

Kalıp ve Baskılama

ile

**Nano
Ölçekte
Üretim**

**Mekanik olarak yenilikçi cihazlar üretmek için
kabartma benzeri teknolojiler
çok küçük boyutlarda kullanılabilir.**

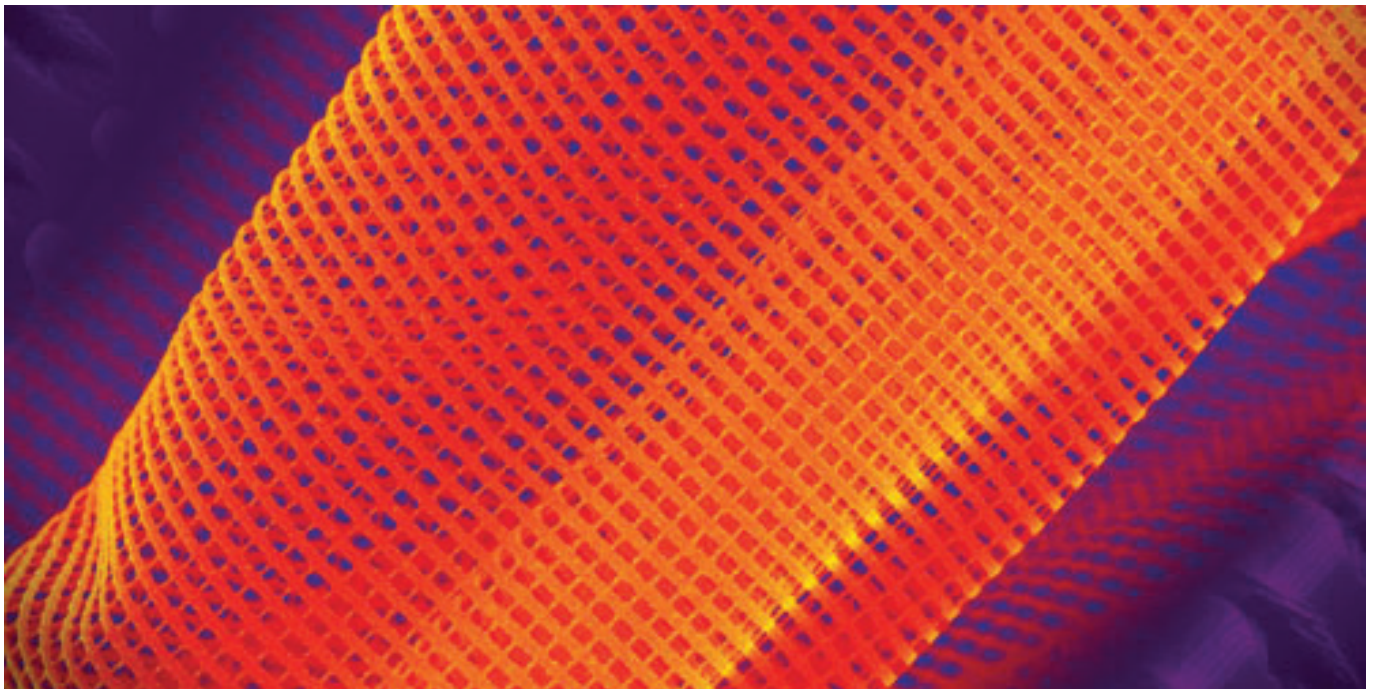
Kalıp ve Baskılama ile Nano Ölçekte Üretim

Dr. Ilgım Göktürk, Dr. Fatma Yılmaz ve Dr. Adil Denizli

Hacettepe Üniversitesi, Kimya Bölümü, Beytepe, Ankara

Önümüzdeki birkaç on yılda, nanoteknoloji alanındaki büyümenin, 1970'lerdeki bilgisayar devriminin ilk günlerine benzer olacağı tahmin edilmektedir.

Bu ultra minyatürleştirme işlemi, yaklaşık 100 nanometre ve altındaki uzunluk ölçeklerinde çalışır; 1 nanometre, saçın genişliğinin yaklaşık 50.000'de biri kadardır. Malzemeler nano ölçekte farklı davranır ve bu özelliklerden yararlanmak, bilgisayar çiplerinden medikal tedavilere kadar birçok alanda ilerlemeye yol açar. Ancak geleneksel üretim yöntemlerinin çoğu bu ölçeklerde çalışamaz, bu nedenle araştırmacılar yeni malzeme desenleme yöntemleri geliştirmek için geçmişten ilham almaktadır.



Şekil 1. Renkli taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.

NANOTEKNOLOJİ

MALZEMELERİN BİR ATOM VEYA BİR MOLEKÜL TARAFINDAN AYRILMA, KONSOLİDASYON VE DEFORMASYON YÖNTEMİ OLARAK TANIMLANIR.



Malzeme, nano ölçekte bir çeşit baskılama işlemiyle oluşturulmuştur. Bu tür mekanik işlemler, düşük maliyetle yüksek verimde nano ölçekli üretime ivme kazandırmaktadır. (Debashis Chanda'nın izniyle, NSTC/CREOL, Central Florida Üniversitesi; ve John A. Rogers, MSE, Illinois Üniversitesi, Urbana Champaign) 1959'da fizikçi Richard Feynman, ufuk açıcı "Altta çok yer var" adlı konuşmasında nanoteknoloji kavramını açıklasa da, asıl terim 1974'te Tokyo Bilim Üniversitesi'nden Norio Taniguchi tarafından telaffuz edildi ve nanoteknolojinin ana fikri açıklığa kavuşmuş oldu. Nanoteknoloji, *malzemelerin bir atom veya bir molekül tarafından ayrılma, konsolidasyon ve deformasyon yöntemi* olarak tanımlanır. 1980'lere kadar, mikroskopideki gelişmelerle (özellikle taramalı elektron mikroskopunun icat edilmesiyle), bilim adamları, ticari üretime olanak sağlayan nano ölçekte organize olan maddeleri inceleyebildiler.

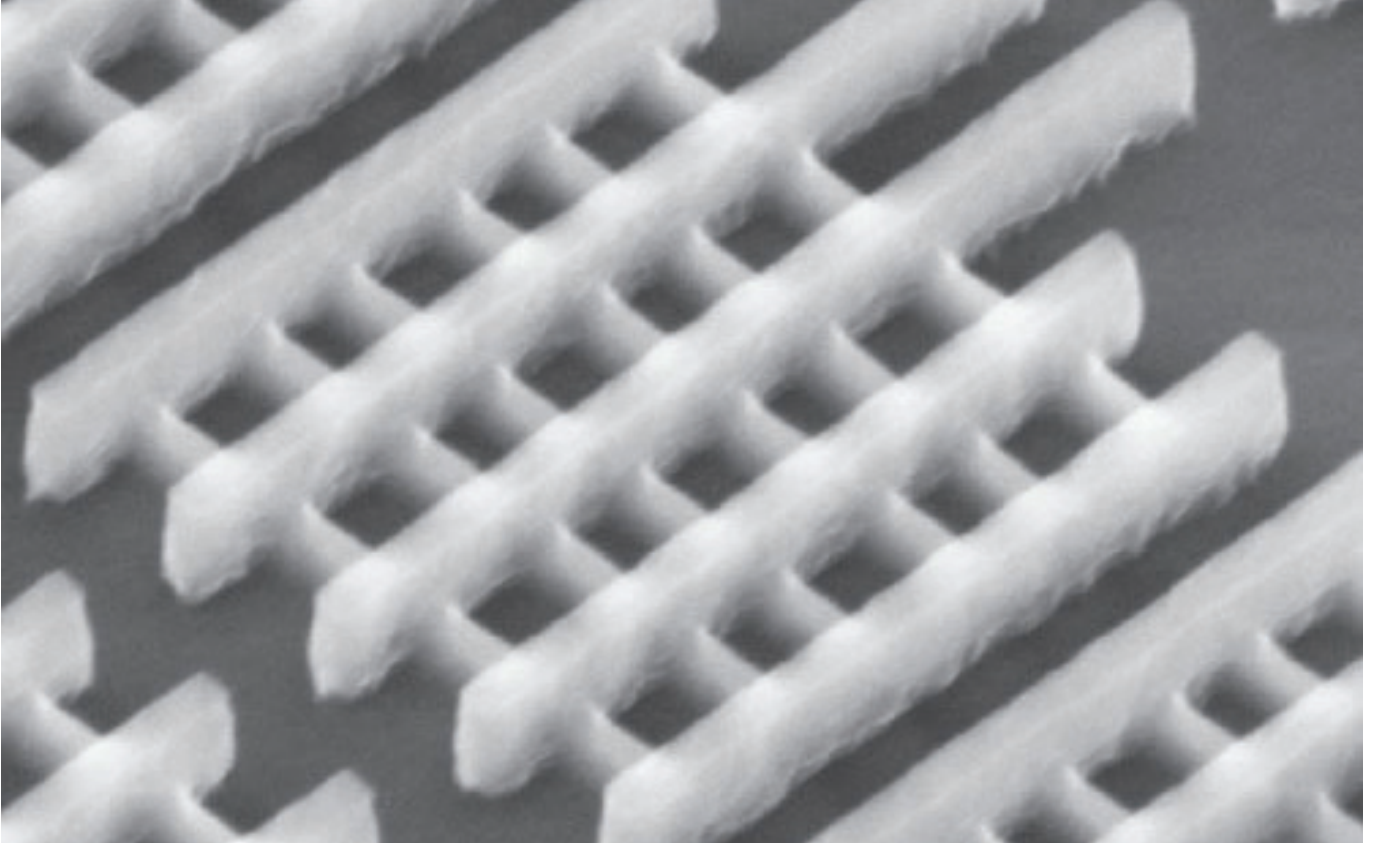
Geçtiğimiz yirmi yıl, çeşitli nanofabrikasyon tekniklerinin gelişimine ve büyük ilerlemesine tanık olduk. Genel olarak, bu teknikler yukarıdan aşağıya ve aşağıdan

yukarıya yaklaşımlar olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir. Yukarıdan aşağıya nanofabrikasyon, bir taş bloktan yontma işlemine, istenmeyen malzemeyi boş bir tabandan kesmeye benzetilebilir. Aşağıdan yukarıya nanofabrikasyon, bir tuğla ev inşa etme, parça parça bir yapı oluşturma süreci gibi görselleştirilebilir.

Nanofabrikasyonun amacı ticari ürünler üretmektir. Bu nedenle bir laboratuvar ölçeğinden yüksek hacimli üretime geçmeden önce başarılı olmak için geliştirilen tekniğin esnek, güvenilir, ölçeklenebilir ve uygun maliyetli olması gereklidir. Aşağıdan yukarıya yaklaşımlar bu teknolojik zorlukların birçoğundan hala muzdariptir. Öte yandan, zaten iyi çalıştığı bilinen iki tane yukarıdan aşağıya yaklaşım vardır. Bunlardan biri bilgisayar çiplerini yapmak için kullanılan standart işlem olan optik litografidir. Diğer, nanobaskı litografisi, malzemeleri büyük bir hassasiyetle mekanik olarak modellemek için ortaya çıkan bir tekniktir.

IŞIK İLE "AŞINDIRMA"

1960'larda tanıtılan optik litografi, yarı iletken bilgisayar çipleri için ana desenleme tekniği olmaya devam etmektedir. Optik litografi, devre tasarımlarını bir maskeden fotorezist adı verilen ışığa duyarlı bir polimerle kaplanmış silikon bir levha üzerindeki desenlere dönüştürmek için ışığı kullanır. İki tür fotorezist vardır; her biri ışığa maruz kaldıktan ve ardından geliştirici adı verilen bir kimyasalla işlem den sonra farklı bir reaksiyona girer. Pozitif bir fotorezist ışığa maruz kalırsa, geliştirici tarafından çözünür hale gelir. Fotorezistin maskenin arkasında kalan kısmını geride bırakır ve yıkanarak uzaklaşır. Negatif bir fotorezist, fotorezistin ışığa maruz kalmayan kısmı çözülürken direnç geliştirici için çözünmez hale gelir. Bu aşındırma döngüsü, yarı iletken çipin her katmanı için tekrarlanır. Maskenin nasıl yerleştirildiği ve malzemeyi ortaya çıkarmak için kullanılan ışığın dalga boyu, optik litografinin çözünürlüğünün artırılmasından büyük ölçüde sorumlu olmuştur.



Şekil 2. Optik litografi ile ultraviyole dalga boyları kullanılarak oluşturulan bir 3D üç kaplı transistör, elektronlara daha hızlı hareket için daha fazla alan açar ve böylece güç tasarrufu sağlarken işlemci hızı artar.

1990'ların sonlarında endüstri, 90 nm'ye kadar desen çözünürlüğü elde etmek için ultraviyole lazer kullanarak ışık kaynaklarının dalga boyunu azalttı. Bugün bu dalga boyu minimum 22 nm çözünürlüğe ulaşmış durumda. Endüstri, optik litografiyi bu 22 nm çözünürlüğün ötesine taşımak için zorluklarla karşı karşıyadır. Bu ölçek küçültme isteğinin bir sonraki adımı olarak aşırı ultraviyole dalga boyları (mevcut 193 nm'ye kıyasla 13,5 nm) kullanılmaya çalışılmaktadır. Ancak bu kısa dalga boyunda, hemen hemen tüm malzemeler radyasyonu emecektir. Bu nedenle işlemin çok yüksek güçlü ışık kaynaklarının yanı sıra ışığı yansıtacak ve verimliliği arttıracak özel maskeler ve optikler kullanılması gerekecektir. Buna karşılık, bu tür yüksek güçlü lazer maruziyetine dayanabilecek uygun direnç malzemelerine ihtiyaç vardır. Ayrıca absorpsiyon kayıplarını en aza indirmek için tüm sürecin vakum altında gerçekleşmesi gereklidir. Aşırı ultraviyole litografi, optik litografiyi ilerletmek ve uygulanabilir bir üretim tekniği haline getirmek için üstesinden gelinmesi gereken hem teknik hem de ekonomik zorluklar mevcuttur.

MEKANİK KUVVETLERE GEÇİŞ

Nanobaskı litografisi, optik litografiden farklı olarak bir desen oluşturmak için direncin doğrudan deformasyonuna dayanan mekanik bir süreçtir. Bu teknik yarı iletken endüstrisinde henüz yaygın olarak kullanılmamakla birlikte optik, sabit disk sürücüler ve biyoteknoloji alanında bir pazara sahiptir. Nanobaskı litografisi karmaşık ve pahalı ışık kaynaklarına ihtiyaç duymaz. Çok çeşitli polimerik malzemeleri ve ticari olarak temin edilebilen dirençleri içerebilir ve sert veya esnek alt tabaka malzemeleriyle uyumludur. Bu tür bükülgen polimerik malzemeler, üç boyutlu ve karmaşık şekiller oluşturmak için kolayca kullanılabilir ve Chou'nun 1990'ların sonlarında önerdiği rulo baskı işlemlerinin geliştirilmesi, tekniğin düşük maliyetle geniş alanların modellenmesindeki verimini önemli ölçüde artırmıştır. 1997 yılına gelindiğinde, teknik 6 nm'lik bir çözünürlüğe ulaşmıştır. Şu anda süreç üzerinde iki varyasyon baskındır. Biri, termal nanobaskı litografisi (sıcak kabartma litografisi olarak da adlandırılır) diğeri ise, UV temelli nanobaskı litografisidir.

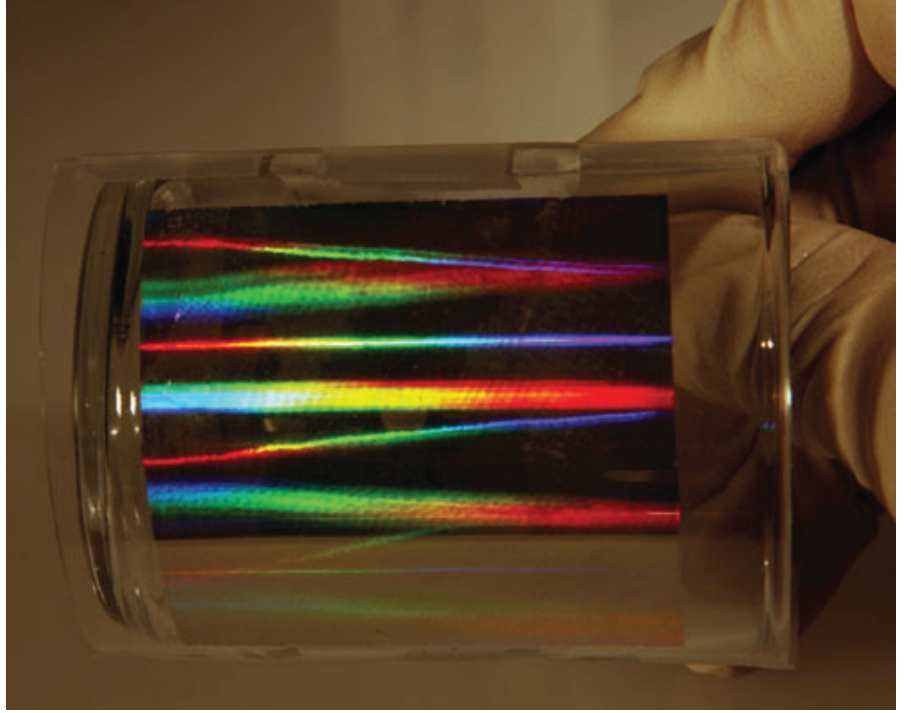
Standart termal nanobaskı litografisinde,

alt tabaka üzerine ısıya duyarlı bir polimer kaplanır. İstenen modeli oluşturmak için yarı iletken teknolojileri kullanılarak bir kalıp ayrı ayrı üretilir ve daha sonra kontrollü bir yüksek sıcaklık ve basınçta kaplanmış alt tabaka ile doğrudan temasa getirilir. Baskı sıcaklığı genellikle polimerin cam geçiş sıcaklığının 20-50°C üzerindedir ve bu da onu viskoz hale getirir. Yükseltilmiş basınçta, polimerin kalıbın boşluklarını tamamen doldurması sağlanır. Kalıp ve polimer daha sonra hala temas halindeyken soğutulur, böylece polimer istenen şekilde sertleşir. Polimer desenleri, doğrudan kullanım için substrat üzerinde kalabilir veya bir dağlama işlemi yoluyla alttaki substrata desen transferi için bir maske olarak kullanılabilir. UV temelli nanobaskı litografisi, kullanılan reçinenin UV ile sıvı bir fotopolimer olması, kalıbın normalde optik olarak şeffaf malzemeden (kuvars gibi) yapılması ve tüm işlemin oda sıcaklığında gerçekleştirilebilmesi dışında, termal işleme benzer şekilde çalışır.

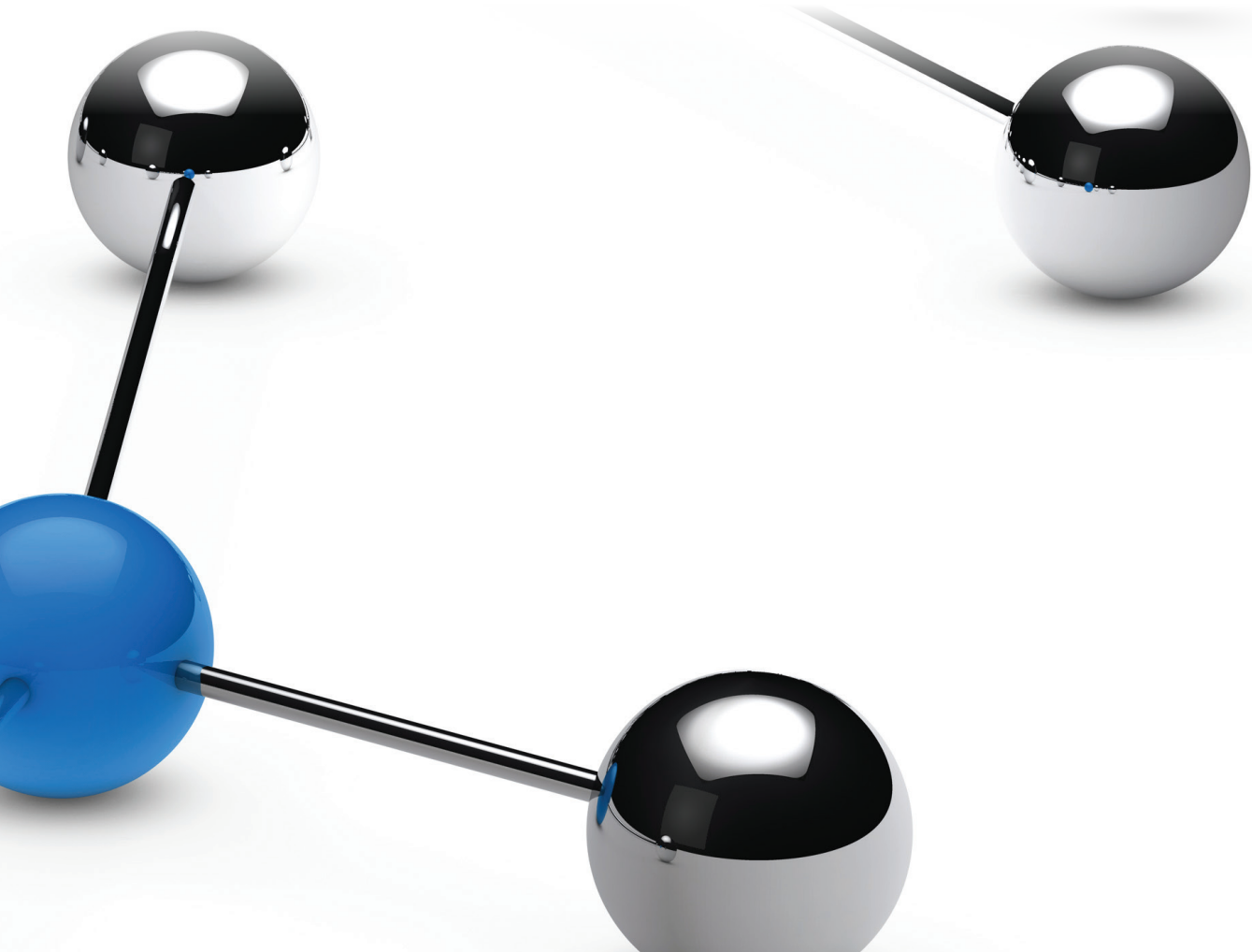


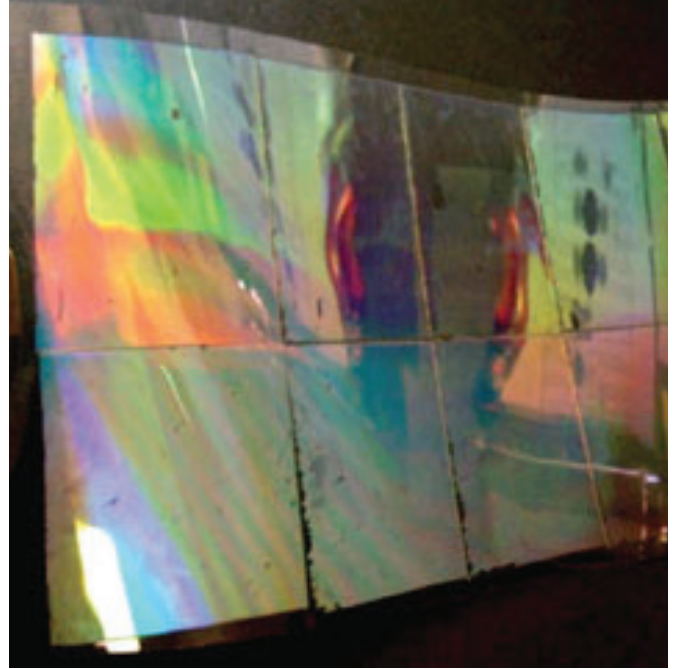
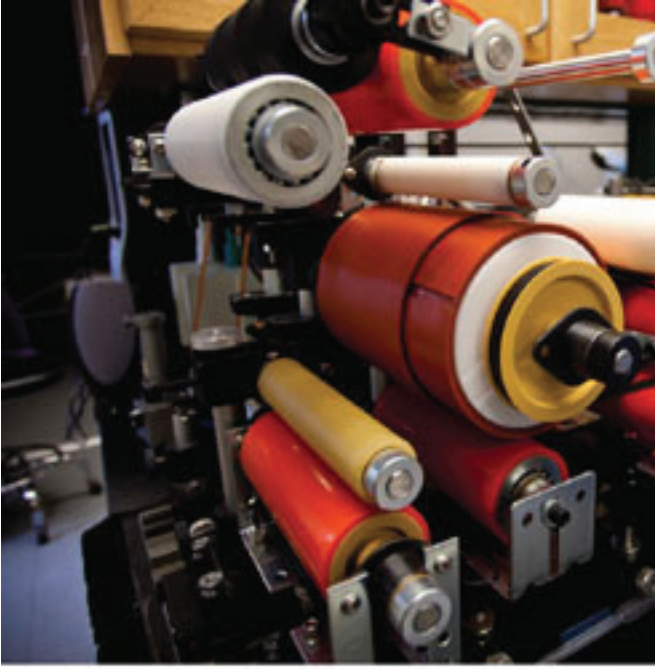
WAFERLAR ÜZERİNDEKİ LENSLER

Optik cihazlar, fazla miktarda ürün üretimi için nanobaskı litografinin başarıyla kullanıldığı bir uygulama alanıdır. Nanobaskı litografinin Ar-Ge'den üretim seviyesine taşıyan substrat (wafer) düzeyinde optikler ve yüksek parlaklıkta ışık yayan diyotlar (LED'ler)dir. Substrat düzeyinde optikte, UV-nanobaskı litografi, bir substratın tam boyutunda bir merceği desenler. Geleneksel işleme teknikleriyle karşılaştırıldığında, bu yaklaşım önemli ölçüde verimi artırır ve maliyet avantajı sunar. Aynı zamanda substrat düzeyinde modelleme sayesinde mümkün olan daha iyi performansla optik cihazların minyatürleştirilmesine olanak tanır.



Şekil 3. Nanobaskı litografinin bir avantajı, esnek substratları modellemek için kullanılabilmesidir. Bu fotoğraftaki film, nano ölçekte görüntülediğinde, telekomünikasyona ayrılmış elektromanyetik spektrum bandındaki sinyalleri kontrol etmek için kullanılabilen mikroskobik bir ağ oluşturur. (John A. Rogers'ın izniyle, MSE, Illinois Üniversitesi, Urbana-Champaign)





Şekil 4. Şekil 4. Makineler yüksek verimle ve sürekli olarak modellenebilen malzeme alanında geleneksel sınırlar olmadan nanobaskı litografisini (üstte) gerçekleştirebilir. Alt tabakalar da esnekler (altta), bu optik litografi ile mümkün değil. (Görüntüler, Michigan Üniversitesi'nden L. Jay Guo'nun izniyle)

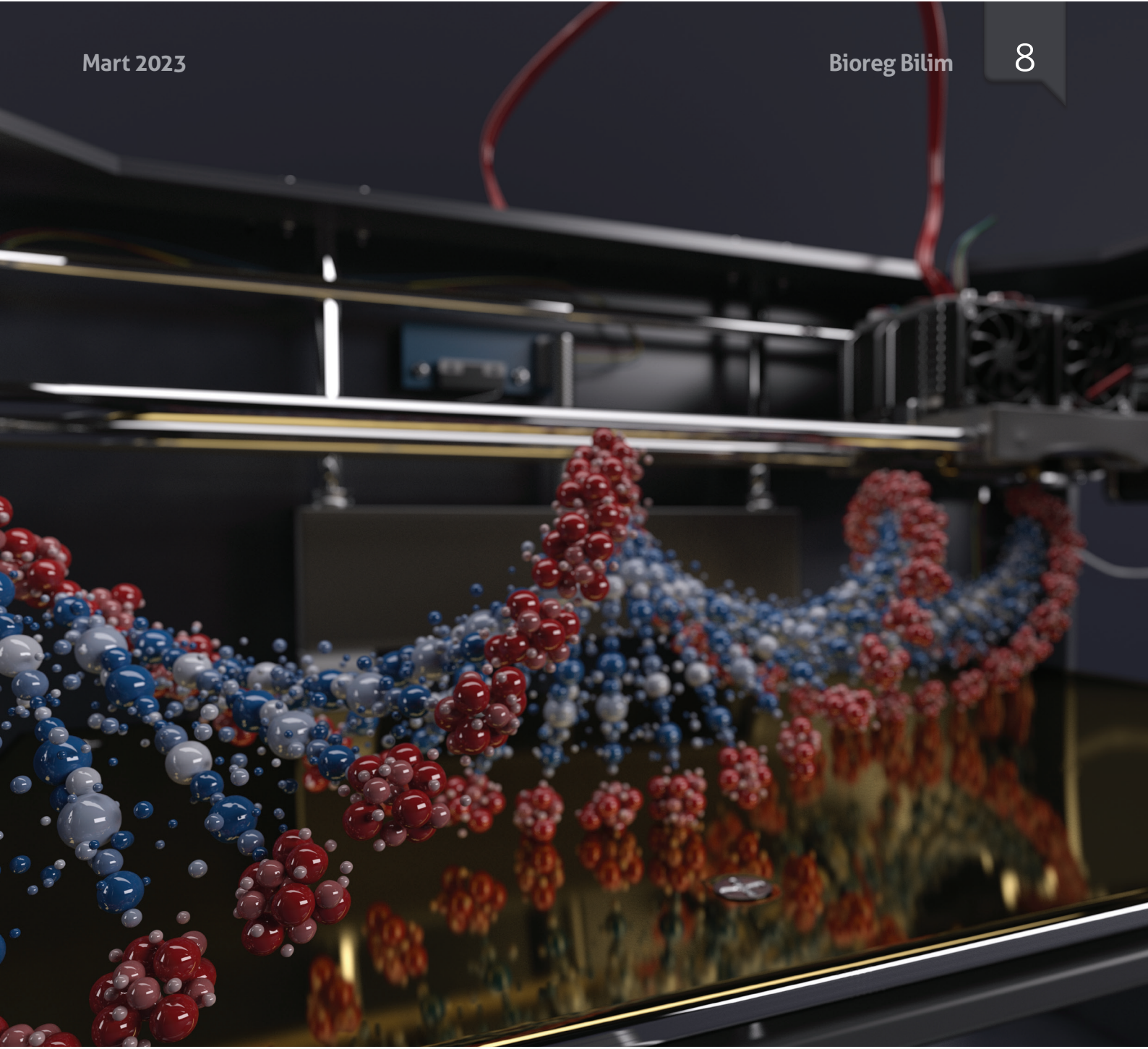
Geçtiğimiz birkaç yılda, ekran arka aydınlatması, tabela, genel ve otomotiv aydınlatması ve mobil cihazlarda yüksek parlaklıkta ancak düşük maliyetli LED pazarındaki patlayıcı büyüme, LED üreticilerinin ışık emisyonunu iyileştirmek için nanobaskı litografisine yönelmesine neden oldu. LED'ler galyum nitrid gibi yarı iletken malzemelerden üretilir. Bu malzemeler havaya kıyasla yüksek bir kırılma indeksine sahiptir ve bu da ışığın büyük kısmının LED'in içinde hapsolmesine ve zayıf ışık emisyon verimliliğine yol açar. LED'in yüzeyinde birkaç yüz nm aralığında tipik bir uzunluk ölçeğine sahip periyodik nano ölçekli yapıların modellenmesi, bu etkileri azaltabilir ve ışık verimliliğini ve dolayısıyla parlaklığını önemli ölçüde artırabilir.

Geleneksel optik litografi bu uygulamada pek işe yaramaz çünkü LED alt tabakanın doğal dalgalanması, yansıtılan maskeye odaklanmayı zorlaştırır. Ayrıca, uzunluk ölçeği optik kırınım sınırına yakın olduğundan, işlem daha karmaşık optikler gerektirir ve daha yüksek maliyete neden olur. Öte yandan, UV-nanobaskı litografi, kolayca yüksek çözünürlük elde edebilen mekanik bir kalıplama işlemi olduğu için çok daha basit modelleme yapmak mümkündür. Ayrıca, alet yapım şirketi Obducat tarafından geliştirilen bir modelleme yaklaşımı, orijinal sert ana baskıdan çoğaltılan tek kullanımlık yumuşak polimer baskılar kullanarak, üniform olmayan LED alt tabakasına nano desen oluşturma güçlüğüne çözmektedir. Bu çözüm aynı zamanda pahalı ana kalıbın ömrünü uzatır, böylece nanomodelleme sürecini oldukça uygun maliyetli hale getirir.

BASKI DEPOLAMA

1990'lardan beri sabit disk sürücülerinin nanobaskı litografisinin gelişimini yönlendiren önemli bir uygulama olmuştur. Sabit sürücü depolama kapasitesine olan talep, özellikle video ve ses uygulamalarının daha fazla kullanılmasıyla birlikte son yıllarda, yılda yaklaşık % 30-40 oranında artıyor. Ancak, günümüzün sabit diskleri, kapasite artırma kapasitelerinin teknik sınırlarına ulaşmak üzere. Geleneksel sürücüler, her veri bitini kaydetmek için rastgele yerleştirilmiş nanometre ölçeğinde taneciklere sahiptir, ancak tanelerin, veri kaybına veya bozulmasına neden olabilecek termal dalgalanmalara karşı giderek daha duyarlı hale geldiği bir eşik boyutu vardır. Süperparamanyetik etki olarak bilinen bu fenomen, geleneksel sürücülerin 1 terabayt kapasite engelini aşmak için temel teknik zorluktur.

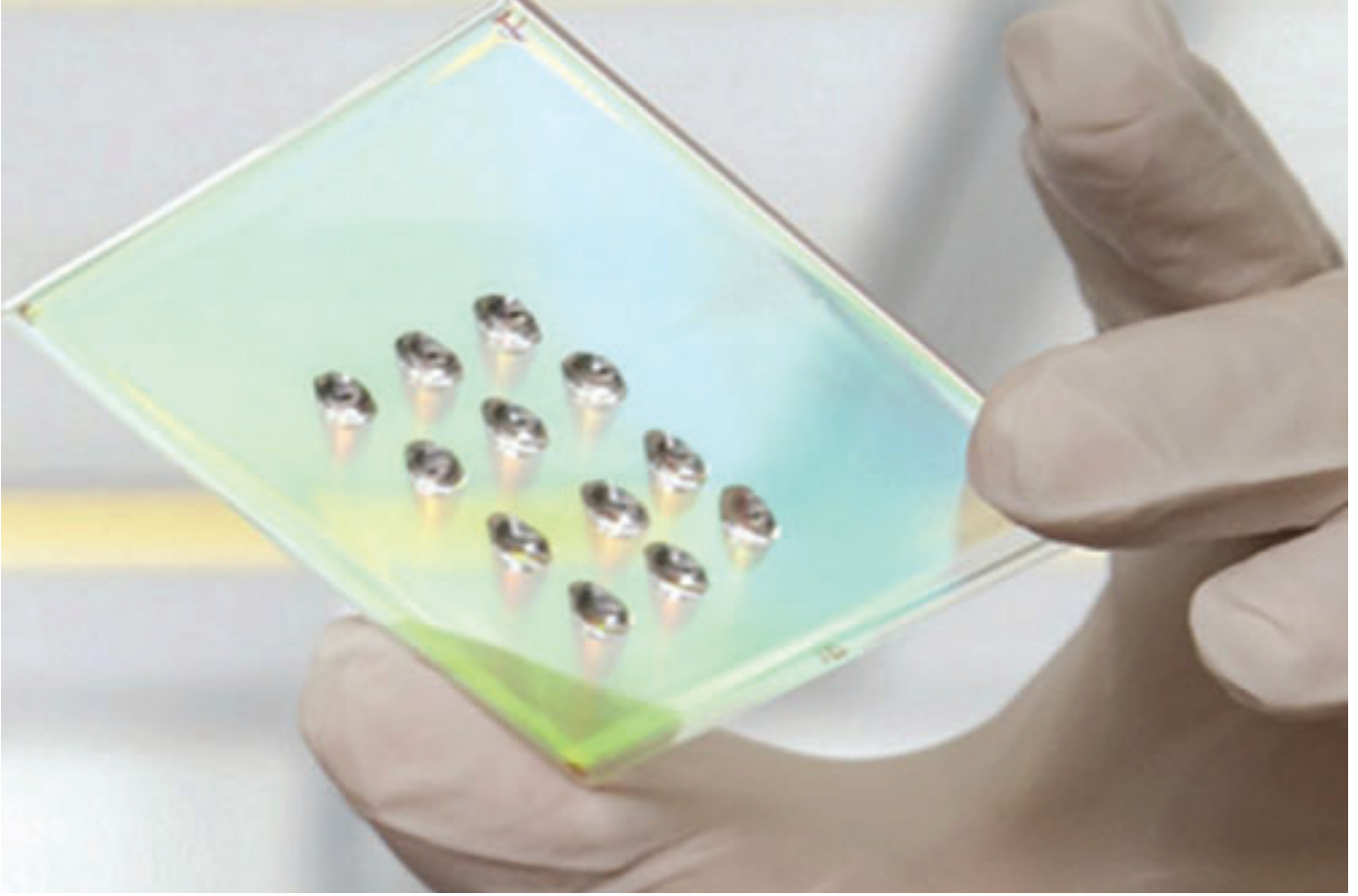
Bu sınırlamayı aşmak için umut verici bir yöntem, bit desenli ortam kullanmaktır. Nanobaskı litografi modelleme kullanılarak, iyi tanımlanmış ve fiziksel olarak ayrılmış manyetik nanoyapılar, tek veya çift taraflı bir disk yüzeyinde kolayca oluşturulabilir. Her bir nano yapı, ayrı bir biti depolama yeteneğine sahiptir. Fiziksel olarak ayrılmış bitlerin komşularını etkileme olasılığı daha düşüktür ve bu nedenle geleneksel sabit sürücülerden daha büyük miktarda verinin depolanmasına izin verir. Nanobaskı litografisi, bu daha ince özellikleri modelleme konusunda oldukça yeteneklidir. Ayrıca, desenli medya, çoklu katman hizalaması gerektirmez ve kusurlara daha fazla toleranslıdır, bu da nanobaskıyı seri üretim sürücülerini için uyarlanabilir bir teknik haline getirir.



BIYOTEKNOLOJİ İÇİN MODELLEME

Nanobaskı teknolojisi, geleneksel yüksek teknoloji bilgi işlem dünyasının dışında daha geniş uygulamalara sahiptir. Örneğin, tıp ve malzemelerin bulunduğu bir alan olan biyoteknoloji, tekniğe çok uygun belirli uygulamalara sahiptir. Şeker hastaları için glukoz sensörleri gibi çok az miktarda sıvı kullanan evde teşhis cihazları genellikle tek kullanımlık plastiklerden yapılır, bu nedenle birim başına düşük üretim maliyeti önem kazanır. Termal nanobaskı litografi, tek bir işlem adımında bu tür cihazları hızlı ve ucuz bir şekilde oluşturmak için doğrudan polimerleri şekillendirebilir. Ek olarak, süreç biyolojik olarak parçalanabilen ve biyolojik olarak uyumlu malzemeleri şekillendirebilir. Bazı biyomalzemeler çözücüler, su veya diğer kimyasallar tarafından bozunmaya karşı hassas olduğundan ve bu nedenle geleneksel optik litografinin ıslak geliştirme sürecine dayanmadığından, doğal olarak kuru desen oluşturma özellikleri daha fazla avantaj sunar.

Yara onarımı ve organ değişimi için umut verici bir alternatif sunan doku mühendisliği, nanoizlemenin kullanılabileceği büyüyen bir başka biyoteknoloji alanıdır. Nispeten yeni ama önemli bir konu, bir yüzeyin topografyasının hücrelerin nasıl gelişip işlev gördüğü üzerinde sahip olabileceği roldür. Bu faktörü incelemek için, farklı



Şekil 5. Gül yaprakları üzerindeki kılcalardan ilham alan nano ölçekli konik çıkıntılarla desenli bir çarşaf, baş aşağı tutulduğunda bile su damlacıklarını yerinde tutabiliyor.

türdeki topografyaların (örneğin, iki boyutlu, üç boyutlu, mikro, nano, kavisli, anizotropik, izotropik veya farklı en boy oranlarına sahip şekiller) yeterince büyük bir miktarda üretilmesi gerekir. Termal nanobaskı litografisi, basit iki boyutlu kalıplardan kolayca üç boyutlu yapılar oluşturabilir.

Nanofabrikasyon biyolojide yararlı olabilir, ancak süreç aynı zamanda doğadan ilham alabilir. Bir mekanizma, malzemelerin silindirik bazlı sürekli işlenmesi, birkaç biyomimetik ürüne sahiptir. Bu mekanizma, yüksek verim sağlar ve ayrıca silikon substrat kullanımının doğasında bulunan alan kısıtlamasını ortadan kaldırır. Silindirik işleme, hem hafif hem de uygun maliyetli ürünler oluşturabilen plastik gibi esnek alt tabakalarla iyi çalışır. Sürecin ilk ticari uygulayıcıları, bunu optik filmler için kullanır. Tek katmanlı nano desenler, malzemeye gelişmiş optik performans kazandırarak doğrudan plastik film üzerine basılır. Doğrudan plastik üzerinde işlevsellik

oluşturmak, yeni ortaya çıkan uygulamalar için birçok fırsatı da beraberinde getiriyor.

En son çalışmaları, nano ölçekte düzgün dağılmış konik çıkıntılarla kaplı gül yapraklarından ilham alıyor. Benzer desenlerle silindirik baskılı polimerler, ters çevrildiklerinde bile su damlacıklarını yerinde sabitliyor. Potansiyel uygulamalar, sağlıklı bitki büyümesi için yoğuşma kontrolünün önemli olduğu seraları ve kurak bölgelerde su kaynağı olarak çiy toplamayı içermektedir. Genomik araştırmalarda, yüksek kaliteli protein kristalleri genellikle asılı damlalar kullanılarak büyütülür; nanobaskılı yüzeyler, daha düzgün ve kontrol edilebilir damlacıklara izin vererek böyle bir işlemin verimini artırabilir.

Bazı fütüristik uygulamalar da ufukta görünüyor. Ortak bir çalışma olan başka bir proje, artık Nanoveu şirketi tarafından ticarileştiriliyor, özel gözlüğe ihtiyaç duymadan 3 boyutlu bir görüntü oluşturan mobil cihaz ekranları için şeffaf bir kaplama oluşturmak üzere lentiküler lensleri plastik film üzerine yerleştiriyor. Benzer şekilde, WaveFront Technology gibi gruplar, giyilebilir görüntüleme cihazlarında kullanılabilen plastik üzerinde bir polarize edici etki yaratarak filmlerin üzerine metal bir nanotel ızgarası yerleştirmek için çalışıyorlar. Rulo tipi nano-baskılama, nihayet bu tür uzun zamandır beklenen ürünleri sıradan hale gelebilecek kadar uygun fiyatlı, hafif ve yüksek performanslı hale getiren bir teknoloji olabilir.

