar, uyarılmış diğer atomları, tekdüze foton yayacak şekilde uyarır.

Bir lazerin etkinliği, uyarılmış atomların doğru enerjide ışık yayma olasılığına bağlıdır. Bu olasılık, foton dalgasının yayılma duru-

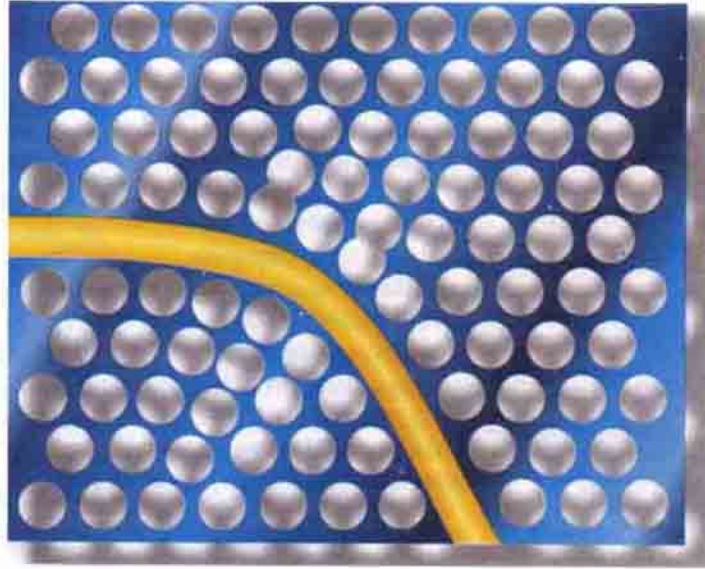
m u n -

da benimseyeceği değişik foton enerji dağılımlarının sayısıyla ilgilidir. Seçilebilen değişik dağılımların sayısı arttıkça, yayılma olasılığı da artar. Boşlukta, belli bir enerjiye sahip fotonun dağılımları, oldukça geniş bir alana yayılmıştır. Fotonun aniden hapsedilmesi, tüm boşluğu kaplayan dağılım yoğunluğunu artırır. Bu da, boşluktaki atomların, uyarılmış durumda kalmaktansa, bir foton yaymasını daha olası kılıyor. Mikroboşlukta, gerçek anlamda soğurulan tüm enerjinin, gereken frekansta yayılması gerekir; böylece etkinlik yüzde yüze yakın olur. Dolayısıyla bu cihazlar, çok az güç gerektirir. Boşluklar çok küçük olduğundan, birçoğu tek bir fotonik entegre devre üzerinde bir araya getirilerek sıkışık, etkin bir lazer oluşturulabilir. Işığın frekansı da, boşluklarla oynayarak ayarlanabilir.

Sonuç olarak, doğru dalgaboylarında işleyen üç boyutlu fotonik bir kristal oluşturulması gerekiyor; ama bu şekilde çalışabilecek bir mikroboşluk da yaratılabilir. Bu amaçla da, üç boyutlusundan daha kolay oluşturulabilecek bir ya da iki boyutlu fotonik kristallerle kalan boyutlardaki optik dağılımları hapsedmek için toplam iç yansımaların kullanılması öngörülmüyor. Tam yansıma, ışık, cam gibi yüksek kırılma indisine sahip bir maddeden geçerken, hava gibi kırılma indisi düşük bir madde içeren bir ara yüzeye çarptığında oluşur. Eğer kritik değerden daha düşük açıda çarparsa, tüm ışık cama geri yansır. İşte cam, optik lifle (fiber optik) böyle hapsedilir. Lifen içindeki kırılma indisi kaplamasından yüksek olduğundan, life kritik açıyla gelecek şekilde bir eğim verilmediği sürece ışık içeride kalır.

Delikten Köprü

MIT'deki çalışma grubu, tek boyutlu fotonik kristalleri iki boyutlu dalga kılavuzu ile birleştiren bir mikroboşluk tasarladı. Buna göre, dalga kılavuzu iki blok üzerine yerleştirilip, aralarında, havayla çevrili mikroskobik bir köprü oluşturulacak. Havanın kırılma indisi silikondan çok daha düşük olduğu için, toplam iç yansıma, dalga kılavuzu içinde



Fotonik kristalde kanal açılması, açılan kanalın deliklerinin periyodik dizilişinde bir kusur yaratmak için bazı malzemelerin eklenmesi ya da çıkarılmasıyla mümkündür. Bunu etkin bir dalga kılavuzu haline getiren ışık da sadece bu kanalın içinden geçebilir.

oluşur. Dalga kılavuzu boyunca delikler açmak, tek boyutlu fotonik band aralığı olan tek boyutlu periyodik bir yapı oluşumuna yol açar. Deliklerden bir tanesinin yerinde olmaması, yalnızca tek bir frekanstaki ışığı hapsedilebilir kılar. Bilgisayar simülasyonları, ışığın, kaçmasına olanak tanımayacak şekilde hapsedilebileceğini gösteriyor.

Bu tür bir yapının prototipleri, MIT'de Leslie Kolodziejcki ve çalışma arkadaşları tarafından zaten yapılmıştı. Bu çalışmada, 1 mikrometrelik ve ardından 0.5 mikrometrelik silikon katmanları, silikonun alt tabakasına yerleştirildi. Daha sonra, delinen silikon ve silikon dioksit katmanları asıl yapıdan yakılarak çıkarıldı ve arada ince bir şerit bırakıldı. Bir sonraki adım, silikon dioksidi bu şeridin alt kısmından ayırmak ve yarım mikrometre kalınlığında, 10 mikrometre uzunluğunda bir silikon köprüsü oluşturmaktır. Son olarak, tek boyutlu fotonik kristal oluşturmak üzere, silikon köprüsünün içine dikey konumda dört delik açıldı. Artık geriye, benzer yapıların oluşturulması ve test edilmesi kaldı.

MIT'de yapılan araştırmanın bir diğer yönü, kontrollü bir biçimde boşluktan boşluğa ışık geçirebilen bir cihaz geliştirebilmek. Silikon köprü yeterince kısaysa, başka bir deyişle, fazla delik kullanılmadıysa, ışığın bir kısmı kenarlardan dışarı sızabilir. Bu yöntem, yüzlerce parçanın tek bir çip üzerinde bir araya getirildiği optoelektronik entegre devrelerin "birbirine bağlanması"nda yararlı olabilir. Işık, yol aldığı sırada, fazla bir kayba uğramaksızın bu parçaların birinden diğerine geçebilmelidir. Konvansiyonel dalga kılavuzları, ışığı düz bir çizgi üzerinde götürmede oldukça kullanışlı olmalarına karşılık, bir eğim ile kar-

şılaştırıldığında aynı derecede etkin olamıyorlar. Bazı dalga kılavuzları da, yarıçapı 1 mikrometreden büyük olan kavislerde başarılı olamıyorlar. Bilgisayar çiplerinin sadece birkaç mikrometre genişliğinde olduğu göz önüne alınırsa, bunun bir hayli sınırlayıcı olduğu anlaşılır. O ölçekte, 90°'lik bir eğimin 1 mm'lik yarıçapı, gerçekte ciddi bir çıkıntı oluşturuyor. Bilgisayar simülasyonları, fotonik kristallerin bu noktada imdada yetişebileceğini gösteriyor. Fotonik kristalde ekleme ya da çıkarmayla oluşan dar bir kanal, keskin kıvrımların etrafında bile mükemmel bir dalga kılavuzu oluşturabilir, çünkü kanalın içindeki ışığın gidebileceği hiçbir yer yoktur. Bir kanal, kristalin sürekliliğinin bozulmasıyla, yani delik eklenmesi ya da deliklerin bazılarının değişik malzemelerle doldurulması yoluyla oluşabilir.

Gelecekte fotonik kristaller, bütünüyle ışığa dayalı süper-güçlü bilgisayarların yapımında kullanılabilir. Günümüzün optoelektronik devrelerinde, ışın çoğunu elektronik parçalar üstleniyor. Oysa optik cihazlar çok daha etkin olduklarından, elektronik cihazlara göre daha az güç gerektirecekler. Elektronik cihazlarda devrelerin boyutunu küçültmek, direnci ve artık ısıyı artırıyor; oysa optik sistemlerde bu tür sorunlar olmayacak. Ayrıca, optik devreler tek bir hat üzerinde birçok farklı sinyal iletebilecek ve böylece bilgi aktarımı hızlanacak.

Henüz elektronik transistör gibi çok amaçlı optik bir parça yok. Ancak, fotonik kristallerden yapılmış cihazlar içeren tümüyle optik çipler, er ya da geç, transistör işlevi görecek...

Pierre Villeneuve, John Joannopoulos
New Scientist 26 Ağustos 1995
Çeviri: Bezen Çetin