

Yarı-iletken lazer etkileşimleri ile yonga içerisinde hacimsel nano-üretim

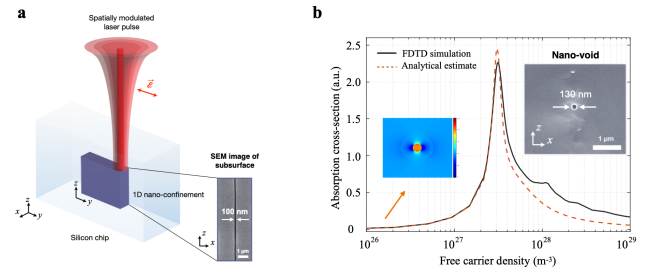
Rana A. Sabet, Aqıq Ishraq, Alperen Saltık, Mehmet Bütün, **Onur Tokel***Bilkent Üniversitesi- Fizik Bölümü, 06800, Ankara*

Silisyum (Si) modern teknolojinin temel taşlarından. Bilgisayarlardan cep telefonlarına, akıllı ev sistemlerinden fotovoltaik teknolojilere kadar birçok alanda nano-üretim teknikleri ile Si yongalar sürekli daha çok fonksiyon taşıyabilmiştir. Günümüzde ise Moore yasası yavaşlamış, Richard Feynman'ın nano-teknolojiye atfedilen meşhur sözü, "there is more room at the bottom" yonga yüzeyi ile sınırlı kalmıştır. Burada bu diktayı sözlük anlamı ile alarak, yonga derinliklerinde nano-ölçekli etkileşimlerin ve nano-litografinin mümkün olabileceği tartışılacaktır.

Silisyumda nano-üretim konvansiyel litografi teknikleri ile mümkün olabilmektedir. Fakat mevcut yaklaşımlar çok sayıda ve son derece kompleks üretim adımları içermekte, ve büyük finansal yatırımlar gerektirmektedir. Dahası, mevcut nano-üretim teknolojileri tamamen yonga yüzeyi ile sınırlıdır. Yeni ortaya çıkan lazer-temelli yonga-içi üç-boyutlu litografi ise bu problemleri eş-zamanlı olarak çözmek hedefi ile öne çıkmaktadır [1]. Bu paradigmada, yonganın şeffaf olduğu dalga-boylarında, nanosaniye ya da ultrahızlı atımlara sahip lazer demetleri, malzeme yüzeyinde bir değişim yapmadan, yonga derinliklerine ilerler, ve doğrusal-olmayan etkileşimler başlatırlar [1, 2]. Demet kendinden odaklanma ile (*self-focusing*) enerjisini lokal olarak malzemeye geçirerek, malzemenin kristal yapısını değiştirir. Bu şekilde 1- μm çözünürlüğe ulaşmak mümkündür.

Bu yaklaşım şimdiden yonga içerisinde özgün optik etkilerin kapısını aralamaktadır. Bir örnek olarak literatürde ilk defa lazer-ile-yazılmış gömülü bölgelerin çevresinde çift-kırınım (*birefringence*) etkisini gözledik [3]. Bu etkiyi kullanarak yine ilk kez yonga içerisinde dalga-plakalarının üretimini mümkün olabileceğini önerdik [3], ve bu optik cihazların yüksek verim ile çalıştıklarını deneysel olarak teyit ettik.

Bu ilerlemeler, Gaus tipi demetler kullanılarak yapılmıştır. Lazerin demetinin uzaysal dağılımı, odaklanmasına etki etmekte ve etkileşim bölgesini belirlemektedir [1]. Burada ise, Uzaysal Demet Desenleyici (*Spatial Light Modulator - SLM*), kullanılarak, lazer demeti holografik bir faz maslesi yardımı ile Bessel türü dağılıma çevrilmiştir. Bessel demetlerinin saçılma-dayanıklı doğaları etkileşimin daha sınırlı bir bölgede oluşmasının mümkün olabileceğine işaret etmektedir (Şekil 1).



Şekil 1: (a) Desenlendirilmiş demetler ile yonga içinde üç-boyutlu nano-ölçekli yazma [4]. (b) Nano-boşluklar çevresinde akı yoğunlaşması ve kutuplama etkisi.

Bu şekilde 100-nm seviyesine kadar inilmiştir. Nano-yapıların ortaya çıkmasında nano-boşlukların demeti yükseltmesi ve lazer kutuplamasına bağlı özgün etkiler temel oluşturmaktadır [4]. Bu heyecan verici sonuçlar, nano-üretim silisyum yüzeyinden yonga içerisine taşınabileceğini işaret etmektedir.

Kaynakça

1. O. Tokel, A. Turnalı, G. Makey, P. Elahi, T. Çolakoğlu, E. Ergeçen, Ö. Yavuz, R. Hübner, M. Borra, I. Pavlov, A. Bek, R. Turan, D. Kesim, S. Tozburun, S. Ilday, F. Ö. Ilday., "In-chip microstructures and photonic devices fabricated by nonlinear laser lithography deep inside silicon", *Nature Photonics*, 11, 639, (2017).
2. M. Chambonneau, D. Grojo, O. Tokel, F. Ö. Ilday, S. Tzortzakakis, S. Nolte, "In-volume laser direct writing of silicon", *Laser & Photonics Reviews*, 2100140, (2021).
3. A. Saltık, O. Tokel, "Laser-written wave plates inside the silicon enabled by stress-induced birefringence", *Optics Letters*, 49, 1, 49, (2024).
4. R. A. Sabet, A. Ishraq, A. Saltık, O. Tokel, "Laser nano-fabrication inside silicon with spatial beam modulation and non-local seeding", arXiv, <https://arxiv.org/abs/2302.13105v1>, (2023).