

ÖZET

BİR FOTOLİTOGRAFİ YÖNTEMİ VE SİSTEMİ

- 5 Buluş, bir hedef fazın sağlanması, bir EM radyasyon kaynağından (9) bir uzamsal ışık modülatörüne (3) bir ışının ve uzamsal ışık modülatöründen (3) yansıyan ışının bir numuneye (5) iletilmesi, bir ışık kaynağından (10) sağlanan bir ışının bir nesne dalgası (7) ve bir referans dalga (8) olarak ikiye bölünmesi ve nesne dalgasının (7) numuneye (5) iletilmesi, numuneden (5) geçen nesne dalgasının (7) ve referans dalgasının (8) birleştirilmesi ve bir görüntü alıcı
- 10 elemana (1) gönderilmesi ve bir faz görüntüsünün elde edilmesi, faz görüntüsü ve hedef fazın karşılaştırılması ve faz görüntüsü ve hedef faz arasındaki bir farkın önceden belirlenmiş bir değerin üzerinde olması durumunda uzamsal ışık modülatörü (3) için yeni bir görüntü oluşturmak üzere faz görüntüsünün nicelenmesi adımlarını içeren bir fotolitografi yöntemi ile ilgilidir.

İSTEMLER

1. Bir fotolitografi yöntemi olup, özelliği;

- bir hedef fazın sağlanması,
 - bir EM radyasyon kaynağından (9) bir uzamsal ışık modülatörüne (3) bir ışının ve uzamsal ışık modülatöründen (3) yansıyan ışının bir numuneye (5) iletilmesi,
 - bir ışık kaynağından (10) sağlanan bir ışının bir nesne dalgası (7) ve bir referans dalga (8) olarak ikiye bölünmesi ve nesne dalgasının (7) numuneye (5) iletilmesi,
 - numuneden (5) geçen nesne dalgasının (7) ve referans dalgasının (8) birleştirilmesi ve bir görüntü alıcı elemana (1) gönderilmesi ve bir faz görüntüsünün elde edilmesi,
 - faz görüntüsü ve hedef fazın karşılaştırılması, eğer faz görüntüsü ve hedef faz arasındaki fark önceden belirlenmiş bir değerin üzerindeyse uzamsal ışık modülatörü (3) için yeni bir görüntü oluşturmak üzere faz görüntüsünün nicelenmesi
- adımlarını içermesidir.

2. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği; faz görüntüsünün ve hedef fazın karşılaştırılmasının piksel bazında çıkarma ile gerçekleştirilmesidir.

3. İstem 2'ye göre bir yöntem olup, özelliği; nicelemenin, aşağıdaki formülle gerçekleştirilmesi ile karakterize edilmektedir

$$W_k(x, y) = \begin{cases} 255, \text{eğer } W_k(x, y) > \pi \\ \text{aksi takdirde } \frac{255 * W_k(x, y)}{\pi}, \end{cases} \text{ veya } W_k(x, y) = \begin{cases} 1, \text{eğer } W_k(x, y) > \pi \\ \text{aksi takdirde } \frac{255 * W_k(x, y)}{\pi}, \end{cases}$$

burada W_k , uzamsal ışık modülatörüne yansıtılacak nicelenmiş gri tonlamalı görüntüdür, $\Delta\varphi_k$ hedef faz ile mevcut ölçüm arasındaki faz farkıdır, n uzamsal ışık modülatörünün bit derinliğidir, a ve m katsayılarıdır, x ve y piksellerin koordinatlarıdır ve k yineleme sayısıdır.

4. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği; referans dalgasının (8), görüntü alıcı elemana (1) açısal olarak iletilmesidir.
5. İstem 1'e göre bir yöntem olup, özelliği; ilaveten faz görüntüsünü ve hedef fazı karşılaştırmadan önce faz görüntüsünün yeniden yapılandırılması adımını içermesidir.
6. İstem 5'e göre bir yöntem olup, özelliği; Yeniden yapılandırmanın, mevcut faz görüntüsünden yeniden yapılandırılan faz ile ilk referans faz arasındaki fark bulunarak gerçekleştirilmesidir.
7. İstem 5'e veya 6'ya göre bir yöntem olup, özelliği; İlaveten faz yeniden yapılandırması ile elde edilen faz görüntüsünün çözülmesi adımını içermesidir.
8. Yukarıdaki istemlerden herhangi birine göre bir yöntem olup, özelliği; EM radyasyon ışınının süreksiz bir şekilde uygulanmasıdır.
9. Bir fotolitografi sistemi olup, aşağıdakiler ile karakterize edilmektedir
- bir EM radyasyon kaynağı (9) ve EM radyasyon kaynağından (9) bir ışını almak ve alınan ışını yansıtmak üzere bir uzamsal ışık modülatörü (3),
 - bir ışık kaynağı (10) ve ışık kaynağından (10) sağlanan bir ışının bir nesne dalgası (7) ve nesne dalgasını numuneye (5) ileten bir referans dalga (8) olarak ikiye bölünmesine yönelik bir hüzme ayırıcı (2),
 - nesne dalgasını (7) ve referans dalgasını (8) birleştirmek için bir hüzme ayırıcı (2),
 - birleştirilmiş nesne dalgasını (7) ve referans dalgasını (8) almak için bir görüntü alıcı eleman (1),
 - bir hedef fazı ve görüntü alıcı eleman tarafından alınan bir faz görüntüsünü depolamak için bir hafıza elemanı,
- faz görüntüsünü ve hedef fazı belirlemek ve faz görüntüsünü ve hedef fazı önceden belirlenmiş bir değere göre karşılaştırmak ve yeni bir görüntü oluşturmaya yönelik farkı nicelemek ve yeni görüntüyü uzamsal ışık modülatörüne göndermek için konfigüre edilmiş bir işlem elemanına haiz bir işlem birimi içermesidir.

10. İstem 9'a göre bir sistem olup, özelliği; işlem elemanının, piksel bazında çıkarma işlemi gerçekleştirerek faz görüntüsünü ve hedef fazı karşılaştırmak üzere konfigüre edilmiş olmasıdır.

5 11. İstem 10'a göre bir sistem olup, işlem elemanının, nicelemeyi,

$$W_k(x, y) = \begin{cases} 255, \text{eğer } W_k(x, y) > \pi \\ \text{aksi takdirde } \frac{255 * W_k(x, y)}{\pi}, \end{cases} \text{ veya } W_k(x, y) = \begin{cases} 1, \text{eğer } W_k(x, y) > \pi \\ \text{aksi takdirde } \frac{255 * W_k(x, y)}{\pi}, \end{cases}$$

formülüne göre gerçekleştirecek şekilde konfigüre edilmiş olması ve

10 burada W_k , uzamsal ışık modülatörüne yansıtılacak nicelenmiş gri tonlamalı görüntüdür, $\Delta\varphi_k$ hedef faz ile mevcut ölçüm arasındaki faz farkıdır, n uzamsal ışık modülatörünün bit derinliğidir, a ve m katsayılarıdır, x ve y piksellerin koordinatlarıdır ve k yineleme sayısıdır.

15 12. İstem 9'a göre bir sistem olup, özelliği; nesne dalgası (7) ve referans dalgasını (8) birleştiren hüzmeye ayırıcının (2), referans dalgasını (8) görüntü alıcı elemana (1) açışal olarak iletecek şekilde konumlandırılmış olmasıdır.

20 13. İstem 9'a göre bir sistem olup, özelliği; işlem elemanının, karşılaştırmadan önce görüntüleme elemanından (1) alınan görüntüyü yeniden yapılandıracak şekilde konfigüre edilmiş olmasıdır.

25 14. İstem 13'e göre bir sistem olup, özelliği; işlem elemanının, mevcut faz görüntüsünden yeniden yapılandırılan faz ile ilk referans faz arasındaki farkı bularak yeniden yapılandırmayı gerçekleştirmek üzere konfigüre edilmiş olmasıdır.

30 15. İstem 13 veya 14'e göre bir sistem olup, özelliği; işlem elemanının, faz yeniden yapılandırması ile elde edilen faz görüntüsünü çözecek şekilde konfigüre edilmiş olmasıdır.

TARİFNAME

BİR FOTOLİTOGRAFI YÖNTEMİ VE SİSTEMİ

5 Teknik Alan

Buluş, optik araçların üretimi için EM radyasyon kaynağı ile kürlemeye dayanan bir fotolitografi yöntemi ve bir sistem ile ilgilidir.

Önceki teknik

10 Fotolitografi yönteminde bir ışık, tercihen bir UV ışığı, maske aracılığıyla, o dalga boyundaki ışığa duyarlı bir fotoreziste iletilmektedir ve maskenin şekli, fotorezistin spesifikasyonu ve kimyasal bir prosesle yüzeyde istenilen şekiller oluşturulmaktadır.

Söz konusu alternatif bir yöntem için maskesiz bir fotolitografi kullanılmaktadır. Bu
15 yöntemde ışık, SLM olarak bilinen bir uzamsal ışık modülatörüne gönderilmektedir ve SLM'den yansıyan ışık, SLM'de depolanan hedef şekle göre bir çıktı sağlamaktadır.

Gri tonlamalı fotolitografi, mikro optik elemanların imalinde güçlü bir alet haline gelmiştir. Geleneksel fotolitografi, 2-B yapılarla sonuçlanan tüm alan boyunca aynı ışık dozu
20 uygulamaktadır. Gri tonlamalı litografi, uygulanan dozu değiştirmektedir ve bir oluşum prosesinden sonra 3-B yapılarla sonuçlanmaktadır.

Gri tonlamalı litografi, mikroakışkan kanalları¹, mercekler², optik elyaflar³, ızgaralar ve yarı iletken cihazların üretimi için kullanılabilir. Açık döngü olarak tasarlanan üretim
25 yönteminde, hedeflenen ürünün özelliklerini geliştirmek için birçok parametre optimize edilmeli ve üretim, ideal ortamda gerçekleştirilmelidir.

Bu yöntemde sıkı bir boyutsal gereklilik, numune üzerinde ön kalibrasyon gerektirmektedir. Hata marjları istenen toleransların altına düşene kadar ön kalibrasyon tekrarlanmaktadır. Aynı
30 zamanda, kalibrasyon tamamlandıktan sonra, sistem, doğal olarak çevresel etkilere duyarlı olduğundan, çevre koşulları sistemi etkilemeyecek şekilde değişmemelidir.

Tekniğin bilinen durumunda, ürünler ancak üretimden sonra karakterize edilmektedir ve üretim ve karakterizasyon için ayrı cihazlar kullanılmaktadır. Karakterizasyon sonucu ile hedeflenen aşama arasındaki farka bakılarak üretimde kullanılan parametreler optimize edilmektedir. Bu nedenle farklı eleman türleri için hem üretim süreci uzamakta hem de maliyet artmaktadır. Ek olarak üretimdeki olası varyasyonları en aza indirmek için çevresel faktörler kontrol edilmekte ve üretim cihazındaki optik doğrusallık (büyütme, bozulma, vinyet ve benzeri) en iyi seviyede tutulmaya çalışılmaktadır. Tüm bu parametrelerin kontrol altına alınması sistemlerin karmaşıklığını ve maliyetini artırmaktadır.

Spektroskopik elipsometri⁴, faza duyarlı elipsometri⁵, lazer reflektometri⁶, çok ışınlı interferometri⁷ ve emisyon spektroskopisi⁸ gibi tahribatsız muayene gereksinimini sağlayan ancak genellikle tek noktalı ölçümler için kullanılan bazı optik karakterizasyon teknikleri vardır. Bu teknikler düzlemsel şekiller için yeterli olabilir, ancak karmaşık faz plakaları üretmek için gerekli geri bildirim bilgilerini sağlamada yetersizdir. Görüş alanındaki herhangi bir sapmayı tamamen düzeltmek için tek nokta yöntemi yerine görüntüleme yöntemi tercih edilmektedir. Bu iş için nicel faz görüntüleme, gürültülü ortamlardaki iyi performansı ile öne çıkmaktadır. Numunenin fazı, dijital olarak kaydedilmiş hologramların dijital holografik mikroskopta⁹ yeniden yapılandırılması veya çeşitli nicel faz mikroskopi yöntemleri^{10,11,12} ile elde edilebilmektedir. Gerçek zamanlı nicel faz görüntülemeyi kullanan bazı ön çalışmalar vardır, ancak bunların kullanımı daha çok değişen aşındırma oranlarının bulunmasında sınırlıdır.

US5076974A, kısmen polimerize numune için bir kütleme yöntemini açıklamaktadır. Kütleme, bu açıklamada EM radyasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem için bir fotorezist kalibrasyonu ve son karakterizasyon gereklidir.

US9229330B2, nano ölçekte desen yazmak için bir yöntemi açıklamaktadır. Burada numuneye birinci ve ikinci dalga boyunda olan ışınlar gönderilmektedir ve bundan sonra ikinci dalga boyundaki fotonların söz konusu numune malzemeden geçtikten sonra yansıyan bir kısmı tespit edilmektedir.

KR100864391B1'de, bir ışık kaynağından sağlanan bir ışın, bir hüzme ayırıcı aracılığıyla bir SLM'ye iletilmektedir ve hüzme ayırıcıdan yansıyan ışın, bir numuneye yansımaktadır. Burada, sürekli olarak SLM'ye veri besleyen bir pikselleştirici kullanılmaktadır.

- 5 Sonuç olarak yukarıda bahsedilen sorunların tümü ilgili alanda bir özgünlük sağlamayı gerekli kılmıştır.

Buluşun Kısa Açıklaması ve Amaçları

10 Mevcut buluşun temel amacı, anlık kalibrasyon ile polimerizasyon bazlı optiklerin üretimi için bir fotolitografi yöntemi yapısı oluşturmaktır. Buna göre, yöntem aşağıdaki adımları içermektedir:

bir hedef fazın sağlanması,

bir EM radyasyon kaynağından bir uzamsal ışık modülatörüne bir ışının iletilmesi ve bir uzamsal ışık modülatöründen yansıyan ışının bir numuneye iletilmesi,

- 15 bir ışık kaynağından sağlanan bir ışının referans dalga ve nesne dalgası olarak ikiye bölünmesi ve nesne dalgasının numuneye iletilmesi,

numuneden geçen nesne dalgasının ve referans dalgasının birleştirilmesi ve bir görüntü alıcı elemana gönderilmesi ve bir faz görüntüsü elde edilmesi,

- 20 faz görüntüsü ve hedef fazın karşılaştırılması ve faz görüntüsü ve hedef faz arasındaki bir farkın önceden belirlenmiş bir değerin üzerinde olması durumunda uzamsal ışık modülatörü için yeni bir görüntü oluşturmak üzere faz görüntüsünün nicelenmesi.

Dolayısıyla sistemin dijital görüntüleme bölümünden gelen faz gecikme ölçümleri ile anında müdahale edilerek her noktanın fazının zaman içinde nasıl geliştiği ölçülerek ve sapmalar 25 düzeltilerek sürecin istenilen deseni oluşturulmaktadır ve bu sayede, fotorezistin ön kalibrasyonu ve sonradan karakterizasyonu gerekliliği ortadan kalkmaktadır.

Buluşun tercih edilen bir yapılandırmasında niceleme, aşağıdaki formül ile gerçekleştirilmektedir

30

$$W_k(x, y) = \begin{cases} 255, & \text{eğer } W_k(x, y) > \pi \\ \text{aksi takdirde } \frac{255 * W_k(x, y)}{\pi}, & \end{cases} \text{ veya } W_k(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } W_k(x, y) > \pi \\ \text{aksi takdirde } \frac{255 * W_k(x, y)}{\pi}, & \end{cases}$$

burada W_k , uzamsal ışık modülatörüne yansıtılacak nicelenmiş gri tonlamalı görüntüdür, $\Delta\phi_k$, hedef faz ile mevcut ölçüm arasındaki faz farkıdır, n uzamsal ışık modülatörünün bit derinliğidir, x ve y piksellerin koordinatlarıdır ve k yineleme sayısıdır. Denklemin genelleştirilmiş biçiminde, a ve m katsayılarıdır.

5

Buluşun tercih edilen bir yapılandırmasında referans dalga, görüntü alıcı elemana açışal olarak iletilmektedir ve bu, numunedeki fazın belirlenmesi için eksen dışı dijital holografi yöntemlerinin kullanılmasına olanak tanımaktadır.

- 10 Buluşun tercih edilen bir yapılandırmasında referans dalga ve nesne dalgalarından biri birleştirmeden önce geciktirilmektedir. Dolayısıyla referans dalganın ve nesne dalgasının zamansal fazı eşleştirilmektedir.

- 15 Buluşun tercih edilen bir yapılandırmasında, nesne dalgası ve EM radyasyon ışını numuneye aynı eksende gönderilmekte ve nesne dalgasının geçişini sağlamak ve EM radyasyon ışınını numuneye yansıtmak üzere seçilen dikroik bir ayna, söz konusu eksende konumlandırılmaktadır. Dolayısıyla her iki operasyon da tek eksende yapılabilmekte ve sistem kullanılacak hacim konusunda avantajlı hale gelmektedir.

- 20 Mevcut buluşun temel amacı, anlık kalibrasyon ile polimerizasyon bazlı optiklerin üretimi için bir fotolitografi sistem yapısı oluşturmaktır. Buna göre, sistem şunları içermektedir: bir EM radyasyon kaynağı ve EM radyasyon kaynağından bir ışını almak ve alınan ışını yansıtmak üzere bir uzamsal ışık modülatörü.

- 25 bir ışık kaynağı ve ışık kaynağından sağlanan bir ışının referans dalga ve nesne dalgası olarak ikiye bölünmesi ve nesne dalgasının numuneye iletilmesi için ve bir hüzme ayırıcı, referans dalgasını ve nesne dalgasını birleştirmek için bir hüzme ayırıcı, birleştirilmiş referans dalgasını ve nesne dalgasını almak için bir görüntü alıcı eleman, aşağıdakilere sahip bir işlemci birimi

- 30 bir hedef fazı ve görüntü alıcı eleman tarafından alınan bir faz görüntüsünü depolamak için bir hafıza elemanı,

bir işlem elemanı, faz görüntüsünü ve hedef fazı belirlemek ve faz görüntüsünü ve hedef fazı önceden belirlenmiş bir değere göre karşılaştırmak ve yeni bir görüntü oluşturmak için farkı

nicelemek ve yeni görüntüyü uzamsal ışık modülatörüne göndermek için konfigüre edilmektedir.

Buluşun Şekillerinin Açıklaması

- 5 Buluşun konusunun daha iyi anlaşılması için gerekli şekiller ve ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.

Şekil 1. Buluşun konusunun temsili bir şematik görünümü.

Şekil 1a. Örnek bir hedef faz görüntüsüdür.

- 10 **Şekil 1b.** Şekil 1a'daki hedef faz görüntüsünün $k=1, 46, 75$ yinelemelerinde yeniden yapılandırılmasıyla elde edilen yeniden yapılandırılmış görüntülerdir.

Şekil 1c. Şekil 1a'daki hedef faz için sistemdeki nicelemenin bir sonucu olarak $k=1, 46, 75$ yinelemelerinde elde edilen uzamsal ışık modülatörü için yeni görüntüler.

Şekil 2. Deneysel kurulumun örnek bir şematik görünümüdür.

- 15 **Şekil 3.** Örnek bir hedef faz görüntüsüdür.

Şekil 3a. Önceki tekniğe ait sistem tarafından bir sonuç görüntüsü elde edilmektedir.

Şekil 3b. Buluşun konusu tarafından elde edilen bir sonuç görüntüsüdür.

Şekil 3c. Şekil 3-3b'de gösterilen görüntülerin faz profilleridir.

Şekil 4. Başka bir örnek hedef faz görüntüsüdür

- 20 **Şekil 4a.** Şekil 4'ün bir sonuç görüntüsü, önceki tekniğe ait sistem tarafından elde edilmektedir.

Şekil 4b. Şekil 4'ün bir sonuç görüntüsü, buluşun konusu tarafından elde edilmektedir.

Şekil 4c. Şekil 4-4b'de gösterilen görüntülerin faz profilleridir.

Şekil 5. Bir girdap faz plakası için örnek bir hedef faz görüntüsüdür.

- 25 **Şekil 5a.** Şekil 5'in bir sonuç görüntüsü, önceki tekniğe ait sistem tarafından elde edilmektedir.

Şekil 5b. Şekil 5-5a'da gösterilen görüntülerin faz profilleridir.

Şekil 6. İmal edilen girdap faz plakasından fiziksel olarak gözlemlenen çıkış ışınıdır.

- 30 **Şekil 6a.** Numuneden elde edilen son kompleks alandan çıkış ışınının sayısal hesaplanmasıdır.

Şekil 6b. Şekil 6 ve Şekil 6a'nın dikey ve yatay profil karşılaştırmalarıdır.

Şekil 7. Buluşun konusunun temsili bir diğer şematik görünümü.

Referans Numaraları

Buluşun konusunun daha iyi anlaşılabilmesi için şekillerde verilen parça ve bileşenler referans verilmiştir.

5

1. Görüntü alıcı eleman
2. Hüzme ayırıcı
3. Uzamsal ışık modülatörü
4. Ayna

10

5. Numune
6. Mercekler
7. Nesne dalgası
8. Referans dalgası
9. EM radyasyon kaynağı

15

10. Işık kaynağı
11. Dağıtıcı
12. Uzamsal filtre
13. Prizma

20

Buluşun Detaylı Açıklaması

Buluş, optik araçların üretimi için EM radyasyon kaynağı ile küremeye dayanan bir fotolitografi yöntemi ve bir sistem ile ilgilidir.

25

Detaylı açıklamada tarif edilen fotolitografi yöntemi, polimerizasyona dayalı ürünler, özellikle optikler üretmek için açıklanmıştır. Bununla birlikte tekniği, polimerizasyon esaslı olmayan malzemelere genişletmek mümkündür. Fotorezistler (malzemenin çözünabilirliğinin ışığa maruz kalma ile değiştiği fotopolimerler dahil) genel olarak kullanılabilmektedir. Ek olarak camların, kristallerin veya metallerin ışıkla indüklenen seçici aşındırması veya biriktirmesi de yöntem ile uyumlu olacaktır. Uygun bir uzamsal ışık modülatörü (3) veya tarama sistemi ile metallerin, kristallerin, camların çok hızlı (femtosaniye) lazerle aşındırılması veya kristallerde ve camlarda çok hızlı lazer kaynaklı kırılma indisi değişikliği diğer alternatif kullanım senaryoları olacaktır. Yansıtıcı bir numune ile kullanımlar için,

30

sistemin yansıma görüntüleme geometrisi için değiştirilmesi gerekmektedir. Ancak, yaklaşım ve yöntem aynı kalacaktır.

Şekil 1 ve 2'ye atfen; buluşun konusu iki kısım içermektedir. Bunlar fotolitografi kısmı ve işlem kısmıdır.

Fotolitografi işlemi için, örneğin Şekil 1a'da gösterilen görüntü gibi bir hedef faz sağlanmaktadır. Hedef faz bir görüntü olarak verilebilmekte veya matematiksel olarak tanımlanabilmektedir. Hedef faz bir bellek birimine, özellikle bir işlem biriminin bellek elemanına aktarılmaktadır. İşlem birimi, daha sonra açıklanacağı gibi bir işlem elemanı içermektedir.

Fotolitografi prosesinin başlangıcında, bir EM radyasyon kaynağı başlatılmaktadır ve bir EM radyasyon ışını bir uzamsal ışık modülatörüne (3) iletilmekte ve uzamsal ışık modülatöründen (3) bir numuneye (5) yansıtılmaktadır. Burada EM radyasyon kaynağı (9) dalga boyu 260-410 nm arasında, özellikle 405 nm olacak şekilde seçilmektedir. Tercihen EM radyasyon kaynağı (9), bir UV ışık kaynağı veya dalga boyu 500 nm-540 nm olan bir yeşil ışık kaynağıdır. Tercihen EM radyasyon kaynağı (9), EM radyasyon kaynağının (9) ışını, uzamsal ışık modülatörünün (3) en azından tüm aktif yüzeyini dolduracak, özellikle uzamsal ışık modülatörünün (3) aktif yüzeyini fazlasıyla dolduracak şekilde seçilmektedir.

EM radyasyon ışınları uzamsal ışık modülatöründen (3) numuneye (5) doğrudan aktarılabilenkte veya tercihen aynalarla numuneye (5) yansıtılabilmektedir. Şekil 1 ve 2'de gösterilen yapılandırmada EM radyasyon ışını, ışın yönüne göre açılı olarak konumlandırılan aynalar (4) tarafından numuneye (5) iletilmektedir. Tercihen bu aynalar (4) ışın yönüne göre 45°'lik bir açıyla konumlandırılmaktadır. Mercekler (6), aynalar (4) arasına yerleştirilebilmektedir.

Tercihen uzamsal ışık modülatörünün (3) önüne bir hüzme ayırıcı (2) yerleştirilmiştir. Söz konusu uzamsal ışık modülatörü (3), PBS olarak bilinen polarize edici bir uzamsal ışık modülatörüdür (3). PBS, EM radyasyon ışını için kontrast oluşturmaktadır.

Tercih edilen bir yapılandırmada, hüzme ayırıcı (2) ve EM radyasyon kaynağı (9) arasına bir dağıtıcı (11), tercihen dönen dağıtıcı (11) konumlandırılmaktadır. Dağıtıcı (11), lazer ışınının neden olduğu beneklerin etkisini azaltmaktadır. Ek olarak, düzlemsel olarak sağlanan başka bir dağıtıcı (11) uzamsal ışık modülatörü (3) ve EM radyasyon kaynağı (9) arasında

5 konumlandırılabilir.

EM radyasyon ışını numuneye (5) temas ettiğinde desenleme/yazma prosesi başlamaktadır. EM radyasyon kaynağı (9) sürekli olarak ışın iletebilmektedir veya diğer ışık kaynağı (10) başladıktan sonra durmaktadır. Mevcut sistem için, yinelemenin her bir döngüsü, 50 ms'lik bir

10 EM radyasyon ışın süresine sahiptir. Yakınsamaya, tipik olarak 125 yinelemeden sonra ulaşılmaktadır. Bu süre, EM radyasyon kaynağının ışık şiddetine bağlı olarak daha uzun veya daha kısa olabilmektedir. Dolayısıyla tipik olarak EM radyasyon maruziyetinin birkaç yüz milisaniyeden (20-200 ms.) birkaç yüz yinelemeyle (100-400) daha az olması beklendiğini söylemek mümkündür.

15 Söz konusu ikinci ışık kaynağı (10) tercihen faz uyumlu lazer ışınıdır. Işık kaynağı (10), numune (5) üzerinde polimerizasyona neden olmayan dalga boyuna sahip ışını yaymaktadır. Işının dalga boyu, 405 nm'ye duyarlı polimer için 440 nm'den yüksek, tercihen 660 nm'de olabilmektedir. Burada, bir miktar soğurma marjı da hesaba katılmalıdır.

20 Işık kaynağından (10) yayılan ışın, bir hüzme ayırıcı (2) ile bölünmektedir. Söz konusu hüzme ayırıcı (2) polarize değildir. Bölünmüş ışının iki parçasından biri nesne dalgası (7), diğeri ise referans dalgası (8) olarak adlandırılabilir. Işık kaynağı (10) tarafından iletilen ışın, hüzme ayırıcıya (2) ulaşmadan önce tam uzamsal faz uyumluluğunu sağlamak

25 için bir uzamsal filtreden (12) geçmektedir.

Nesne dalgası (7) numuneden (5) geçmektedir. Hüzme ayırıcı (2), nesne dalgasını (7) doğrudan numunenin (5) yüzeyine yansıtacak şekilde konumlandırılabilir. Alternatif olarak, hüzme ayırıcı (2) nesne dalgasını (7) doğrudan numuneye (5) yönlendirmese dahi

30 nesne dalgası (7), başka bir hüzme ayırıcı (2) ve/veya prizma (13) ve/veya aynalar (4) tarafından numuneye (5) yönlendirilebilir.

Nesne dalgası (7), nesne dalgası (7) numuneden (5) geçtikten sonra bir hüzme ayırıcı tarafından referans dalgası (8) ile birleştirilmektedir. Nesne dalgası (7) ve referans dalgası (8), hüzme ayırıcının (2) farklı yüzeylerine girmekte ve hüzme ayırıcının (2) aynı yüzeyinden dışarı çıkmaktadır. Aynalar (4), hüzme ayırıcının (2) yüzeyine gitmelerini sağlamak üzere nesne dalgasına (7) ve/veya referans dalgaya (8) kılavuzluk etmek için kullanılabilir. 5

Nesne dalgasının (7) ve referans dalgasının (8) zamansal fazının eşleşmesini sağlamak için dalgalardan biri, tercihen nesne dalgası bir geciktirme hattından geçmektedir. Geciktirme hattı, hüzme ayırıcının (2) ve/veya prizmaların (13) ve/veya aynaların (4) ışının yolunu daha 10 uzun hale getirmek için yol üzerine yerleştirildiği bir ışın yoludur. Tercihen geciktirme hattı, bıçak kenarlı ayna (4) ve dik açılı prizma (13) içermektedir.

Buluşun tercih edilen bir yapılandırmasında EM radyasyon ışını ve ışık kaynağının (10) aktardığı ışın aynı ekseninde numuneye (5) ulaşmaktadır. Bunu sağlamak için dikroik ayna (4) 15 kullanılmaktadır. Dikroik ayna (4), nesne dalgasının (7) geçmesini ve EM radyasyon ışınını numuneye (5) yansıtmasını sağlayacak şekilde konumlandırılmış ve seçilmiştir.

Nesne dalgası (7) ve referans dalgası (8) hüzme ayırıcı (2) tarafından birleştirildikten sonra bir görüntü alıcı eleman (1) tarafından alınmaktadır. Görüntü alıcı eleman (1) tercihen bir 20 kameradır. Hüzme ayırıcı (2) tercihen açılı olarak konumlandırılmaktadır, daha açık olarak hüzme ayırıcı (2) ışını açılı şekilde aktarmaktadır.

Şekil 1 ve 7'ye atfen; görüntü alıcı elemandan (1) alınan bir faz görüntüsü, tercihen bir hologram, hedef faz ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma için piksel bazında çıkarma 25 yapılmaktadır ve eğer çıkarma sonucu önceden belirlenen değerden düşükse herhangi bir işlem yapılmamaktadır, ancak eğer çıkarma sonucu önceden belirlenen değerden yüksekse alınan faz görüntüsü için niceleme yapılmaktadır. Niceleme, farklı ihtiyaçlar için tasarlanmıştır. Ancak başarı oranı daha yüksektir, niceleme aşağıdaki formül ile yapılmaktadır

30

$$W_k(x, y) = \begin{cases} 255, \text{eğer } W_k(x, y) > \pi \\ \text{aksi takdirde } \frac{255 * W_k(x, y)}{\pi}, \end{cases} \text{ veya } W_k(x, y) = \begin{cases} 1, \text{eğer } W_k(x, y) > \pi \\ \text{aksi takdirde } \frac{255 * W_k(x, y)}{\pi}, \end{cases}$$

burada W_k , uzamsal ışık modülatörüne yansıtılacak nicelenmiş gri tonlamalı görüntüdür, $\Delta\varphi_k$ hedef faz ile mevcut ölçüm arasındaki faz farkıdır, n uzamsal ışık modülatörünün bit derinliğidir, x ve y piksellerin koordinatlarıdır ve k yineleme sayısıdır. Denklemin genelleştirilmiş biçiminde, a ve m katsayılarıdır.

5

Niceleme sonucunda uzamsal ışık modülatöründe (3) kullanılmak üzere yeni görüntü oluşturulmaktadır. Bu yeni görüntü kullanılarak işlem yeniden başlatılmaktadır ve alınan faz görüntüsü hedef faz ile karşılaştırılmaktadır ve söz konusu işlem, fark önceden belirlenen değerden düşük olana kadar tekrarlanmaktadır.

10

Karşılaştırmadan önce faz görüntüsü yeniden yapılandırılabilir. Yeniden yapılandırma, mevcut faz görüntüsünden yeniden yapılandırılan faz ile ilk referans faz arasındaki fark bulunarak gerçekleştirilmektedir.

15 Yeniden yapılandırmadan sonra, elde edilen görüntü “çözülmüş” olabilmektedir.

Karşılaştırma, bir işlem elemanına sahip bir işlem birimi tarafından gerçekleştirilmektedir. Burada işlem birimi ayrıca piksel kaldırma ve/veya yeniden yapılandırma ve/veya çözme işlemlerini gerçekleştirmek üzere konfigüre edilebilmektedir.

20

Bu yöntem, uygun uyarılama ile diğer fotolitografi prosesleri için kullanılabilir. Bir örnek, örneğin silikonun foto-indüklenmiş kimyasal aşındırması kullanılarak silikondaki 3B yapılarıdır. Bu durumda silikon üzerinden (Silikon şeffaflığının daha yüksek olduğu yerlerde) faz görüntüleme için kısa dalga kızılötesi lazer ve kamera gereklidir. Bu şekilde, bir yonga içinde fiziksel kanallar veya yollar oluşturulabilir. Başka bir örnek, fotonik yongalar için optik dalga kılavuzlarının gerçekleştirilmesidir, bu dalga kılavuzlarının tanımlanması için burada çok hızlı lazer kaynaklı kırılma indisi değişimi kullanılabilir. Bunların yanı sıra, kristallerin veya metallerin herhangi bir 3B yapısı, farklı yongaların (örneğin MEMS yongaları) parçası olarak gerçekleştirilebilir.

30

Buluşun tercih edilen bir yapılandırması aşağıdaki adımları içermektedir:

- a) Bir hedef faz haritasının sağlanması (Optik veya başka bir elemanın istenilen faz haritası),

- b) EM radyasyon kaynağının (9) önceden tanımlanmış bir süre boyunca tüm görüş alanlarında polimerizasyona neden olması ve ışıklı aydınlatma ile fotopolimer veya fotorezistin kürlemesini başlatması için açılması,
- c) EM radyasyon kaynağının (9) kapatılması ve lazer tipi ışık kaynağının (10) dijital holografik görüntüleme için açılması,
- d) Görüntü alıcı elemandan (1) numunenin dijital hologramının alınması,
- e) Görüntü alıcı elemandan (1) alınan görüntünün, hologramın yeniden yapılandırılması,
- f) Faz görüntüsünün elde edilmesi,
- g) Faz görüntüsünün çözülmesi ve hedef faz haritası ile çözülmüş faz görüntüsü arasındaki piksel bazında farkın hesaplanması
- h) Fark önceden belirlenen değerden yüksekse bir sonraki adıma geçilmesi ve değilse yinelemenin sonlandırılması,
- i) Piksel farkının nicelenmesi. Pi faz değerine kadar olan piksel bazlı fark değerlerinin, uzamsal ışık modülatörünün tam bit derinliğine doğrusal olarak haritalanması. Pi faz değeri üzerindeki tüm faz farkları, bit derinliğinin maksimum değerine ayarlanmaktadır.
- j) Nicelenmiş görüntünün uzamsal ışık modülatörüne (3) yansıtılması.

DeneySEL bir sistem kurulumu aşağıda açıklanmıştır.

UV kürleme alt sistemi

DeneySEL konfigürasyon Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu kurulum sırasıyla UV kürleme ve dijital holografî olarak 2 parçaya ayrılabilir. UV kürleme için, fotopolimerin soğurma bandıyla eşleşen bir merkez dalga boyuna sahip bir ışık kaynağı (10) (tipik olarak bir LED veya merkez dalga boyu 260 nm ve 410 nm arasında düşen bir lazer diyot), paralelleştirme sonrası ışığın uzamsal ışık modülatörüne (3) fazla dolmasını sağlayacak şekilde bir mercek (6) yardımıyla paralelleştirilmektedir. Lazerin neden olduğu beneklerin etkisini azaltmak için, döner dağıtıcı (11) görevi görmesi için bir DC motor üzerine ev yapımı bir dağıtıcı monte edilmiştir. Uzamsal ışık modülatörü (3) düzleminde homojen ışıklandırma sağlamak için ek bir düz tepeli dağıtıcı (Thorlabs ED1-S20-MD) yerleştirilmiştir. Bu deneyde kullanılan uzamsal ışık modülatörü (3), 1024x600 doğal çözünürlüğe ve 9.45 µm piksel boyutuna (Syndiant Syl2061) sahip ticari bir projektörden (AAXA Technologies P3 Pico Projektör) alınmıştır. Uzamsal ışık modülatöründen (3) yansıyan ışık, kontrast oluşturmak için polarize

edici bir hüzme ayırıcıdan (2) (Thorlabs CCM1-PBS251/M) geçmektedir. Uzamsal ışık modülatörü (3) düzlemi, iki mercek (6) aracılığıyla bir kat büyütme 4-f konfigürasyonu tarafından numune düzlemi üzerine görüntülenmektedir. 4-f sisteminin iki merceği arasında bulunan bir ayna (4), optik yolun katlanmasını sağlamaktadır. UV kürlemenin optik yolu, dijital holografi lazer diyotu olan ışık kaynağının (10) dalga boyunu iletirken EM radyasyon kaynağının (10) dalga boyunu yansıtan bir dikroik aynadan (4) yansıma ile katlanmaktadır. 405 nm lazerin anahtarlama durumu, bir L298N motor sürücüsü ve Arduino tarafından kontrol edilmektedir. UV aydınlatmasının numune düzlemindeki akışı $4.23 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 'dir.

10 Dijital holografik görüntüleme alt sistemi

Dijital holografi ölçümü için, 660 nm merkez dalga boyuna sahip ışık kaynağı (10) olarak bir lazer diyottan gelen ışık, tam uzamsal faz uyumunu sağlamak için paralelleştirilmiş ve uzamsal olarak filtrelenmiştir (15). Ardından bu ışın, nesne dalgası (7) ve referans dalgası (8) olarak kullanılmak üzere polarize olmayan bir hüzme ayırıcı (2) tarafından iki dalgaya bölünmektedir. Nesne dalgası (7), referans kolunun zamansal fazına uyması için bir bıçak kenarı ayna (4) ve bir dik açılı prizmadan (13) oluşan bir geciktirme hattından geçmektedir. Ardından nesne dalgasından (7) gelen ışın, numune (5) ve dikroik aynadan (4) geçmektedir. Numune, bir kat büyütmeye sahip iki mercekli (6) 4-f görüntüleme sisteminin giriş düzlemi ile çalışmaktadır. Nihai polarize olmayan bir hüzme ayırıcı (2) ile referans dalga (8), bir kamera olarak seçilen görüntü alıcı elemana (1) eğik bir açıyla yönlendirilmektedir ve nesne dalgasından (7) gelen ışınla birleşmektedir. Bu eğim açısı, numunedeki fazı belirlemek için eksen dışı dijital holografi yöntemlerini kullanmamızı sağlamaktadır. (Kamera modeli IDS UI-3080CP). (Tüm 4f konfigürasyonları 1-1'dir)

25 Faz yeniden yapılandırması

Faz nicelleştirilmesinde, nesne dalgasının geri eldesi için Fourier filtrelemesi uygulanmaktadır. Doğrusal faz modülasyonlarından kurtulmak için nesne dalgası, düşük frekanslı spektrum terimleriyle bölünerek Fourier düzleminin merkezine taşınmaktadır. UV kürleme ile faz değişiminin ölçümü, mevcut hologramdan yeniden yapılandırılan faz ile ilk referans hologram arasındaki fark bulunarak yapılmaktadır. Faz görüntüsü daha sonra en küçük kare faz tahmin yöntemi kullanılarak çözümlenmektedir. Her faz görüntüsü için istikrarlı bir temel ayarlamak için, yansıtılan alanın dışında kalan bir dikdörtgen bölgedeki fazın

ortalama değeri hesaplanmaktadır ve yinelemeli projeksiyon için son faz görüntülerini elde etmek üzere çıkarılmaktadır.

5 Numune hazırlanışı

Numune (7), çift taraflı bantla ayrılmış iki cam slayt arasına yüklenen OrmoComp® pozitif fotorezist kullanılarak hazırlanmaktadır.

Projektif dönüşüm

- 10 Yinelemeli yöntem, elde edilen faz görüntüsünü kullanarak uzamsal ışık modülatörü (3) girişini değiştirdiğinden, projeksiyonu hologram yakalamaya doğru şekilde haritalamak esastır. Bunu başarmak için, uzamsal ışık modülatörüne (3) bir kalibrasyon görüntüsü beslenmektedir ve elde edilen faz görüntüsüne bakılarak MATLAB'ın `fitgeotrans()` fonksiyonu kullanılarak elde edilen projektif dönüşüm bulunmaktadır.

15

Projeksiyon Hesaplaması

- İlk olarak hedef faz fonksiyonu bir görüntü olarak verilmekte veya matematiksel olarak tanımlanmaktadır. İkinci olarak, görüntü alıcı eleman (1) hologramı yakalamakta ve bir faz haritası oluşturmaktadır. Projektif bir dönüşümden sonra ortaya çıkan faz değerleri, bir sonraki uzamsal ışık modülatörü (3) görüntüsünü oluşturmak için kullanılabilir. Görüntünün oluşturulması için hedef faz ve mevcut faz arasındaki fark hesaplanmaktadır. Faz farkı π 'den büyük ise uzamsal ışık modülatörü (3) için 255 piksel değeri verilmektedir. Aksi halde, karşılık gelen piksel değerini bulmak için doğrusal bir haritalama uygulanmaktadır. Bu döngü, ortalama faz farkı belirli bir eşiğin altına düşene kadar devam etmektedir. Bu eşik değeri, hedef faza bağlıdır ve deneysel olarak karşılaştırılmaktadır.

25

Şekil Seçimi

- Çoğu fotorezistin doğrusal olmayan bir pozlama eğrisi vardır ve bağlanma başlamadan önce belirli bir miktarda eşik pozlaması gerektirmektedir. Bu eşik olgusunun etkisini azaltmak için, düşük değerli faz hedeflerinin bile doğru şekilde oluşturulmasını sağlamak üzere π radyan fazlı bir taban ekledik. 10 piksel yarıçaplı bir gauss filtresi, bu temel faz çerçevesinin kenarlarına, doğru faz çözmeye izin vermek için uygulanmaktadır, çünkü çözülme algoritmalarının ani sıçramaları doğru bir şekilde algılaması için zordur.

30

İlk deneyler, deney düzeneğimizle elde edebileceğimiz maksimum faz farkının $\sim 4\pi$ olduğunu göstermiştir. Önerilen yinelemeli yöntemin yeteneklerini göstermek için kare, maya piramidi ve girdap olmak üzere 3 farklı faz levhası oluşturmaya çalıştık. Kare faz plakası için, kare faz bölgesinin yüksekliği, çerçeveye kıyasla 2π faz sıçramasına karşılık gelen 3π olarak seçilmektedir. Bu şekil, çoğunlukla düz yüzeyler için önerilen algoritmanın performansını değerlendirmemizi sağlamaktadır. Maya piramidi, üst tarafı kesilmiş kare bir piramit gibi görünecek şekilde tasarlanmıştır. Daha sonra kalan şekil kare durumda anlatıldığı gibi çerçeveye eklenmektedir. Piramidin yüksekliği, çerçeveye kıyasla 2π faz sıçramasına karşılık gelen 3π olarak seçilmektedir. Bu şekil, sabit eğimli uygulamalar için önerilen algoritmanın davranışını izlememize izin vermektedir.

Son faz plakası olan girdap, kesilmiş bir piramit üzerine yerleştirilmektedir. Bu seçim, bu girdap şeklinin x ekseninde doğal bir faz süreksizliğine sahip olması nedeniyle faz sıçramalarının etkisini tekrar azaltmaktır.

Standart sapma hesaplaması

Şekiller 3-3b ve 4-4b'deki faz görüntülerinin boyutu 300x300'dür. Şekil 3c'deki çizim, oklar yönünde alınan ve 5 piksel ayırık çizgi profilleri kullanılarak oluşturulmuştur. Kalın çizgi, bu 41 çizgi profilinin ortalamasını göstermektedir ve vurgulanan alan her nokta için standart sapmayı göstermektedir. Ölçek çubuğu, 500 μm 'lik bir uzunluk göstermektedir. Çizgiler ideal durumu, geleneksel sabiti ve önerilen yöntemimizin sonuçlarını göstermektedir.

Şekil 4-4b'de gösterilen piramit durumu için düz alan bir önceki duruma göre daha küçük olduğu için standart sapma ve ortalama değerlerin hesaplanmasında 21 çizgi profili kullanılmıştır. Her satır için ayırıklık yine 5 pikseldir.

Şekil 5-5b'de gösterilen girdap durumu için, farklı yarıçaplara sahip eş merkezli halkalar boyunca çizgi profilleri kullanılarak standart sapma hesaplanmaktadır. Her bir halkanın yarıçapı her adımda 5 piksel artmaktadır. Her adım için, çizgi profilleri eşit aralıklı bir açı vektörüne ara değerlendirilmektedir. Tüm yarıçap değerleri için aynı uzunluktaki çizgi profillerini elde ettikten sonra standart sapma ve ortalama hesaplanmaktadır.

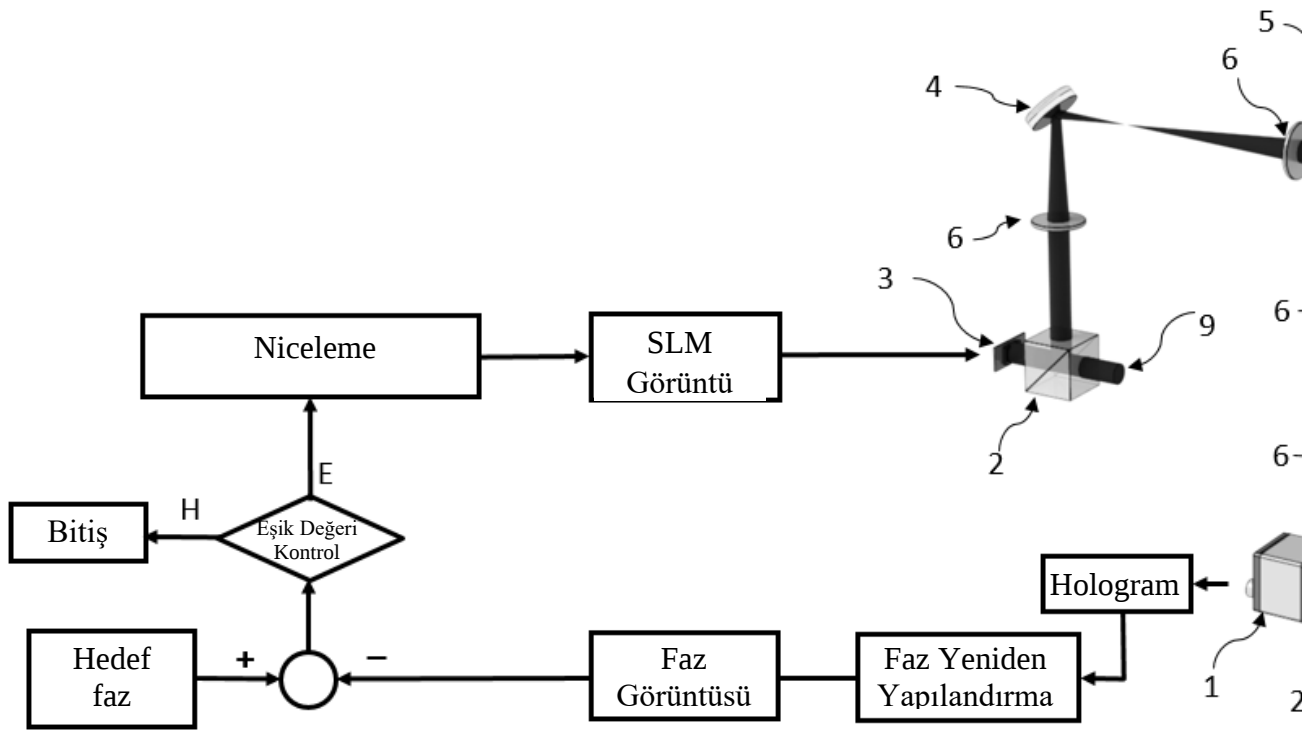
Donut Şekli görüntüleme

Donut şeklinin görüntülenmesi için, yazılı faz plakası, paralelleştirilmiş bir lazer kaynağının önüne yerleştirilmektedir. Işın boyutu, çapı girdabın boyutundan biraz daha küçük olacak şekilde ayarlanmıştır. Ardından faz plakasından geçen ışık bir mercek (Thorlabs LB1409-A) ile kamera (Basler acA1440-220um) odaklanmaktadır.

Şekil 3-3c'ye atfen; kare durumda, klasik yöntem için üst yüzeyin düzlüğü kabul edilebilir olsa da yöntemimiz numunedeki standart sapmayı da azaltarak bunu iyileştirmektedir. Klasik ve yinelemeli durum için ortalama faz farkı sırasıyla 0.62 ve 0.29 radyandır. Klasik yöntemde arka plan ve üst kısım artan bir profile sahipken yinelemeli durumda ideale yakın kaldığı için yinelemeli yöntemin homojen olmayan UV ışıklandırmasına karşı bağımsızlık sağladığını görebilmekteyiz.

Şekil 4-4c'ye atfen; piramit şeklindeki yapı için homojen olmayan ışıklandırmanın etkisi daha belirgindir. Faz görüntüsünün üstü, faz görüntüsünün sağ tarafındaki toplam UV dozunun sol tarafa göre daha yüksek olduğunu gösteren pozitif bir eğime sahiptir. Klasik ve yinelemeli durum için ortalama faz farkı sırasıyla 1.34 ve 0.19 radyandır. Aynı zamanda piramitlerin kenarlarının eğimi sabit bir değere yakın olmasına rağmen istenen eğimden farklıdır ve ortalama farkının artmasının temel nedeni budur. Bu fark, bir ön kalibrasyon tablosu yardımıyla klasik yöntem için öngörülen model değiştirilerek düzeltilebilmektedir. Bununla birlikte, bir ön kalibrasyon süreci yürütmek maliyetleri artırmaktadır ve kabul edilebilir performans için çevre koşullarının aynı kalmasını gerektirmektedir.

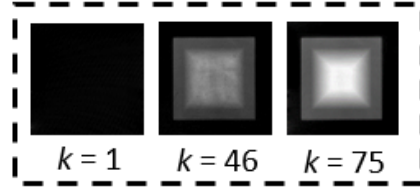
Şekil 5-5b'ye atfen; son şekil için 2π girdap faz plakası oluşturduk. Önerilen yöntemin performansı bu faz plakasında daha belirgindir. Deneysel olarak gözlemlenen halka şeklindeki ışın Şekil 6'da ve Şekil 6a'da görülebilmektedir. Şekil 6b, dijital holografik faz görüntülemeye elde edilen nihai faz değeri kullanılarak hesaplanan ışık şiddeti dağılımını göstermektedir. Klasik ve yinelemeli durum için ortalama faz farkı sırasıyla 1.57 ve 0.46 radyandır.



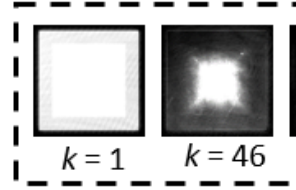
ŞEKİL 1



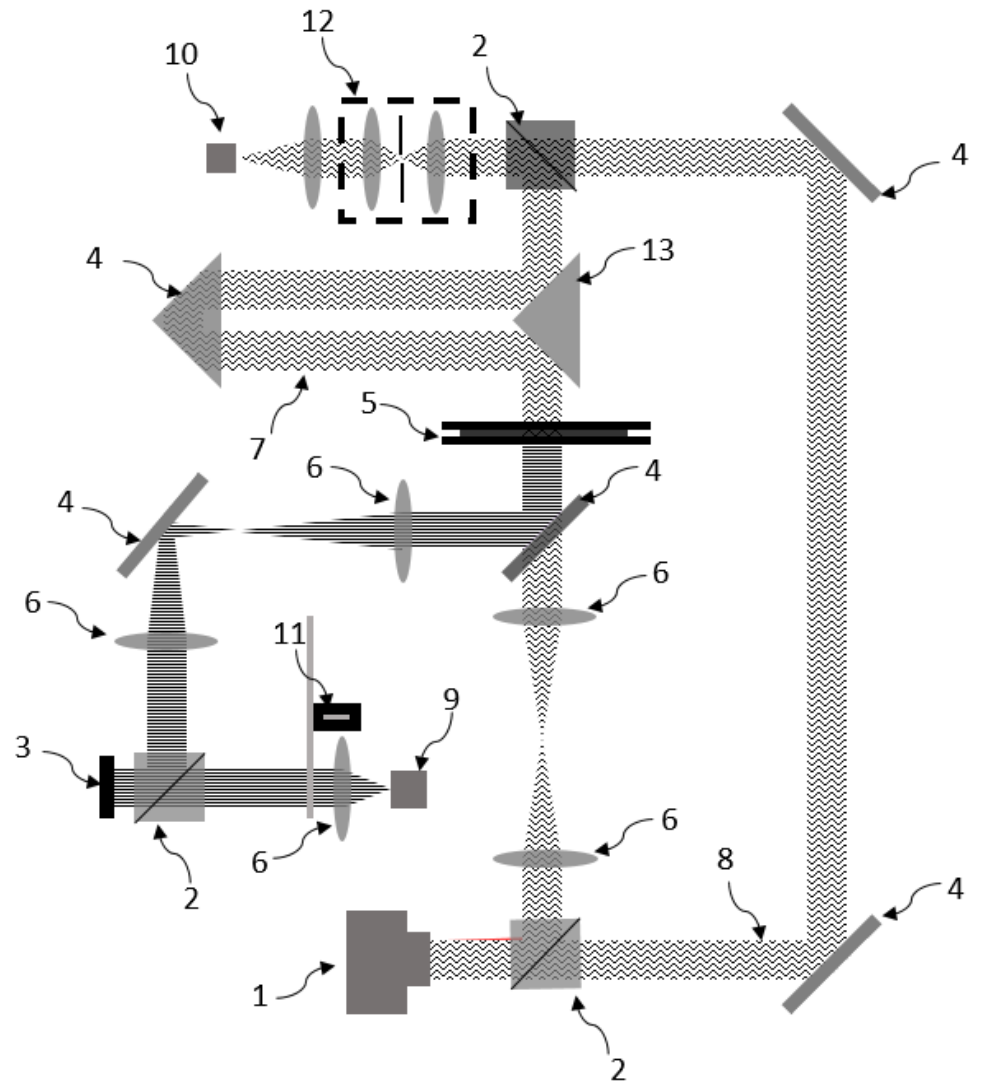
ŞEKİL 1a



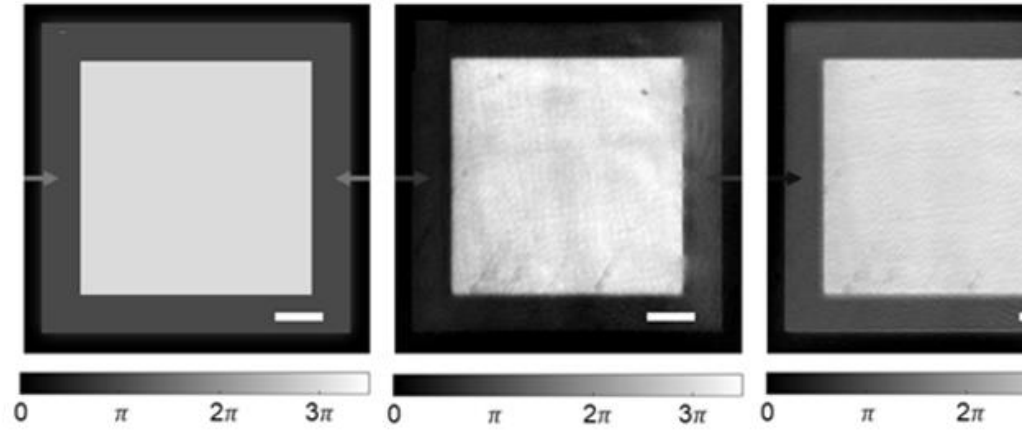
ŞEKİL 1b



ŞEKİL 1c



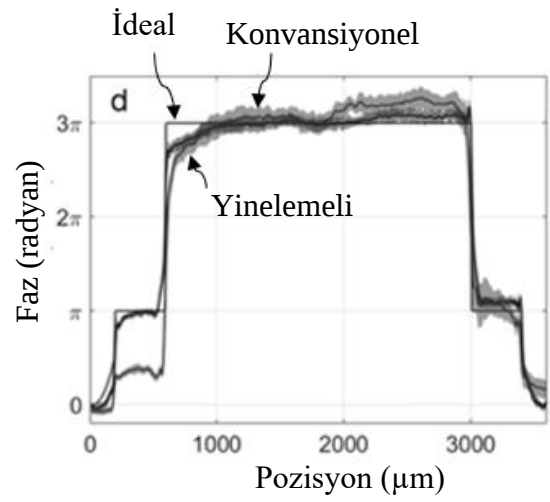
ŞEKİL 2



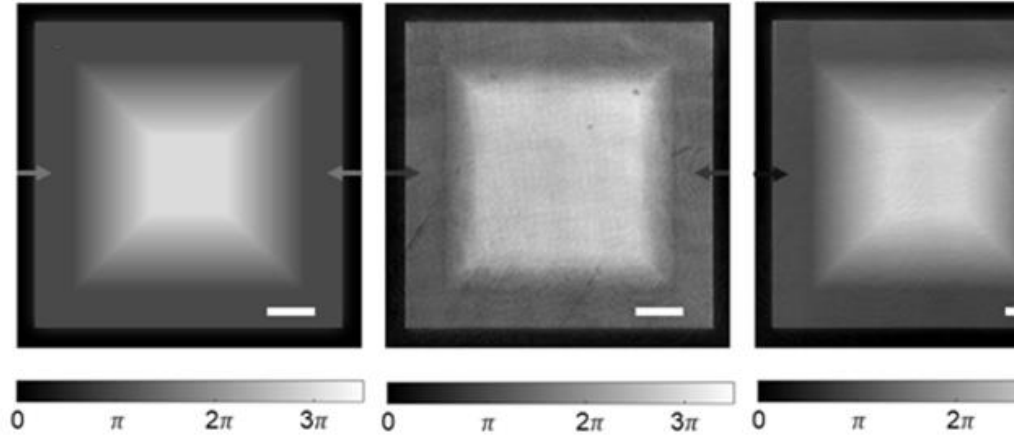
ŞEKİL 3

ŞEKİL 3a

ŞEKİL 3b



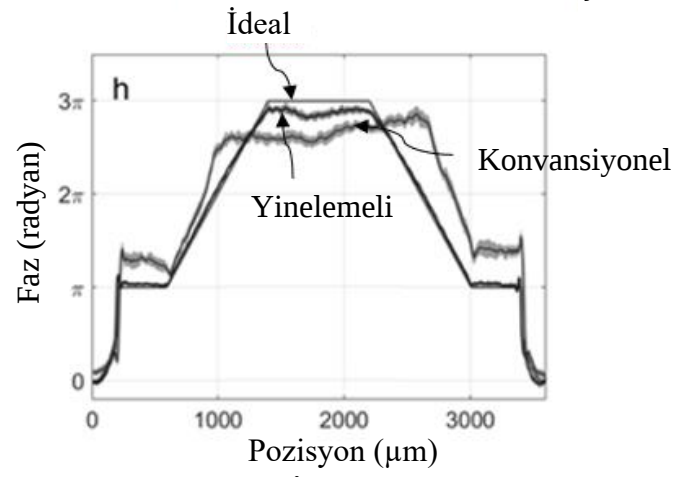
ŞEKİL 3c



ŞEKİL 4

ŞEKİL 4a

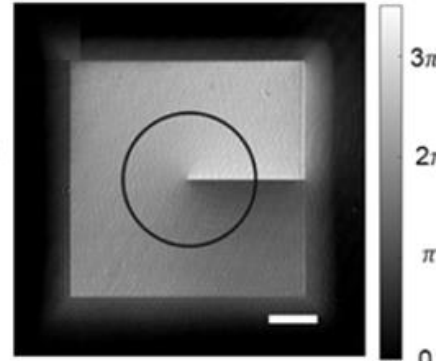
ŞEKİL 4b



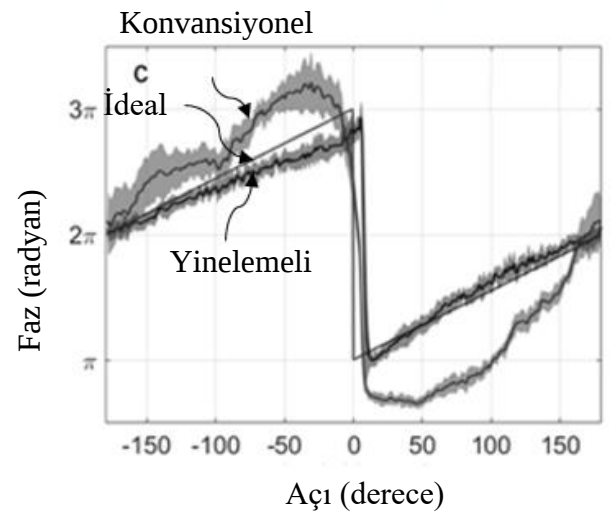
ŞEKİL 4c



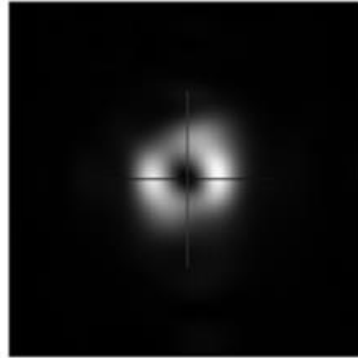
ŞEKİL 5



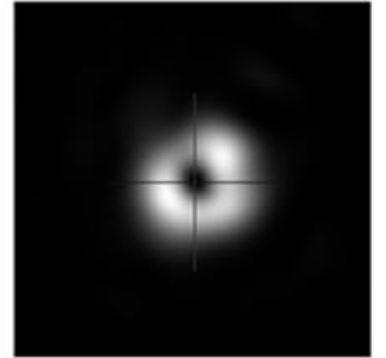
ŞEKİL 5a



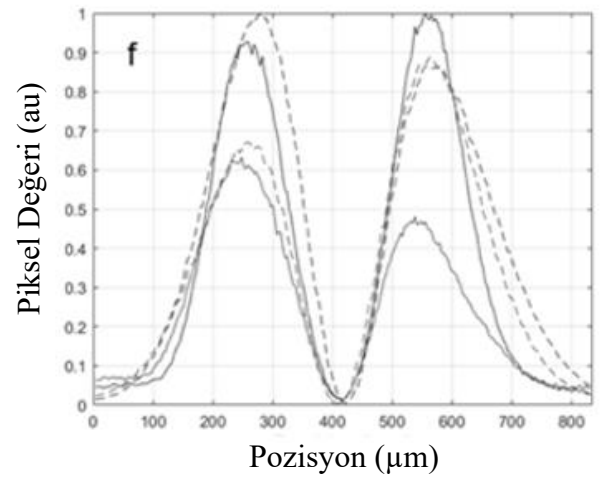
ŞEKİL 5b



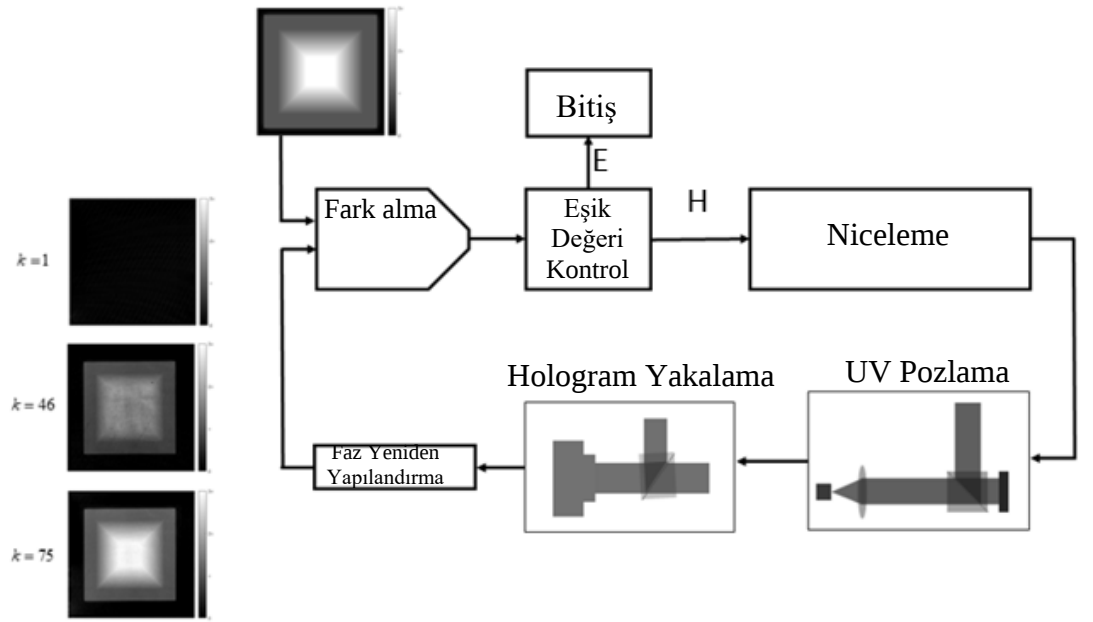
ŞEKİL 6



ŞEKİL 6a



ŞEKİL 6b



ŞEKİL 7