

MANYETİK ALANDA SIĞRATMA YÖNTEMİNDE SON GELİŞMELER

Nurhan CANSEVER

Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Manyetik alanda sıçratma, ince filmlerin fiziksel buhar biriktirme yöntemleriyle kaplanmasında çok kullanılan yöntemlerden biridir. İlk kullanılmaya başlandığı yıllarda, kaplama özellikleri istenildiği gibi olmasa da, manyetik alanda sıçratma yönteminde yapılan değişikliklerle günümüzde istenilen özellikte metal, alaşım, seramik, yalıtkan malzemeler ve çok katlı kaplamalar yapmak mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, daha çok sıçratmayı esas alan fiziksel buhar biriktirme yöntemleri üzerinde durulmuş ve manyetik alanda sıçratmanın temel bilgileri verilerek, bu yöntemdeki gelişmeler-dengesiz manyetik alanda sıçratma, kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma, darbeli manyetik alanda sıçratma-üzerinde durulmuştur.

Anahtar sözcükler:

Fiziksel buhar biriktirme, manyetik alanda sıçratma, dengesiz manyetik alanda sıçratma, kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma, darbeli manyetik alanda sıçratma

ABSTRACT

Magnetron sputtering is the most widely used process for the physical vapour deposition of thin films. In the years of initial application of this technique, despite the attained of coating were not desirable, with the development of magnetron sputtering, it is now possible, to deposit high quality metal, alloy, ceramic, highly insulating materials and multi-layer coatings. In this paper, physical vapor deposition techniques based particularly on sputtering were investigated and the basic knowledge of magnetron sputtering was presented. The developments on this technique including unbalanced magnetron sputtering,

closed field unbalanced magnetron sputtering, pulsed magnetron sputtering were also discussed.

Keywords:

Physical vapour deposition, magnetron sputtering, unbalanced magnetron sputtering, closed field unbalanced magnetron sputtering, pulsed magnetron sputtering.

GİRİŞ

Malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirmek amacıyla yapılan işlemler, hem onlara yeni mühendislik özellikler kazandırmakta, hem de malzeme israfını önleyerek ülke ekonomisine katkıda bulunmaktadır. Yüzey işlem teknolojileri özellikle 90'lı yıllardan sonra önem kazanmış olup, hem klasik hem de modern teknolojilere dayanan yüzey işlemleri çok kullanılmaya başlanmıştır.

Modern teknolojilerle yapılan yüzey işlemlerinde, buhar fazından yapılan kaplamalar çok hızlı teknolojik ve bilimsel gelişmelerin sağlandığı kaplama tekniklerinin başında gelmektedir. Bunun temel nedenlerinden biri, seramik kaplamaların bu teknikler kullanılarak oldukça kolay yapılabilmesidir. Buhar fazından yapılan kaplamalar içinde fiziksel buhar biriktirme teknikleri, bu tekniklerin tribolojik amaçlı seramik kaplamaların yapılmasında çok iyi sonuçlar alınması nedeniyle son 15 yılda yaygınlaşmaya başlamıştır. [1]

Fiziksel buhar biriktirme tekniklerinin buharlaştırmaya ve sıçratmaya dayanan iki temel grubu vardır. Bu gruplar buharlaştırma ve sıçratma işlemlerinin yapıma şekillerine göre kendi içlerinde gruplara ayrılırlar. Bu yazıda sıçratmaya dayalı teknikler üzerinde durularak manyetik alanda sıçratma yöntemlerindeki gelişmeler incelenecektir.

SİÇRATMAYA DAYALI TEKNİKLER

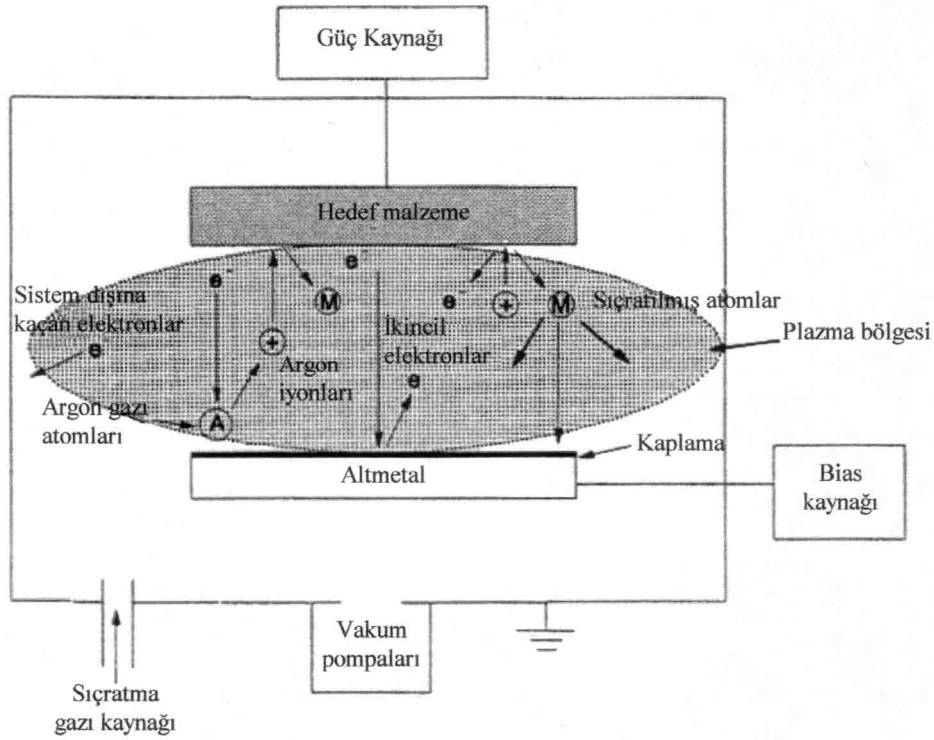
Vakum ortamında katı haldeki kaplama metali (hedef malzeme) yüzeyinin enerjili iyonlarla bombardıman edilerek malzemenin buharlaştırıldığı sıçratma yöntemi, ince film kaplamaların biriktirilmesinde kullanılan çok önemli proseslerden biridir. Sıçratma ile altmetal yüzeyi istenen bir metalle kaplanabildiği gibi, reaktif kaplama denilen ve buharlaştırılan malzemenin istenilen bir gazla altmetal

yüzeyinde bileşik oluşturması sağlanabilir. Böylece sert seramik filmler veya bileşik malzemelerden üretilen kaplamalar yapılabilir.

Sıçratma sistemi, negatif d.c. veya r.f. potansiyel uygulamalı bir hedef malzeme ile altmetal tutucusunun bulunduğu bir vakum odasından oluşur. Altmetal tutucusu hedef malzeme ile karşılıklıdır ve topraklanabilir, negatif potansiyel uygulanabilir veya kendi halinde bırakılabilir. Aynı zamanda ısıtılabilir veya soğutulabilir. Sistem basıncı, 10^{-3} - 10^{-2} mbar aralığında tutulur ve şerare etkisi veya plazmanın başlatıldığı bir ortam sağlamak için sıçratma gazı olarak argon ile doldurulur. Sistem şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. [2]

Hedef malzemeye 2-3 kV'luk negatif potansiyel uygulayarak oluşturulan plazmadaki pozitif iyonlar, hedefe çarparak momentum değişim mekanizması ile hedef atomlarını yerlerinden çıkarırlar. Hedef malzemesinin atomlarının bu şekilde malzemeden uzaklaştırılması sıçratma olarak bilinir. Sıçratılan iyonların bazıları altmetal yüzeyine giderek orada birikir ve bir film oluşturur. Sıçratma sırasında hedef yüzeyine pozitif yüklü iyonların çarpması ile başka ara etkimler de meydana gelebilir. Örneğin çarpmanın etkisi ile çıkan ikincil elektronlar, nötr haldeki sıçratma gazı atomlarının ilave iyonizasyonuna neden olabilir.

Sıçratma ile, birçok malzeme başarılı bir şekilde biriktirilmesine rağmen, birikme hızının ve plazma içindeki iyonlaşma etkisinin düşük olması, altmetal sıcaklığının yükselmesi sistemin kullanımını sınırlamıştır. Son yıllarda sıçratma teknolojisindeki gelişmelerin çoğu, manyetik alanda yapılmıştır. Bunun nedeni, manyetik alanda sıçratma yöntemi ile yapılan kaplamaların, mikroelektronik, optik, türbin bıçakları, manyetik ve optik diskler, kesici takımlar ve solar kontrol endüstrisi gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmasıdır. [2-5]



Şekil 1. Sıçratma sistemi

Sıçratma sistemindeki eksiklikleri gidermek amacıyla sıçratma kaynaklarında yapılan değişiklikler, daha gelişmiş sistemleri ortaya çıkarmıştır. Bu sistemler gelişme sırasına göre aşağıda verilmiştir.

- (1) Diyot sıçratma sistemi
- (2) Konvansiyonel manyetik alan
- (3) Dengesiz manyetik alan
- (4) Elektron şuası, r.f. veya mikrodalga deşarj kullanan gelişmiş iyonizasyonlu manyetik alan
- (5) Düşük basınçlı manyetik alan
- (6) Yüksek hızlı manyetik alan ve kendi kendine sıçratmalı manyetik alan
- (7) Ferromanyetik malzemeler için sıçratma kaynağı

Diyot sıçratma, sıçratma etkisinin zayıf olması nedeniyle çok kullanılmamıştır. Konvansiyonel ve dengesiz manyetik alanda sıçratma sistemleri, manyetik alan (~200 gauss) kullanılır. Bunun için kalıcı mıknatıslardan veya

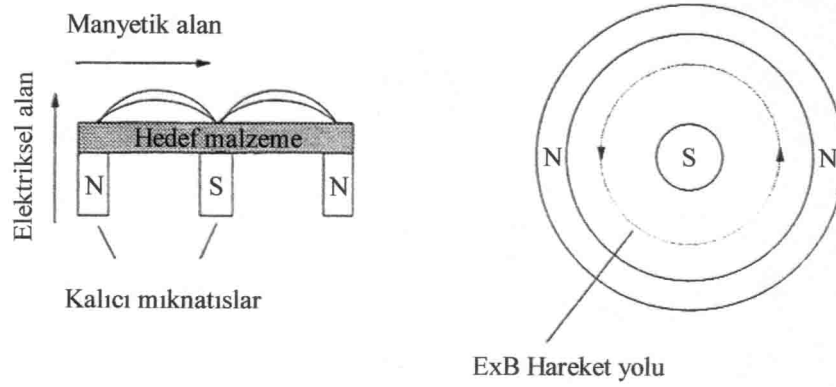
elektromıknatıslardan yararlanılır. Gelişmiş iyonizasyonlu manyetik alan ve düşük basınçlı manyetik alan sistemleri, mikronüstü kaplama teknolojisinde büyük gelişmelere neden olmuşlardır. Çok hızlı manyetik alan ve kendi kendine sıçratmalı manyetik alan sistemleri 200 W cm^{-2} ve üzerindeki çok büyük hedef güç yoğunluklarında çalışırlar. Ferromanyetik malzemelerin sıçratılmasının güç olması nedeniyle, geliştirilen sistemlerin hiçbiri endüstriyel üretim için uygun olmamıştır. Bu konudaki çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. [6,7]

Manyetik Alanda Sıçratma

Manyetik alanda sıçratma yöntemi, farklı bileşimde sert kaplamalar biriktirmek için kullanılmasına rağmen, önceleri takım kaplama prosesi olarak başarılı olamamıştır. Ancak daha sonra, manyetik alanda sıçratma sisteminde yapılan değişiklikler, yöntemi en gelişmiş sıçratma sistemi haline getirmiştir. Bu yöntemde hedef malzemesi, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilmiştir. Hedefin merkez eksenini, mıknatısın bir kutbunu oluşturur. İkinci kutbu ise, hedefin kenarlarına yerleştirilen mıknatıslar tarafından halka şeklinde oluşturulur. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve manyetik alanların hedef üzerinde birbirine dik olmasını sağlar. Manyetik alanlar dairesel veya dikdörtgen şeklinde düzenlenebilir. Dairesel düzenli manyetik alanlardaki manyetik alanın şekli ve hareket yolu Şekil 2'de gösterilmiştir. Hareket yolunu ifade eden $E \times B$ değerinde, E elektrik alanı, B ise manyetik alanı ifade etmektedir. $E \times B$ hareket yolu hedef yüzeyine paraleldir ve kapalı halka oluşturur. Böylece iyon bombardımanı ile katod yüzeyinden yayılan ikincil elektronlar, bu bölgede özellikle tutularak iyonizasyonun artmasına ve plazmanın daha yoğun olmasına neden olurlar. [2,8]

İyonizasyon etkisinin artması, ana sıçratma sistemlerinden daha düşük çalışma basınçlarında plazma oluşturabilen manyetik alanlar meydana getirir. Çalışma basıncının düşürülmesi ile, sıçratılan hedef atomlarının gaz fazındaki saçınması daha az olacağından altmetale ulaşan tanecik sayısı artar ve bunun sonucunda birikme hızları nispeten yüksek (dakikada birkaç mikron) olur. Pratikte birikme hızını kontrol eden faktörler ise, hedef malzemesi, altmetal-hedef mesafesi, hedef bölgesindeki güç yoğunluğu, hedef alanı ve basınçtır.

Manyetik alanda sıçratma yöntemleri, dengeli ve dengesiz manyetik alanda sıçratma adı altında iki genel grupta toplanır. Yöntemler temelde aynı olmasına rağmen, hedef malzeme önünde oluşturulan plazmanın kapanma şeklindeki farklılık nedeniyle birbirinden ayrılmaktadır.



Şekil 2. Dairesel düzenli manyetik alan

Konvansiyonel Dengeli Manyetik Alanda Sıçratma

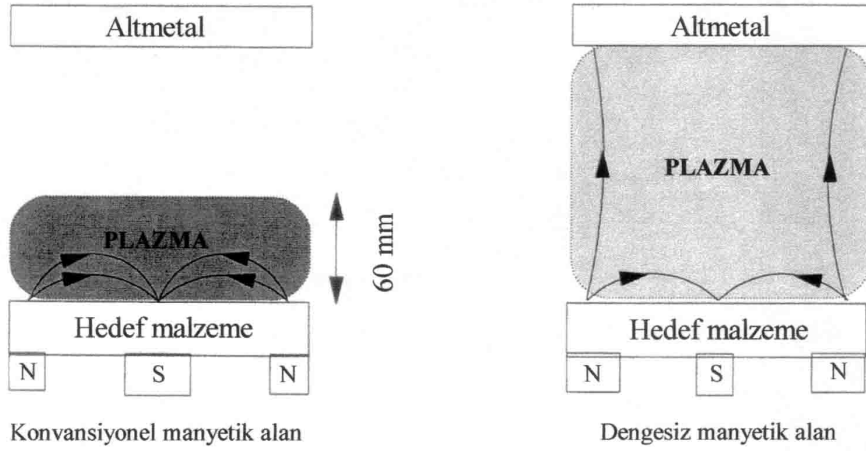
Konvansiyonel dengeli manyetik alanda sıçratma yönteminde, hedef metalinin ön kısmında oluşan kapalı plazma, plazmanın yoğun olduğu bölgedir ve normal çalışma koşullarında, hedeften itibaren yaklaşık 60 mm. mesafededir. Yoğun plazma bölgesi içine yerleştirilen altmetaller, film büyümesi sırasında yeterli miktarda iyon bombardımanına uğradıklarından filmin fiziksel ve kimyasal özellikleri istenildiği gibi değiştirilebilir. Film özelliklerindeki değişimler, yüzeye çarpan iyon enerjisi, birikme hızı ve altmetalde ölçülen iyon akım yoğunluğu ile kolayca kontrol edilebilir. Ancak alt metal plazma bölgesinin dışına yerleştirilirse, burada plazma yoğunluğu az olacağından (iyon akım yoğunluğu $1\text{mA}/\text{cm}^2$) filmin mikroyapısını ve özelliklerini etkileyen iyon bombardımanı yetersiz olacaktır. (Şekil 3a). Bu nedenle konvansiyonel manyetik alanda sıçratma ile, büyük ve karmaşık parçalar üzerine çok yoğun ve kaliteli kaplamalar yapmak çok zor olacaktır. Ancak bu yöntemle altmetal fazla ısınmadığından plastikler gibi sıcaklığa hassas malzemeler üzerine de kaplama yapmak mümkündür. [2,8-14].

Konvansiyonel manyetik alanda sıçratma yönteminde, film birikmesi sırasında iyon bombardımanını arttırmak için altmetale negatif potansiyel uygulanır. Ancak iyon bombardımanını daha fazla arttırmak amacıyla negatif potansiyelin büyük seçilmesi, hem tane içi hataların oluşumuna hem de film içindeki gerilmeyi arttıracığından, özellikle sert kaplamaların birikmesi sırasında istenmeyen etkiler ortaya çıkabilir. Altmetale iyi yapışmayan kötü kalitede kaplamalar elde edilir. Filmin mikroyapısını ve yapışmasını geliştirmek için, düşük negatif potansiyel-yüksek akım yoğunluğu tavsiye edilmektedir. Düşük negatif potansiyel değerinde $2\text{mA}/\text{cm}^2$ den daha büyük akım yoğunluklarının, tamamen yoğun, sert kaplamalar verdiği tespit edilmiştir. Yine de çok kaliteli kaplamaları bu yöntemle elde etmek mümkün olmamıştır. Kaplama kalitesini geliştirmek amacıyla

iyonizasyonu arttırılmış yeni sıçratma sistemleri geliştirilmiştir. Sıçratma sistemlerinde plazma iyonizasyonunu arttırma iki şekilde mümkün olmuştur.

1. İlave gaz iyonizasyonu
2. Plazma kapanması (kapalı plazma alanı kullanımı)

İlave gaz iyonizasyonu, sıcak katot elektron emisyon kaynağı veya delik katot ark elektron kaynağı kullanarak sağlanabilir. Plazma kapanması ise, dengesiz manyetik alanlar veya manyetik aynaların kullanımı ile mümkün olmuştur (7,8). Bu yazıda daha çok dengesiz manyetik alanlar üzerinde durulacaktır.



Şekil 3. Konvansiyonel ve dengesiz manyetik alanda plazma kapanmasının karşılaştırılması

Dengesiz Manyetik Alanlar

Window ve Savvides (15,16), konvansiyonel manyetik alan yönteminde mıknatısların manyetik alan konfigürasyonunu değiştirerek bu yöntemi geliştirmişlerdir. Dengesiz manyetik alan yönteminde, manyetik alanın dış mıknatısları, merkezdeki mıknatısa göre daha kuvvetli seçilerek plazmanın manyetik alan çizgilerini takip etmesi ve alt metale kadar yayılması sağlanabilir. (Şekil 3b). Manyetik alanın dengesini bu şekilde bozarak, plazmanın, hedef ve altmetal arasında, manyetik alan yardımıyla kapanması sağlanır. Böyle bir konfigürasyon, sıçratma sırasında üretilen ikincil elektronlardan çoğunun, manyetik alan çizgileri boyunca hedef metalden altmetale doğru gitmesini sağlar. Pozitif iyonlar da elektrostatik çekimle elektronları takip edeceğinden altmetal

yakınında iyonizasyon gelişir ve altmetal yüzeyindeki iyon bombardımanı artar [2,7,10,11,14,17].

Biriken filmin iyon bombardımanını daha fazla arttırabilmek için ilave manyetik alan düzenleri de kullanılmıştır. Altmetalın arkasına, merkezi kutupla zıt kutuplu mıknatıslar yerleştirilerek, elektromıknatıslar kullanarak veya dış kutupların mukavemetini arttırmak için kuvvetli, nadir toprak mıknatıslar kullanarak iyon enerji akımı arttırılabilir [7,8,14]. Yine de tek mıknatıs kaynağı kullanarak karmaşık şekilli parçalar üzerine üniform kaplama yapmak oldukça zordur. Bu nedenle dairesel birikme odasının duvarlarına birden fazla dikdörtgen mıknatıslar monte edilerek, altmetalın mıknatısların arasında kalması ve böylece kaplamanın homojenliğinin kontrolü sağlanır. Bunun için birden fazla manyetik alan sistemi biraraya getirilerek kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemi geliştirilmiştir [8-10].

Kapalı Alan Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma

Kapalı alan dengesiz manyetik alan sisteminde, iki veya daha fazla manyetik alan vardır. İki tane dengesiz manyetik alan birbirine ters olacak şekilde, yani aynı kutuplar karşılıklı (ayna görüntüsü) veya zıt kutuplar karşılıklı (kapalı alan) olacak şekilde yerleştirilerek (Şekil 4), çiftli manyetik kapalı alan meydana getirilir. Ayna görüntüsü düzeninde, her iki manyetik alan çizgilerinin birbiri ile etkileşmesi şekilden de görüldüğü gibi, yana doğru yayılmaktadır. Böyle bir düzen, çizgileri takip eden ikincil elektronların plazmadan kaçmasına neden olabilir. Sonuçta altmetal bölgesinde plazma yoğunluğu düşer ve birikme sırasında iyon bombardımanı azalır. Kapalı alan düzeninde ise, mıknatıslar arasındaki manyetik alan çizgileri, plazma içindeki elektronlar için kapalı bir tuzak oluşturur. Kapalı alan düzeninde elektronların dışarı kaçma ihtimali çok az olduğundan, alt metal bölgesinde yoğun bir plazma elde edilir, bu da büyüyen filmin uğrayacağı iyon bombardımanını arttırır. Çok kaliteli filmler biriktirebilmek, alt metale negatif potansiyel uygulayarak mümkün olur. Sistemdeki iyonizasyonla ilgili olan altmetale uygulanan negatif potansiyel, konvansiyonel iyon kaplama ile karşılaştırıldığında çok düşüktür (yaklaşık $\approx 50V$) [2,8-10,17].

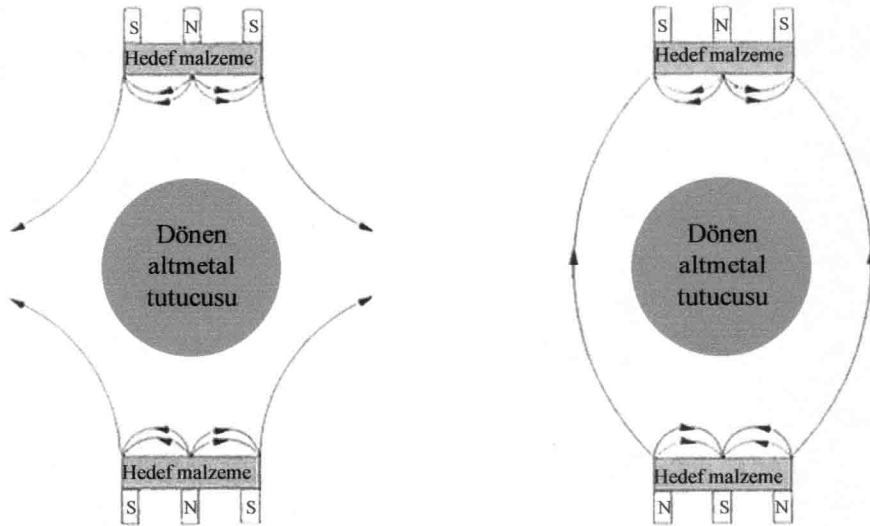
Manyetik alanda sıçratma yöntemleri içinde en pratik ve çok yönlü olan bu yöntem, büyük ve karmaşık şekilli altmetaller üzerine yüksek birikme hızlarında kaliteli metal ve alaşım kaplamanın yanısıra çok katlı tabakalar oluşturmak, oksit, nitrür ve karbür gibi seramik kaplama yeteneğine de sahiptir.

Teer ve ark. tarafından geliştirilen çoklu manyetik alan düzenleri, karmaşık parçalar üzerine titanyum nitrür, alaşım nitrürler, elmas benzeri karbon ve

molibden disülfid biriktirmek için kullanılmıştır. Homojen bir birikme sağlamak için dönen parçanın etrafına dörtlü dengesiz manyetik alan yerleştirilmiştir. Böyle bir düzende, komşu manyetik alanlardaki farklı mıknatıs polariteleri, manyetik alanın kapanmasını sürekli yaparak kapalı alan oluşmasını sağlar (Şekil 5) [3,8,10,13].

Altmetale yüksek iyon akımı gönderebilme ve enerjiyi değiştirebilme yeteneği, dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemini çok yönlü kaplama sistemi yapmıştır. Çok kaliteli metal kaplamalar, kaplama parametrelerini geniş bir aralıkta değiştirerek kolayca biriktirebilir. Ayrıca iletken olmayan altmetaller üzerine titanyum oksit, indiyum kalay oksit ve silisyum oksit gibi kaplamalar, reaktif sıçratma ile biriktirilebilir [8].

Kaliteli ve üniform birikme, mıknatısları numune etrafına yerleştirerek sağlanabildiği gibi, birikme sırasında mıknatıslar etrafında birkaç eksenle dönebilen (1,2 veya 3 eksenli) numuneler kullanılarak da yapılabilir. Tek metal bileşikleri (örn: TiZrN, CrN) ve birçok saf metalin reaktif birikmesi için tek eksenli dönme yeterlidir. Numunenin iki eksenle dönmesi, karmaşık şekilli parçalarda üniformluğun çok iyi kontrolü ve karmaşık nitrür alaşımlarının (örn: TiZrN, CrZrN) ve çok tabakalı yapıların birikmesi için gereklidir. Pratikte kullanımı az olmasına rağmen, üç eksenle dönebilen numuneler üzerine karışık alaşımların homojen birikmesi de mümkün olmuştur [18].

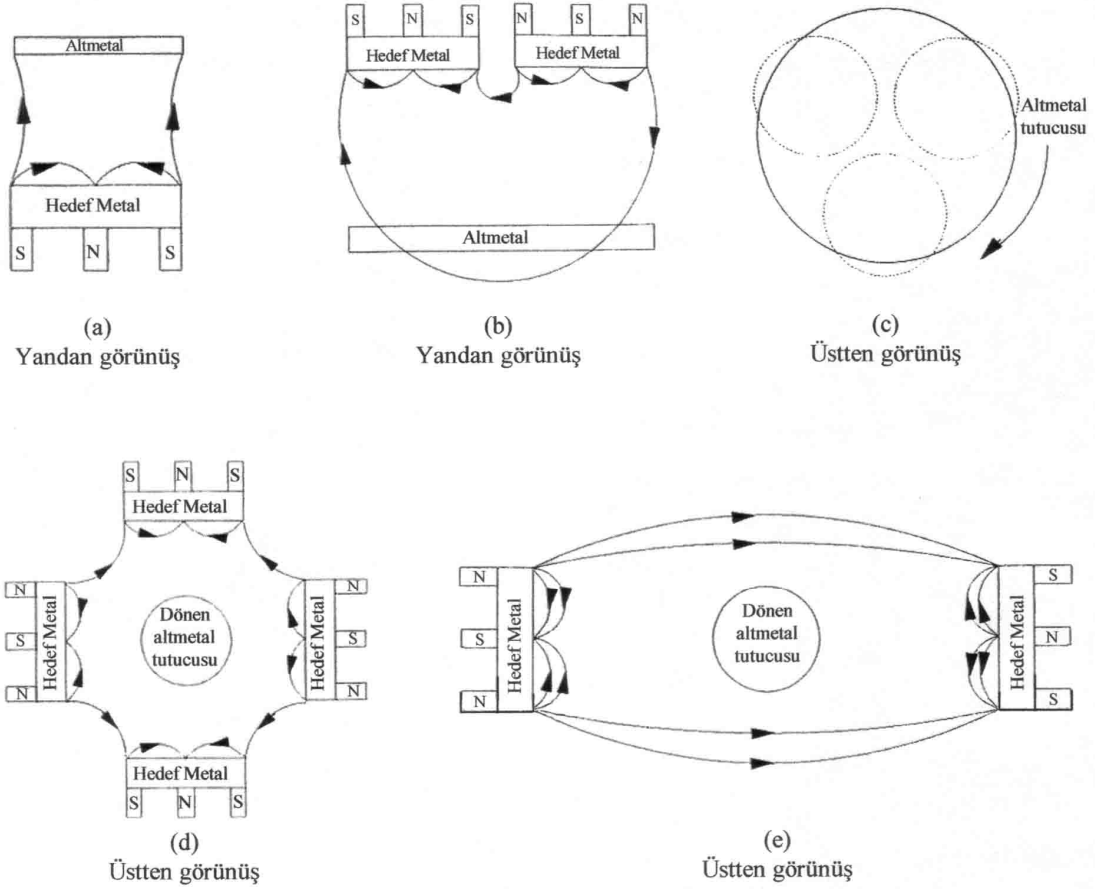


Şekil 4. Çiftli manyetik alan sistemlerinde manyetik alan düzeni

a) Ayna görüntüsü

b) Kapalı alan

alan



Şekil 5. Tekli ve Çoklu Manyetik Alan Düzenleri

- a alaşım veya hybrid hedeften biriktirmede tekli manyetik alan*
- b birlikte birikme için çiftli manyetik alanlar*
- c çoktabakalı veya alaşım biriktirmede kullanılan üçlü manyetik alanlar*
- d egzotik alaşımlar, çoktabakalar ve reaktif filmler için dörtlü manyetik alan düzeni*
- e karmaşık parçalar üzerine alaşım tabakası, çoktabaka ve reaktif birikme için çiftli kapalı manyetik alan düzeni*

Darbeli Manyetik Alanda Sıçratma

Al₂O₃ gibi yalıtkan malzemelerin fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanması, r.f. diyot sıçratma kullanılarak Al₂O₃ hedeften veya argon/oksijen

atmosferinde AI hedeften reaktif olarak yapılmıştır. Bu şekilde yapılan Al_2O_3 kaplamanın birikme hızının düşük ve yapısının da amorf olması, onların takım malzemeleri kaplamasında kullanımını sınırlamıştır. Kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemi ile yalıtkan malzemelerin reaktif kaplanması sırasında birikme hızı mm/saat (metalik kaplamalarda mm/dak) değerine düşmekte ve sıçratma sırasında meydana gelebilecek ark deşarjları, hedeften makrotaneciklerin çıkmasına neden olduğundan hatalı ve homojen olmayan filmler meydana getirmektedir.

Geliştirilen darbeli manyetik alanda sıçratma yöntemi, bu problemleri büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır. Yalıtkan malzemelerin biriktirilmesi sırasında, manyetik alan deşarjını orta frekanslarda (10-200 kHz) darbeli yaparak yani hedefe, dönüşümlü pozitif ve negatif darbeler uygulayarak, deşarj kararlı yapılabilir ve film içinde hata oluşumu engellenir. Film biriktirme hızı da $\mu\text{m/dak}$ değerine yaklaşır.

Darbeli manyetik alanda sıçratma yönteminde, tek manyetik alan deşarjı darbeli ise, sistem tek kutuplu darbeli sıçratma olarak tariflenir. Bu durumda yalıtkan tabakanın yüklenmesi zaman alacağından darbe süresi sınırlıdır, sonuçta ark meydana gelebilir. Eğer iki manyetik alan aynı darbeyi destekleyecek şekilde birleştirilirse, iki kutuplu darbeli sıçratma sistemi gelişir. Böyle bir sistemde, her manyetik alan dönüşümlü olarak deşarjın anot ve katodu olabileceğinden, periyodik kutup değişimi yalıtkan tabakaların deşarjını geliştirir, böylece ark oluşumu önlenir. Darbeli d.c. güç kaynaklarının pahalı olması nedeniyle, onların yerine, ark oluşumunu önleyen d.c. güç kaynakları kullanılmıştır. Hedef ile d.c. güç kaynağı arasına yerleştirilen ark önleme birimi, anlık olarak polariteyi ters çevirir ve katot potansiyelinin miktarını azaltır. Hedef potansiyeli pozitif olduğu zaman, elektronları deşarj bölgelerine çeker [2,9,17].

Arnell ve ark. [2,9,19], darbeli manyetik alanda sıçratma prosesini kullanarak, reaktif sıçratma prosesi ile alumina filmler yapmaya çalışmışlar ve hatasız, yoğun, stokiometrik bileşimde, yaklaşık 20000 Mpa civarında mikrosertliğe sahip alumina filmler elde etmişlerdir.

SONUÇ

Fiziksel buhar biriktirme yöntemindeki gelişmeler, diğer kaplama yöntemleriyle yapılamayan veya istenen kalitede olmayan ince film kaplamaların uygulanmasını sağlamıştır. Dengesiz manyetik alanda sıçratma, kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma, darbeli manyetik alanda sıçratma yöntemleriyle iletken, yalıtkan, çok katlı ve süperkafes kaplamalar yapılmış ve çok iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Konvansiyonel dengeli manyetik alanda sıçratma yönteminde, alt metal yüzeyine ulaşan iyon yoğunluğu yetersiz olduğundan filmin mikroyapısını ve özelliklerini geliştirmek amacıyla dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemi geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemde de karmaşık şekilli parçalar üzerine üniform kaplama yapma zorluğu, iki veya daha fazla manyetik alan kullanarak kapalı alan düzeninin geliştirilmesine neden olmuştur. Bu amaçla geliştirilen kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemi, manyetik alanda sıçratma yöntemleri içinde en pratik ve çok yönlü bir yöntem olmuş, büyük ve karmaşık şekilli altmetaller üzerine yüksek birikme hızlarında kaliteli metal ve alaşım kaplamanın yanısıra çok katlı tabaka, oksit, nitrür ve karbür gibi seramik kaplama yapma yeteneğine de sahip olmuştur. Al_2O_3 gibi yalıtkan filmlerin bu yöntemlerle istenilen özellikte biriktirilememesi de darbeli manyetik alanda sıçratma yönteminin gelişmesini sağlamıştır. Bu yöntemle biriktirilen alumina filmler, düşük kırılma indisi, çok yüksek direnç, yüksek sertlik ve aşınma direnci gibi özellikleri nedeniyle optik, mikroelektronik endüstrisinde ve kesici takım uygulamalarında kullanılmıştır.

KAYNAKÇA

1. M. Ürgen, Modern Yüzey İşlemleri Teknolojileri ve Türkiye'deki Gelişmeler, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 11-15 Haziran 1977, İstanbul, 333-350,1997.
2. R.D.Arnell, P.J.Kelly, Recent Developments in Magnetron Sputtering Systems, Advances in Surface Engineering, Vol.II: Process Technology, Edited by: P.K.Datta, J.S. Burnell-Gray, 4th International Conference on Advances in Surface Engineering, 14-17th May 1996, 19-30, 1997.
3. B.Window, Recent Advances in Sputter Deposition, Surface and Coatings Technology, 71, 93-97,1995.
4. R.D. Arnell, P.J. Kelly, Recent Advances in Magnetron Sputtering, AEPSE'97, Conference Proceedings.
5. S. Grainger, J. Blunt, Engineering Coatings-Design and Application, Woodhead Publishing Ltd, England, 194-214, 198.
6. J. Musil, Recent Advances in Magnetron Sputtering Technology, Surface and Coatings Technology, 100-101, 280-286, 1998.
7. J. Musil, Low-Pressure Magnetron Sputtering. Vacuum, (50), 3-4, 363-372, 1998.

8. P.J. Kelly, The Theory and Applications of Unbalanced Magnetron Sputtering, October 1994.
9. R.D. Arnell, P.J. Kelly, Recent Advances in Magnetron Sputtering, Surface and Coatings Technology, 112, 170-176, 1999.
10. P.J. Kelly, R.D. Arnell, W.Ahmed, Some Recent Applications of Materials Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering, Surface Engineering, 9, (4), 287-291, 1993.
11. R.D. Arnell, Control of Mechanical and Structural Properties of Coatings Deposited Using Unbalanced Magnetrons Surface and Coatings Technology, 59, 105-109, 1993.
12. B. Window, Issues in Magnetron Sputtering of Hard Coatings, Surface and Coatings Technology, 81, 92-98, 1996.
13. K. Lating, J. Hampshire, D. Teer, G. Chester, The Effect of Ion Current Density on the Adhesion and Structure of Coatings Deposited by Magnetron Sputter Ion Plating, Surface and Coatings Technology, 112, 177-180, 1999.
14. D. Monaghan, R. D. Arnell, Novel PVD Films by Unbalanced Magnetron Sputtering, Vacuum, (43), 77-81, 1992.
15. B.Window, N. Savvides, J. Vac. Sci. Technol. A, A4, (2), 453-456, 1986.
16. B.Window, N. Savvides, J. Vac. Sci. Technol. A, A4, (2),504-508, 1986.
17. W.D. Sproul, Physical Vapor Deposition Tool Coatings, Surface and Coatings Technology, 81, 1-7, 1996.
18. B. Rother, G.Ebersbach, H.M. Gabriel, Substrate-rotation Systems and Productivity of Industrial PVD Processes, Surface and Coatings Technology, 116-119, 694-698,1999.
19. P.J.Kelly, R.D.Arnell, Control of the Structure and Properties of Aluminum Oxide Coatings Deposited by Pulsed Magnetron Sputtering, J.Vac.Sci.Technol. A17 (3), 945-953, 1999.