



Si NANOTELLERİN MEKANİK ÇINLAÇ OLARAK ÜRETİMİ ve TESTİ

Evren F. Arkan Koç Üniversitesi/Müh. Fak., İstanbul	Davide Sacchetto EPFL/SRI- IEL-LSM, Lozan	İzzet Yıldız Koç Üniversitesi/Müh. Fak., İstanbul	Yusuf Leblebici EPFL/SRI- IEL-LSM, Lozan	B. Erdem Alaca Koç Üniversitesi/Müh. Fak., İstanbul
--	---	--	--	--

ÖZET

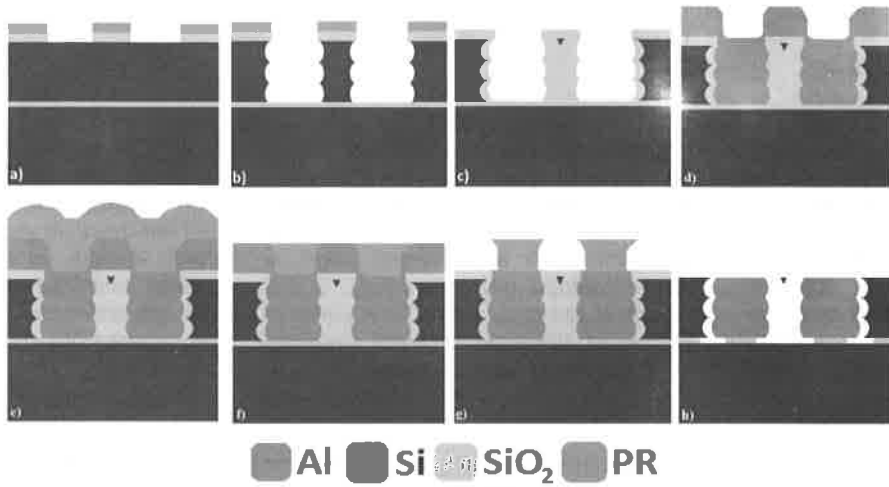
Si nanotellerin (SiNT'lerin) mekanik özelliklerinin test edilebilmesi için yeni bir üretim yöntemi geliştirilmiştir. Söz konusu üretim yöntemiyle üretilen cihazlarda 50 nm uzunluğa sahip SiNT'ler ve mikron altı SiNT-elektrot boşluklu yapılar elde edilmiştir. Üretim yöntemi sadece optik litografi kullanarak yüksek ölçeklenebilirlik göstermiştir. Elde edilen cihazların SiNT'leri üzerinde yapılan 3 noktalı eğilme testleri ile yapıların teorik mukavemete yakın bir değerde kırıldığı ve mesnet noktalarının son derece sağlam olduğu gözlemlenmiştir. 3 noktalı eğilme testlerine ilaveten elektrostatik tahrik ve sığa okuması vasıtasıyla SiNT'lerin çınlanım testleri icra edilmiştir. Yapılan testler sonucunda [010] yöneliminde, beklenen elastisite modülüne yakın değerler ölçülmüş aynı zamanda silisyum içerisindeki iç gerilmeler hesaplanmıştır.

GİRİŞ

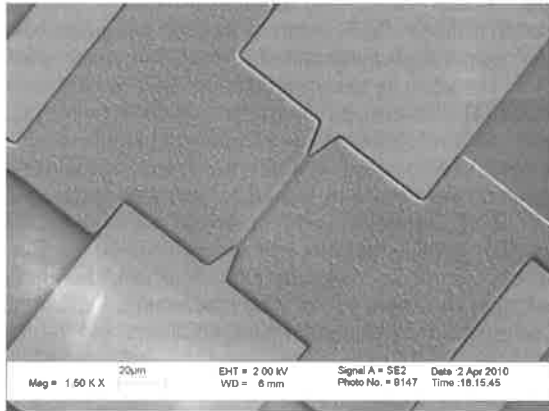
Si nanoteller (SiNT'ler), teorik değerlere yaklaşan kırılma mukavemetleri [1], yüksek doğal frekansları ile titreşim kalite faktörleri [2] ve elektron ve çukur hapsedimi kaynaklı dev piezoresistivite [3] gibi olağanüstü özellikleri sebebiyle dikkat çekmektedirler. Mikroelektromekanik sistemler (MEMS) ile SiNT bütünleştirilmesi, adı geçen özelliklerin araştırılması için gerekli test platformlarını sağlamaktadır. Ancak söz konusu bütünleştirme çalışmalarının kapsamı ve başarısı, SiNT üretim şekline doğrudan bağlıdır. SiNT üretim sistemleri aşağıdan-yukarı (bottom-up) ve yukarıdan-aşağı (top-down) olarak ikiye ayrılmaktadır. Aşağıdan yukarı yöntemlerde, SiNT'lerin kristal yönelimi, genellikle $\langle 111 \rangle$ yönü ile sınırlanmakta ve SiNT'in çapı ve hizalanması konusunda sınırlı denetim bulunmaktadır [4]. Elektron ışın litografisi gibi daha belirleyici yukarıdan-aşağıya yöntemler ise kristal içyapısı ve SiNT şekil kalitesi konularında sınırlı sonuçlar vermektedir [5]. Son yıllarda geliştirilen indüksiyona bağlı plazma ile derin reaktif iyon aşındırması (ICP-DRIE) tekniğine dayanan bir üretim tekniğinin de yardımıyla bu kısıtlamaların üstesinden gelinebilmektedir [6]. İstenilen kristal yöneliminde SiNT üretiminin yanında, yonga düzlemine dik SiNT dizileri elde etmek mümkündür. Bu çalışmada ICP-DRIE yöntemini geliştirerek üretilen SiNT'in elektrostatik tahrik ve sığa değişimine dayalı yer değiştirme ölçümüne uygun olacak şekilde metalik elemanlarla birleştirilmesini sağlayacak olan bir üretim yöntemi açıklanacaktır. Devamında üretilen SiNT'lerin üç noktalı eğilme testleri ve çınlanım özelliklerinin nitelendirilmesi için yapılan ölçüm çalışmaları anlatılacaktır.

Bir mikro-cımbız için gerçekleştirilmiş daha basit bir sistem birleştirmesi için üretim akışı yakın zamanda rapor edilmişti [6]. Bu çalışmada ise Al elektrotlarla kendiliğinden hizalanmış SiNT dizisi elde etmek için tasarlanmış üretim akışı, Şekil 1'de görülmektedir. İlk adım olarak, SOI (silicon-on-insulator) pul üzerinde SiO₂ büyütülür. Devamında iki bağlantı uçlu cihaz SOI pul üzerine optik litografi ile şekillendirilir ve sert maske oluşturmaları için SiO₂ aşındırılır. SiNT'i oluşturacak olan

çizginin kalınlığı, üretimin başarısı için kritik önem taşımaktadır. Söz konusu çizginin kalınlığı 1.2 μm 'yi geçmemelidir. Cihazlar pozitif AZ92XX fotorezist ile tanımlandıktan sonra ICP-DRIE'de Bosch süreci vasıtasıyla SiNT alanı altında oyuklu bir duvar elde edilir. Bu duvar SOI'n oksit (BOX) kısmına kadar devam eder. Müteakiben yürütülen ıslak oksidasyon, Si duvarın iki yanından tüketilmesini sağlar. Dikkatli bir oksidasyon sürecinden sonra büyütülen SiO_2 tabakaları ortada birleşir, ancak belli miktarda Si sert maskenin altında ve ardışık oyukların arasında tüketilmeden kalır. Üretilen çukurların ve SiNT duvarının üzerine RF saçtırma (sputtering) yöntemi ile 1.5 μm Al kaplanır. Çukurlar doldurulduktan sonra tüm sistem fotorezist ile kaplanır ve kimyasal-mekanik-parlatma (CMP), SiNT duvarının üzerindeki Al ortaya çıkana kadar sürdürülür. Bunun ardından SiNT duvarı meydana çıkana kadar Al aşındırılır. Fotorezist soyulduktan sonra SiO_2 içine gömülmüş SiNT'ler ve bu tellere hizalanmış Al elektrotlar elde edilir. SiNT'leri kaplayan oksit Al'a karşı hassas olan Silox banyosunda tüketilir ve SiNT'ler Al elektrotlar arasında iki bağlantı ucu arasında gerilmiş olarak açığa çıkarlar. 50 μm 'luk SiNT'e sahip bir cihazın taramalı elektron mikroskop görüntüsü, Şekil 2'de görülmektedir.



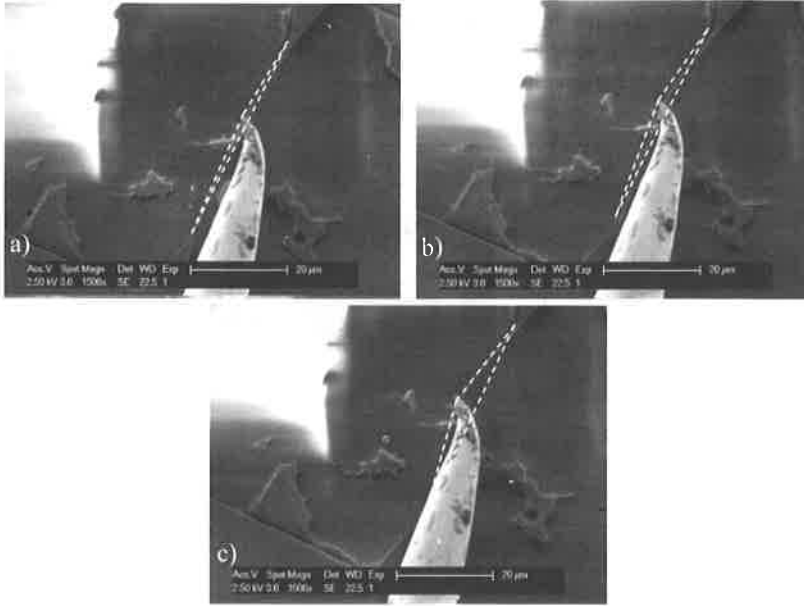
Şekil 1: Üretim akışı. a) Oksit maske tanımlama b) ICP-DRIE c) Oksidasyon d) Al kaplama e) Fotorezist kaplama f) CMP g) Al aşındırma h) Oksit aşındırma



Şekil 2: 50 μm uzunluğunda ve 200nm çapında SiNT cihazın taramalı elektron mikroskop altındaki görüntüsü

YÖNTEM

Elde edilen yapıların mekanik karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskobu altında 3 noktlı eğilme testi ile yapılmıştır. 500 nm çapında uca sahip bir volfram ölçüm ucu, bir mikro manipülatöre takılarak SiNT'lerin ortasından kuvvet uygulanmıştır. SiNT'ler kırılana kadar kuvvet verilmeye devam edilmiştir (Şekil 3). Kırılmanın orta noktada gerçekleşmesi, SiNT'in her iki uçtaki mesnet noktalarına sağlam bir şekilde tutunduğunu göstermiştir. Orta noktanın kırılma esnasındaki ortalama yer değiştirmesi, 5.9 μm olarak ölçülmüştür. [110] kristal yönelimindeki SiNT için yapılan yüksek yer değiştirmeli sonlu elemanlar analizi (FEM) sonucunda, kırılma mukavemeti, silisyum malzemesinin teorik değerine yakın olacak şekilde 14 GPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3: İki uçtan mesnetlenmiş SiNT'in mekanik karakterizasyonu esnasında alınmış taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. Tireli çizgiler SiNT'in orijinal ve eğilmiş hallerini nitelendirmektedir. a) Testin başındaki temas b) Ara basamak c) Kırılmadan hemen önceki görüntü.

Cihazın çınlanım nitelendirilmesi için kullanılan elektrostatik tahrik şeması, Şekil 4'te görülebilir. Burada her iki Al elektroda da ihtiyaç duyulmaktadır. SiNT'in bir bağlantı ucundan doğru akım (DC) bir potansiyel uygulanırken, Al elektrotlardan birine alternatif akım (AC) potansiyeli tatbik edildi ve ölçüm karşıt elektrottan yapıldı. Uygulanan alternatif akımın frekansı tarandı ve karşıt elektrottan ölçülen akımın büyüklüğü ile uygulanan akımın büyüklüğü oranı ölçüldü.

Ölçüm prensibi, çınlanımdan dolayı okuma elektrotu ve SiNT arasındaki sığa değişiminin, akım oluşturmaya dayanır. Ancak sistemin içinde elektrotlar arasındaki parazitik sığadan dolayı oluşan akım, çınlanımdan dolayı oluşan akımdan çok daha büyük olduğu için çınlanım kaynaklı akım doğrudan okunamaz. Ölçülen bu akım aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

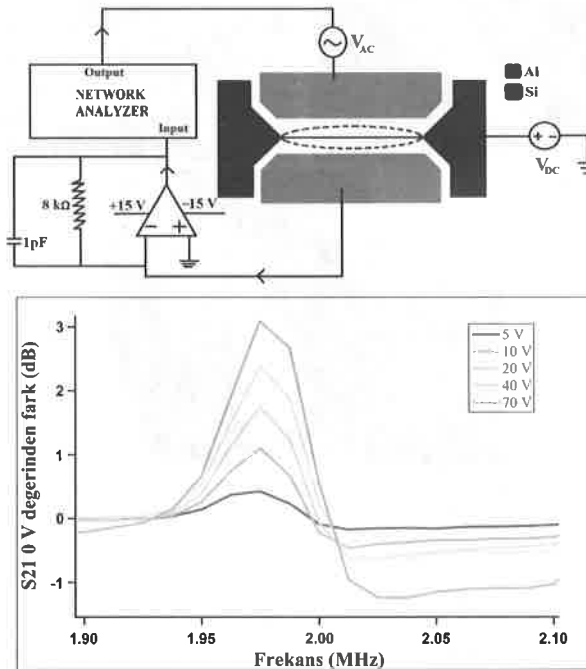
$$I = I_p + I_m = C_p V_{ac} + \Delta C V_{dc}$$

Formülde I_p , parazitik akımı, I_m , çınlanım kaynaklı akımı, C_p , parazitik sığayı, ΔC , çınlanım kaynaklı sığa farkını, V_{ac} , uygulanan alternatif akımlı potansiyeli ve V_{dc} , SiNT'e uygulanan doğru akımlı potansiyeli temsil etmektedir. Formülden de anlaşılacağı üzere SiNT'e sıfır gerilim uygulandığında karşıt elektrottan yalnızca parazitik akım okunmaktadır.

Sistemin içindeki parazitik sığadan kaynaklı oluşan parazitik akımı ortadan kaldırmak için, ölçülen veri setlerinden SiNT'e sıfır gerilim uygulandığında alınan değerler çıkarıldı. Sonuç olarak uygulanan gerilime bağlı bir zirve grafiği elde edildi. Şekil 4'te [010] yönelimindeki bir SiNT için elde edilen grafik görülebilir. Elde edilen grafikten çınlanım frekansı 1.97 MHz olarak tespit edildi. Bu ölçüm sonucunda SiNT'in elastisite modülü, 180 GPa olarak hesaplanmıştır. Teorik elastisite modülünden görülen bu %38'lik sapmanın sebebi SiNT'in iç gerilimidir. İç gerilimden kaynaklı çınlanım ötelemesi aşağıdaki gibi formüle edilebilir [7].

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{2L^2 \sigma}{7h^2 E}}$$

Formülde ω iç gerilmeli çınlanım frekansı, ω_0 iç gerilmesiz çınlanım frekansı, L , h , SiNT uzunluğu ve kalınlığı, E SiNT'in elastisite modülü ve σ SiNT'in iç gerilmesini temsil etmektedir. Elde edilen değerlerden iç gerilme 2.8 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4: a) Çınlaç nitelendirmesi için kullanılan ölçüm şeması b) Elde edilen çınlanım grafiği

Elde edilen zirve grafiğinden aynı zamanda SiNT'in çınlanımının kalite faktörü hesaplanabilir. Her veri setine bir lorenz eğrisi yerleştirilmiştir. Yerleştirilen lorenz eğrilerinin bant genişlikleri kullanılarak sistemin kalite faktörü ortalama 75 olarak hesaplanmıştır.

SONUÇ

Sonuç olarak yapılan çalışma, optik litografi kullanarak SiNT üretilbileceğini ve bunun sistem bütünleştirme açısından önemli bir avantaj taşıdığını göstermiştir. Elde edilen SiNT'ler üzerinde yapılan 3 noktalı eğilme testleri ile yapıların teorik mukavemete yakın bir değerde kırıldığı ve mesnet noktalarının son derece sağlam olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra elektrostatik tahrik ve sığa okuması vasıtasıyla SiNT'lerin çınlanım testleri icra edilmiştir. Yapılan testler sonucunda [010] yöneliminde, beklenen elastisite modülüne yakın değerler ölçülmüş aynı zamanda silisyum

içerisindeki iç gerilmeler hesaplanmıştır. Çalışmanın ileriki fazlarında, 50 μ m olan SiNT boylarının kısaltılarak çınlanım frekanslarının artırılması ve aynı zamanda parazitik etkileri düşürecek serim tasarımlarına gidilmesi planlanmaktadır. Çalışmaların başarılı olması durumunda ileride kuvars zamanlayıcıların yerine alabilecek, elektronik ile bütünleştirilmesi kolay bir nano elektromekanik sistem ortaya çıkmış olacaktır.

Teşekkür

B. E. Alaca, çalışmaya kısmi destek sağlayan TÜBA GEBİP programına teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Hoffmann, S., Utke, I., Moser, B., Michler, J., Christiansen, S. H., Schmidt, V., Senz, S., Werner, P., Gosele, U. ve Ballif, C., *Measurement of the bending strength of vapor-liquid-solid grown silicon nanowires*, Nano Letters, Cilt.6, No.4, s.622-625, Nisan 2006
- [2] Feng, X.L., He, R.R., Yang, P.D. ve Roukes., M.L., *Very High Frequency Silicon Nanowire Electromechanical Resonators*, Nano Letters, Cilt.7, No. 7, s.1953-1959, Temmuz 2007
- [3] Milne, J.S., Rowe, A.C.H., Arscott, S. ve Renner, C., *Giant Piezoresistance Effects in Silicon Nanowires and Microwires*, Physical Review Letters, Cilt.105, No.22, s.4, Kasım 2010
- [4] Lu, W. ve Lieber, C.M., *Semiconductor Nanowires*, Journal of Physics D-Applied Physics, Cilt.39, No.21, s.R387-R406, Kasım 2006
- [5] Kedzierski, J., Bokor, J. ve Kisielowski, C., *Fabrication of Planar Silicon Nanowires on Silicon-on-Insulator Using Stress Limited Oxidation*, Journal of Vacuum Science & Technology B, Cilt.15, No.6, s.2825-2828, Kasım-Aralık 1997
- [6] Ozsun, O., Alaca, B.E., Leblebici, Y., Yalcinkaya, A.D., Yildiz, I., Yilmaz, M. and Zervas, M., *Monolithic Integration of Silicon Nanowires with a Microgripper*, Journal of Microelectromechanical Systems, Cilt.18, No.6, s.1335-1344, Aralık 2009
- [7] Liu, C., *Foundations of Mems*, Pearson Education Inc., 2006.