Grafen Tabanlı Radar Kesit Alanı Değişebilen Yüzeyler

Program Kodu: 1003

Proje No: 114F052

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Coşkun KOCABAŞ

Bursiyer(ler):

1) Emre Ozan Polat

2) Osman Balcı

3) Sivabalan Sivaraj

4) Hasan Burkay Uzlu

5) Nurbek Kakenov

6) Muhammed Said Ergöktaş

Ağustos 2017

ANKARA

ÖNSÖZ

Bu sonuç raporunda TÜBİTAK tarafından desteklenen 114F052 numaralı “Grafen Tabanlı Radar Kesit Alanı Değişebilen Yüzeyler” başlıklı araştırma projesinden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır. Proje kapamında mikrodalga yansıması elektriksel olarak değiştirilebilen aktif yüzeyler üretilmiştir. Grafen tabanlı yeni nesil radar kesit alanı değişebilen yüzeyler üretildi. Bu aygıtlar tek atom kalınlığındaki grafen tabakası üzerindeki yük yoğunluğunu elektrostatik olarak değiştirerek mikrodalgaların elektriksel olarak kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. Grafen süperkapasitorlerin farklı geometrilerde kullanılması sayesinde terahertz mikrodalgalarının geçirgenliği ve yansımasını kontrol eden aygıtlar ürettik. Ayrıca bu aktif yüzeyler metamalzemeler ile bütünleştirilerek aktif metayüzeyler üretildi. Üretilen bu aktif yüzeyler bir model uçak üzerine yerleştirilerek geniş alan üzerinde radar yansımasının elektriksel olarak değiştirilebildiği gösterildi. Bu proje kapsamında ikisi yayınlanmış 3 bilimsel makale yazıldı. Projede iki yüksek lisans öğrencisi ve iki doktora sonrası araştırmacı burs alarak akademik çalışmalarına katkı sağladı. Bunlara ek olarak proje çıktıları proje yürütücüsü Doç. Dr. Coşkun Kocabaş’nın akademik kariyerine ciddi katkı sağlamıştır.

TÜBİTAK

İçindekiler

1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 2
3. GEREÇ ve YÖNTEM 4
   3.1 Grafen sentezi 4
   3.2 Grafenin esnek PVC yüzeyine transfer edilmesi 5
   3.3 Bakır folyoların kimyasal olarak aşındırılması 6
   3.4 Tek tabakalı grafenin optik olarak karakterize edilmesi 8
   3.5 PVC üzerine transfer edilen grafenin elektriksel olarak karakterize edilmesi 11
   3.6 Grafen süperkapasitorlerin üretilmesi 12
   3.7 Grafen süperkapasitorlerin elektriksel olarak karakterize edilmesi 15
   3.8 Grafen süperkapasitörlerin optik olarak karakterize edilmesi 16
4. BULGULAR 17
   4.1 Mikrodalga bölgesinde çalışabilen geniş alanlı aktif grafen yüzeylerin tasarımı 17
   4.2 Geniş alanlı grafen süperkapasitörlerin mikrodalga performanslarının ölçülmesi 19
   4.3 Geniş alanlı yüksek performanslı radar emici yüzeyler 22
   4.4 Çok geniş alanlı yüzeyleri kaplayabilmek için grafen tabanlı radar emici hücrelerin tasarımı 25
   4.5 Geniş alanlı düz olmayan yüzeyleri kaplayabilmek için grafen tabanlı radar emici hücrelerin tasarımı 26
   4.6 Aktif metamalzeme mikrodalga yüzeylerinin üretilmesi ve karakterizasyonu 28
   4.7 Elektromanyetik dalgaların fazının kontrol edilmesi 37
   4.8 Geniş Frekans Bandında Çalışan Grafen Tabanlı Elektriksel Olarak Kontrol Edilebilen Radar Emici Aygıtların Geliştirilmesi 45
   4.9 Prototip üretilmesi 51
5. SONUÇ 57
6. KAYNAKLAR 58

TÜBİTAK

Şekiller Listesi

Şekil 1-1. Projenin 4 ana bölümü ve alt bölümlerin özeti. 2
Şekil 3-1. Tek tabakalı grafen filmin kimyasal buhar yükleme sistemi ile büyütülmesi. a) Geniş alanlı ve tek tabakalı grafeni büyütmek için öncelikle 7 cm genişliğinde, 14,5 cm uzunluğunda ve 10μm kalınlığındaki iki parça pürüzsüz bakır folyoyu quartz tabla üzerine yerleştiriyoruz. b) Bu quartz tablayı daha sonra yüksek sıcaklığa çıkabilen fırının üzerinde bulunan 8 cm çapındaki silindirik quartz tüpün içerisine ortalayacak şekilde yerleştiriyoruz. Quartz silindirin giriş ve çıkışını kapattıktan sonra bir pompa ile quartz tüpün içerisini yaklaşık 6 mTorr seviyelerine kadar vakuma alıyoruz. Daha sonra split fırının kapağını kapatıp 100 sccm H_2 akıtarak bakır folyoların bulunduğu alanın 1035ºC ye çıkmasını bekliyoruz. Sıcaklık 1035ºC ye ulaştığında akan H_2 ye ilave olarak 10 sccm CH_4'u 1dk akıtarak bakır folyoların üst yüzeyinde tek tabakalı grafeni büyütüyoruz. Akan CH_4'ı kapatıp fırının kapağını açarak büyütme işlemini sonlandırıyoruz ve H_2 akışı altında fırının sıcaklığının yaklaşık oda sıcaklığına gelmesini bekliyoruz. c) Fırın oda sıcaklığına geldikten sonra akan H_2'yi kapatıp vakum pompasını kapatıyoruz, quartz silindirin içerisine hava göndererek vakumu kırıyoruz ve grafen büyütülmüş bakır folyoları quartz silindirin içerisinden çıkarıyoruz. 5
Şekil 3-2. Geniş alanlı ve tek tabakalı grafen filmin sıcak laminasyon yöntemi ile esnek PVC filmi üzerine aktarılması. a) İki adet grafen büyütülmüş bakır folyoyu bir A4 kâğıdı üzerine uzun kenarları birbirlerine çok yakın olacak şekilde seriyoruz. Üzerlerine de bir tarafı ısıtıldığında eriyebilen standart PVC laminasyon filmini eriyebilen kısmı bakır folyolara bakacak şekilde folyoların üzerine seriyoruz. b), c), Önceden yaklaşık 100ºC ye kadar ısıtılan standart laminasyon aletini (Mapilam 124) kullanarak PVC filmi bakır folyoya yapıştırıyoruz. d) Isıtılarak preslenen PVC filmi bakır folyolara ve bakır folyonun olmadığı A4 kâğıdı yüzeylerine düzgün bir şekilde yapıştırılıyor. 6
Şekil 3-3. Geniş alanlı, esnek PVC filmi üzerine ısıtılarak transfer edilen grafen büyütülmüş bakır folyoların kimyasal olarak aşındırılması. a) PVC filmi ısıtarak grafen büyütülmüş bakır folyoya yapıştırdıktan sonra bakır folyonun kenarlarından keserek kenarlardaki lamine olmuş kâğıt kısımları çıkarıyoruz. Elimizde kalan PVC üzerinde grafen büyütülmüş bakır folyonun baş ve son kısımlarına iki ince şerit şeklinde bant yapıştırarak bandın altına gelen bakır alanları kimyasal olarak aşınmadan koruyoruz. Klan bu bakır alanları daha sonraki aşamalarda grafenden elektriksel kontak almak için kullanacağız. b) Önceden hazırladığımız 5 mM $FeCl_3$ sulu çözeltisine PVC ye yapıştırılmış bakır folyoyu aşınması için bakır folyolar çözeltiye bakacak şekilde seriyoruz. c) Yaklaşık 10 dk. bekledikten sonra bakır folyo tamamen aşınıyor. d) Çözeltiden çıkarıp temiz su ile yıkayıp kuruladıktan sonra yaklaşık 14 cm^2 alanlı, tek tabakalı, esnek PVC üzerine transfer edilip elektriksel kontakları alınmış grafeni elde ediyoruz. 7
Şekil 3-4. Pürüzsüz bakır üzerinde sentezlenen grafenin cam yüzeyinde geçirgenlik ölçümü. a) Pürüzsüz bakır yüzeyinde sentezlenen tek tabakalı grafenin cam üzerine transfer edilmiş fotoğrafı gösteriliyor. Grafen görünür bölgede bantlar arası geçişlerin sağladığı optik iletkenlik sayesinde üzerine gelen görünür ışığın yaklaşık %2'sini emer. Bu nedenle resimde de görüldüğü gibi grafen olan alan olmayan alanlardan biraz daha koyu renkte görünür. b) Cam üzerindeki grafenin 450 nm ile 1050 nm dalga boyu arasındaki ışıkta geçirgenliği gösterilmektedir. Önce grafen olmayan boş bir camdan geçen ışık miktarını ölçüyoruz ve bu referans olarak kabul edildikten sonra grafen olan yüzeyden geçen ışık miktarını ölçüyoruz. Tek katmanlı grafen 1000 nm civarındaki dalga boylarında yaklaşık %97,6 geçirgenliğe sahip iken 450 nm civarındaki dalga boylarında yaklaşık %96 seviyelerinde bir geçirgenliğe sahip. 10
Şekil 3-5. Pürüzsüz bakır üzerinde sentezlenen grafenin SiO_2 yüzeyinde Raman sinyali ölçümü. a) Tek katmanlı grafen pürüzsüz bakır üzerinde sentezlendikten sonra SiO_2 üzerine transfer edilmiş resmi gösteriliyor. Grafen olan alan grafenin görünür ışıktaki yaklaşık %2'lik emiciliğinden dolayı olmayan alanlara göre biraz daha koyu renkte görünüyor. b) Tek katmanlı grafenin SiO_2 üzerinde çekilen Raman sinyali gösteriliyor. Bu grafikte grafenin karakteristik olarak sahip olduğu üç tane sinyal görünüyor; 1350 cm^{-1}'de olan D sinyali, 1600 cm^{-1}'de olan G sinyali ve 2700 cm^{-1}'de olan da 2D sinyali. Burada grafenin tek tabakalı ve kaliteli grafen olduğunu anlamak için iki tane parametre çok önemli. Birincisi D sinyalinin G ve 2D ye göre çok düşük olması gerekiyor çünkü D sinyali grafen katmanındaki hataları bozuklukları gösterir ve düşük olması bunların az olduğu anlamına gelir. Bizim sentezlediğimiz grafende D sinyalinin şiddeti G ve 2D ye göre çok düşük. İkincisi de 2D sinyalinin G sinyaline oranıdır, bu da grafenin tek tabakalı mı yoksa daha fazla tabakalı mı olduğu hakkında bilgi verir. Çok tabakalı grafende bu oran genelde 1'den daha az olur fakat tek tabakalı grafen 2'ye kadar varabilir. Bizim ölçümlerimizde sentezlediğimiz grafen için 2D sinyalinin G sinyaline oranı yaklaşık 1.7 civarındadır. 11
Şekil 3-6. Pürüzsüz bakır üzerinde sentezlenen ve PVC film üzerine transfer edilen tek katmanlı grafenin elektriksel direnç analizi. a) Genişlikleri aynı uzunlukları farklı olacak şekilde sentezlenen tek katmanlı grafenler PVC film üzerine transfer edildikten sonra resimde gösterildiği gibi bir ohmmetre kullanılarak dirençlerini

ölçüyoruz. b) Ölçtüğümüz dirençler ile grafen genişliklerini çarparak elde ettiğimiz dirence karşılık grafen uzunlukları grafikte gösteriliyor. Ölçülen direnç grafen uzunluğu ile doğrusal bir şekilde değişiyor. Yapılan ölçümlere yapılan doğrusal ayarlama ile grafenin alan direncini yaklaşık 3.32 kΩ/sq ve kontak direncini de yaklaşık 0.7 kΩ.cm olarak hesapladık. 12
Şekil 3-7. Grafen süperkapasitorlerin üretilmesi ve çalışma prensibi. a) Geniş alanlı grafen süperkapasitor üretmek için iki tane geniş alanlı esnek PVC film üzerine transfer edilmiş grafen kullanıyoruz. Bu iki PVC üstündeki grafen birbirlerine bakacak şekilde ve aralarına da 50 μm kalınlığında bir kâğıt yerleştirerek birbiri üzerine seriyoruz. Daha sonra iyonik sıvıyı ince kâğıda emdirerek grafen süper kapasitörün üretimini tamamlıyoruz. Grafen süperkapasitorün şematik gösteriminde sıvı içerisindeki iyonların grafen elektrotlara voltaj uygulandıktan sonraki dağılımı gösteriliyor. b) Üretilen grafen süperkapasitorün devre elemanları ile simgesel gösterimi. c) Üretilen geniş alanlı grafen süperkapasitorlerden bir tanesi resimde gösteriliyor, alan genişliği yaklaşık 12 cm^2. 14
Şekil 3-8. Grafen süperkapasitorlerin elektriksel karakterizasyonu. a) Grafen süperkapasitörler üretildikten sonra elektriksel olarak performansını ölçmek için bir LRC metre kullanıyoruz. Burada grafen süperkapasitörlerin direnç ve kapasitans değerlerinin uygulanan voltaja göre değişimini ölçüyoruz. Uygulanan bir DC voltaj üzerine monte edilmiş daha küçük bir şiddete sahip bir AC voltaj yardımı ile grafen süperkapasitörlerin voltaja göre direnç ve kapasitanslarını ölçüyoruz. Grafen kapasitörden ölçtüğümüz direnç ve kapasitans da bize kapasitör içerisindeki grafenin direncini ve kuantum kapasitansını veriyor. Voltaj 0 V civarında iken grafenin Fermi enerjisi Dirak noktası civarında olduğundan grafenin direnci maksimum ve kapasitansı da minimum. Fakat negatif veya pozitif voltaj yönünde ilerlediğimizde ise grafenin Fermi seviyesi Dirak noktasından uzaklaştığından direnci düşüyor ve kapasitansı artıyor. b) Kapasitans değeri kullanılarak hesaplanan grafen üzerinde biriken yük yoğunluğu voltaja göre gösteriliyor. Uyguladığımız voltaj ile grafen üzerinde $0.5x10^{14}$ cm^{-2} seviyelerine kadar yük toplayabiliyoruz. 15
Şekil 3-9. Grafen süperkapasitörlerin optik karakterizasyonu. a) PVC üzerinde ürettiğimiz grafen süperkapasitörlerin üzerinden geçen ışığın uygulanan voltaj gerilimi ile değişimi FTIR kullanılarak ölçtük. Referans olarak 0 V alırsak, düşük voltajlarda geçirgenlikte bir değişim görünmez ama uygulanan voltaj 3.5 V seviyelerine doğru ulaştığında grafende 650 nm dalga boyuna kadar olan bantlar arası geçişleri engellediğimiz için grafen kapasitörün geçirgenliği artıyor. b) Ölçtüğümüz geçirgenlik değeri kullanılarak grafenin Fermi enerji seviyesinin voltaj ile nasıl değiştiğini de hesaplayabiliriz. Geçirgenlik değerinden hesapladığımıza göre grafenin Fermi seviyesini 1 eV seviyelerine kadar kaydırabiliyoruz. 17
Şekil 4-1. Mikrodalga bölgesinde çalışabilen geniş alanlı aktif grafen yüzeylerin tasarımı. a) İki grafen elektrot kullanılarak üretilen grafen süperkapasitörlerin mikrodalga bölgesindeki geçirgenlik, yansıtma ve emme özelliklerinin nasıl ölçüleceği şematik olarak gösterilmiştir. Bir adet mikrodalga kaynağından çıkan dalgaların aktif grafen yüzeyinden yansıyan ve geçen kısımları ölçüldükten sonra bunların gelen sinyalden çıkarılması ile grafen kapasitörün emmesini ölçüyoruz. Daha sonra grafen elektrotlar üzerindeki yük yoğunluğunu aktif olarak kontrol ederek mikrodalgaların kapasitör yüzeyinden geçirgenliğini, yansımasını ve dolayısı ile emilmesini kontrol etmeyi amaçlıyoruz. b) Üretilen grafen süperkapasitörlerin şematik olarak gösterimi, iki grafen elektrodun arasına koyduğumuz iyonik sıvı grafen elektrotlara uygulanan voltaj farkı ile polarize edilerek grafenin yük yoğunluğunu değiştiriyoruz. c) Üretilen grafen süperkapasitörlerden bir tanesinin resmi. d) Grafenin elektronik bant yapısı Fermi seviyesinin iletkenlik bandına doğru kaydırılmış hali ile gösteriliyor. Fermi enerjisinin iki katından daha fazla olan fotonlar grafen üzerinden belli bir miktarı emilerek geçerler. Fakat Fermi enerjisinin iki katından daha az olan enerjiye sahip fotonlar ise grafen üzerinden emilmeden geçerler. Daha da ötesi olarak eğer gelen foton grafenin Fermi enerji seviyesinden çok küçük bir enerjiye sahipse bu sefer bant içi geçişlerden dolayı gelen foton grafenin Fermi seviyesi ile artan bir şekilde grafen üzerinde emilir. e) Grafenin bantlar arası ve bant içi geçişlerden dolayı sahip olduğu optik iletkenliği kullanarak grafenin 100 nm den 1 m'ye kadar geniş bir spektrumda optik emme özelliğini hesapladık. 19
Şekil 4-2. Geniş alanlı grafen süperkapasitörlerin mikrodalga performanslarının ölçülmesi. a) Geniş alanlı PVC üzerine transfer edilmiş grafen kullanılarak üretilen grafen süperkapasitörlerin şematik gösterimi ile birlikte mikrodalga performansının ölçülmesi için kullanılan antenlerin şematik gösterimi sunulmuştur. Grafen süperkapasitörlerin yansıması (b), geçirgenliği (c) ve emmesi (d) 10G Hz frekansta mikrodalga kaynağı kullanılarak ölçülmüştür. Grafen elektrotlar arasına uygulanan voltaj farkı 0 V olduğunda grafen kapasitörden yansıyan mikrodalga şiddeti minimum ve geçirgenliği de maksimum durumdadır. Pozitif veya negatif voltaj uygulayarak grafen elektrotlar üzerindeki yük yoğunluğunu arttırdığımızda kapasitör yüzeyinden yansıyan mikrodalga %2 seviyelerinden %20 seviyelerine kadar artmaktadır. Bunun yanında grafen kapasitörden geçen mikrodalga da %70 seviyelerinden %33 seviyelerine kadar düşmüştür. Çünkü uyguladığımız voltaj farkı grafen yüzeylerin iletkenliğini arttırdığından grafen yüzeyleri daha çok metalik olmaya başlar ve uygulanan voltaj ile birlikte yansıma artarken geçirgenlikte azalır. Yansıma ve geçirgenliği gelen toplam dalganın şiddetinden çıkardığımızda da grafen kapasitör üzerinde mikrodalganın emilme miktarını hesaplayabiliriz. Grafen üzerindeki yük yoğunluğunu arttırdığımızda mikrodalganın grafen üzerinde emilmesi de bant içi geçişlerden dolayı

artmaktadır. e) Grafen süperkapasitörün toplam direncinin uygulanan voltaj farkı ile değişimi gösterilmektedir. f) Grafen süperkapasitor yapısı içerisindeki tek katmanlı grafenin 10 GHz frekansta geçirgenliği, yansıması ve emilmesini farklı alan direnci değerlerinde matriks transfer metodu ile hesapladık. Çizgiler simülasyon sonucunu, yuvarlak noktalar ise deneysel ölçüm sonuçlarını göstermektedir. g, h) Mikrodalga frekanslarında aktif olarak çalışabilen grafen süperkapasitörün 10 GHz frekanstaki mikrodalgada yansıma ve geçirgenlik değişiminin hızını ölçtük. Kapasitörün kontrol hızı RC zaman sabiti ile yaklaşık olarak aynı çıkmıştır ve 300 ms civarındadır. 21
Şekil 4-3. Geniş alanlı yüksek performanslı radar emici yüzeyler. a) Grafen süperkapasitör kullanılarak dizayn edilen geniş alanlı ve yüksek performanslı radar emici yüzeylerin şematik gösterimi sunulmuştur. PVC üzerine transfer edilen grafen kullanılarak üretilen geniş alanlı grafen kapasitörün alt kısmına metalden oluşan düz bir yüzey yerleştirerek mikrodalga rezonansı elde ediyoruz. Rezonans frekansı metal yüzey ile grafen kapasitör arasındaki uzaklığın dört katı uzunluktaki dalga boyuna karşılık geliyor. b, c) Üretilen geniş alanlı radar emici yüzeylerin ön ve arka taraflarından çekilmiş fotoğraflar gösteriliyor. d) Yüksek performanslı radar emen yüzeyden rezonans frekansında ölçülen mikrodalga yansıma şiddeti uygulanan voltaj farkına göre çizildi. Kapasitöre 0 V voltaj uygulandığında gelen mikrodalganın %60 lık kısmı geri yansıyor. Fakat uygulanan voltaj ±3 V a doğru arttırıldığında yansıma şiddeti -50 dB seviyelerine kadar düşüyor. e) Rezonans frekansında yüzeyden yansıyan mikrodalga şiddetinin ne kadar hızlı değiştiğini ölçmek için yansıma şiddetini zamana göre açık ve kapalı durumlar için çizdirdik. Kontrol hız yine grafen süperkapasitörün RC zaman sabiti ile limitli durumda ve yaklaşık 300 ms civarı. f) Radar emici yüzeyden alınan mikrodalga yansıma şiddeti frekansa göre değişen voltaj farklarında çizildi. Yüksek voltajda rezonans frekansı -60 dB seviyelerine kadar emilmektedir. g) Radar emici yüzeyden ölçülen yansıma şiddeti grafen kapasitör ile metal yüzey arasındaki uzaklık ile uygulanan voltaja göre değişimi çizilmiştir. Mavi alanlar rezonans bölgelerini kırmızı alanlar da yüksek yansıma bölgelerini göstermektedir. h) Radar emici yüzeyler de grafen kapasitör ile metalik yüzeyin arasındaki uzaklığı değiştirdik ve her uzaklıktaki kontrol derinliğini ölçtük. Rezonans frekansının dalga boyunun dörtte birine ve onun dalga boyunun yarısı eklenmiş katlarına denk gelen mesafelerde kontrol derinliği %100 seviyesine ulaşıyor. i) Radar emici yüzeyden gelen yansıma şiddeti frekansa göre farklı uzaklıklar için çizildi. Farklı uzaklıklar farklı frekanslarda rezonans sağlıyor. 24
Şekil 4-4. Çok geniş alanlı yüzeyleri de kaplayabilmek için grafen tabanlı radar emici hücrelerin tasarımı. a) Grafen tabanlı radar emici altıgen hücreler kullanılarak kaplanılan yaklaşık 0.12 m^{2}'lik bir alanın resmi gösterilmektedir. b, c) Üretilen küçük altıgen şekilli radar emici hücrelerden birinin ön ve arka yüzeyinin fotoğrafı gösterilmektedir. d) Altıgen şekilli radar emici hücrelerin iç yapısını gösteren şematik bir çizim. Üretilen altıgenlerde grafen kapasitör ile metal arasına mesafe oluşturması için karton kâğıdı kullanılmıştır. e) Bir tane altıgen radar emici hücreden rezonans frekansında ölçülen radar yansıma şiddeti uygulanan voltaja göre çizildi. 0 V'da yansıma maksimum iken uygulanan voltaj artırıldıkça yansıma %0 seviyelerine kadar düştü. f) Bir tane altıgen radar emici hücrenin rezonans frekansındaki yansıması x-y ekseninde bir tane iki boyutlu tarayıcı ile taradık. 0V'ta altıgenden yansıyan mikrodalga maksimum seviyede, uygulanan voltaj arttırıldıkça altıgenden yansıyan mikrodalga 0 seviyelerine kadar düşüyor. g) Altıgen hücrelerin dört tanesini beraber kullandığımızda, bu dört altıgen birbirinden bağımsız olarak yüzeyden gelen radar yansımasını kontrol edebilmektedir. 26
Şekil 4-5. Geniş alanlı düz olmayan yüzeyleri de kaplayabilmek için grafen tabanlı radar emici hücrelerin tasarımı. a, b) Grafen tabanlı, altıgen ve beşgen şekilli radar emici hücreler kullanılarak düz bir şekli olmayan, örneğin bir yarım küre, yüzeyleri kaplamak için de kullanılabilir. Burada, dışbükey (a), içbükey (b) oval şekilli iki yarım kürenin hücreler ile kaplanmış hali gösterilmektedir. c) Geniş alanlı esnek PVC kullanılarak üretilen grafen kapasitörler bir metalik silindir etrafına kaplanarak da bu metalik silindirden rezonans frekansında gelen yansıma engellenebilir, grafen kapasitör kaplanmış metalik silindirin resmi gösteriliyor. d) Grafen kapasitörle etrafı sarılmış metalik silindirden alınan rezonans frekansındaki yansıma şiddetinin voltaj ile değişimi gösterilmektedir. Uygulanan voltaj arttırıldığında yansıma şiddeti -3 dB seviyelerinden -50 dB seviyelerine kadar azaltılabilmektedir. e) Grafen kapasitörle kaplanan metalik silindirden rezonans frekansında ölçülen yansıma şiddetinin açıya göre açık ve kapalı durumda değişimi gösterilmiştir. Silindirin radar izdüşümü açı ile değişmiyor iken uygulanan voltaj ile açılıp kapatılabilmektedir. 27
Şekil 4-6. Elektriksel akort edilebilen meta-aygıtlar: a, Grafen elektrotlara kapasitif olarak birleştirilen bölünmüş halka rezonatörden (split-ring resonator) oluşan hibrit metamalzeme sisteminin şematik gösterimi. Kapasitif birleşme SRR-grafen mesafesi, d ile tanımlandı. b, Meta-aygıtın küçük-sinyal eşdeğer devre modeli. SRR toplu devre elemanları olan L, R, C ile ifade edilmiştir; grafen katman değiştirilebilen yüzey direnciyle, R_G ve kuantum kapasitansı, C_Q ile tanımlanmıştır. C_c kapasitif birleşimi göstermektedir. c, d, Farklı besleme gerilimlerinde geçirgenliğin (S_{21}) genlik ve fazının spektrası. Renk çubuğu besleme gerilimini ifade etmektedir. e, f, Geçirgenliğin genlik ve fazının besleme gerilimiyle değişimi. 30
Şekil 4-7. Akort edilebilir 2D-Drude metal yanındaki elektrik ve manyetik dipole yayıcılar a, SRR üzerindeki gelen ışığın polarizasyon yöneliminden bağımsız elektrik ve manyetik dipollerin şematik gösterimi. b, c, Farklı

yönelimlerdeki elektrik ve manyetik dipollerin normalize edilen yayınım gücünün Drude metalinin yüzey direncine karşı gösterimi. Dipoller ara yüzeyden 2 mm uzağa yerleştirildiler. 32
Şekil 4-8. Aktif meta-aygıtların yakın alan karakterizasyonu: a, Aygıtın lokal saçılma parametresinin (S_{21}) saptanması için kullanılan yakın alan tarama tekniği. Saçılma parametresi anten yönü boyunca olan lokal elektrik alanın büyüklüğünü verir. b, c Farklı grafen-SRR uzaklıklarında ölçülen konum haritası ve meta-aygıtın lokal saçılma parametresinin spektrumunun gösterimi. d, e Aygıtın merkezindeki lokal saçılma parametresinin büyüklüğü ve konum haritasının uygulanan gerilime bağlı gösterimi. 34
Şekil 4-9. Meta-aygıtların zaman yanıtı: a, b, Meta-aygıtların geçirgenliğinin (S_{21}) (1.5 V besleme geriliminden sonra) genlik ve fazının zamana bağlı gösterimi c ve aygıtın faz ve geçirgenlik rezonansının değişimi. 35
Şekil 4-10. Elektriksel yeniden ayarlanabilir, konumsal değişen dijital metamalzemeler: a Ayrı ayrı adreslenebilen piksellere sahip dijital meta malzemenin şematik gösterimi. Bağımsız pikseller üzerindeki yük yoğunluğunun kontrolü lokal dielektrik sabitini yeniden ayarlayabilmemizi sağlar. b, c Tekli pikselin etkin dielektrik sabitinin hesaplanan reel ve sanal kısımlarının spektrumunun besleme geriliminin fonksiyonu olarak gösterimi. d, Rezonans koşulunda farklı gerilim konfigürasyonları için aygıtın etkin dielektrik sabitinin reel kısmının konumsal haritası. Piksellerin etkin dielektrik sabitleri pasif matris adresleme ile kontrol edilir. 36
Şekil 4-11. Grafene dayalı aktif Salisbury ekranı. (a) Aktif grafen cihazın şematik yerleşimi. Karşılıklı bir metalik yüzeyden bir çeyrek dalga uzaklığa yerleştirilen grafen kapı tabakaları. (b) Aktif cihazın iletim hattı gösterimi. Bir kısa devre ile gösterilmiştir ve metalik yüzey grafen tabakalar ayarlanabilir bir direnç ($Z_{tg;}$ $Z_{Tg,}$ alt grafen üst grafen) ile temsil edilmektedir. (c) Üretilen cihazın fotoğrafı. İyonik bir sıvı elektrolit, polimer substratlar üzerinde iki geniş alanlı CVD ile büyütülmüş grafen arasına yerleştirilir. Cihazın arka yüzü bir alüminyum folyo ile kaplanmıştır. 39
Şekil 4-12. Gerilim ile kontrol edilen yansıyan mikrodalganın fazı ve yoğunluğu: (a) yansıyan elektromanyetik dalgaların faz spektrumu. (a) Ön gerilimde Salisbury ekranında yansıyan elektromanyetik dalgaların spektrumu. (c) Rezonans durumunda (11.976 GHz) ve rezonans olmadan (15 GHz) ön gerilim voltajına karşı yansıma genliğinin ve fazının değişimi. 40
Şekil 4-13. Giriş empedansın gerçek ve hayali kısmından grafen sıkma tabaka direnci: (a) Smith şeması ön gerilimi ile cihazın toplam giriş empedansı değişimini. (B) Hem frekans hem de ön gerilim voltajının bir fonksiyonu olarak grafene dayalı Salisbury ekranının toplam giriş empedansının gerçek ve sanal kısmı. (C) Grafene toplam giriş empedansından çıkartılan levha direnci. Rezonans frekansında toplam giriş empedansının gerçek kısmı, levha direncinin yarısını verir. Toplam empedansın kendi ekstremumundaki hayali kısmı, rezonans frekanslarının hem sol hem de sağ tarafında grafene ait levha direncinin dörtte birini verir. 41
Şekil 4-14. Aktif Salisbury ekranının simülasyonu. (a) Bir Smith şeması ile gösterilen grafenin simüle edilmiş (düz hat) ve ölçülen (dalgalı çizgiler) yansıma katsayısına göre Salisbury ekran. Simülasyonda, frekans 1-23 GHz arasında değişiyor ve levha direnci 0,2-5,0 kΩ arasında değişiyor. Deneysel ölçümler için frekans aralığı 7-15 GHz'dir. (b) Rezonanstaki yansıma genliğinin deneysel ve hesaplanan değerlerinin karşılaştırılması, levha direncine karşı çizilmiştir. (c) Çeşitli frekanslarda fazın değişimi, tabaka direncine karşı çizilmiştir. Kesintisiz çizgiler simülasyon ile sağlanır. 42
Şekil 4-15. Çift yönlü Faz kontrolü: (a) Aygıtın kesit görüntüsü. Elektrolitin kalınlığı ve grafen tabakaları arasındaki asimetrik doping, pozitif ve negatif ön gerilim voltajları için iki ayrı rezonans verir. (b) Rezonans genliklerinin ön gerilim gerilimi ile değişimi, pozitif ve negatif ön gerilimli gerilimlerdeki rezonansların yoğunlukları benzerdir. (c) Pozitif ve negatif ön gerilim voltajlarında rezonans spektrumu. Üç farklı bölgede $f>f_{+,}$ K_{+} için çapraz gerilimi ile aynı fazda (d) ayarlanabilirliği, $<f<f_{-,}$ $f>f_{-.}$ 44
Şekil 4-16. Geniş bant aralığında radar sinyallerini emebilen ve elektriksel olarak kontrol edilebilen iki tabaka grafen kullanılarak tasarlanmış radar emici aygıtın modellemede kullanılan şematik gösterimi. 46
Şekil 4-17. Modellenen grafen tabanlı Jaumann radar emici yüzeylerin grafen yüzeylerin direnci ile değişen yansıma grafikleri. Her bir resimde ortadaki grafenin direnci sabit tutularak en üstteki grafenin direnci taranmış ve yansıyan mikrodalga yoğunluğu kaydedilmiştir. İkinci grafenin direnci 200-ohm dan 1250 ohm'a kadar a)'dan h)'ye kadar değiştirilmiştir. 47
Şekil 4-18. Modellenen grafen tabanlı Jaumann radar emici yüzeylerin grafen yüzeylerin direnci ile değişen yansıma spektrumları gösterilmiştir. Birinci ve ikinci grafenin dirençleri 200-ohm'dan 1250-ohm'a kadar değiştirilmiştir. 48
Şekil 4-19. İki tabaka grafen kapasitör kullanılarak üretilen grafen tabanlı Jaumann radar emici yüzeylerin şematik gösterimi. 49
Şekil 4-20. Üretilen ve modellenen geniş bant aralığında çalışabilen radar emici yüzeylerin karşılaştırılması. Birinci grafen kapasitöre uygulanan voltaj taranırken ikinci grafen kapasitördeki voltaj 0 V da tutulmuştur. 50
Şekil 4-21. Üretilen ve modellenen geniş bant aralığında çalışabilen radar emici yüzeylerin karşılaştırılması. Birinci grafen kapasitöre uygulanan voltaj taranırken ikinci grafen kapasitördeki voltaj 0.6 V da tutulmuştur. 50
Şekil 4-22. (a) Çalışmalarda kullanılan model uçak, (b) uçak yüzeyinin mikrodalgaları yansıtan alüminyum levha ile kaplandıktan sonraki hali 51

Şekil 4-23. Kanat ve gövde üzerine yerleştirilmiş grafen tabanlı aygıtlar, kanat düzlemsel yüzey ve gövde ise dairesel yüzey olarak farklı geometrilere sahip aygıtların üretilmesini gerek kılmıştır. 52
Şekil 4-24. Ölçümler sırasında kullanılan deneysel düzenek ve farklı açılarda radar kesit alanı ölçümleri. 53
Şekil 4-25. Kanat bölgesi üzerinden alınmış s polarize ölçüm sonuçları, (a) farklı voltajlarda frekansa bağlı güç değişimi, (b) farklı voltajlarda frekansa göre fazın değişimi, (c) rezonans frekansında voltaja göre güç değişimi, (d) rezonans frekansında voltaja göre fazın değişimi 55
Şekil 4-26. Kanat bölgesi üzerinden alınmış p polarize ölçüm sonuçları, (a) farklı voltajlarda frekansa bağlı güç değişimi, (b) farklı voltajlarda frekansa göre fazın değişimi, (c) rezonans frekansında voltaja göre güç değişimi, (d) rezonans frekansında voltaja göre fazın değişimi 56
Şekil 4-27. Gövde bölgesi üzerinden alınmış s polarize ölçüm sonuçları, (a) farklı voltajlarda frekansa bağlı güç değişimi, (b) farklı voltajlarda frekansa göre fazın değişimi, (c) rezonans frekansında voltaja göre güç değişimi, (d) rezonans frekansında voltaja göre fazın değişimi 57

ÖZET

Mikrodalgalar elektromanyetik spektrumun dalga-boyu 1 mm ile 1 m arasındaki bölgeyi kapsamaktadır. Radar teknolojileri mikrodalgaların yüzeylerden yansımasını ölçerek cisimlerin şeklinin ve büyüklüğünün uzaktan algılanmasını sağlamaktadır. Metal yüzeyler mikrodalgaları yansıttığı için radarlar tarafından rahatlıkla algılanmaktadır. Radar emici malzemeler mikrodalgaların yüzeyden yansımalarını azaltarak cisimlerin uzaktan algılanmalarını engellemek için kullanılmaktadır. Radar emici yüzeyler genel olarak elektriksel iletkenliği düşük karbon ve metal parçacıkların karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Radar emici yüzeyler pasif yüzeylerdir ve mikrodalga yansımaları aktif olarak kontrol edilememektedir. Elektriksel olarak kontrol edilebilen radar emici yüzeyler günümüz teknolojisinde mevcut değildir.

Bu proje kapsamında geniş alan grafen elektrotlar kullanarak akıllı radar emici yüzeyler üretilmiştir. Projenin ana hedefi 1-20 GHz frekans bandında çalışan mikrodalga yansıması voltaj ile değişebilen, radar sinyallerini 0-100% arasında soğurabilen aktif yüzeylerin üretilmesidir. Grafen elektrotlar arasına iyonik sıvı elektrolit konularak üretilen kapasitör yapısı ile grafen üzerindeki yüklerin yoğunluğu kontrollü bir şekilde ayarlanabilmektedir. Grafenin tek atom kalınlığındaki yapısı sayesinde, mikrodalga yansıması yük yoğunluğunu değiştirerek kontrol edilmektedir.

Bu proje kapsamında 3 farklı rezonant aygıt yapısı kullanarak grafen elektrotların mikrodalgaların kontrollü bir şekilde emilmesi sağlanacaktır. Projede 1. Aktif Salibury yüzeyi, 2. Aktif metamalzeme yüzeyi ve 3. Jaumann yüzeyi üretildi. Bu aygıtların performanslarını arttırmak için farklı iyonik sıvılar ve kapasitör yapıları test edildi.

Projenin son kısmında geliştirilen aktif mikrodalga yüzeyleri kullanarak bir prototip ürettik. Bir maket uçağın gövdesi ve kanatları projede geliştirilecek aktif yüzeyler ile kaplanarak mikrodalga yansıması voltaj ile kontrol edildi.

Bu projenin sonuçları prestijli üç bilimsel makale ile sonuçlandı. Bu proje kapsamında yürütülen bilimsel çalışmalar, proje yöneticisinin ve araştırmacıların akademik kariyerine katkıda bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Grafen, radar, mikrodalga, 2-boyutlu yarıiletkenler, kimyasal buhar biriktirme, süperkapasitor,

ABSTRACT

The microwave is the part of the electromagnetic spectrum with wavelength ranges between 1 mm and 1 m. Radar technologies measure the reflections of microwaves from the surfaces, enabling remote sensing of the shape and size of objects. Since metal surfaces reflect microwaves, they are easily perceived by radar. Radar absorbing materials are used to prevent objects from being remotely sensed by reducing the reflection of microwaves from the surface. Radar absorbing surfaces are generally obtained by mixing carbon and metal particles with electrical conductivity. Radar absorbing surfaces are passive surfaces and microwave reflections are not actively controlled. Electrically controllable radar emissive surfaces are not present in today's technology.

In this project, smart radar absorbing surfaces were produced by using wide area grafen electrodes. The main goal of the project is to produce active surfaces which can be radiated with 0-100% radar signals, which can be changed by microwave reflection voltage operating in the 1-20 GHz frequency band. The density of the charges on the graphene can be controlled by the capacitor structure produced by putting the ionic liquid electrolite between the graphene electrodes. Thanks to the structure of the graphene at one atomic thickness, the microwave reflection is controlled by changing the load amplitude.

Within the scope of this project, using 3 different resonant device structures, grafens will be controlled to absorb microwaves. In the project, 1. Active Salibury surface, 2. Active metamorphic surface, and 3. Jaumann surface were produced. To improve the performance of these devices, different ionic liquids and capacitor structures were tested.

We developed a prototype using active microwave surfaces developed at the end of the project. A model of the plane and the wings of the plane were covered with active surfaces to be developed in the project and controlled by microwave reflection voltage.

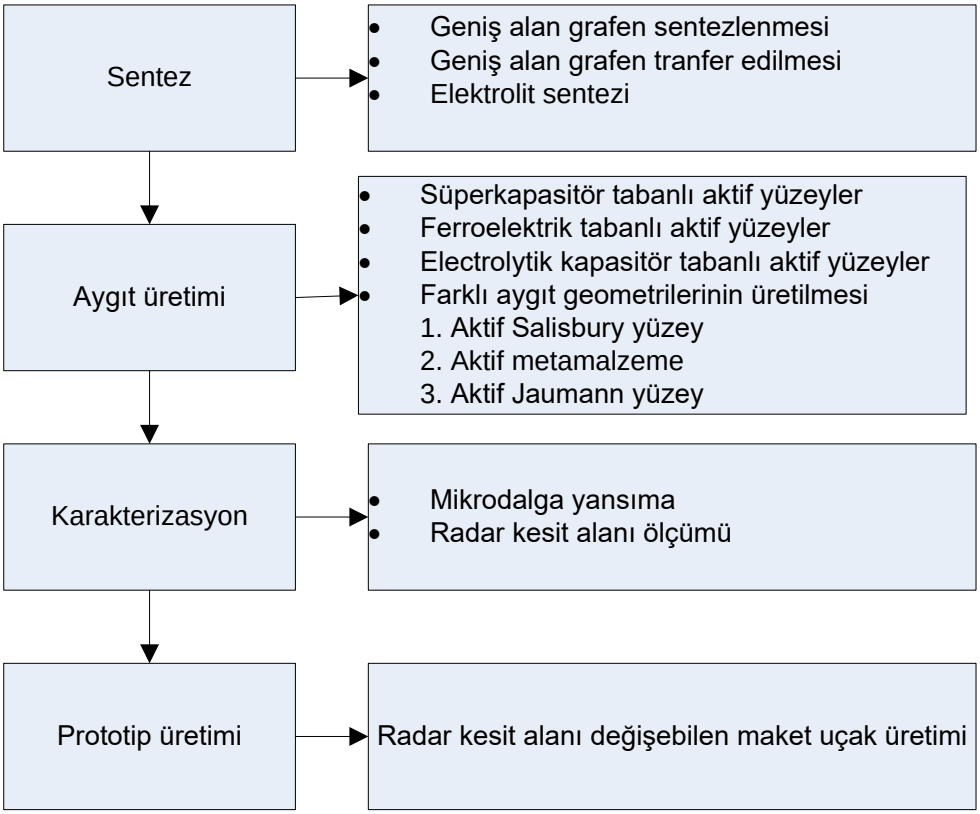
The results of this project resulted in three prestigious scientific papers. The scientific studies carried out under this project have contributed to the academic career of project managers and researchers.

Keywords: Grafen, optoelectronics, radar, 2-dimensional semiconductors, chemical vapor deposition, supercapacitor

1. GİRİŞ

Mikrodalgalar elektromanyetik spektrumun dalga-boyu 1 mm ile 1 m arasındaki bölgeyi kapsamaktadır. Radar teknolojileri mikrodalgaların yüzeylerden yansımasını ölçerek cisimlerin şeklinin ve büyüklüğünün uzaktan algılanmasını sağlamaktadır. Metal yüzeyler mikrodalgaları yansıttığı için radar tarafından rahatlıkla algılanmaktadır. Radar emici malzemeler mikrodalgaların yüzeyden yansımalarını azaltarak cisimlerin uzaktan algılanmalarını engellemek için kullanılmaktadır. Radar emici yüzeyler genel olarak elektriksel iletkenliği düşük karbon ve metal parçacıklarının karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Radar emici yüzeyler pasif yüzeylerdir ve mikrodalga yansımaları aktif olarak kontrol edilememektedir. Bu proje kapsamında geniş alan grafen elektrotlar kullanarak akıllı radar emici yüzeyler üretilecektir. Projenin ana hedefi radar yansıması voltaj ile değişebilen, radar sinyallerini istenildiğinde tamamen emebilen ve yansıtabilen aktif yüzeylerin üretilmesidir.

Bu projenin temel amacı grafen tabanlı radar kesit alanı elektriksel olarak kontrol edilebilen yeni nesil akıllı mikrodalga yüzeyler geliştirmektir. Bu projede tek atom kalınlığındaki grafen tabakasındaki serbest yüklerin yoğunluğunu elektriksel olarak değiştirerek, mikrodalgaların yüzeyden yansıması kontrol edilecektir. Proje kapsamında üretilmesi hedeflenen aktif mikrodalga yüzeyler grafen kapasitör yapısını kullanacaktır. İki geniş alan grafen elektrota uygulanacak potansiyel ile grafen elektrotlar üzerinde yük birikmesi sağlanacak ve biriken yükler mikrodalgaların yansımasını kontrol edecektir. Geniş alan (20 cm x 20 cm) tek tabakalı grafen kimyasal buhar biriktirme metodu ile sentezlendikten sonra esnek polimer yüzeylere aktarılacaktır. İki grafen elektrot arası bir elektrolit sıvı ile doldurularak üretilecek grafen kapasitörün üzerine uygulanan voltaj ile grafen elektrotlar üzerinde biriken yük yoğunluğunun kontrol edilmesine olanak sağlayacaktır ve bu şekilde mikrodalgaların yansımasının kontrol edilebilmesi amaçlanmaktadır. Şekil 1-1 Projenin ana bölümlerini kısaca özetlemektedir.



Şekil 1-1. Projenin 4 ana bölümü ve alt bölümlerin özeti.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Mikrodalgalar elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır ve dalga boyları bir santimetre ile bir metre arasında değişir. Radar ve iletişim teknolojileri, serbest alana mikrodalgaları yönlendirmek için pasif metal yüzeyleri kullanmaktadır. Mikrodalgaların kaynağı elektriksel yöntemlerle kontrol edilebilmesine rağmen, serbest alan içindeki mikrodalgaların etkin kontrolü, geniş alan yüzeylerinin elektrik özelliklerini verimli bir şekilde kontrol edebilmesi nedeniyle zor olmuştur. Elektrikle ayarlanabilir yansıma ve iletim sağlayan akıllı optik camların mikrodalga analoğu uzun yıllar aktif araştırma konusu olmuştur (Ford ve Chambers 2000; Mirsaneh, Furman vd. 2010; Haupt ve Lanagan 2013). Buradaki ana zorluk mikrodalgalar ve madde arasındaki etkileşimi elektriksel yöntemlerle ayarlamaktır. Bu etkileşimler esas olarak malzemelerin dielektrik tepkileri ile yönetilmektedir. Ayarlanabilir iletkenliği olan malzemeler (Wright, Chambers vd. 2000; Mirsaneh, Furman vd. 2010) dielektrik (Vendik, Hollmann vd. 1999) ya da geçirgenliği (Pozar ve Sanchez 1988; Hansen ve Burke 2000) aktif yüzeyler için istifade edilmiştir. Toplu malzeme özelliklerini kontrol etmek

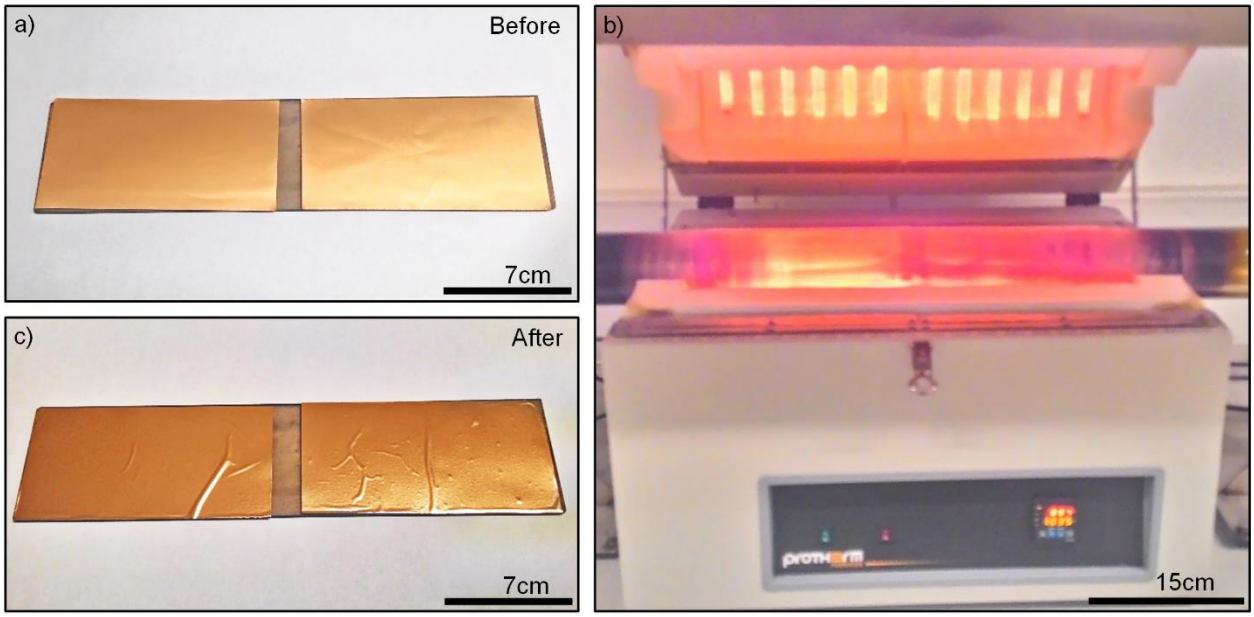
yerine, bu projede yüzeydeki yük yoğunluğunu dinamik olarak ayarlayarak mikrodalgaları kontrol etmeyi öneriyoruz. Karbonun, iki boyutlu kristal formu olan grafen, bize bu yaklaşımı test edebilmemiz ve aktif mikrodalga yüzeyler için yeni imkânlar sağlamaktadır. Yoğun miktarda serbest yük olmadığı sürece, atomik olarak ince bir kaplamanın mikrodalgaların bir yüzeyden yansıması üzerinde önemli etkilere sahip değildir. Atomik katmandaki yük yoğunluğunu ayarlayarak, mikrodalga yansıması kontrol edilebilir.

Yarı iletkenlerden farklı olarak metallerin iletim bandı içinde uzanan Fermi seviyesi (E_F) dış elektrik alanı tarafından ayarlanamaz. Bu dezavantaj, metallerin aktif mikrodalga yüzeyler için kullanılmasını önler. Yarıiletken metal oksit yarı yapıları ile ayarlanabilir yük yoğunluğu sağlayabilir (Ando, Fowler vd. 1982); Bununla birlikte, metal geçit elektrodu yarı iletken yüzeyini kaplar ve biriken yükleri ekranlar. Çıplak yarı iletken yüzeyin bir ışık kaynağı ile ısıtılması veya aydınlatılması serbest taşıyıcılar oluşturabilir; ancak, bu teknikler gerçekçi cihaz yapıları için pratik değildir. Güçlü aktif mikrodalga yüzeyler için ferroelektrik malzemeler, şekil bellekli alaşımlar ve kompozit polimerler gibi elektrikle ayarlanabilir malzemeler incelenmiştir. Bu malzemeleri geniş alanda yapamama ve dielektrik özelliklerin zayıf modülasyonu aktif yüzeylerin oluşmasını engeller. Diğer bir yaklaşım, aktif devre elemanlarının pasif metalik yapılar (diyotlar, transistörler veya foto-anahtarları) ile bütünleştirilerek yapılır (Freeman, Lamberty vd. 1992; Grewal ve Hanson 2003). Bu dağıtılmış devre elemanlarına uygulanan dış ön gerilim veya ışık kaynağı mikrodalgalar üzerinde sınırlı kontrol sağlar. Ayrıca, mikro-elektromekanik cihazlar ve mekanik aktüatörler, mekanik araçlar ile mikrodalga kontrol etmek için kullanılmıştır. Bu proje kapsamında literatürde ilk defa büyük alan grafen kapasitörler kullanarak bu zorluklar ortadan kaldırılmıştır ve elektriksel olarak ayarlanabilen mikrodalga yüzeyleri gösterilmiştir. Tek atom kalınlık, ayarlanabilir yük yoğunluğu ve grafenin geniş alan sentezi, aktif mikrodalga yüzeylerin gerçekleştirilmesi için eşsiz bir yapılandırma sağlamaktadır.

3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1 Grafen sentezi

Tek tabakalı ve geniş alanlı grafen sentezlemek için kimyasal buhar biriktirme sistemini (CVD) kullanıyoruz. Sistem içerisinde genel olarak H_2 ve CH_4 gaz tüpleri, gaz akışını kontrol etmek için kullanılan MFC'ler (Mass Flow Controller), 8 cm çapında ve 1 m uzunluğunda bir quartz tüp, bir vakum pompası, bir tane çift alanlı açılabilir fırın ve sistem soğutması için kullanılan bir adet soğutucu bulunmaktadır. Grafen büyütme işlemine başlamadan önce üzerinde grafen büyütmek istediğimiz bakır folyoları istenilen ölçülerde kesip hazırlıyoruz. Bakır folyoları fırına koymak için 30 cm uzunluğunda ve 7 cm genişliğinde düz bir quartz tabla kullanıyoruz. Dolayısı ile bir seferde büyütebileceğimiz grafen büyüklüğü maksimum bu quartz tabla kadar olabiliyor. Yaptığımız deneylerde kullanmak için genelde 7 cm genişliğinde ve 14,5 cm uzunluğunda iki parça bakırda aynı anda büyütmeyi tercih ediyoruz (Şekil 3-1). Bakır folyoları kesip quartz tabla üzerine yerleştirdikten sonra bu tablayı silindirik quartz tüpün ortasında olacak şekilde yerleştiriyoruz. Silindirik tüpe olan bağlantıları bağladıktan sonra tüpün içerisini 6 mTorr seviyelerine kadar vakum pompası yardımı ile vakuma alıyoruz. 6 mTorr civarında vakum seviyelerine indikten sonra vakum pompasını kapatmadan tüp içerisine 100 sccm H_2 gazı göndermeye başlıyoruz. H_2 gazını açtığımız anda fırının kapağını kapatarak 1035 ^oC'ye doğru ısıtmaya başlıyoruz. Yaklaşık 30 dk sonunda fırının sıcaklığı 1035^oC'ye geldikten sonra grafeni bakır folyo yüzeyinde büyütmeye başlamak için akan H_2 gazına ilave olarak 1dk süre ile 10 sccm CH_4 gazı akıtıyoruz. 1dk sonunda bakır folyo yüzeyinde tek tabakalı grafen büyütme işlemi tamamlanıyor, sürenin daha fazla uzatılması bakır yüzeyinde çok katmanlı grafenin büyümesine sebep olduğundan sürenin iyi ayarlanması gerekmektedir. Tek tabakalı grafen büyüdükten sonra akan CH_4 gazını kapatıyoruz ve fırının kapağını açarak bütün sistemi oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakıyoruz (Şekil 3-1b). Yaklaşık bir saat sonunda fırının sıcaklığı oda sıcaklığına geldiğinde önce akan H_2 gazını kapatıyoruz, yaklaşık bir dakika sonrasında da vakum pompasını kapatıp vakumda olan silindirik tüpün içerisine hava akıtarak vakumu kırıyoruz. Hemen sonrasında da silindirik tüpe olan bağlantıları açarak yüzeyinde tek tabakalı grafen sentezlenmiş bakır folyoları quartz tabla ile birlikte fırından çıkartıyoruz (Şekil 3-1c).

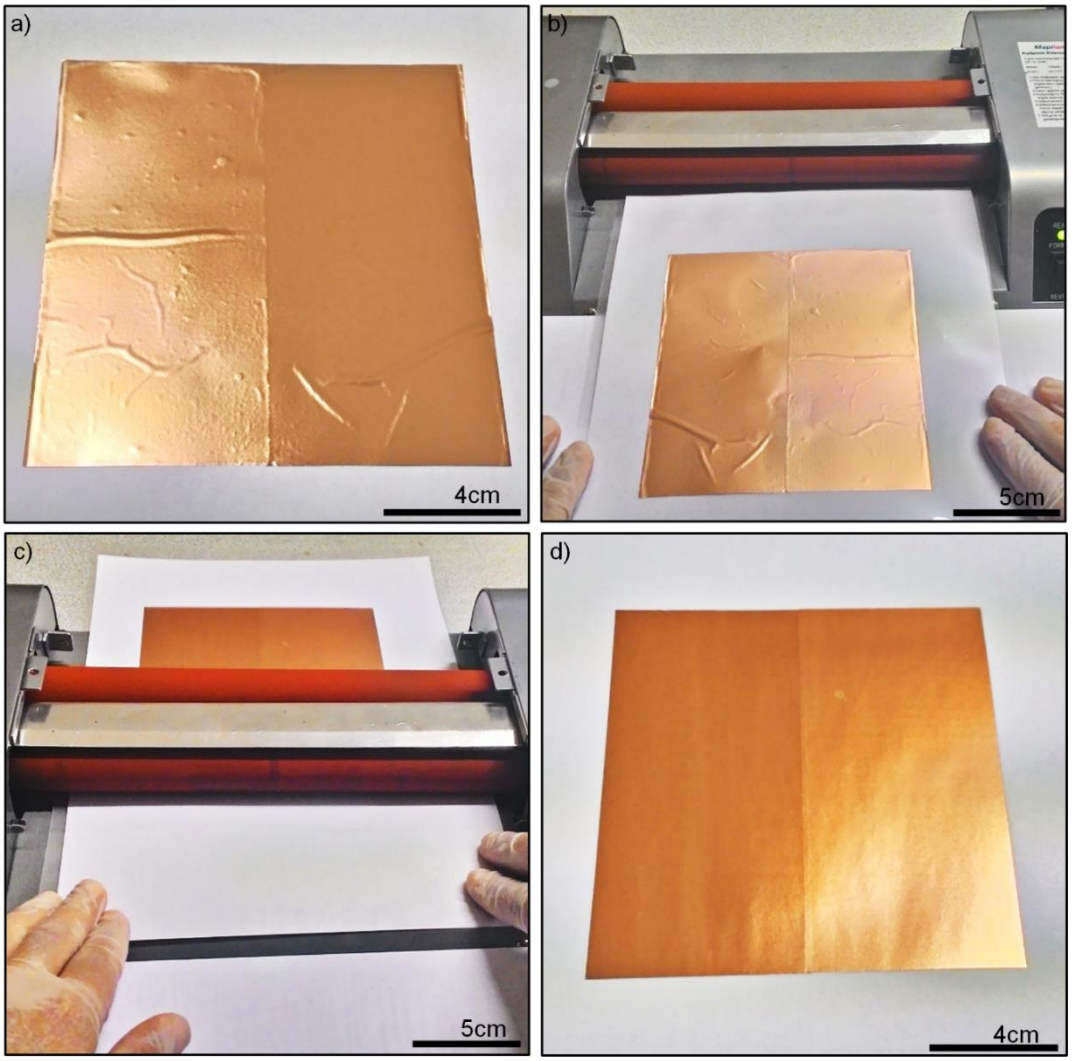


Şekil 3-1. Tek tabakalı grafen filmin kimyasal buhar yükleme sistemi ile büyütülmesi. a) Geniş alanlı ve tek tabakalı grafeni büyütmek için öncelikle 7 cm genişliğinde, 14,5 cm uzunluğunda ve 10μm kalınlığındaki iki parça pürüzsüz bakır folyoyu quartz tabla üzerine yerleştiriyoruz. b) Bu quartz tablayı daha sonra yüksek sıcaklığa çıkabilen fırının üzerinde bulunan 8 cm çapındaki silindirik quartz tüpün içerisine ortalayacak şekilde yerleştiriyoruz. Quartz silindirin giriş ve çıkışını kapattıktan sonra bir pompa ile quartz tüpün içerisini yaklaşık 6 mTorr seviyelerine kadar vakuma alıyoruz. Daha sonra split fırının kapağını kapatıp 100 sccm H_2 akıtarak bakır folyoların bulunduğu alanın 1035^oC ye çıkmasını bekliyoruz. Sıcaklık 1035^oC ye ulaştığında akan H_2 ye ilave olarak 10 sccm CH_4'u 1dk akıtarak bakır folyoların üst yüzeyinde tek tabakalı grafeni büyütüyoruz. Akan CH_4'ı kapatıp fırının kapağını açarak büyütme işlemini sonlandırıyoruz ve H_2 akışı altında fırının sıcaklığının yaklaşık oda sıcaklığına gelmesini bekliyoruz. c) Fırın oda sıcaklığına geldikten sonra akan H_2'yi kapatıp vakum pompasını kapatıyoruz, quartz silindirin içerisine hava göndererek vakumu kırıyoruz ve grafen büyütülmüş bakır folyoları quartz silindirin içerisinden çıkarıyoruz.

3.2 Grafenin esnek PVC yüzeyine transfer edilmesi

Bakır folyo üzerinde sentezlenen tek tabakalı ve geniş alanlı grafeni mikrodalga ve radar ölçümlerinde kullanabilmek için esnek PVC filmi üzerine transfer ediyoruz. Transfer için önce grafen büyütülmüş 14,5 cm uzunluğunda ve 7 cm genişliğindeki bakır folyoların ikisini uzun kenarları birbirine çok yakın ve grafen büyütülmüş yüzeyleri yukarı tarafta olacak şekilde bir A4 kâğıdı üzerine seriyoruz (Şekil 3-2a). Daha sonra 75 μm kalınlığında ve yaklaşık bir A4 kâğıdı büyüklüğündeki standart PVC sıcak laminasyon filmini ısıtıldığında eriyebilen mat yüzeyi bakır folyolar tarafında olacak şekilde bakır folyolar ve kâğıt üzerine seriyoruz. Daha önceden açarak 100^oC ye kadar ısıttığımız sıcak laminasyon aletini (Mapilam 124) kullanarak PVC filmi hem ısıtıp hem de presleyerek bakır folyolar ve kâğıt

üzerine yapıştırıyoruz (Şekil 3-2b-c). Hem ısıtılıp hem de preslenen PVC film hava boşluğu bırakmadan bakır ve kâğıt yüzeyine istenilen şekilde yapışıyor (Şekil 3-2d).

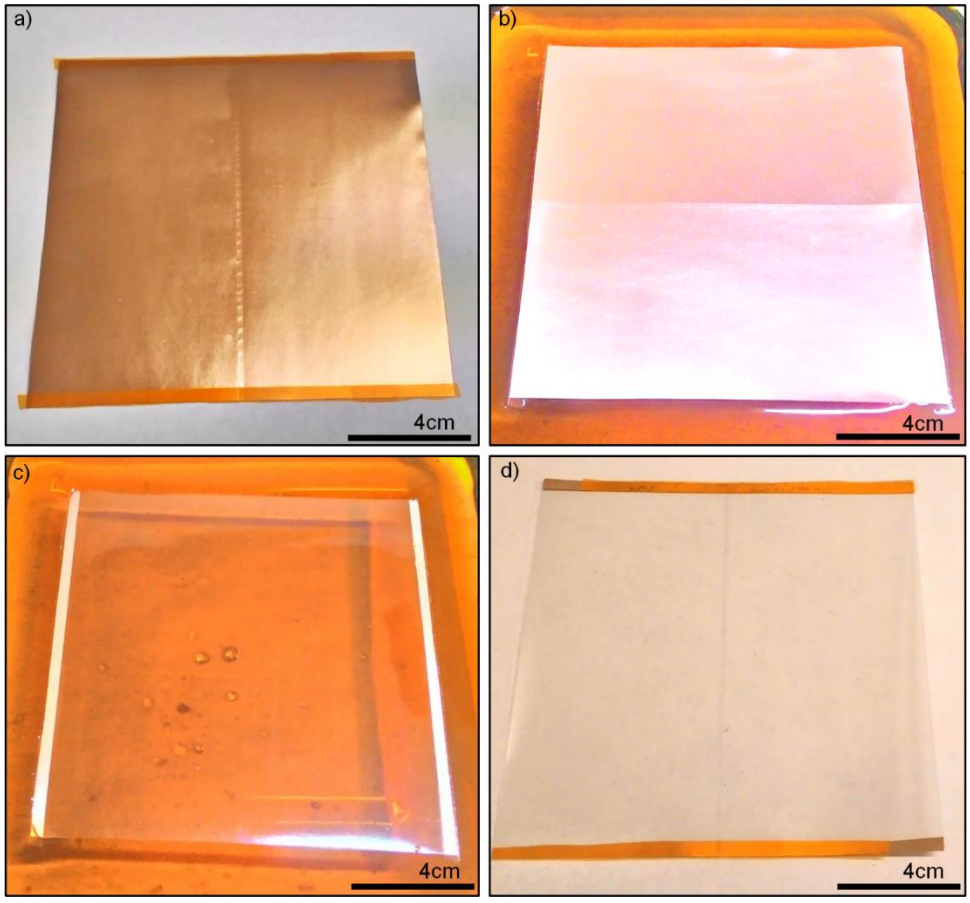


Şekil 3-2. Geniş alanlı ve tek tabakalı grafen filmin sıcak laminasyon yöntemi ile esnek PVC filmi üzerine aktarılması. a) İki adet grafen büyütülmüş bakır folyoyu bir A4 kâğıdı üzerine uzun kenarları birbirlerine çok yakın olacak şekilde seriyoruz. Üzerlerine de bir tarafı ısıtıldığında eriyebilen standart PVC laminasyon filmini eriyebilen kısmı bakır folyolara bakacak şekilde folyoların üzerine seriyoruz. b), c), Önceden yaklaşık 100^{o}C ye kadar ısıtılan standart laminasyon aletini (Mapilam 124) kullanarak PVC filmi bakır folyoya yapıştırıyoruz. d) Isıtılarak preslenen PVC filmi bakır folyolara ve bakır folyonun olmadığı A4 kâğıdı yüzeylerine düzgün bir şekilde yapıştırılıyor.

3.3 Bakır folyoların kimyasal olarak aşındırılması

Sıcak laminasyon tekniği ile esnek PVC film üzerine lamine edilerek yapıştırılan bakır folyo ile birlikte üzerinde büyütülen tek tabakalı grafen filmi de PVC üzerine yapışıyor. Bu grafen filmini PVC yüzeyinde kalacak şekilde bakır folyodan kurtulmak için bakır folyoyu

kimyasal olarak aşındırıyoruz. Önce PVC film üzerine kâğıt ile birlikte yapıştırılan bakır folyoyu tam olarak bakır folyonun kenarlarından makas ile keserek çıkartıyoruz. Sadece bakır folyonun olduğu alanlarda PVC kâğıda yapışmadığından kenarlarından kesilen bakır folyo ve PVC film kolayca kâğıttan ayrılır. Çıkartılan PVC ye lamine olmuş bakır filmin bakır folyo tarafını çevirerek son ve baş taraflarına ince bir bant yapıştırıyoruz (Şekil 3-3a). Yapıştırdığımız bu bant şeridi altında kalan bakır folyoyu kimyasal aşındırma sırasında koruyarak aşınmasını engelleyecektir. Daha sonra bu aşınmayan bakır folyoyu geniş alanlı PVC üzerindeki grafenden elektriksel kontak almak için kullanacağız. Kimyasal aşındırma için 5 mM $FeCl_3$ sulu çözeltisini hazırlayarak PVC film üzerindeki bakır folyoyu sulu çözeltiye bakacak şekilde yüzdürüyoruz (Şekil 3-3b). Yaklaşık 10dk sonunda bakır folyo kimyasal olarak aşınır (Şekil 3-3c). Çözeltiden çıkarıp temiz su ile yıkayıp kuruladıktan sonra yaklaşık 14 cm^2 alanlı, tek tabakalı, esnek PVC üzerine transfer edilip elektriksel kontakları alınmış grafeni elde ediyoruz (Şekil 3-3d).



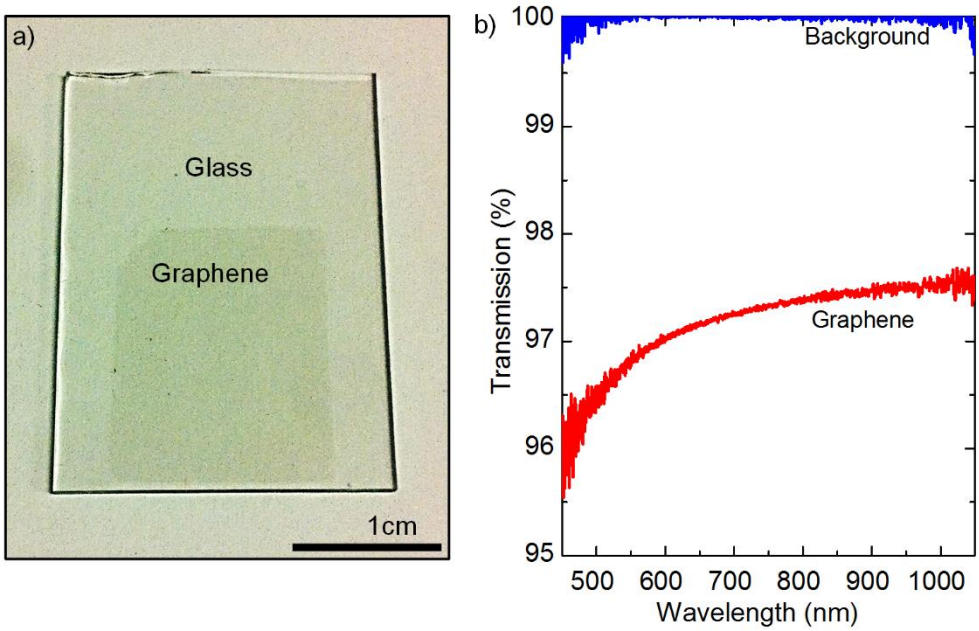
Şekil 3-3. Geniş alanlı, esnek PVC filmi üzerine ısıtılarak transfer edilen grafen büyütülmüş bakır folyoların kimyasal olarak aşındırılması. a) PVC filmi ısıtarak grafen büyütülmüş bakır folyoya yapıştırdıktan sonra bakır folyonun kenarlarından keserek kenarlardaki lamine olmuş kâğıt kısımları çıkarıyoruz. Elimizde kalan PVC üzerinde grafen büyütülmüş bakır folyonun

baş ve son kısımlarına iki ince şerit şeklinde bant yapıştırarak bandın altına gelen bakır alanları kimyasal olarak aşınmadan koruyoruz. Klan bu bakır alanları daha sonraki aşamalarda grafenden elektriksel kontak almak için kullanacağız. b) Önceden hazırladığımız 5 mM $FeCl_3$ sulu çözeltisine PVC ye yapıştırılmış bakır folyoyu aşınması için bakır folyolar çözeltiye bakacak şekilde seriyoruz. c) Yaklaşık 10 dk. bekledikten sonra bakır folyo tamamen aşınıyor. d) Çözeltiden çıkarıp temiz su ile yıkayıp kuruladıktan sonra yaklaşık 14 cm^2 alanlı, tek tabakalı, esnek PVC üzerine transfer edilip elektriksel kontakları alınmış grafeni elde ediyoruz.

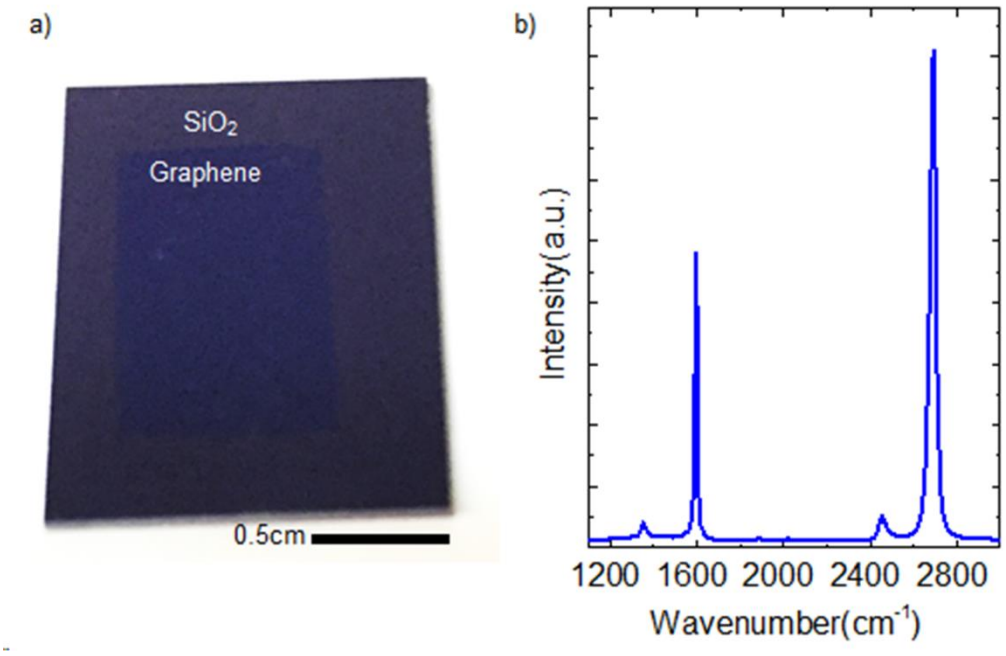
3.4 Tek tabakalı grafenin optik olarak karakterize edilmesi

Pürüzsüz bakır üzerinde sentezlenen grafenin kalitesini ve kaç tabaka olduğunu anlamak için önce grafenin geçirgenliğini daha sonra da Raman analizini yapıyoruz. Grafenin optik geçirgenliğini ölçmek için önce grafeni optik geçirgenliği yüksek düz bir yüzeye transfer ediyoruz, bu yüzey cam veya quartz olabilir. Biz yaptığımız ölçümlerde cam yüzey kullanıyoruz. Grafeni cam yüzeyine transfer etmek için grafen büyütme işleminden sonra bakır folyonun grafen olan tarafına bolca fotorezist (Shipley 1813) damlatıp 70^oC'deki fırında yaklaşık 24 saat fotorezistin kuruması için bekletiyoruz. Kuruyan fotoreziste yapışan bakır folyoyu 5 mM $FeCl_3$ çözeltisinde yaklaşık 10dk kimyasal olarak aşındırıyoruz. Bakır aşındıktan sonra grafen fotorezist üzerinde kalıyor ve bu grafeni cama aktarmak için önce fotorezisti grafen cama bakacak şekilde cam üzerinde istediğimiz alana yerleştiriyoruz. Daha sonra 70^oC deki ısıtıcıda yaklaşık 4dk Bekletiyoruz. Isınan fotorezist yer yer cama yapışıyor. Daha sonra camı 120^oC deki ısıtıcıya koyup yaklaşık 10 sn ısıtıp hemen indiriyoruz. Yüksek sıcaklıkta iyice eriyen fotorezist grafen ile birlikte artık cama tamamen yapışıyor. 120^oC'de çok fazla bekletilmemesi önemli çünkü fazla bekleyen fotorezist sertleşiyor ve yüzeyden ayrılmaz bir hal alıyor. Daha sonra fotorezisti aseton içerisinde yaklaşık 10dk boyunca tamamen çözerek cam üzerinde sadece grafen tabakasının kalmasını sağlıyoruz (Şekil 3-4a). Cam üzerine transfer edilen grafenin optik geçirgenliğini ölçmek için FTIR aletini kullanıyoruz. Bu alet içerisinde yaklaşık 450 nm den 1050 nm'ye kadar ışık çıkartabilen ve bunu ölçebilen bir optik kurulum bulunmaktadır. Önce referans ölçümü olarak boş camın bu optik aralıktaki geçirgenliğini ölçüyoruz ve daha sonra da üzerine grafen transfer edilmiş başka bir camın optik geçirgenliğini ölçüyoruz. Boş camı referans olarak ölçtükten sonra tekrar kendisinden olan optik geçirgenliği ölçünce bu da bize ölçüm sistemimizdeki hata payını çıkartıyor (Şekil 3-4b mavi çizgi). Daha sonra da üzerine grafen transfer edilmiş camdan optik geçirgenliği ölçüyoruz. Bizim sentezlediğimiz grafen 1050 nm dalga boyunda yaklaşık %97,6 geçirgenliğe ve 450 nm dalga boyunda da %96 geçirgenliğe sahip. Bu değerler bizim sentezlediğimiz grafenin yaklaşık olarak tek tabakalı bir grafen olduğunu göstermektedir.

Bir başka optik karakterizasyon tekniği olarak da Raman spektrum analizini yapıyoruz. Bu analizi yapmak için grafeni yine cam, quartz veya SiO_2 yüzeylerinden herhangi birine transfer edilebilir. Burada önemli olan transfer edilen yüzeyin düz ve Raman spektrum özellikleri bilinen bir malzemeden yapılmış olmasıdır. Bu nedenle PVC yüzeyinin çok pürüzlü olmasından dolayı grafenin Raman analizini yapmak için çok elverişli bir alttaş değildir. Biz sentezlediğimiz grafenlerin Raman analizlerini yapmak için grafeni SiO_2 üzerine transfer ediyoruz (Şekil 3-5a). FNOM Confocal Raman aletinde 532 nm dalga boyuna sahip lazer kaynağını kullanarak SiO_2 üzerindeki grafenin Raman analizini yapıyoruz. Ölçüm sonucunda grafenin üç tane karakteristik Raman sinyalini elde ediyoruz; bunlar 1350 cm^{-1}'de olan D sinyali, 1600 cm^{-1}'de olan G sinyali ve 2700 cm^{-1}'de olan da 2D sinyali. D sinyali grafen üzerindeki düzensizlik ve yabancı katkı ile ilgili bilgi verir ve bu yüzden D sinyalin G ve 2D sinyallerine göre çok düşük olması grafenin saf ve düzenli büyümüş olmasını gösterir. Bizim ölçüm sonuçlarına göre D sinyalinin şiddeti G ve 2D ye göre nispeten düşük ama grafen üzerinde transfer sırasında oluşan çok nadir çatlaklar ve fotorezist kalıntılarından dolayı hala belli oranda D sinyali görünmektedir. G sinyali sp^2 şeklinde hibritlenme yapan karbon atomlarının grafenin üzerinde grafenin yüzeyi doğrultusunda titreşmelerinden kaynaklanmaktadır. Çok tabakalı grafende bu sinyal geniş ve şiddeti fazladır ama tek tabakalı grafende daha dar ve şiddeti daha düşüktür. Grafenin bir diğer önemli Raman sinyali de 2D sinyalidir. Çok tabakalı grafende bu sinyal iki ye ayrılmış ve daha şiddetli olurken tek tabakalı grafende tek ve şiddeti daha düşüktür. Bizim sentezlediğimiz grafende bu sinyal tekdir. Bir diğer önemli Raman analizi de 2D sinyal şiddetinin G sinyal şiddetine oranıdır. Çok tabakalı grafende bu oran 1'den aşağıda beklenirken yüksek kalitede ve tek tabakalı grafenlerde bu oran yaklaşık 2 olarak beklenmekledir. Bizim ölçümlerimizde bu oran yaklaşık olarak 1,7 civarında bulunmuştur. Bütün bu optik analizler sonucunda bizim pürüzsüz bakır yüzeyinde geniş alanda sentezlediğimiz grafenlerin yüksek kalitede ve çoğunlukla tek tabakalı olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 3-4. Pürüzsüz bakır üzerinde sentezlenen grafenin cam yüzeyinde geçirgenlik ölçümü. a) Pürüzsüz bakır yüzeyinde sentezlenen tek tabakalı grafenin cam üzerine transfer edilmiş fotoğrafı gösteriliyor. Grafen görünür bölgede bantlar arası geçişlerin sağladığı optik iletkenlik sayesinde üzerine gelen görünür ışığın yaklaşık %2'sini emer. Bu nedenle resimde de görüldüğü gibi grafen olan alan olmayan alanlardan biraz daha koyu renkte görünür. b) Cam üzerindeki grafenin 450 nm ile 1050 nm dalga boyu arasındaki ışıkta geçirgenliği gösterilmektedir. Önce grafen olmayan boş bir camdan geçen ışık miktarını ölçüyoruz ve bu referans olarak kabul edildikten sonra grafen olan yüzeyden geçen ışık miktarını ölçüyoruz. Tek katmanlı grafen 1000 nm civarındaki dalga boylarında yaklaşık %97,6 geçirgenliğe sahip iken 450 nm civarındaki dalga boylarında yaklaşık %96 seviyelerinde bir geçirgenliğe sahip.

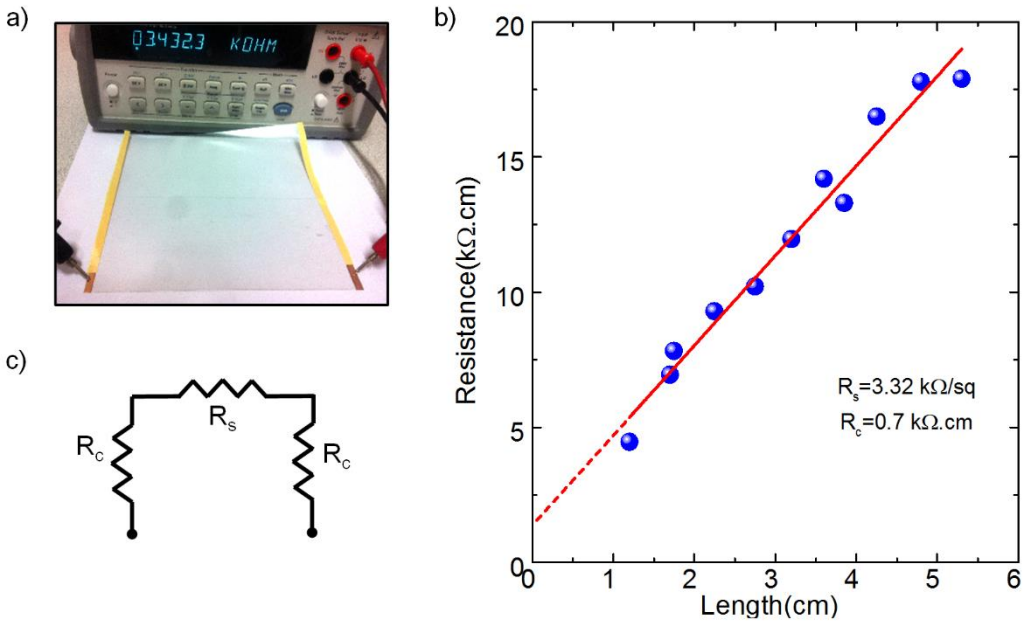


Şekil 3-5. Pürüzsüz bakır üzerinde sentezlenen grafenin SiO_2 yüzeyinde Raman sinyali ölçümü. a) Tek katmanlı grafen pürüzsüz bakır üzerinde sentezlendikten sonra SiO_2 üzerine transfer edilmiş resmi gösteriliyor. Grafen olan alan grafenin görünür ışıktaki yaklaşık %2'lik emiciliğinden dolayı olmayan alanlara göre biraz daha koyu renkte görünüyor. b) Tek katmanlı grafenin SiO_2 üzerinde çekilen Raman sinyali gösteriliyor. Bu grafikte grafenin karakteristik olarak sahip olduğu üç tane sinyal görünüyor; 1350 cm^{-1}'de olan D sinyali, 1600 cm^{-1}'de olan G sinyali ve 2700 cm^{-1}'de olan da 2D sinyali. Burada grafenin tek tabakalı ve kaliteli grafen olduğunu anlamak için iki tane parametre çok önemli. Birincisi D sinyalinin G ve 2D ye göre çok düşük olması gerekiyor çünkü D sinyali grafen katmanındaki hataları bozuklukları gösterir ve düşük olması bunların az olduğu anlamına gelir. Bizim sentezlediğimiz grafende D sinyalinin şiddeti G ve 2D ye göre çok düşük. İkincisi de 2D sinyalinin G sinyaline oranıdır, bu da grafenin tek tabakalı mı yoksa daha fazla tabakalı mı olduğu hakkında bilgi verir. Çok tabakalı grafende bu oran genelde 1'den daha az olur fakat tek tabakalı grafen 2'ye kadar varabilir. Bizim ölçümlerimizde sentezlediğimiz grafen için 2D sinyalinin G sinyaline oranı yaklaşık 1.7 civarındadır.

3.5 PVC üzerine transfer edilen grafenin elektriksel olarak karakterize edilmesi

Pürüzsüz bakırda sentezlenen ve esnek PVC film üzerine transfer edilen grafeni elektriksel olarak karakterize etmek için grafenin alan direncini ve bakır kontaklara olan kontak direncini ölçtük. Direnç ölçmek için bir multimetre kullandık (Şekil 3-6a). Bu ölçüm için önce farklı uzunlukta ama aynı genişlikte PVC üzerine transfer edilmiş grafenlerin direncini ölçtük. Ölçtüğümüz bu dirençleri grafenin genişlikleri ile çarparak karşılık gelen uzunluklarla birlikte bir grafikte gösterdik (Şekil 3-6b). Ölçülen bu direnç değerlerini doğrusal bir çizgi ile fit etiğimizde bu çizginin eğimi bize grafenin iki boyutlu alan direncini ve uzunluğun sıfır olduğu

yerdeki direnç değeri de grafenin bakıra olan kontak direncini verir. Analizler sonucunda grafenin alan direncini 3,32 kΩ/sq olarak hesapladık ve bakır kontaklara olan kontak direncini de 0,7 kΩ.cm olarak hesapladık. Bu ölçüm sonucu sentezlenen grafenin alan direncinin literatürdeki grafenlerin alan dirençleri ile yaklaşık benzer olduğunu gösterdiğinden dolayı sentezlediğimiz grafenin yaklaşık olarak tek tabakalı olduğuna karar verebiliriz.

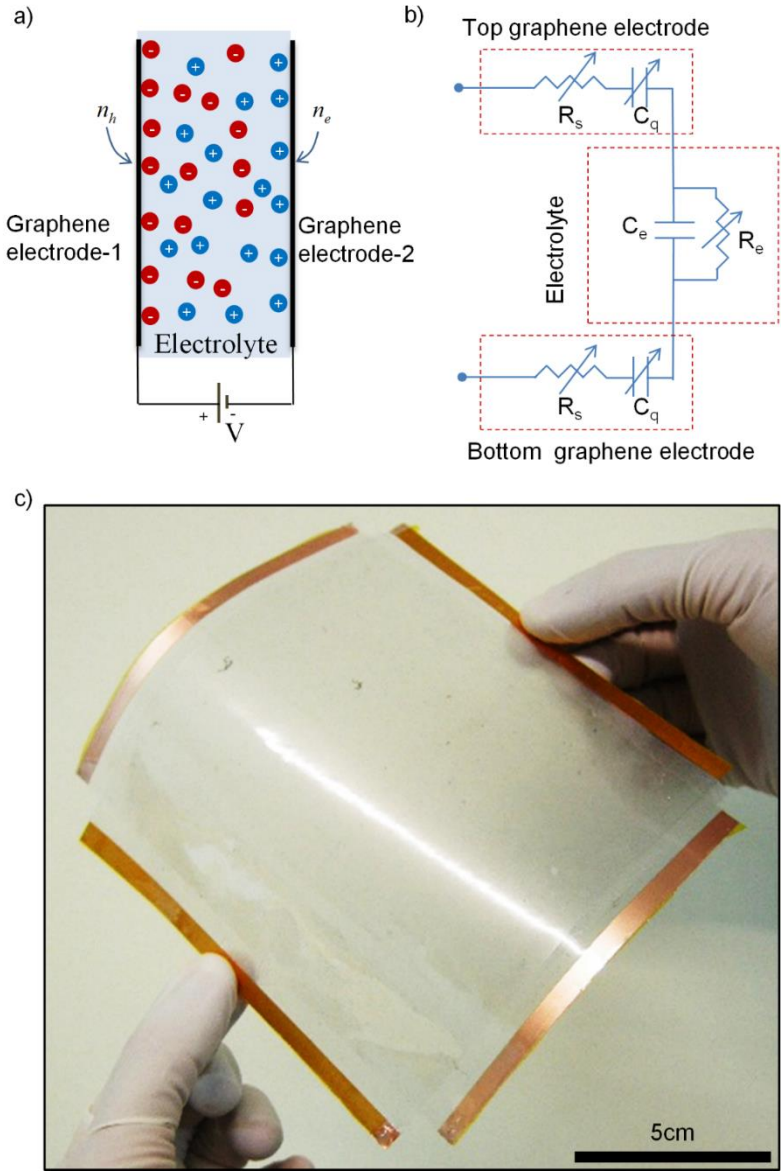


Şekil 3-6. Pürüzsüz bakır üzerinde sentezlenen ve PVC film üzerine transfer edilen tek katmanlı grafenin elektriksel direnç analizi. a) Genişlikleri aynı uzunlukları farklı olacak şekilde sentezlenen tek katmanlı grafenler PVC film üzerine transfer edildikten sonra resimde gösterildiği gibi bir ohmmetre kullanılarak dirençlerini ölçüyoruz. b) Ölçtüğümüz dirençler ile grafen genişliklerini çarparak elde ettiğimiz dirence karşılık grafen uzunlukları grafikte gösteriliyor. Ölçülen direnç grafen uzunluğu ile doğrusal bir şekilde değişiyor. Yapılan ölçümlere yapılan doğrusal ayarlama ile grafenin alan direncini yaklaşık 3.32 kΩ/sq ve kontak direncini de yaklaşık 0.7 kΩ.cm olarak hesapladık.

3.6 Grafen süperkapasitorlerin üretilmesi

Geniş alanlı grafen ve tek tabakalı grafen filmler esnek PVC üzerine transfer edilip elektriksel ve optik olarak karakterize edildikten sonra bu geniş alanlı grafenler kullanarak geniş alanlı grafen süperkapasitorleri üretiyoruz. Öncelikle 13 cm genişliğe ve 14,5 cm uzunluğa sahip iki grafen transfer edilmiş PVC filmi grafen yüzey yukarıya gelecek şekilde yere seriyoruz. Sonrasında üzerine 50 μm kalınlığında ince bir kâğıt seriyoruz ve iyonik sıvıyı (1-Butyl-3methlimidazolium hexafluorophosphate) onun üzerine yayılacak şekilde damlatıyoruz. İyonik sıvı yayıldıktan sonra ikinci bir grafen transfer edilmiş PVC filmi grafen yüzey iyonik sıvıya bakacak şekilde diğer grafen üzerine hava boşluğu kalmayacak şekilde

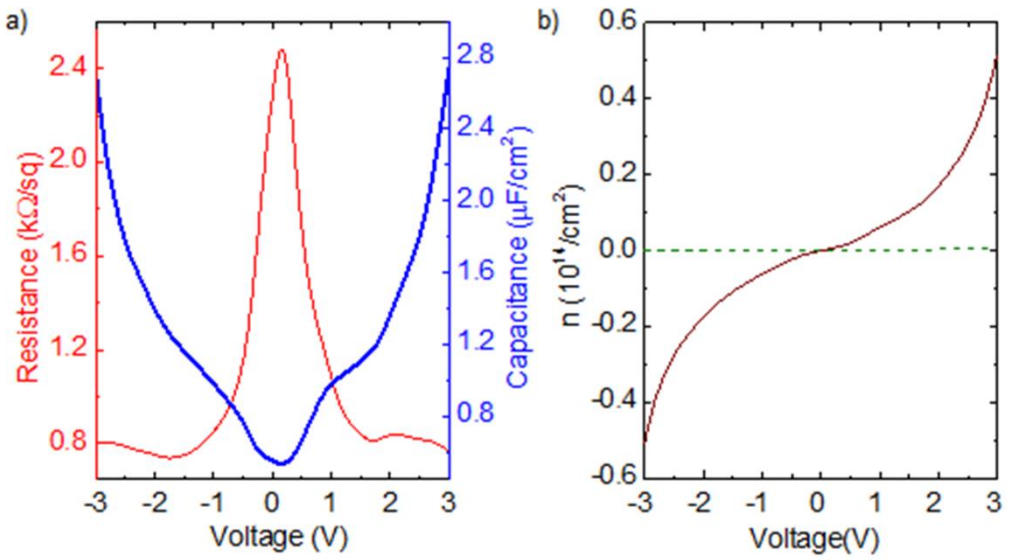
seriyoruz. Daha sonra elektriksel bağlantıları aldıktan sonra grafen süperkapasitor ölçüm için hazır hale geliyor. Grafen süperkapasitorlerin şematik gösterimi Şekil 3-7a'da gösterilmektedir. İki grafen elektrot arasına voltaj farkı uygulandığında pozitif voltaj uygulanan tarafta negatif ve negatif voltaj uygulanan tarafta ise pozitif yüklü sıvı iyonlar, grafen-iyonik sıvı arasındaki yüzeyde, yaklaşık 1 nm kalınlığında bir bölgede toplanırlar. Bu kadar ince bir alanda toplanan yüksek yük yoğunluğu grafen üzerinde çok yüksek elektrik alan gerilimi oluşturur ve böylece grafenin Fermi seviyesinin 1 eV ye kadar kaymasına olanak sağlar. Grafen süperkapasitorlerin devre elemanları cinsinden simgesel gösterimi Şekil 3-7b'de gösterilmektedir. Her bir grafen değişken bir direnç ve kapasitans ile gösteriliyor. İyonik sıvı da değişken olmayan bir kapasitans ve 3.5 V üstündeki voltajlarda azalan bir direnç ile gösteriliyor. Biz genel olarak 3.5 V'un altında çalıştığımızdan bu direnci görmezden gelebiliriz. Burada iyonik sıvıdan dolayı oluşan kapasitans grafen üzerindeki diğer kuantum kapasitanslara göre çok büyük olduğundan bunu da ihmal edebiliriz. Böylece grafen kapasitörden ölçtüğümüz kapasitans ve direnç değerleri bize bir tane grafenin alan direncinin iki katını ve kuantum kapasitansının yarısını verir. Üretilen geniş alanlı grafen süperkapasitorlerden birinin resmi Şekil 3-7c'de gösterilmektedir.



Şekil 3-7. Grafen süperkapasitorlerin üretilmesi ve çalışma prensibi. a) Geniş alanlı grafen süperkapasitor üretmek için iki tane geniş alanlı esnek PVC film üzerine transfer edilmiş grafen kullanıyoruz. Bu iki PVC üstündeki grafen birbirlerine bakacak şekilde ve aralarına da 50 μm kalınlığında bir kâğıt yerleştirerek birbiri üzerine seriyoruz. Daha sonra iyonik sıvıyı ince kâğıda emdirerek grafen süper kapasitörün üretimini tamamlıyoruz. Grafen süperkapasitorün şematik gösteriminde sıvı içerisindeki iyonların grafen elektrotlara voltaj uygulandıktan sonraki dağılımı gösteriliyor. b) Üretilen grafen süperkapasitorün devre elemanları ile simgesel gösterimi. c) Üretilen geniş alanlı grafen süperkapasitorlerden bir tanesi resimde gösteriliyor, alan genişliği yaklaşık 12 cm^2.

3.7 Grafen süperkapasitorlerin elektriksel olarak karakterize edilmesi

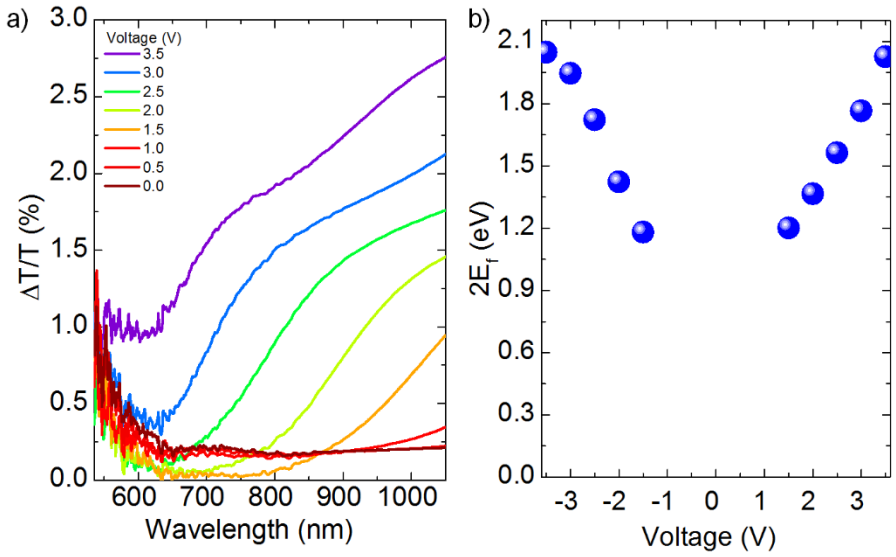
Üretilen grafen süperkapasitorlerin elektriksel karakteristiğini ölçmek için bir adet LCR metre kullanıyoruz. Bu alet ile grafen kapasitörlere az şiddetli 20 Hz frekansa sahip AC voltaj eklenmiş bir DC voltaj uygulayarak grafen kapasitörün direnç ve kapasitansını ölçüyoruz. Grafen kapasitöre 0 V uygulandığında grafen elektrotların Fermi seviyeleri Dirak noktası civarında olduğundan grafenin direnci maksimum ve kapasitansı minimum seviyededir. Uyguladığımız voltaj değerini negatif veya pozitif yönde arttırdığımızda grafen elektrotların Fermi seviyeleri Dirak noktasından uzaklaşır ve grafenlerin direnci azalırken kapasitansları da artar (Şekil 3-8a). Daha sonra bu ölçtüğümüz voltaja karşılık kapasitans değerini kullanarak grafen elektrotlar üzerinde toplanan yük yoğunluğunu hesapladık ve grafen üzerinde ki yük yoğunluğunu yaklaşık olarak $0.5x10^{14}$ cm^{-2} seviyelerine kadar çıkarabildiğimizi hesapladık (Şekil 3-8b).



Şekil 3-8. Grafen süperkapasitorlerin elektriksel karakterizasyonu. a) Grafen süperkapasitörler üretildikten sonra elektriksel olarak performansını ölçmek için bir LRC metre kullanıyoruz. Burada grafen süperkapasitörlerin direnç ve kapasitans değerlerinin uygulanan voltaja göre değişimini ölçüyoruz. Uygulanan bir DC voltaj üzerine monte edilmiş daha küçük bir şiddete sahip bir AC voltaj yardımı ile grafen süperkapasitörlerin voltaja göre direnç ve kapasitanslarını ölçüyoruz. Grafen kapasitörden ölçtüğümüz direnç ve kapasitans da bize kapasitör içerisindeki grafenin direncini ve kuantum kapasitansını veriyor. Voltaj 0 V civarında iken grafenin Fermi enerjisi Dirak noktası civarında olduğundan grafenin direnci maksimum ve kapasitansı da minimum. Fakat negatif veya pozitif voltaj yönünde ilerlediğimizde ise grafenin Fermi seviyesi Dirak noktasından uzaklaştığından direnci düşüyor ve kapasitansı artıyor. b) Kapasitans değeri kullanılarak hesaplanan grafen üzerinde biriken yük yoğunluğu voltaja göre gösteriliyor. Uyguladığımız voltaj ile grafen üzerinde $0.5x10^{14}$ cm^{-2} seviyelerine kadar yük toplayabiliyoruz.

3.8 Grafen süperkapasitörlerin optik olarak karakterize edilmesi

Grafen süperkapasitörleri optik olarak karakterize etmek için FTIR aletini kullanarak grafen süperkapasitörlerin 450 nm ile 1050 nm dalga boyu aralığındaki geçirgenliğinin voltaj ile değişimini ölçtük (Şekil 3-9a). Grafen görünür ve yakın kızılötesi bölgelerindeki optik iletkenliği grafenin elektronik bant yapısındaki iletkenlik bandı ile valans bandı arasındaki direk elektronik geçişlere bağlıdır. Grafen bu bantlar arası direk geçişlerden dolayı sahip olduğu optik iletkenlik sayesinde görünür ve yakın kızılötesi bölgesinde yaklaşık olarak %2-4 aralığında optik emiciliğe sahiptir. Bu optik emme ancak ilgili optik enerjinin yarısına karşılık gelen bant enerjisindeki elektronik yerlerin boş olması ile mümkün olabilir. Eğer dolu olursa Pauli Bloklaması prensibinden dolayı gelen foton elektronu veya deliği o enerji seviyesine uyaramayacağından grafen üzerinde hiç emilmeden direk geçebilir. İşte bu nedenle bizim düzenlediğimiz grafen süperkapasitör yapısı sayesinde grafenin geçirgenliği grafenin yük yoğunluğunu ve Fermi seviyesini elektrostatik olarak kontrol ederek ayarlayabiliyoruz. Şekil 3-9a'da geçirgenlik ölçümü gösterilmektedir. 0 V'a göre referans ölçüm alıyoruz ve bunun üzerine grafen kapasitöre uyguladığımız voltaj farkını arttırarak grafen üzerine gelen fotonlardan dolayı oluşan elektronik geçişleri bloklayarak gelen fotonun o kaydırdığımız Fermi seviyesinin iki katına karşılık gelen enerjilerden küçük enerjilerde emilmesini engelleyebiliyoruz. Bizim kapasitör yapısı ile grafenin Fermi seviyesini en fazla 1 eV'ye kadar kaydırabildiğimizden optik olarak engelleyebildiğimiz emilme seviyesinde yaklaşık 2 eV'ye karşılık gelen 620 nm dalga boyu civarıdır. Bu geçirgenlik ölçümünü kullanarak grafen elektrotların Fermi seviyelerini hangi seviyelerde kaydırabildiğimizi hesapladık. Hem pozitif ve hem de negatif voltajlarda grafen elektrotların Fermi seviyesini 1 eV'ye kadar kaydırabildiğimizi hesapladık.



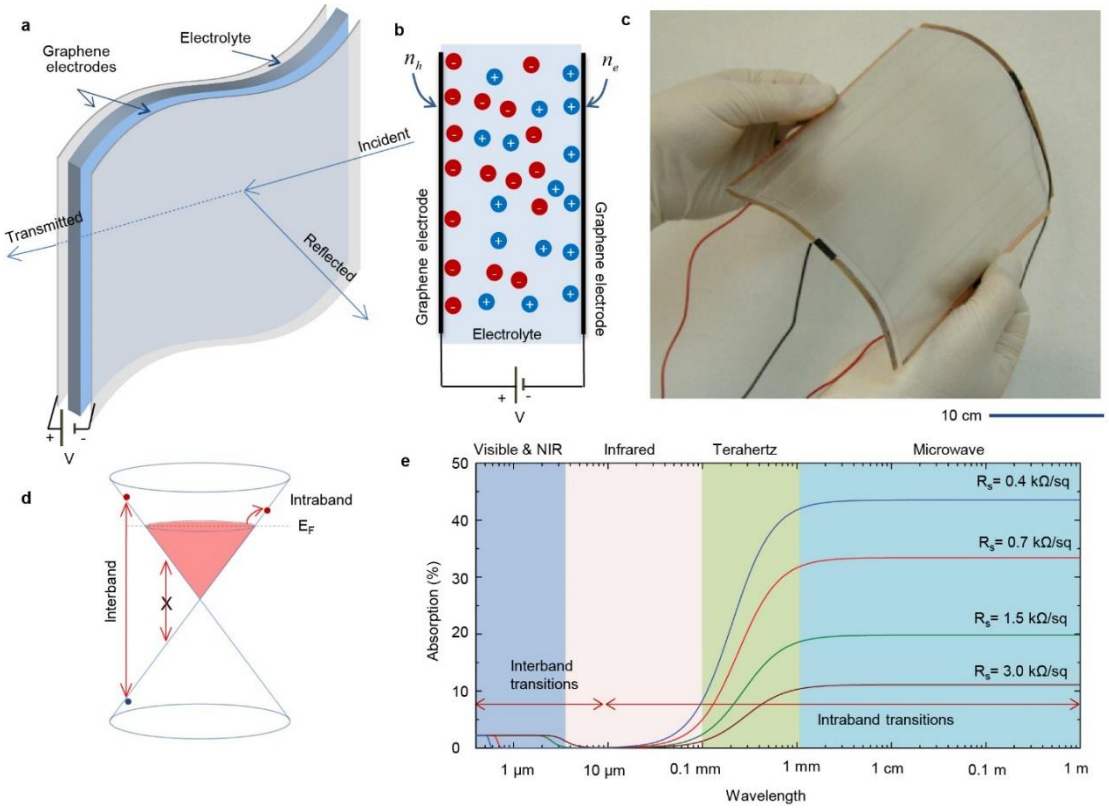
Şekil 3-9. Grafen süperkapasitörlerin optik karakterizasyonu. a) PVC üzerinde ürettiğimiz grafen süperkapasitörlerin üzerinden geçen ışığın uygulanan voltaj gerilimi ile değişimi FTIR kullanılarak ölçtük. Referans olarak 0 V alırsak, düşük voltajlarda geçirgenlikte bir değişim görünmez ama uygulanan voltaj 3.5 V seviyelerine doğru ulaştığında grafende 650 nm dalga boyuna kadar olan bantlar arası geçişleri engellediğimiz için grafen kapasitörün geçirgenliği artıyor. b) Ölçtüğümüz geçirgenlik değeri kullanılarak grafenin Fermi enerji seviyesinin voltaj ile nasıl değiştiğini de hesaplayabiliriz. Geçirgenlik değerinden hesapladığımıza göre grafenin Fermi seviyesini 1 eV seviyelerine kadar kaydırabiliyoruz.

4. BULGULAR

4.1 Mikrodalga bölgesinde çalışabilen geniş alanlı aktif grafen yüzeylerin tasarımı

Pürüzsüz bakır folyo üzerinde sentezlendikten sonra geniş alanlı PVC film üzerine aktarılan tek tabakalı grafenler kullanılarak üretilen geniş alanlı grafen süperkapasitörler elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde aktif yüzeyler olarak çalıştıklarını gösteriyoruz. Mikrodalgalar dalga boyu olarak santimetreden metreye kadar uzun dalga boylarına sahiptirler. Bu nedenle mikrodalga bölgesinde aktif olarak kullanılmak istenen yüzeylerin boyutları da dalga boyları ile karşılaştırılabilir veya hatta daha büyük olmalıdırlar. Bu yüzden biz de grafeni aktif malzeme olarak mikrodalga bölgesinde kullanabilmek için öncelikle geniş alanlı grafen üretip daha sonra bu grafenleri kullanarak gerek duyduğumuz boyutlarda grafen süperkapasitör ürettik. Geniş alanlı bir grafen kapasitörün mikrodalga bölgesinde aktif yüzey olarak kullanımını şematik olarak Şekil 4-1a'da gösteriyoruz. Geniş alanlı grafen kapasitör iki tane geniş alanlı tek katmanlı grafen ve aralarına konulmuş bir iyonik sıvıdan oluşur. Bu sıvıyı iki grafen arasında tutması için 50 μm kalınlığında bir kâğıt kullanıyoruz. Grafen kapasitörün yandan görünümü Şekil 4-1b'de gösterilmiştir. İki grafen

elektrot arasına uygulanan voltaj farkından dolayı aralarındaki iyonik sıvı polarize olur ve negatif iyonlar pozitif voltaj tarafına ve pozitif iyonlar da negatif voltaj tarafına toplanırlar. Grafen ile iyonik sıvı arasında toplanan iyonlar yaklaşık 1nm'lik bir kalınlıkta bulunurlar ve bu kadar ince bir alandaki bu kadar fazla yük yoğunluğu grafen üzerinde $3x10^9$ m/V seviyelerinde bir elektrik alan oluşmasına sebep olur. Grafen üzerinde oluşturulan bu yüksek elektrik alandan dolayı grafenin Fermi seviyesi 1eV'nin üzerine çıkar. Üretilen geniş alanlı grafen süperkapasitörlerden birisinin resmi Şekil 4-1c'de gösterilmektedir. Grafen Dirak noktası civarında doğrusal bir elektronik bant yapısına sahiptir. Hiç yüklenmemiş, saf grafenin Fermi seviyesi tam olarak Dirak noktası üzerinde bulunur. Bu seviye oda sıcaklığı etkisi ve bazı istenmeyen yüklenmelerden veya alttaş etkisinden dolayı çoğu zaman ±200 meV seviyelerinde olur. Grafen temel olarak iki tür optik iletkenliğe sahiptir, birincisi bantlar arası geçişten kaynaklanan iletkenlik, ikincisi de bant içi geçişlerden kaynaklanan iletkenlik. İletkenlik ve valans bandı arasındaki elektronik geçişlerden kaynaklı bantlar arası iletkenlik grafen ile karşılaşan bir fotonun valans bandındaki bir elektronu iletkenlik bandına atması ile gerçekleşir veya delik için tam tersi. Fakat gelen fotonun bunu yapabilmesi için enerjisine karşılık gelen enerji seviyelerinin boş olması gerekmektedir. Boş değil ise gelen foton grafen ile hiçbir etkileşime girmeden grafenden geçer. Bu prensip Pauli Bloklaması olarak bilinmektedir (Şekil 4-1d). Eğer gelen fotonun enerjisi grafenin Fermi seviyesinden çok küçük olursa bu durumda gelen foton bantlar arası geçiş sayesinde değil de bant içi geçişler sayesinde grafen ile etkileşime geçebilir. Bu durumda gelen foton Fermi seviyesindeki bir elektronu uyararak enerjisi yettiği yere kadar uyarabilir (Şekil 4-1d). Bizde tek tabakalı grafenin sahip olduğu optik frekansa bağlı bu iki temel optik iletkenliği kullanarak tek tabakalı grafen için 100 nm dalga boyundan 1 m dalga boyuna kadar emme değerlerini farklı alan dirençlerine göre hesapladık. Hesabı matris transfer metodu kullanarak yaptık ve grafeni havada durduğunu ve herhangi bir alttaş üzerinde durmadığını farz ettik. Hesabın sonucu Şekil 4-1e'de sunulmuştur. Tek tabakalı grafen görünür ve yakın kızılötesi bölgesinde bantlar arası geçişlerden dolayı gelen ışığın sadece %2,3'ünü emebilmektedir. Grafen üzerindeki alan direnci kontrol edilerek bu %2,3'lük emmenin hangi dalga boylarında olup olmayacağı yaklaşık UV bölgesine kadar deneysel alan direnç değerleri kullanılarak kontrol edilebileceğini hesapladık. Uzak kızılötesi, terahertz ve mikrodalga bölgesinde tek tabakalı grafen bant içi elektronik geçişlerden dolayı beklenilenin çok üzerinde bir emme kabiliyetine sahiptir. Hatta bu emme mikrodalga bölgesinde %50 oranına bile ulaşabildiğini ve grafenin alan direnci kontrol edilerek bu emme oranı büyük oranda kontrol edilebilirliğini hesapladık (Şekil 4-1e).



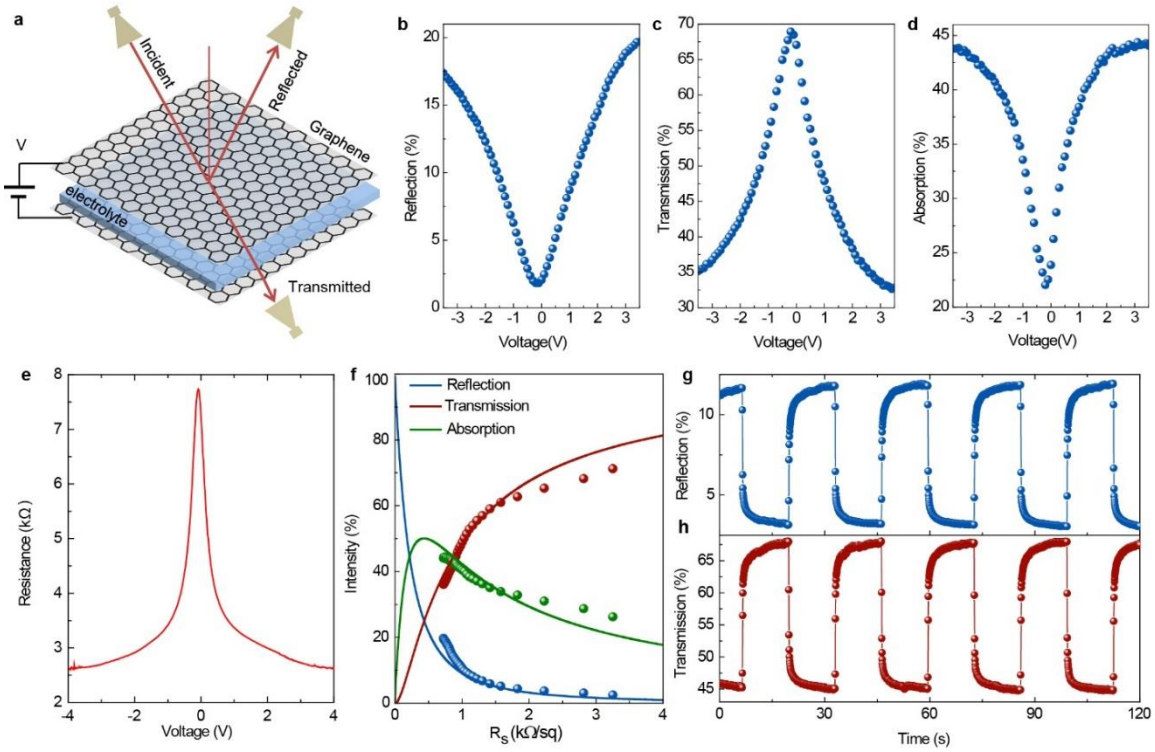
Şekil 4-1. Mikrodalga bölgesinde çalışabilen geniş alanlı aktif grafen yüzeylerin tasarımı. a) İki grafen elektrot kullanılarak üretilen grafen süperkapasitörlerin mikrodalga bölgesindeki geçirgenlik, yansıtma ve emme özelliklerinin nasıl ölçüleceği şematik olarak gösterilmiştir. Bir adet mikrodalga kaynağından çıkan dalgaların aktif grafen yüzeyinden yansıyan ve geçen kısımları ölçüldükten sonra bunların gelen sinyalden çıkarılması ile grafen kapasitörün emmesini ölçüyoruz. Daha sonra grafen elektrotlar üzerindeki yük yoğunluğunu aktif olarak kontrol ederek mikrodalgaların kapasitör yüzeyinden geçirgenliğini, yansımasını ve dolayısı ile emilmesini kontrol etmeyi amaçlıyoruz. b) Üretilen grafen süperkapasitörlerin şematik olarak gösterimi, iki grafen elektrodun arasına koyduğumuz iyonik sıvı grafen elektrotlara uygulanan voltaj farkı ile polarize edilerek grafenin yük yoğunluğunu değiştiriyoruz. c) Üretilen grafen süperkapasitörlerden bir tanesinin resmi. d) Grafenin elektronik bant yapısı Fermi seviyesinin iletkenlik bandına doğru kaydırılmış hali ile gösteriliyor. Fermi enerjisinin iki katından daha fazla olan fotonlar grafen üzerinden belli bir miktarı emilerek geçerler. Fakat Fermi enerjisinin iki katından daha az olan enerjiye sahip fotonlar ise grafen üzerinden emilmeden geçerler. Daha da ötesi olarak eğer gelen foton grafenin Fermi enerji seviyesinden çok küçük bir enerjiye sahipse bu sefer bant içi geçişlerden dolayı gelen foton grafenin Fermi seviyesi ile artan bir şekilde grafen üzerinde emilir. e) Grafenin bantlar arası ve bant içi geçişlerden dolayı sahip olduğu optik iletkenliği kullanarak grafenin 100 nm den 1 m'ye kadar geniş bir spektrumda optik emme özelliğini hesapladık.

4.2 Geniş alanlı grafen süperkapasitörlerin mikrodalga performanslarının ölçülmesi

Geniş alanlı grafen kapasitörlerin mikrodalga performanslarını ölçmek için Keysight-E5063A network analizör ile birlikte 7-12 GHz arasında çalışabilen iki tane horn anten

kullanıyoruz. Network analizöre bağlanan horn antenler birbirinden yaklaşık 50 cm uzaklığa yerleştiriyoruz. Ürettiğimiz geniş alanlı grafen süperkapasitörü bu iki antenin ortasına açılı bir şekilde yerleştirerek grafen süperkapasitör üzerine düşen mikrodalganın geçme, yansıma ve emilme miktarını ölçüyoruz. Ölçüm sisteminin ve grafen süperkapasitörün şematik gösterimi Şekil 4-2a'da gösterilmiştir. Burada grafen süperkapasitörü açılı olarak ölçmemizin sebebi sonuçlara interferans etkisini en aza indirmek. Grafen süperkapasitöre uyguladığımız voltaj farkı ile grafenler üzerindeki yük yoğunluğunu değiştirerek kapasitör üzerine gelen mikrodalganın yansımasını, geçmesini ve emilmesini belli bir oranda kontrol edebiliyoruz. Voltaja göre 10 GHz frekansta ölçülen yansıma, geçirgenlik ve emilme sıra ile Şekil 4-2b, c, d'de gösterilmiştir. Grafen elektrotlara 0 V voltaj farkı uygulandığında grafen üzerindeki istenmeyen yüklenmelerden dolayı gelen mikrodalganın %2'si yansımaktadır. Uygulanan voltaj farkı negatif veya pozitif yönde arttırıldığında grafen elektrotlar üzerinde toplanan yük yoğunluğu arttırılarak grafenin alan direnci düşürülür ve grafenler daha metalik davranarak gelen mikrodalganın %20'sini yansıtabilirler. Uygulanan voltaj değeri ile bu yansıma aktif olarak arttırılıp azaltılabilir. Benzer şekilde grafen süperkapasitörden geçen mikrodalga miktarı uygulanan voltaj farkı 0 V'da %70 civarındadır ve uygulanan voltaj farkı negatif veya pozitif yönde arttırıldığında grafen kapasitörden geçen mikrodalga miktarı %33 seviyelerine kadar düşürülebilir. Yine burada da voltaj farkı uygulanan grafen daha metalik davrandığından grafen kapasitörden geçen mikrodalga miktarı azalır. Bu iki yansıma ve geçirgenlik ölçümünden ölçülen değerler gelen mikrodalga sinyalinden çıkarıldığında bu sefer de grafen kapasitör tarafında emilen toplam mikrodalga miktarını ölçebiliyoruz. Grafen kapasitöre 0 V uygulandığında gelen mikrodalganın yaklaşık %22'lik kısmı grafen üzerindeki istenmeyen yüklerden dolayı emiliyor. Uygulanan voltaj farkı arttırıldığında ise grafen kapasitör tarafından emilen mikrodalga miktarı %45 seviyelerine kadar çıkarılabiliyor. Uygulanan voltaj farkı ile yük yoğunluğu arttırılan grafenlerin alan dirençleri düşer ve Fermi seviyeleri Dirak noktasından uzaklaşır. Yüksek Fermi seviyeleri bant içi geçiş imkanını arttırdığından dolayı grafenleri yükledikçe grafenin mikrodalgayı emme miktarı artar. Uygulanan voltaj farkı grafen kapasitörün toplam direncini etkili bir şekilde kontrol ederek mikrodalganın kapasitör yüzeyinde karşılaştığı toplam impedansı değiştirmektedir. 0 V voltaj farkında grafen kapasitör toplam 7.7 kΩ dirence sahiptir, uygulanan voltaj farkı arttırıldığında bu direnç 2.5 kΩ seviyelerine kadar düşürülebilmektedir (Şekil 4-2e). Grafen süperkapasitörün mikrodalga frekansındaki bu voltaj ile kontrol edilebilen davranışını modellemek amacı ile tek tabakalı grafenin frekansa bağlı bant içi geçiş iletkenliğini transfer matris metodu ile birlikte kullanarak bir model geliştirdik. Bu modeli kullanarak grafen süperkapasitör içerisindeki bir grafen tabakasının alan direncine karşılık grafen kapasitörün tamamının 10 GHz frekanstaki mikrodalgada yansımasını, geçirgenliğini ve emmesini

hesapladık. Çıkan sonuçlara (Şekil 4-2f) göre grafen kapasitörden yansıma, direnç arttıkça azalıyor ve geçirgenlikte direnç arttıkça artıyor. Fakat emilme grafen kapasitörün toplam impedansı boş uzayın toplam impedansı olan 377 Ω'un yarısına geldiğinde maksimum değeri olan %50'ye ulaşıyor. Onun üstündeki ve altındaki bütün alan direnç değerlerinde grafen kapasitörün emmesi azalıyor. Şekil 4-2f'de grafen kapasitör içindeki tek grafen tabakasının direncine göre çizildiğinden 188.5 Ω'luk eşleşme görülmüyor. Daha sonra deneysel olarak ölçülen yansıma, geçirme ve emilme oranları ile hesaplanan oranları üst üste çizdik (Şekil 4-2f) ve deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının birbiri ile uyumlu sonuçlar verdiğini gördük. Grafen kapasitörlerin mikrodalga bölgesindeki kontrol hızlarını ölçmek amacı ile grafen süperkapasitor yüzeyinden yansıyan ve geçen mikrodalga şiddetini zamana göre açık (0 V) ve kapalı (3 V) durumlar için tekrar ederek ölçtük. Yansıma ve geçirme değerlerinin değişme zamanları yaklaşık olarak 300 ms olarak hesapladık. Bu süre de grafen süperkapasitörün RC zaman sabiti ile yaklaşık olarak aynı çıktı. Dolayısı ile bizim ürettiğimiz grafen süperkapasitörlerin mikrodalgayı kontrol etme hızları süperkapasitörün bir iç özelliği olan RC zaman sabiti kadardır.



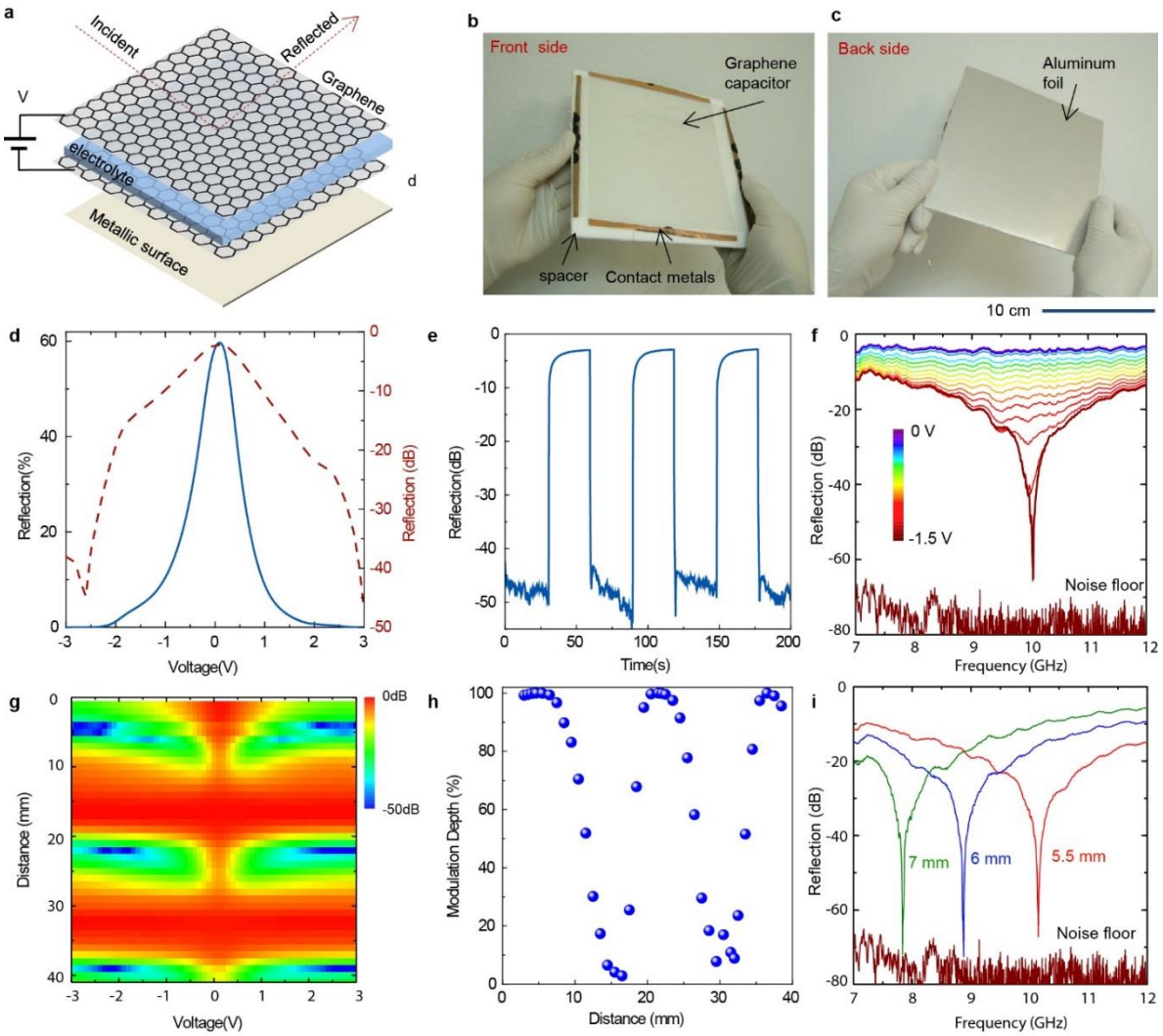
Şekil 4-2. Geniş alanlı grafen süperkapasitörlerin mikrodalga performanslarının ölçülmesi. a) Geniş alanlı PVC üzerine transfer edilmiş grafen kullanılarak üretilen grafen süperkapasitörlerin şematik gösterimi ile birlikte mikrodalga performansının ölçülmesi için kullanılan antenlerin şematik gösterimi sunulmuştur. Grafen süperkapasitörlerin yansıması

(b), geçirgenliği (c) ve emmesi (d) 10G Hz frekansta mikrodalga kaynağı kullanılarak ölçülmüştür. Grafen elektrotlar arasına uygulanan voltaj farkı 0 V olduğunda grafen kapasitörden yansıyan mikrodalga şiddeti minimum ve geçirgenliği de maksimum durumdadır. Pozitif veya negatif voltaj uygulayarak grafen elektrotlar üzerindeki yük yoğunluğunu arttırdığımızda kapasitör yüzeyinden yansıyan mikrodalga %2 seviyelerinden %20 seviyelerine kadar artmaktadır. Bunun yanında grafen kapasitörden geçen mikrodalga da %70 seviyelerinden %33 seviyelerine kadar düşmüştür. Çünkü uyguladığımız voltaj farkı grafen yüzeylerin iletkenliğini arttırdığından grafen yüzeyleri daha çok metalik olmaya başlar ve uygulanan voltaj ile birlikte yansıma artarken geçirgenlikte azalır. Yansıma ve geçirgenliği gelen toplam dalganın şiddetinden çıkardığımızda da grafen kapasitör üzerinde mikrodalganın emilme miktarını hesaplayabiliriz. Grafen üzerindeki yük yoğunluğunu arttırdığımızda mikrodalganın grafen üzerinde emilmesi de bant içi geçişlerden dolayı artmaktadır. e) Grafen süperkapasitörün toplam direncinin uygulanan voltaj farkı ile değişimi gösterilmektedir. f) Grafen süperkapasitor yapısı içerisindeki tek katmanlı grafenin 10 GHz frekansta geçirgenliği, yansıması ve emilmesini farklı alan direnci değerlerinde matriks transfer metodu ile hesapladık. Çizgiler simülasyon sonucunu, yuvarlak noktalar ise deneysel ölçüm sonuçlarını göstermektedir. g, h) Mikrodalga frekanslarında aktif olarak çalışabilen grafen süperkapasitörün 10 GHz frekanstaki mikrodalgada yansıma ve geçirgenlik değişiminin hızını ölçtük. Kapasitörün kontrol hızı RC zaman sabiti ile yaklaşık olarak aynı çıkmıştır ve 300 ms civarındadır.

4.3 Geniş alanlı yüksek performanslı radar emici yüzeyler

Radar uygulamalarında malzemelerin veya ortamların radar yansıma ve emme özellikleri incelenirken yansıyan radar sinyali genelde dB birimi ile ifade edilir. Bu aslında yansıyan sinyalin referans sinyal ile oranlanıp logaritmasının alınmasıdır. Bu nedenle yüzde olarak ifade edilen yüksek değişimlerin dB biriminde pek bir anlamı olmayabilir. Bizim ürettiğimiz geniş alanlı grafen kapasitörün yansıma, geçirgenlik ve emme oranları dB olarak hesaplandığında yansımadaki değişim 20 dB, geçirgenlikteki değişim 7 dB ve emmedeki değişim ise 6 dB seviyelerindedir. Pratik uygulamalarda gerekli olan yüksek performanslı radar emici yüzeyleri düşündüğümüzde bu kontrol oranları gereksinimlerin çok gerisinde kalmaktadır. Zaten sadece grafen kapasitör kullanarak gelen mikrodalganın en fazla %50'sini emebileceğinden tamamını da emebilmesi teorik olarak mümkün değildir. Bu nedenle bizde grafen kapasitör üzerine gelen mikrodalgayı tamamen emebilmek için rezonans bir alet yapısı geliştirdik. Temel olarak yine aynı geniş alanlı grafen kapasitörü kullanıyoruz fakat bu sefer bir metalik yüzey ile grafen kapasitörü entegre ediyoruz. Bu alet yapısı önceden bazı dirençli malzeme ile geliştirilip mikrodalga emmek için kullanılmış ve Salisbury ekranı olarak adlandırılmıştır. Bizim bu Salisbury ekranına getirdiğimiz yenilik ise bunun voltaj ile açılıp kapatılarak kontrol edilebilir olmasıdır. Geliştirdiğimiz alet yapısı şematik olarak Şekil 4-3a'da gösterilmiştir. Bu alet yapısında aletin arkasına metalden dolayı mikrodalga geçmediği için bu

sefer sadece yansıyan mikrodalga şiddetini ölçüyoruz. Grafen kapasitör kullanılarak üretilen geniş alanlı Salisbury ekranının önden ve arkadan çekilmiş resimleri Şekil 4-3b ve Şekil 4-3c'de sırasıyla gösterilmiştir. Metal yüzeyi grafen kapasitörden koyduğumuz uzaklık Salisbury ekranından yansıyan mikrodalganın rezonans frekansına karşılık gelen dalga boyunun dörtte biri uzaklıktadır. Bu uzaklığı değiştirerek istenilen frekansta rezonans elde edilebilir. Grafen Salisbury ekranından rezonans frekansında ölçülen yansıma şiddetinin voltaja göre değişimi Şekil 4-3d'de gösterilmektedir. 0 V voltaj farkında mikrodalga yansıması -2dB'dir ve en yüksek seviyededir. Uygulanan voltaj farkı arttırıldığında grafen kapasitörden yansıyan mikrodalga -50 dB seviyelerine kadar düşürülebilir. Yüzde olarak değerlendirdiğimiz zaman değişim %60 yansımadan yaklaşık %0 yansımaya kadar görülmektedir. Grafen kapasitör kullanılarak üretilen Salisbury ekranının yüzeyden olan rezonans yansımayı açma ve kapama hızını ölçmek için radar emici yüzeyden yansıyan mikrodalgayı açık (0 V) ve kapalı (3 V) durumlarda zamana göre ölçtük (Şekil 4-3e). Yüzeyden yansıyan mikrodalganın açılma ve kapanma hızı grafen kapasitörün RC zaman sabiti ile yaklaşık aynı çıktı ve yaklaşık 300 ms olarak hesapladık. Üretilen geniş alan Salisbury ekranındaki mikrodalga yansımasını 7-12 GHz frekans aralığında ölçtük ve rezonans frekansı etrafında yaklaşık -60dB seviyelerinde bir emilme ölçtük. Uyguladığımız voltaj değerini aktif olarak kontrol ederek bu emilmeyi istenilen seviyede tutmak mümkündür (Şekil 4-3f). Grafen kapasitör ile metalik yüzey arasındaki uzaklığı değiştirerek rezonans frekansında yüzeyden yansıyan mikrodalga şiddetini voltaj ve bu uzaklığa göre renkli grafik olarak Şekil 4-3g'de çizdik. Kırmızı alanlar yansımanın çok olduğu bölgeleri ve mavi alanlar da emilmenin çok olduğu uzaklık ve voltaj kombinasyonlarını göstermektedir. Rezonans frekansına karşılık gelen uzaklık rezonans frekansının dalga boyunun yarısı ile periyodik olarak tekrar ediyor. Ayrıca bu uzaklığa göre voltaj ile kontrol edilebilirliğini ölçmek için her uzaklıkta voltajı değiştirerek kontrol derinliğine karşılık aradaki mesafeyi çizdirdik (Şekil 4-3h). Rezonans frekansına karşılık gelen uzaklıklarda kontrol derinliği %100'e ulaşıyor ve rezonansa gelmeyen uzaklıklarda ise kontrol derinliği azalarak %0'a kadar düşüyor. Grafen kapasitör ile metal mesafesini değiştirerek farklı frekanslarda rezonans elde edilebildiğini göstermek için farklı mesafelerde üretilen Salisbury ekranları için rezonans eğrileri frekansa göre gösteriliyor (Şekil 4-3i).

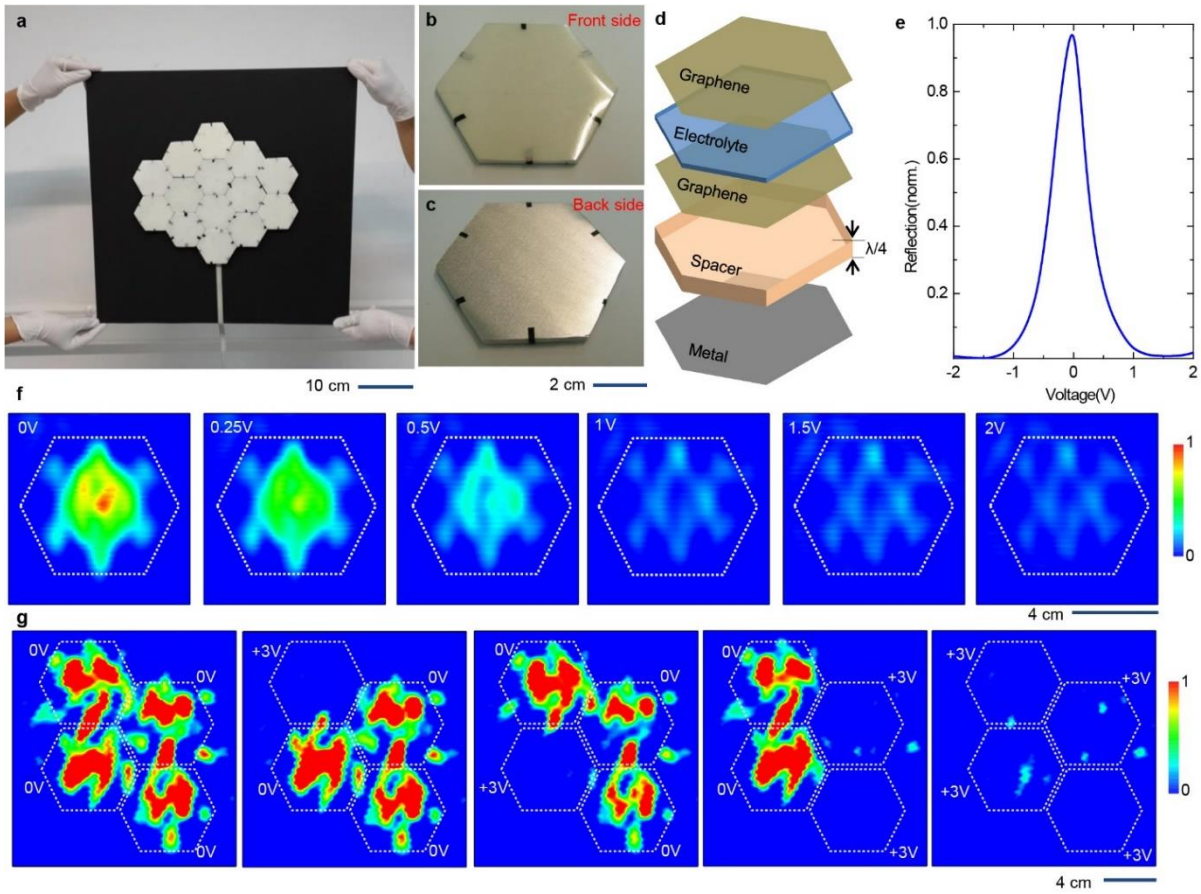


Şekil 4-3. Geniş alanlı yüksek performanslı radar emici yüzeyler. a) Grafen süperkapasitör kullanılarak dizayn edilen geniş alanlı ve yüksek performanslı radar emici yüzeylerin şematik gösterimi sunulmuştur. PVC üzerine transfer edilen grafen kullanılarak üretilen geniş alanlı grafen kapasitörün alt kısmına metalden oluşan düz bir yüzey yerleştirerek mikrodalga rezonansı elde ediyoruz. Rezonans frekansı metal yüzey ile grafen kapasitör arasındaki uzaklığın dört katı uzunluktaki dalga boyuna karşılık geliyor. b, c) Üretilen geniş alanlı radar emici yüzeylerin ön ve arka taraflarından çekilmiş fotoğraflar gösteriliyor. d) Yüksek performanslı radar emen yüzeyden rezonans frekansında ölçülen mikrodalga yansıma şiddeti uygulanan voltaj farkına göre çizildi. Kapasitöre 0 V voltaj uygulandığında gelen mikrodalganın %60 lık kısmı geri yansıyor. Fakat uygulanan voltaj ±3 V a doğru arttırıldığında yansıma şiddeti -50 dB seviyelerine kadar düşüyor. e) Rezonans frekansında yüzeyden yansıyan mikrodalga şiddetinin ne kadar hızlı değiştiğini ölçmek için yansıma şiddetini zamana göre açık ve kapalı durumlar için çizdirdik. Kontrol hız yine grafen süperkapasitörün RC zaman sabiti ile limitli durumda ve yaklaşık 300 ms civarı. f) Radar emici yüzeyden alınan mikrodalga yansıma şiddeti frekansa göre değişen voltaj farklarında çizildi. Yüksek voltajda rezonans frekansı -60 dB seviyelerine kadar emilmektedir. g) Radar emici yüzeyden ölçülen yansıma şiddeti grafen kapasitör ile metal yüzey arasındaki uzaklık ile uygulanan voltaja göre değişimi çizilmiştir. Mavi alanlar rezonans bölgelerini kırmızı alanlar da yüksek yansıma bölgelerini göstermektedir. h) Radar emici yüzeyler de grafen

kapasitör ile metalik yüzeyin arasındaki uzaklığı değiştirdik ve her uzaklıktaki kontrol derinliğini ölçtük. Rezonans frekansının dalga boyunun dörtte birine ve onun dalga boyunun yarısı eklenmiş katlarına denk gelen mesafelerde kontrol derinliği %100 seviyesine ulaşıyor. i) Radar emici yüzeyden gelen yansıma şiddeti frekansa göre farklı uzaklıklar için çizildi. Farklı uzaklıklar farklı frekanslarda rezonans sağlıyor.

4.4 Çok geniş alanlı yüzeyleri kaplayabilmek için grafen tabanlı radar emici hücrelerin tasarımı

Mikrodalgaların dalga boyu metre boyutlarına ulaşabildiğinden radar teknolojisinde kullanılan aletlerinde büyüklüğü dalga boyunun çok üzerinde oluyor. Her yüzeye göre tek bir emici yüzey üretmek yerine her yüzeyi kaplayabileceğimiz küçük hücreler dizayn etmeyi düşündük. Bu nedenle altıgen şekle sahip radar emici hücreler geliştirdik ve bu hücreleri kullanarak 0.12 m^2'lik bir alanı kapladık (Şekil 4-4a). Ürettiğimiz altıgen şekilli Salisbury hücrelerin ön ve arkasından çekilmiş resmi Şekil 4-4b ve c'de gösterilmektedir. Arka yüzeyde metal tabaka olarak alüminyum folyo ve grafen kapasitör-metal yüzey arasındaki mesafeyi ayarlamak için de bir karton kullandık. Altıgen şekilli radar emici hücrelerin şematik gösterimi Şekil 4-4d'de gösterilmektedir. Bu altıgen hücrelerin birinden alınan voltaja göre yansıma ölçümü Şekil 4-4e'de gösteriliyor. Rezonans frekansında altıgen hücreden yansıyan mikrodalga %0 seviyelerine kadar indirilebiliyor. Daha sonra bir x-y mikrodalga yansıma ölçen tarayıcı dizayn ederek tek bir altıgen hücreden rezonans frekansında yansıyan mikrodalga şiddetini farlı voltaj değerleri için görüntüledik. Uygulanan voltaj arttırıldığında hücre yüzeyinden yansıyan mikrodalga şiddeti 0'a kadar düşürülebiliyor (Şekil 4-4f). Daha sonra aynı taramayı bu sefer farklı dört tane hücreyi yan yana koyarak yaptık ve herhangi bir hücreden gelen yansımayı kapatarak toplam yüzeyin mikrodalga yansıma şeklini değiştirdik veya tamamen kapattık (Şekil 4-4g). Tek tek kontrol edilebilen bu altıgen hücreler farklı yüzeylerdeki mikrodalga tarama şeklini değiştirerek bir cismin mikrodalga tarayıcıdaki görüntüsünü başka bir cismin görüntüsüne benzetebilmektedir.

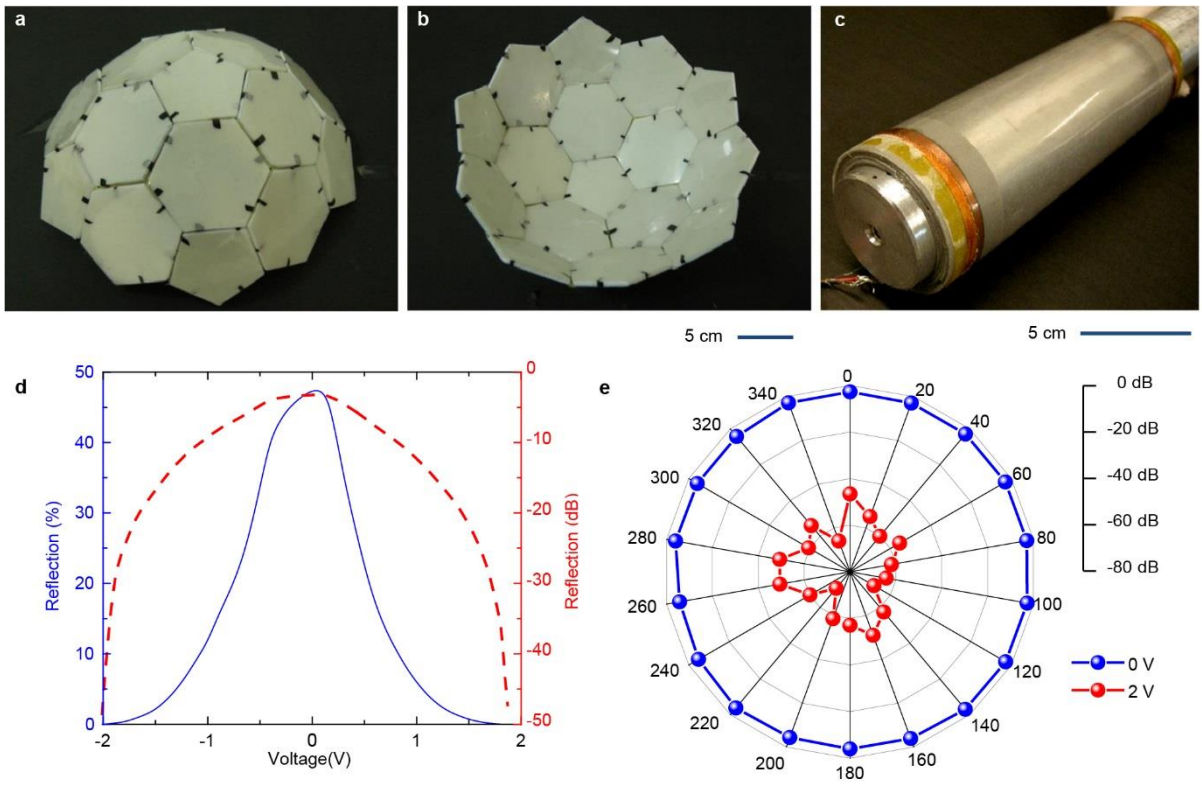


Şekil 4-4. Çok geniş alanlı yüzeyleri de kaplayabilmek için grafen tabanlı radar emici hücrelerin tasarımı. a) Grafen tabanlı radar emici altıgen hücreler kullanılarak kaplanılan yaklaşık 0.12 m^2'lik bir alanın resmi gösterilmektedir. b, c) Üretilen küçük altıgen şekilli radar emici hücrelerden birinin ön ve arka yüzeyinin fotoğrafı gösterilmektedir. d) Altıgen şekilli radar emici hücrelerin iç yapısını gösteren şematik bir çizim. Üretilen altıgenlerde grafen kapasitör ile metal arasına mesafe oluşturması için karton kâğıdı kullanılmıştır. e) Bir tane altıgen radar emici hücreden rezonans frekansında ölçülen radar yansıma şiddeti uygulanan voltaja göre çizildi. 0 V'da yansıma maksimum iken uygulanan voltaj artırıldıkça yansıma %0 seviyelerine kadar düştü. f) Bir tane altıgen radar emici hücrenin rezonans frekansındaki yansıması x-y ekseninde bir tane iki boyutlu tarayıcı ile taradık. 0V'ta altıgenden yansıyan mikrodalga maksimum seviyede, uygulanan voltaj arttırıldıkça altıgenden yansıyan mikrodalga 0 seviyelerine kadar düşüyor. g) Altıgen hücrelerin dört tanesini beraber kullandığımızda, bu dört altıgen birbirinden bağımsız olarak yüzeyden gelen radar yansımasını kontrol edebilmektedir.

4.5 Geniş alanlı düz olmayan yüzeyleri kaplayabilmek için grafen tabanlı radar emici hücrelerin tasarımı

Geliştirilen altıgen şekle sahip radar emici hücreler aynı zamanda düz bir şekli olmayan yüzeyleri de kaplayarak o yüzeylerden yansıyan mikrodalga şiddetini sıfıra düşürebildiğini gösterdik. Bu amaçla altıgen ve beşgen şekillere sahip hücreler kullanarak

örneğin bir içbükey yarım küre veya dışbükey yarım küre oluşturabildik (Şekil 4-5a, b). Bu altıgen veya başka şekillerde dizayn edilebilen küçük ve tek tek kontrol edilebilen radar emici hücreler çok geniş alanları şekline bakmaksızın kaplanmasına imkân sağlamaktadır. Başka tür bir düz olmayan yüzey kaplama metodu olarak da direk grafen kapasitörü, örneğin, metalik silindirin etrafına eşit uzaklıkta olacak şekilde kapladık. Bu silindirden yansıyan mikrodalga rezonans frekansında voltaj uygulayarak -50 dB seviyelerine kadar emilebilmektedir (Şekil 4-5d). Daha sonra bu silindirik yüzeyin radar kesitini rezonans frekansında ölçtük, silindir yüzeyinden yansıyan mikrodalga silindirin açısı ile değişmiyor. Fakat uygulanan voltaj ile silindir yüzeyinden yansıyan mikrodalga -60 dB seviyelerine kadar azaltılabiliyor. Üretilen grafen süperkapasitörlerin esnek bir yapıya sahip olmasından dolayı farklı başka birçok şekil de bu kapasitörler ile veya bunlardan üretilen küçük hücreler ile kaplanarak radar yansıması çok aşağılara çekilebilir.



Şekil 4-5. Geniş alanlı düz olmayan yüzeyleri de kaplayabilmek için grafen tabanlı radar emici hücrelerin tasarımı. a, b) Grafen tabanlı, altıgen ve beşgen şekilli radar emici hücreler kullanılarak düz bir şekli olmayan, örneğin bir yarım küre, yüzeyleri kaplamak için de kullanılabilir. Burada, dışbükey (a), içbükey (b) oval şekilli iki yarım kürenin hücreler ile kaplanmış hali gösterilmektedir. c) Geniş alanlı esnek PVC kullanılarak üretilen grafen

kapasitörler bir metalik silindir etrafına kaplanarak da bu metalik silindirden rezonans frekansında gelen yansıma engellenebilir, grafen kapasitör kaplanmış metalik silindirin resmi gösteriliyor. d) Grafen kapasitörle etrafı sarılmış metalik silindirden alınan rezonans frekansındaki yansıma şiddetinin voltaj ile değişimi gösterilmektedir. Uygulanan voltaj arttırıldığında yansıma şiddeti -3 dB seviyelerinden -50 dB seviyelerine kadar azaltılabilmektedir. e) Grafen kapasitörle kaplanan metalik silindirden rezonans frekansında ölçülen yansıma şiddetinin açıya göre açık ve kapalı durumda değişimi gösterilmiştir. Silindirin radar izdüşümü açı ile değişmiyor iken uygulanan voltaj ile açılıp kapatılabilmektedir.

4.6 Aktif metamalzeme mikrodalga yüzeylerinin üretilmesi ve karakterizasyonu

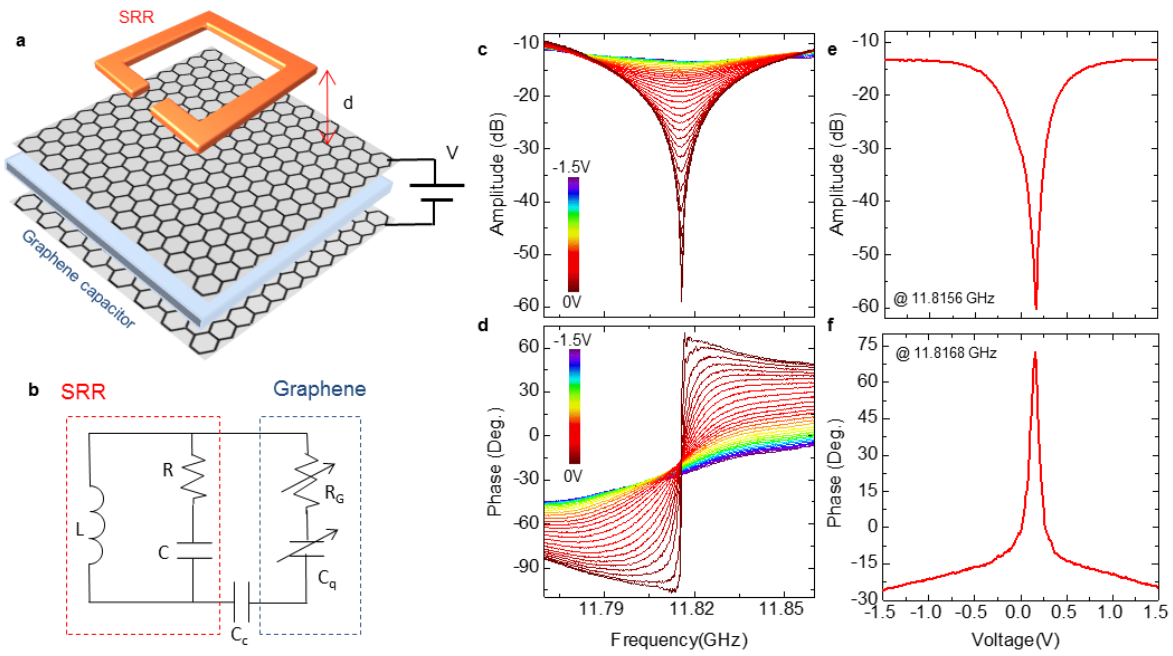
Metamalzemeler elektromanyetik dalgalar ve bunların madde ile etkileşimini kontrol ve manipüle etmek için güçlü bir araç olmuştur (Ozbay 2006; Pendry, Schurig vd. 2006; Tao, Padilla vd. 2011). Çeşitli ayar mekanizmasına sahip pasif meta malzemelerin entegrasyonu yeni fonksiyonlara sahip aktif meta malzemelerin üretilmesi amacıyla incelenmiştir (Goldflam, Driscoll vd. 2011; Shin, Urzhumov vd. 2012; Urzhumov, Lee vd. 2012; Zheludev ve Kivshar 2012). Aktif meta-aygıtlar ayar mekanizmalarına bağlı olarak devre-, malzeme- ve fiziksel–tabanlı meta-aygıtlar olmak üzere üç grupta toplanabilirler (Turpin, Bossard vd. 2014). Devre tabanlı meta-aygıtlar eşdeğer devre toplu elemanlarını değiştirmek amacıyla ayarlanabilir kapasitörleri veya anahtarları kullanır. Örneğin, bölünmüş halka rezonatör üzerinde entegre bir varaktör uygulanan ters besleme gerilimiyle eşdeğer devresinin etkin kapasitansını değiştirir (Reynet ve Acher 2004; Aydin ve Ozbay 2007; Hand ve Cummer 2010; Costa, Monorchio vd. 2011). Malzeme bazlı meta-aygıtlar permitivite, permeabilite, ya da bireysel birim hücrenin iletkenliği gibi kaba malzeme özelliklerinin dış uyaran altında kontrol edilmesine dayanır (Werner, Kwon vd. 2007; Han, Lakhtakia vd. 2008; Golovin ve Lavrentovich 2009; Han ve Lakhtakia 2009; Gardner, Evans vd. 2011; Goldflam, Driscoll vd. 2011; Wang, Liu vd. 2013). Bölme aralığı (split gap) içerisine depolanan yarıiletken malzemenin iletkenliği aydınlatmayla ayarlanabilir ve böylece meta malzemenin rezonans frekansı değiştirilir. Benzer olarak yarıiletken yüzeyine üretilen birbirine bağlı metamalzemeler serbest taşıyıcı soğurumunu değiştiren tüketim (depletion) bölgesinin ayarlanabilmesi için kullanılmıştır (Chen, Padilla vd. 2006; Chen, Padilla vd. 2009). Öte yandan fiziksel-meta-aygıtların tepkileri şekilleri ve diğer alt-bileşenlere (split gap gibi) olan uzaklıkları değiştirilerek akort edebilir (Tao, Strikwerda vd. 2009; Pryce, Aydin vd. 2010; Tao, Strikwerda vd. 2011; Ou, Plum vd. 2013; Ma, Lin vd. 2014). Örneğin, mikro elektromekanik (MEMs) tabanlı aygıtlar meta-aygıtların tınlaşım frekansını terahertz (THz) bölgesinde ayarlayabilir (Tao, Strikwerda vd. 2009). Her ne kadar bu aygıtlar belirli bir oranda akort edilebilirlik sağlasa da performansları malzeme ve üretim sınırlandırmalarından dolayı küçük

bölgeyle dar bir bölgede sınırlıdır. Bu teknolojiler geniş spektrumda büyük akort edilebilirlik sunan malzemeden oldukça fayda görecektir. Mevcut malzemelerin hiçbirisi elde edilmesi zor olan gereksinimleri sağlayamamaktadır. Bunlar haricinde elektriksel akort edilebilen alanlara olan ihtiyaç meta-aygıtların pratik uygulaması için diğer bir zorluktur.

2-boyutlu (2D) kristaller elektriksel olarak akort edilebilir meta-aygıtların gerçekleştirilmesinde kullanılabilecek yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler için yeni bakışaçıları sunmaktadır (Ju, Geng vd. 2011; Sensale-Rodriguez, Fang vd. 2011; Sensale-Rodriguez, Yan vd. 2012; Sensale-Rodriguez, Yan vd. 2013; Tassin, Koschny vd. 2013). 2D kristallerin kalınlıkları etkin dalga boyundan çok daha kısadır ve bundan dolayı verdikleri tepki yalnızca yük taşıyıcılarından kaynaklanmaktadır. Son çalışmalar grafendeki yüksek mobiliteli serbest taşıyıcıların yoğunluklarının ayarlanmasıyla görünür bölgeyle mikrodalga frekansları arasında değişen çok geniş bir spektrum üzerinde ışık-madde etkileşiminin eşi görülmemiş bir şekilde kontrol edilebileceğini göstermiştir (Mak, Ju vd. 2012; Rouhi, Capdevila vd. 2012). Grafenin plazmon frekansı kızıl ötesi (IR) ve THz frekanslar arasında şekil ve katkı seviyeleri çalışılarak ayarlanabilir (Ju, Geng vd. 2011; Liu, Luxmoore vd. 2015). Yük yoğunluğunun ayarlanması ortamının etkin dielektrik sabitinide değiştirir. Diğer bir yaklaşımla, metamalzemeler (Emani, Chung vd. 2012; Lee, Choi vd. 2012) veya optik antenler (Kim, Son vd. 2012; Yao, Kats vd. 2013) üzerine büyütülen grafen elektriksel olarak akort edilebilen meta-aygıtlar sağlamak amacıyla kullanılır. Ancak bu aygıtlar sınırlı akort edilebilirlikleri sebebiyle pratik uygulamalar için uygun değildirler (Lee, Choi vd. 2013). Son zamanlarda yaptığımız çalışmalarda, geniş alan yüzeye sahip iki grafen elektrot ve bunlar arasına yerleştirilmiş elektrolit ortamından oluşan basit bir cihaz yapısı geliştirdik. Bu geometri iki grafen elektrot arasında 10^{14} cm^{-2}'ye ulaşan yük yoğunlukları sağlayan etkin karşılıklı (mutual) elektriksel katkılamaya (gating) izin vermektedir (Polat ve Kocabas 2013). Bu süper-kapasitör yapısını kullanarak optik modülatörleri (Polat ve Kocabas 2013; Baylam, Cizmeciyan vd. 2014), elektrokromik aygıtları (Polat, Balci vd. 2014), ve değiştirilebilir radar soğurucu yüzeyleri (Balci, Polat vd. 2015) içine alan farklı optoelektronik aygıtları geliştirdik. Projenin bu bölümünde, metalik bölünmüş halka rezanotörlerle birleştirilen grafen süper-kapasitörlerin kullanılmasıyla elektriksel olarak kontrol edilebilen yeni bir tür meta-aygıt yapısı gösterilmiştir. Bu meta-aygıtlar grafen içerisindeki akort edilebilen yüksek mobiliteli serbest taşıyıcılara bağlıdır. Bu taşıyıcılar grafen elektrotlara kapasitif olarak eşlenmiş rezanotörlerle elektriksel olarak akort edilebilen dağılım oluşturmak için kullanılırlar.

Grafen yüzeye yakın tümleşik bölünmüş halka rezanatörleri (SRR) rezonansı değişik şekillerde ayarlanabilen yeni bir tür hibrit metamalzeme sağlamaktadır. Grafenin meta malzemelerle entegrasyonu için yapılan önceki çalışmalar kızılötesinde ve terahertz

frekanslarda (Emani, Chung vd. 2012; Liu, Luxmoore vd. 2015) oldukça sınırlı modülasyon sağlamıştır. Burada, oldukça yüksek akort edilebilirlik sağlayan geniş yüzeyli grafene kapasitif olarak çiftlenilmiş mikrodalga metamalzemeler kullanmaktayız. Şekil 4-6a'de bu hibrit yapının şematik gösterimi verilmiştir. Grafenin SRR yakınında olması grafen yüzey direncinden dolayı ek elektriksel kayıplar getirmektedir. Hibrit yapının eşdeğer küçük sinyal modeli Şekil 4-6b'de gösterilmiştir. Halka ve bölünmüş aralık (split gap) sırasıyla indüktans, *L* ve kapasitans, *C*, sağlamaktadır. Direnç, *R*, metal üzerindeki elektriksel ve yayınım direncinden kaynaklı kayıpları modellemektedir. Dizaynımızda, SRR yapı grafene kapasitif olarak çiftlenilmiştir ($C_c = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d}$, çiftlenen kapasitans, ε ortamın dielektrik sabiti ve ε_0 serbest uzayın permitivitesi). Grafen katman yüzey direnciyle ($R_G = \frac{1}{\sigma(n)}$, *σ(n)* grafenin yüke bağlı yüzey iletkenliği olmak üzere) ve grafen elektrotların kuantum kapasitansıyla ($C_Q = \frac{2e^2}{\hbar \upsilon_F}\sqrt{\frac{n}{\pi}}$, *e* elementsel yük, v_F Fermi hızı, *n* yük yoğunluğu) modellenebilir. İstemsiz katkılanan grafen katmanın kuantum kapasitansı (C_Q ~ 0.5 μF/cm^2) seri birleştirme kapasitansından çok daha büyüktür (C_c ~ 5 pF/cm^2) ve, bundan dolayı, küçük devre modelinde katkısını ihmal edebiliriz (Xia, Chen vd. 2009).

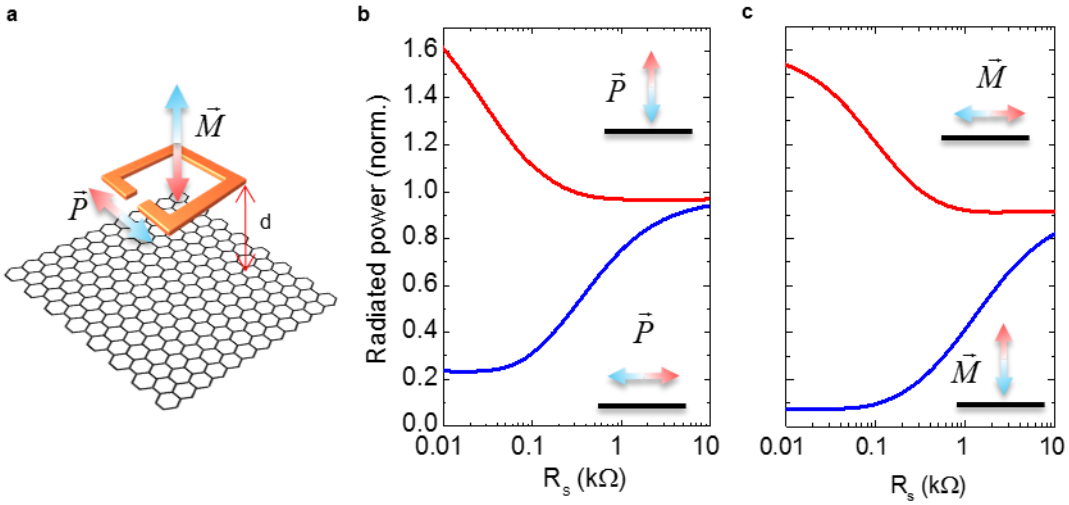


Şekil 4-6. Elektriksel akort edilebilen meta-aygıtlar: a, Grafen elektrotlara kapasitif olarak birleştirilen bölünmüş halka rezonatörden (split-ring resonator) oluşan hibrit metamalzeme sisteminin şematik gösterimi. Kapasitif birleşme SRR-grafen mesafesi, d ile tanımlandı. b,

Meta-aygıtın küçük-sinyal eşdeğer devre modeli. SRR toplu devre elemanları olan L, R, C ile ifade edilmiştir; grafen katman değiştirilebilen yüzey direnciyle, R_G ve kuantum kapasitansı, C_Q ile tanımlanmıştır. C_c kapasitif birleşimi göstermektedir. c, d, Farklı besleme gerilimlerinde geçirgenliğin (S_{21}) genlik ve fazının spektrası. Renk çubuğu besleme gerilimini ifade etmektedir. e, f, Geçirgenliğin genlik ve fazının besleme gerilimiyle değişimi.

Meta malzemelerin elektriksel rezonansı grafen katmanın yük yoğunluğunun iyonik katkılama yöntemi kullanarak değiştirilmesiyle akort edebilir. Grafen temelli mikrodalga cihazlar için teknik zorluk santimetre çaplı dalga boyunda (örneğin; 10 GHz de λ = 3 cm) geniş yüzey cihazların gerekliliğidir. Bakır folyo üzerine kimyasal buhar depolama ile geniş yüzey grafen sentezinin mümkün olması önerilen mikrodalga meta-aygıtların gerçekleştirilmesini sağlar. Çalışmamızda grafen elektrotlar kimyasal buhar depolama sistemi kullanılarak bakır folyo üzerinde sentezlendi ve sonra sıcak laminasyon tekniği kullanılarak esnek PVC alttaşlar üzerine transfer edildi. Laminasyon işlemini takiben lamine edilen bakır folyolar 5 mM $FeCl_3$ sulu çözelti içinde aşındırıldı. İlk olarak kalınlığı 40 μm olan gözenekli kâğıdı grafen elektrotlar arasına ara katman olarak yerleştirdik ve iyonik sıvıyla (1-Butyl-3methlimidazolium hexafluorophosphate) ıslattık. Bu cihaz yapısı tek katmanlı grafen elektrotlar tarafından oluşturulan süperkapasitorlere benzemektedir. Elektrolit herhangi bir metalik elektrodu kullanılmadan grafen elektrotlar arasında iki taraflı elektrolit ile grafenlerin kendi kendilerini yüklemelerini mümkün kılmaktadır. Harici besleme gerilimiyle elektrolit polarize olmakta ve grafen elektrodu yüklemektedir. Negatif uca bağlı grafen elektrot elektron-katkılı (n-katkılı), diğeri ise deşik-katkılı (p-katkılı) olmaktadır. Sıfır gerilimde katkısız grafenin yüzey (sheet) direnci 2.5 kΩ civarında olup ±3 V değerinde 0.7 kΩ'a kadar düşmektedir. Grafen elektrotlar üzerindeki yük yoğunluğu ise $3x10^{11}$ - $0.5x10^{14}$ cm^{-2} arasında değişmektedir. Temel olarak metalik SRR'lar SRR şekillerin PVC film üzerine yapıştırılan 10 μm kalınlığındaki bakır üzerine yazdırılıp kimyasal olarak aşındırılması ile üretildi. Elektromanyetik simülasyonlar en yüksek modülasyon genliğinin 2.4 mm grafen-SRR uzaklığında olduğunu göstermiştir. Cihazı monte ettikten sonra, saçılım parametrelerini sırasıyla kaynak ve alıcı olarak geniş bant boynuz (horn) ve dipol anten kullanarak iki kapılı ağ analizörü yardımıyla ölçtük. Elektriksel rezonansı uyarabilmek için elektrik alanın SRR ayrışma aralığı (split gap) boyunca polarizasyonunu sağladık. Bu aktif cihaz iletilen elektromanyetik dalgaların şiddetini ve fazını kontrol etmek için eşi görülmemiş bir imkân vermektedir. Şekil 4-6c ve d sırasıyla üretilen aygıt üzerinde farklı besleme gerilimlerinde ölçülen geçirgenliğin (S_{21}) genlik ve fazını göstermektedir. Aygıt sıfır volt değerinde 11,8156 GHz ve rezonans geçirgenliği 60 dB olan bir rezonans vermektedir. Besleme gerilimi uygulandığımızda elektron ve deşikler grafen elektrotlar üzerine birikmiş ve rezonans

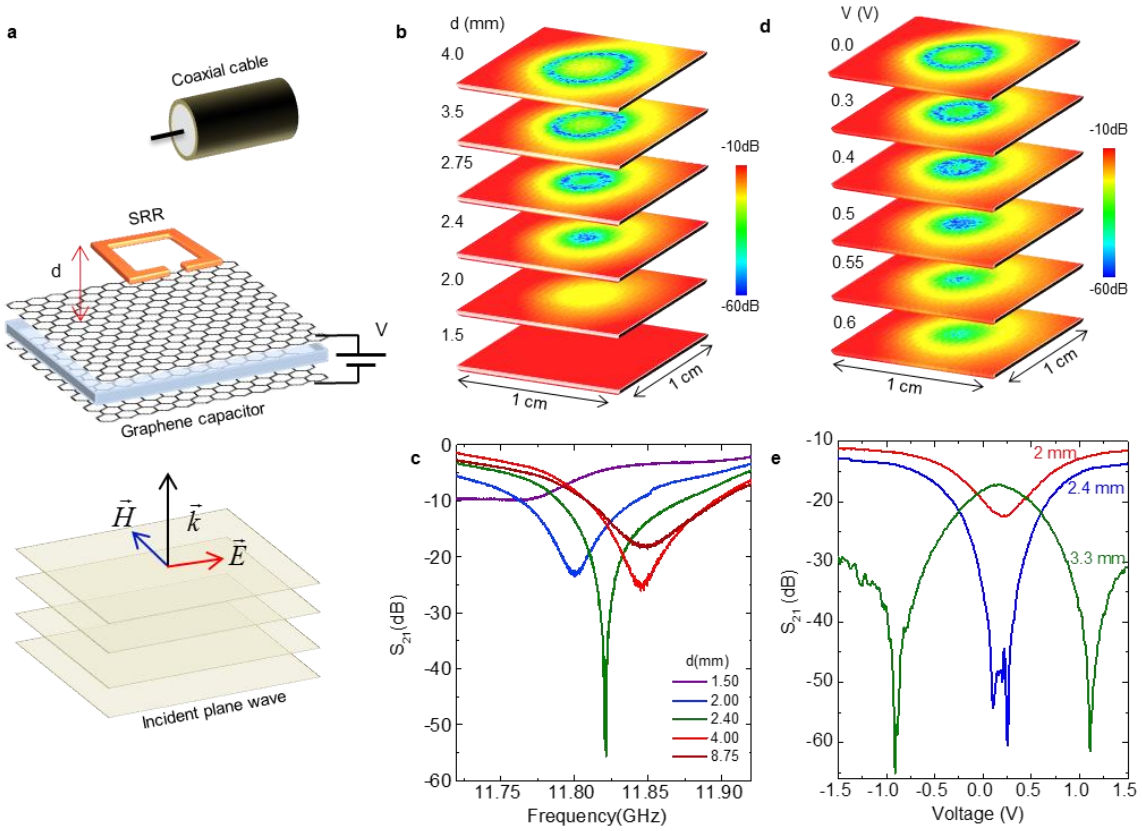
davranışı azaltan önemli sönüm vermiştir. Örneğin, 1.5 V besleme geriliminde rezonans geçirgenliği -12 dB olarak gözlenmiştir. Şekil 4-6e ve f, geçirgenlik genliğinin rezonans (11.8156 GHz) ve faz (11.8168 GHz) koşullarında gerilim bağımlılığını göstermektedir. Geçen sinyallerin fazı -30^o – 70^o arasında değişmektedir. Grafen elektrotların ambipolar davranışından dolayı besleme geriliminin polaritesini değiştirdiğimizde simetrik bir davranış gözlendi. Yük nötralite noktası az miktarda pozitif gerilim değerlerine kaydı. Yaklaşımımız meta malzemelerin yapısından bağımsızdır ve çalışmamızda farklı metamalzeme sistemlerini test ederek benzer elektriksel akort edilebilirlik davranışı gözlemledik.



Şekil 4-7. Akort edilebilir 2D-Drude metal yanındaki elektrik ve manyetik dipole yayıcılar a, SRR üzerindeki gelen ışığın polarizasyon yöneliminden bağımsız elektrik ve manyetik dipollerin şematik gösterimi. b, c, Farklı yönelimlerdeki elektrik ve manyetik dipollerin normalize edilen yayınım gücünün Drude metalinin yüzey direncine karşı gösterimi. Dipoller ara yüzeyden 2 mm uzağa yerleştirildiler.

Hibrit sistemin elektriksel akort edilebilirliğini anlamak için elektrik ve manyetik dipol yayıcıları kullanarak kuantitatif bir model geliştirdik. Elektromanyetik dalgaların SRR tarafından saçılması gelen ve metalik yapılar üzerinde indüklenen çok kutuplardan yayınlanan elektromanyetik dalgaların koherent bindirmesiyle tanımlanabilir. Yayınımın dalga boyu SRR boyutlarıyla kıyaslandığında daha büyükse indüklenen çoklu kutupların en düşük düzeni saçılmayı tanımlamak için yeterlidir (Jackson 1962). Şekil 4-7a SRR üzerinde indüklenen elektrik ve manyetik dipolleri göstermektedir. İndüklenen bu dipoller meta-aygıtların sırasıyla elektrik ve manyetik tepkisini tanımlar. Akort edilebilir meta-aygıtların arkasında yatan temel fiziği anlayabilmek için akort edilebilen Drude metalinin yanındaki dipole yayıcılardan oluşan yayınımını çalıştık. Dipol yayıcılardan oluşan yayınım grafen

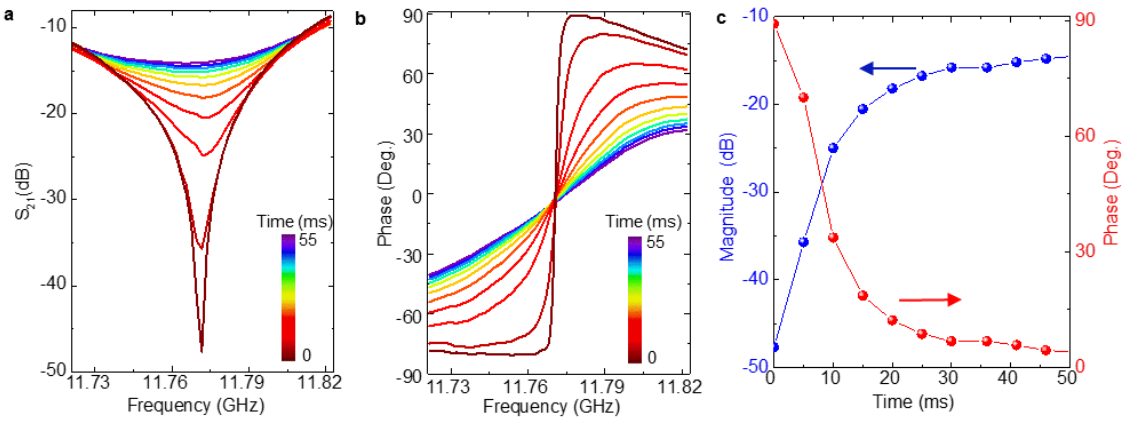
elektrotların etkisini modelleyebilmektedir. Her ne kadar metal ve grafen yüzey yakınındaki moleküler yayıcıların sönümü çalışılmış olsa da (Koppens, Chang vd. 2011; Lee, Bao vd. 2014), elektriksel olarak kontrol edilebilen malzemelerin eksikliğinden dolayı akort edilebilir metal yakınındaki elektrik ve manyetik dipol yayıcıların uzun dalga boyundaki yayınımı keşfedilememiştir. Geniş yüzey grafen üzerindeki yük yoğunluğunun elektriksel kontrolü bu davranışın çalışılması için benzersiz imkân sunmaktadır. Modelimizde akort edilebilir yüzey direncine, R_s, sahip iletken ara yüzey yakınına (2 mm) yerleştirilen uzun dalga boylu dipol yayıcıdan (10 GHz'da) yayınlanan toplam gücü inceledik. Şekil 4-7b ve c ara yüzeyin direnci 10 Ω'dan 10 kΩ'a değiştiğinde elektrik ve manyetik dipolden yayınlanan gücün değişimini göstermektedir. Dipolün yönelimine bağlı olarak (ekli küçük şekil, Şekil 4-7b ve c), yayınlanan gücün hem sönümünü hem de artışını gözlemledik. Elektrik dipol iletken ara yüzey düzleminde olduğunda iletken ara yüzeyinin iletkenliği artarken önemli bir sönüm, buna karşın dipol ara yüzeye dik olduğunda yayınım gücünün arttığı görüldü. Bu davranış, iletken ara yüzden dolayı indüklenen görüntü dipolleriyle de anlaşılabilir. İndüklenen dipolün gücü iletkenlikle değişir. Simule edilen sonuçlar zıt yönelimdeki manyetik dipoller için benzer fakat daha belirgin etkiler gösterdi. Bu sonuçlar meta malzemenin hem elektrik hem de manyetik rezonansının grafenin elektriksel kontrolü ile kontrol edilebilir olduğunu doğrulamaktadır. Grafen tabakası üzerinde yük yoğunluğunu ayarlayarak dipol vericilerin etkin gücünü kontrol etme yeteneği yeni fonksiyonel metamalzemeler yaratır. Drude metali yakınındaki çoklu kutuplara dayanan model bu meta-aygıtların tasarımı için kullanışlı bir araç sağlamaktadır.



Şekil 4-8. Aktif meta-aygıtların yakın alan karakterizasyonu: a, Aygıtın lokal saçılma parametresinin (S_{21}) saptanması için kullanılan yakın alan tarama tekniği. Saçılma parametresi anten yönü boyunca olan lokal elektrik alanın büyüklüğünü verir. b, c Farklı grafen-SRR uzaklıklarında ölçülen konum haritası ve meta-aygıtın lokal saçılma parametresinin spektrumunun gösterimi. d, e Aygıtın merkezindeki lokal saçılma parametresinin büyüklüğü ve konum haritasının uygulanan gerilime bağlı gösterimi.

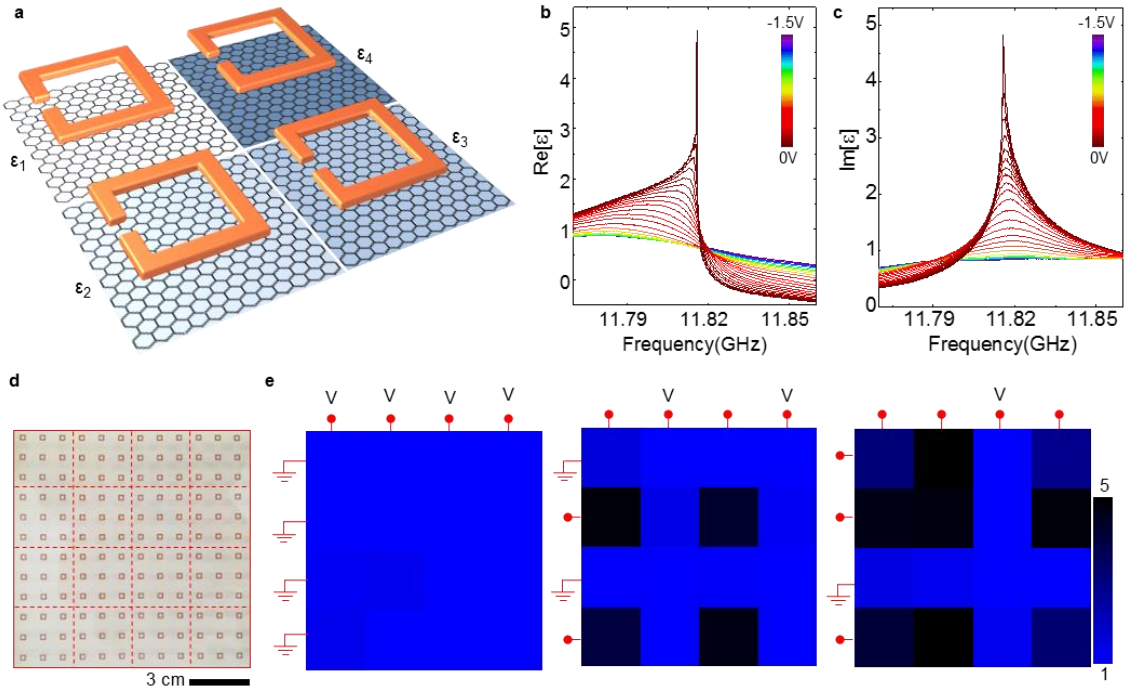
Aktif meta-aygıtların elektrik alan dağılımının ayarlanabilirliğini araştırmak ve lokal elektrik alan dağılımını eşleştirmek için yakın alan tarama tekniği kullanıldı (Sun, He vd. 2012). Aygıt bilgisayar kontrollü motorlu zemin üzerine yerleştirildi ve bir ağ analizörüne bağlı bir monopol anten kullanarak yerel saçılma parametresinin spektrumu kaydedildi (Şekil 4-8a). İlk olarak, sıfır besleme gerilimi değerinde grafen elektrot ve SRR arasındaki kritik çiftlenim koşulu test edildi. Şekil 4-8b meta-aygıtların lokal elektrik alanlarının dağılımını farklı grafen-SRR uzaklıkları için göstermektedir. Meta-aygıtların yakın bölgesinde çapı grafen-SRR uzaklığına bağlı halka şeklindeki bölgede mikrodalga sinyalin tamamen yok olduğu (örneğin; rezonans) gözlendi. Grafen SRR'a çok yaklaştırıldığında (<2 mm), grafen üzerindeki yüksek dağılımdan dolayı rezonans azalmaktadır. Bu davranış metal yüzey üzerine yerleştirilen dipol yayıcının sönümünün mikrodalga analoğudur. Şekil 4-8c

merkezdeki geçirgenlik spektrumunu vermektedir. Uzaklığı ayarlayarak ileri durumda rezonansın oluştuğu kritik çiftlenim koşulunu sağlayabiliriz. Bu kritik uzaklıkta 50 dB büyüklüğünde en yüksek modülasyon sağlanabilmiştir. İkinci adımda yakın alan dağılımının değişimi besleme gerilimine göre ölçüldü (Şekil 4-8c). Grafen elektrotlar üzerindeki yük yoğunluğunu arttırdığımızda sönüm halkası daha fazla küçülmektedir ve daha yüksek gerilimlerde sönmektedir. Şekil 4-8c'de saçılma parametresinin uygulanan gerilime bağımlılığı üç farklı grafen-SRR uzaklığı için gösterilmiştir. Grafenin ambipolar doğasından dolayı pozitif ve negatif gerilim değerlerinde iki rezonans gözlenmiştir. Grafen elektrotların Dirak noktaları arasındaki farktan dolayı küçük bir asimetriklik gözlenmiştir.



Şekil 4-9. Meta-aygıtların zaman yanıtı: a, b, Meta-aygıtların geçirgenliğinin (S_{21}) (1.5 V besleme geriliminden sonra) genlik ve fazının zamana bağlı gösterimi c ve aygıtın faz ve geçirgenlik rezonansının değişimi.

Meta-aygıtların akort edilebilirliklerinin çalışılmasından sonra bunların anahtarlama davranışını inceledik. Aygıtın saçılma parametrelerinin mikrodalga spektrumu zamana bağlı olarak 1.5 V'luk adım değerine sahip besleme gerilimi uygulanarak ölçüldü. Şekil 4-9a ve b, S_{21} parametresinin genlik ve fazının değişimini göstermektedir. Kapasitör şarj olurken geçirgenlik rezonansı 20 ms'de -50 dB'den -15 dB'ye artmaktadır. Benzer şekilde rezonans frekansı yakınında 90 dereceden 0 değerine azalmaktadır. Aygıtın zamana bağlı davranışı grafen kapasitörün şarj süresiyle ve aygıtın boyutlarıyla sınırlıdır. Şekil 4-9'da karakterize edilen aygıt 15x15 cm^2 boyutlara sahip olup yaklaşık 20 ms'lik RC zaman sabitine sahiptir.



Şekil 4-10. Elektriksel yeniden ayarlanabilir, konumsal değişen dijital metamalzemeler: a Ayrı ayrı adreslenebilen piksellere sahip dijital meta malzemenin şematik gösterimi. Bağımsız pikseller üzerindeki yük yoğunluğunun kontrolü lokal dielektrik sabitini yeniden ayarlayabilmemizi sağlar. b, c Tekli pikselin etkin dielektrik sabitinin hesaplanan reel ve sanal kısımlarının spektrumunun besleme geriliminin fonksiyonu olarak gösterimi. d, Rezonans koşulunda farklı gerilim konfigürasyonları için aygıtın etkin dielektrik sabitinin reel kısmının konumsal haritası. Piksellerin etkin dielektrik sabitleri pasif matris adresleme ile kontrol edilir.

Kullandığımız yaklaşımın önemini göstermek için meta malzemelerin konumsal akort edilebilirliğini kullanabiliriz ki bu perdeleme optiğinde (transformation optics) yeni uygulama alanları açma potansiyeline sahiptir (Chen, Chan vd. 2010). Perdeleme optiği konumsal değişen metamalzemeler kullanılarak elektromanyetik dalgaların bir nesneyi gizlemek amacıyla eğildiği, saptırıldığı araştırma alanıdır (Cui, Qi vd. 2014; Della Giovampaola ve Engheta 2014). Permitivite ve permeabilitenin elektriksel olarak konumsal değişiminin kontrolü uyarlanabilir (adaptive) elektromanyetik gizleme ve kamuflaj uygulamaları için yeni ufuklar açabilir. Ayrı ayrı adreslenebilir meta-aygıt dizileri entegre ederek yaklaşımımız gerilim kontrollü uyarlanır perdeleme optiği alanında kullanılabilir. Şekil 4-10 çok pikselli aygıtın şematik gösterimini vermektedir. Pasif matris adreslemeyle pikselli yüzey üzerindeki lokal yük yoğunluğunun kontrolü sağlanarak elektriksel yeniden yapılandırılabilir konumsal değişen meta-aygıtların yapılabileceği gösterilmiştir. Çalışmada aktif piksel dizileri 4×4 olacak şekilde geniş yüzey meta-aygıtlar üretildiler. Her piksel 9 SRR (3×3) içermektedir. Piksellerin merkezinde saçılma parametreleri ölçüldü ve daha sonra lokal dielektrik fonksiyonu hesaplandı. Şekil 4-10b ve c etkin dielektrik sabitinin hesaplanan reel ve sanal kısımlarını göstermektedir. Piksel üzerinde yükler toplandığında dielektrik sabiti 5 değerinden 0,8

değerine değişmiştir. Şekil 4-10d farklı gerilim konfigürasyonlarında pikselli aygıtın dielektrik sabitinin konumsal haritasını göstermektedir. Sütun ve dizilere uygulanan gerilim değerinin değiştirilmesiyle dielektrik sabitinin konumsal değişimi yeniden yapılandırılabilmiştir. Pikseller arasındaki çapraz bağlanma pasif matris adreslenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu aygıtlar esnek alttaşlar üzerindedir ve düzlemsel olmayan nesneler üzerine kamuflaj amaçlı sarılabilirler.

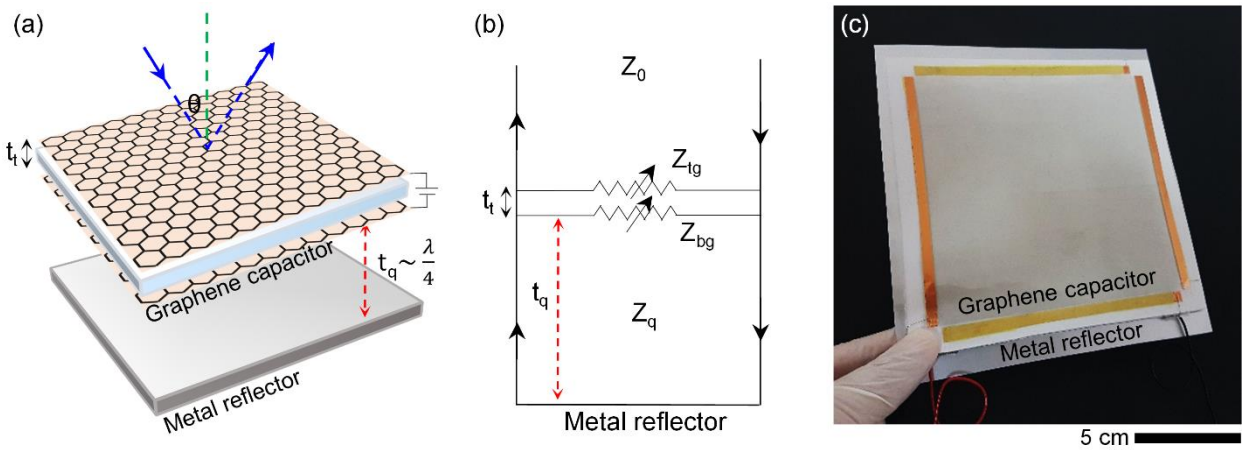
Burada sunulan sonuçlar elektriksel kontrol edilebilen meta-aygıtlar için umut verici bir yaklaşımı ifade etmektedir. Yaklaşımın ana fikri akort edilebilir Drude metal yakınına yerleştirilen dipol yayıcı etkin gücünün elektriksel ayarlamasına dayanır. Grafen üzerindeki yük yoğunluğunun elektrostatik kontrolü meta malzemelerin hem yakın hem de uzak alanda cevabı üzerinde geniş bant aralığı kontrolü sağlar. Bu meta-aygıtlar elektromanyetik dalgaların hem genliğinin (> 50 dB) hem de fazının (> 90°) etkin kontrolünü sunar. Yaklaşımın umut verici kullanımlarını göstermek için, elektriksel yeniden yapılandırılabilir ve konumsal değişen metamalzemeler örnek olarak gösterdik. Bu meta-aygıtların çalışma frekansları kolaylıkla terahertz frekanslara yükseltilebilir. Büyük modülasyon derinliği, basit cihaz yapısı ve mekanik esneklik grafen etkin meta-aygıtların önemli niteliklerindendir. Biz sunulan yaklaşımın mikrodalga ve terahertz frekanslarda elektriksel değiştirilebilir gizleme cihazlarından uyarlanabilir kamuflaj sistemlerine uzanan bölgede birçok yeni uygulamalara imkân sağlayabileceğini öngörmekteyiz.

4.7 Elektromanyetik dalgaların fazının kontrol edilmesi

Bu çalışmada, elektrikle ayarlanabilir grafen aygıtlar kullanarak mikrodalgaların yansıma fazını kontrol etmek için bir yöntem geliştirdik (Balci, Kakenov vd. 2017). Aygıt, metalik bir yüzeye çeyrek-dalga mesafesinde yerleştirilen karşılıklı kapılı geniş alanlı grafen katmanlarından oluşur. Bu aygıt yapısı, grafen empedansı serbest alan empedansı ile eşleştiğinde rezonans frekansı etrafında elektrikle ayarlanabilir rezonans soğurulması ve basamak-benzeri faz kayması üretir. Grafenin üzerinde bulunan yük yoğunluğunu elektrostatik kontrol gerilimi ile ayarlayarak yansıyan elektromanyetik dalgaların hem yoğunluğunu (> 50 dB) hem de fazını (~ p) kontrol etmek mümkündür. Ayrıca, polarizasyon gerilimlerinin zıt kutbunda yükleme asimetrisi kullanarak, uygulanan voltaj ile çift yönlü faz kontrolünü gösterdik.

Işık-madde etkileşimini kontrol etmek, modern iletişim ve bilgi teknolojilerinde merkezi bir role sahiptir. Malzemelerin elektriksel ve manyetik özellikleri ışığın madde ile etkileşiminin arkasındaki fiziksel mekanizmaları yönetir. Malzeme özelliklerini elektrik sinyali ile kontrol edebilme özelliği, ışığın taşıdığı bilginin işlenmesini sağlar. Yarı iletkenler ve sıvı kristal

temelli gelişmiş aygıtlar görünür ve kızıl ötesi için geliştirilmiş olmasına rağmen,(Liu, Jones vd. 2004; Xu, Schmidt vd. 2005; Lee, Zhang vd. 2015; Shcherbin, Gvozdovskyy vd. 2016) uzun dalga boyunda (Terahertz ve mikrodalga) ışığı kontrol edebilmek elektromanyetik spektrumun bir parçası ve uzun vadeli bir sorun olmuştur. Bu mücadelenin temel sebebi, uzun dalga boyları için aktif bir malzemenin olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, meta malzeme MEMS ile entegre, yarı iletkenler ve diyotlar terahertz ve mikrodalga genlik ve faz kontrol etmek için kullanılmıştır. (Chen, Padilla vd. 2006; Hand ve Cummer 2010; Zhu, Feng vd. 2010; Urzhumov, Lee vd. 2012) 2 boyutlu (2D) materyal alanındaki son gelişmeler, ışığın çok geniş bir spektrumda aktif olarak kontrol edilmesi için bir platform oluşturmaktadır. 2D malzemeler, özellikle grafen, ayarlanabilir ışık-madde etkileşimini sağlayabilen aşırı yüksek hareket kabiliyeti taşıyıcıları için ayarlanabilir bir platform olanağı sağlar. Ayarlanabilir yüksek hareket kabiliyeti taşıyıcıları atomik kalınlık ile birlikte, görünürden mikrodalga frekanslarına kadar ışığı kontrol etmek için eşsiz bir kombinasyon sağlar. Grafen yarıiletken kullanılarak aktif Terahertz cihazlar için uygulanmıştır. (Sensale-Rodriguez, Yan vd. 2012; Sensale-Rodriguez, Yan vd. 2012) Bu cihazlar büyük yoğunluk modülasyonu göstermesine rağmen, grafenin atomik kalınlığı nedeniyle faz modülasyonu için önemsizdir. (Ren, Zhang vd. 2012) Faz modülasyonu, bir ortamın optik yolunu veya kırılma indeksini ayarlayarak başarılabilir. Atomik ince tabakalar için, ancak, daha büyük bir kırılma indeksi değiştirmek için, faz modülasyonu, kısa optik yol nedeniyle son derece küçüktür. Bir metamalzeme yapı söz konusu olunca ince tabakalara entegre IR ve THz iyi bir yoğunluk ve faz ayarlama aygıtı olarak gösterilmiştir. (Lee, Choi vd. 2012; Valmorra, Scalari vd. 2013; Balci, Polat vd. 2015; Kakenov, Takan vd. 2015; Li, Tian vd. 2015; Miao, Wu vd. 2015; Wu, La-o-Vorakiat vd. 2015; Kakenov, Balci vd. 2016) Çok yakın zamanda, biz terahertz ve mikrodalga frekanslarında faaliyet gösteren aktif grafen cihaz gösterilmiştir. Ayarlanabilir bir grafeni ayarlanabilir emici bir tabaka olarak entegre ettik ve bu aygıtın rezonans frekanslarında mükemmel bir yoğunluk modülatörü olarak çalıştığını gösterdik. Bu çalışmanın yoğunluk modülasyon yeteneğine ek olarak, bu aygıtların, rezonans frekansının yakınındaki geniş bir frekans penceresinde elektromanyetik dalgaların fazını kontrol etmesi eşi görülmemiş bir yeteneğini ortaya koyuyoruz. (Balci, Kakenov vd. 2017)



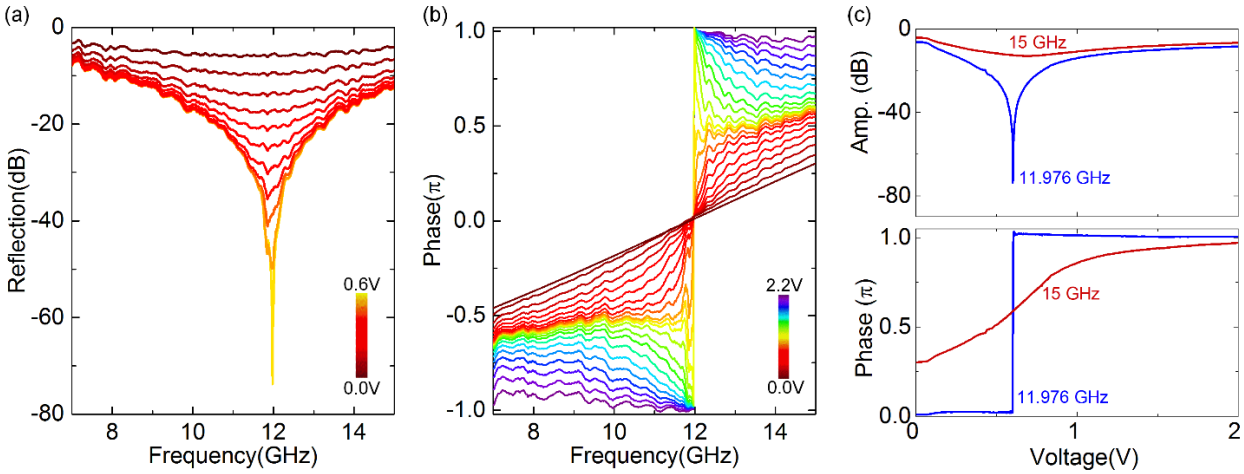
Şekil 4-11. Grafene dayalı aktif Salisbury ekranı. (a) Aktif grafen cihazın şematik yerleşimi. Karşılıklı bir metalik yüzeyden bir çeyrek dalga uzaklığa yerleştirilen grafen kapı tabakaları. (b) Aktif cihazın iletim hattı gösterimi. Bir kısa devre ile gösterilmiştir ve metalik yüzey grafen tabakalar ayarlanabilir bir direnç (Z_{tg}; Z_{Tg}, alt grafen üst grafen) ile temsil edilmektedir. (c) Üretilen cihazın fotoğrafı. İyonik bir sıvı elektrolit, polimer substratlar üzerinde iki geniş alanlı CVD ile büyütülmüş grafen arasına yerleştirilir. Cihazın arka yüzü bir alüminyum folyo ile kaplanmıştır.

Aygıtımız, bir rezonansa bağlı faz kaymasını kontrol etme fikrine dayanmaktadır. Dış tahrik kuvvetinin frekansı rezonans frekansından daha yüksek olduğunda, bir basamak benzeri bir faz kayması, bir rezonans sisteminin tepki olarak ortaya çıkar. Rezonatörde kontrollü bir sönümlemenin yapılması, fazını ayarlamayı mümkün kılacaktır. Burada, bir Salisbury ekranında ayarlanabilir bir emici olarak elektrostatik olarak kontrol edilen grafeni kullanıyoruz, böylece geniş bir frekans bandında yansıyan elektromanyetik dalgaların fazını kontrol altında tutuyoruz. Şekil 4-11(a) aktif grafen cihazının yerleşimini göstermektedir. İki büyük alan grafeni ve aralarında saklanan bir iyonik sıvı elektrolit (DEME TFSI) kullanarak karşılıklı kapılı bir grafen kondansatörü imal ettik. Büyük alan grafen tabakaları, 1035 °C'de kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılarak çok pürüzsüz bakır folyolar üzerinde büyütüldü. Büyümenin ardından, grafeni mikrodalga şeffaf polimer substratlar üzerine sıcak laminasyon yöntemi ile aktardık. İyonik bir sıvı elektrolit ile ıslatılmış ince bir tabaka optik doku, grafen katmanları arasına sıkıştı. Cihazı 5.3 mm kalınlığında bir kartona yerleştirdik ve arka tarafını bir alüminyum folyo ile kapladık. Şekil 4-11 (c), elektrik kablolarıyla birleştirilen fabrikasyon aygıtı göstermektedir. Bu aygıt aktif bir Salisbury ekranı olarak çalışır. Aktif aygıtın iletim hattı modeli Şekil 4-11 (b)'de gösterilmiştir ve ek materyalde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Grafen tabakalar iki değişken dirençler (Z_{tg} ve Z_{bg}) ve metalik yüzey iletim hattında çeyrek dalga uzaklıkta bir kısa devre olarak temsil edilmektedir. Mikrodalga frekanslarında metallerin yüzey empedans iletkenliği (σ) gibi dalgaların yüzey derinliklerine bağlıdır. Grafenin kalınlığı mikrodalga içindeki cilt derinliğinden çok daha küçük olduğu için, grafen tabakalarının yüzey empedansı kendi tabaka direnci (ek malzeme) ile temsil edilebilir.

Devreyi açmak için kısa devreye dönüştüren bir metal yüzeye bir çeyrek dalga uzaklıkta giriş empedansı kullanılarak, bir aktif Salisbury ekranında net toplam giriş empedansı hesaplanabilir;

$$Z_{total} = \frac{R_S \tan(k_q t_q)}{2\tan(k_q t_q) - i\frac{R_S}{Z_q}}$$

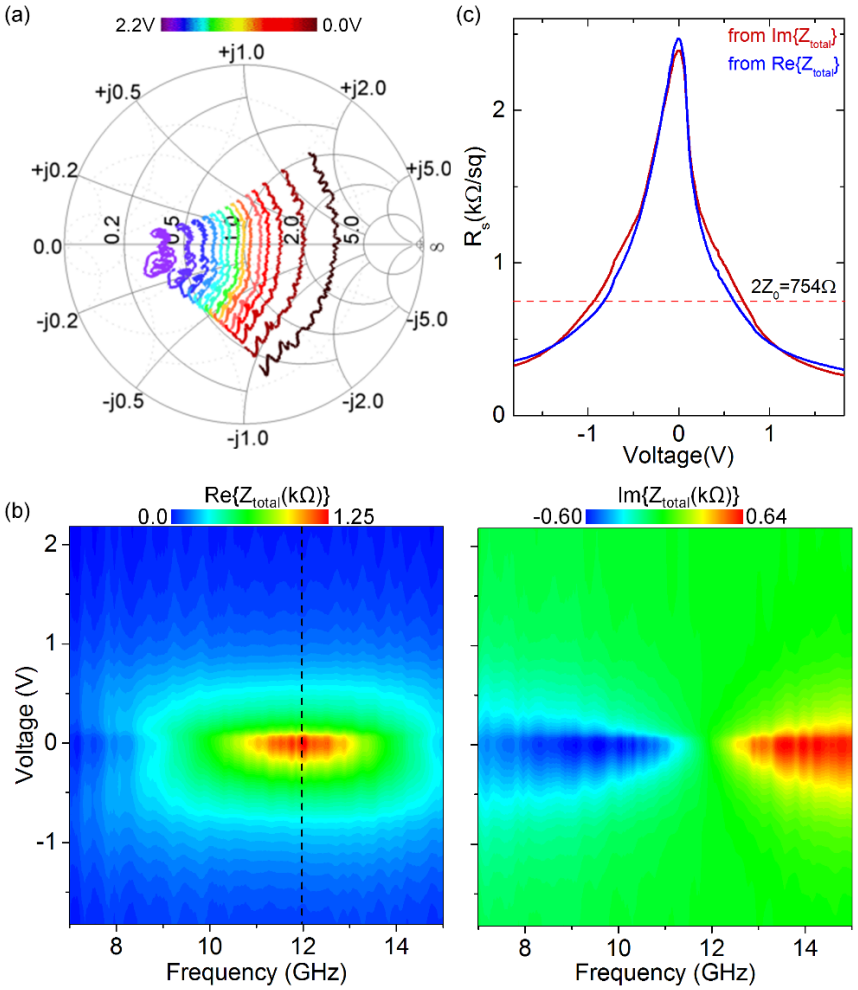
$Z_q = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_q}$ dalga impedansı, $k_q = w\sqrt{\mu_0 \varepsilon_q}$ dalga sayısı, ε_q dielektrik sabitini ifade eder. Rezonans durumunda aygıtın toplam giriş empedansı boş alan empedansına eşittir, ($Z_0 = 377\Omega$). Rezonansta empedansının hayali bölümü sıfır olur ve gerçek bir parçası haline gelir. Bu nedenle, aktif Salisbury ekranının yansıması sıfır olur.



Şekil 4-12. Gerilim ile kontrol edilen yansıyan mikrodalganın fazı ve yoğunluğu: (a) yansıyan elektromanyetik dalgaların faz spektrumu. (a) Ön gerilimde Salisbury ekranında yansıyan elektromanyetik dalgaların spektrumu. (c) Rezonans durumunda (11.976 GHz) ve rezonans olmadan (15 GHz) ön gerilim voltajına karşı yansıma genliğinin ve fazının değişimi.

Şekil 4-12, aygıtın mikrodalga performansını özetlemektedir. Aktif aygıttan farklı gerilim voltajlarında mikrodalga yansıma oranını ölçtük. Yansıtma oranını ölçmek için iki geniş bant standart kazanımlı korna anteni (ARRA Inc., BAY SHORE, seri: 9625) ile birlikte bir ağ analizcisi (Keysight E5063A) kullanarak iki girişli s parametreleri kaydedildi. Kaydedilen spektrumun yoğunluğu Şekil 4-12(a) 'da verilmektedir. Grafen elektrostatik olarak kaplandığında, yansıtma oranı düşer ve 11.976 GHz'de güçlü bir rezonans gösterir. Grafenin levha direncinin yarısının serbest alan empedansı ile eşleştiği 0,6 V'de rezonansı gözlemledik. Daha ilginç bir şekilde, yansıyan mikrodalgaların fazı, ön gerilim voltajıyla büyük bir değişimi göstermektedir (Şekil 4-12 (b)). Biz, rezonans frekansı çevresinde faz modülasyonu gibi bir adım gördük. Bir rezonans etrafındaki faz kayması evrensel bir davranıştır. Bununla birlikte, konfigürasyonumuzda, grafen üzerindeki yük yoğunluğunu ayarlamak, rezonans durumunu ve dolayısıyla elektronun rezonansa yakın faz kaymasını manipüle etmemizi sağlar. Rezonans frekansı daha düşük frekanslar için, yansıyan

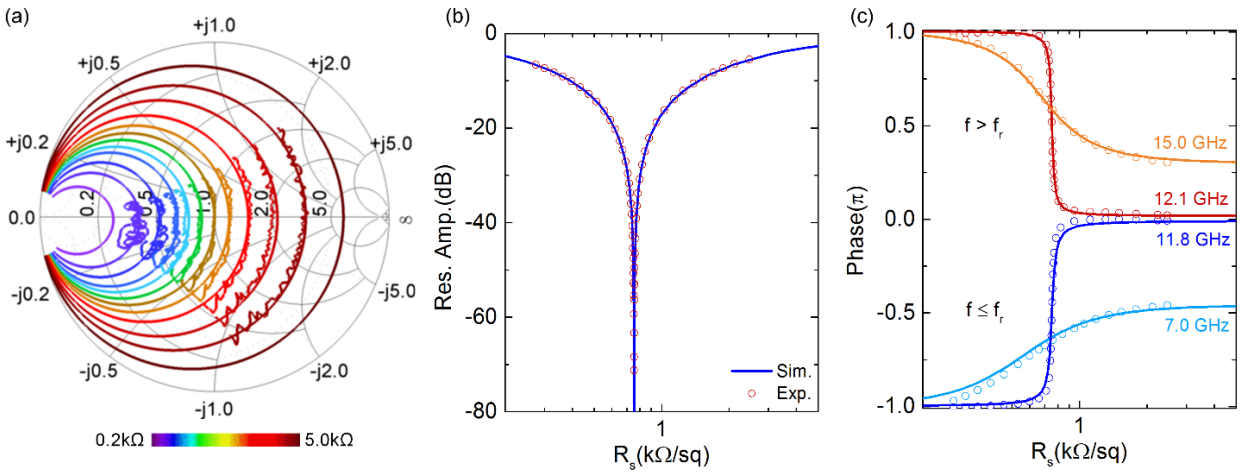
mikrodalgalar negatif faz kayma gösterir. Bu faz ölçümlerinde, grafen kondansatör düzlemini referans düzlem olarak almıştık.



Şekil 4-13. Giriş empedansın gerçek ve hayali kısmından grafen sıkma tabaka direnci: (a) Smith şeması ön gerilimi ile cihazın toplam giriş empedansı değişimini. (B) Hem frekans hem de ön gerilim voltajının bir fonksiyonu olarak grafene dayalı Salisbury ekranının toplam giriş empedansının gerçek ve sanal kısmı. (C) Grafene toplam giriş empedansından çıkartılan levha direnci. Rezonans frekansında toplam giriş empedansının gerçek kısmı, levha direncinin yarısını verir. Toplam empedansın kendi ekstremumundaki hayali kısmı, rezonans frekanslarının hem sol hem de sağ tarafında grafene ait levha direncinin dörtte birini verir.

Fresnel yansıma katsayısı *(r)* bu tür tabaka direnci ve karakteristik empedans gibi grafen tabakasının içsel özellikleri hakkında yararlı bilgi parçasını içerir. Şekil 4-13 (a)'da aktif cihazın ölçülen Fresnel yansıma katsayısını, 0 ila 2.2 V arasında değişen ön gerilim voltajları ve 7 ila 15 GHz arasında frekanslar için Smith grafiği temsilini (yansımanın karmaşık kutupsal grafiği) kullanarak çizdik. 0 V ön gerilim voltajında (koyu kahverengi eğri) hem yansıma hem de karşılık gelen empedans yüksektir. Rezonans durumu, cihazın toplam empedansı serbest alan empedansı ile eşleştiğinde 0.6 V'da karşılanır. Ön gerilim voltajını

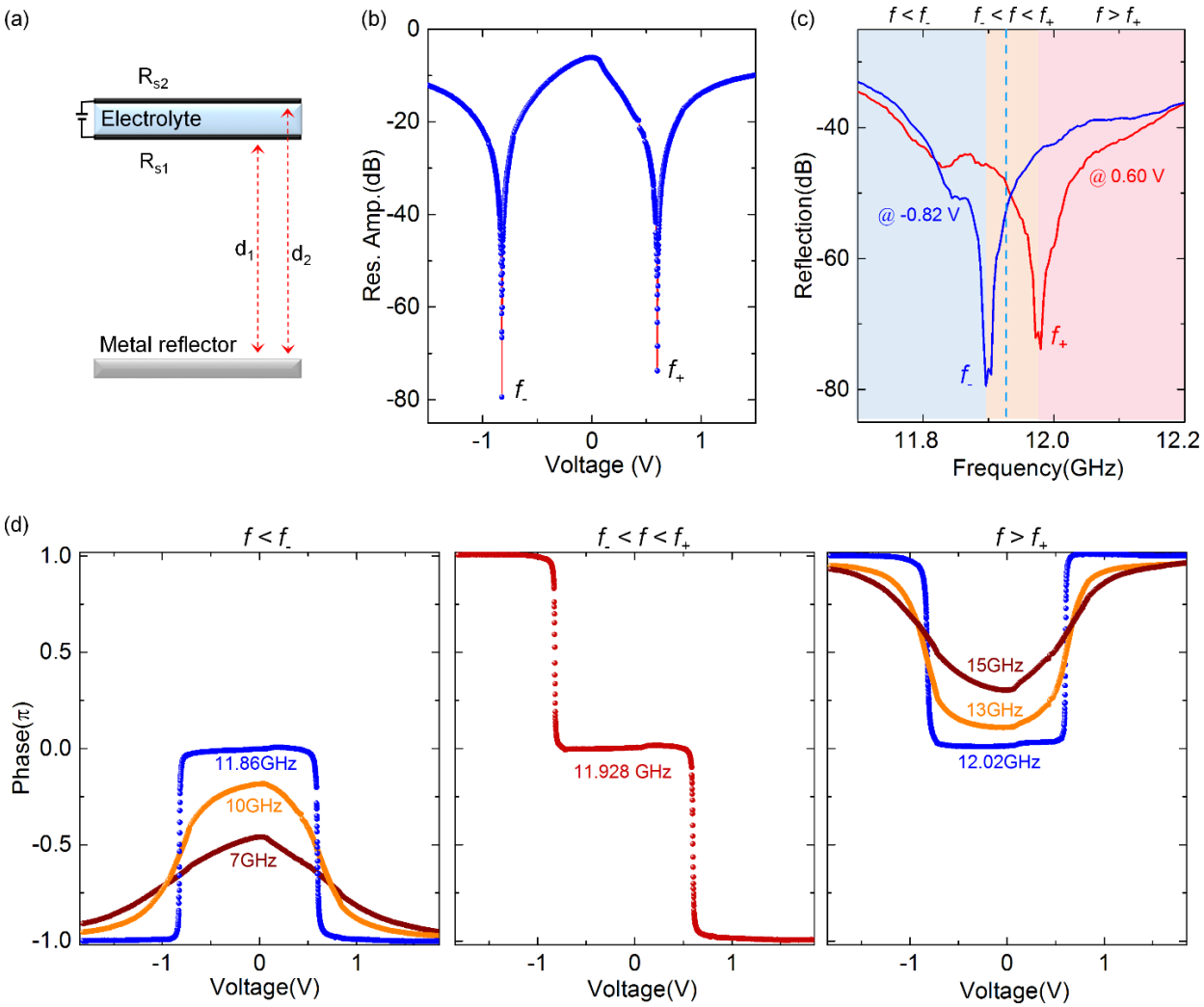
2.2 V arttırmak cihazın empedansını düşürerek yansımayı arttırır. Cihazın mikrodalga performansı ile ilgili daha ayrıntılı bilgi ek materyalde sunulmuştur. Ölçülen Fresnel yansıma katsayısı kullanarak, grafen tabaka direnci elde etmemizi sağlar. Yukarıda verilen denklem cihazın empedansının analitik formunu sağlar. Rezonans frekansında, bu sentezleme tabaka direnci yarısına eşit gerçek değeri vardır. Şekil 4-13 (b)'deki 2 boyutlu haritalar, frekans ve ön gerilim geriliminin bir fonksiyonu olarak cihazın empedansının gerçek ve sanal bölümünü göstermektedir. Gerçek kısım, 11.976 GHz rezonans frekansında 0 V da maksimumu verir. Rezonans frekansındaki empedansın değişimi (Şekil 3 (b)'de dikey çizgi), tabaka direncinin doğru bir şekilde ölçülmesini sağlar. Şekil 4-13 (c), ön gerilim voltajına karşı çizilen levha direncinin çıkarılmış değerlerini göstermektedir. Grafenin levha direncini çıkarmak için toplam giriş empedansının sanal parçasını kullanmak da mümkündür. Şekil 4-13 (b)'de gösterildiği gibi, hayali bölüm rezonans frekansının sol ve sağ tarafında iki maksimuma sahiptir. Bu ekstremum noktalarında, hayali empedans levha direncinin çeyreğini verir. Şekil 4-13 (c)'de empedansın gerçek ve hayali bölümlerinden elde edilen levha direncini karşılaştırabiliriz. Bu yöntem, kontak direncinden katkısı olmaksızın geniş alan grafen katmanlarının doğru bir levha direncini sağlar.



Şekil 4-14. Aktif Salisbury ekranının simülasyonu. (a) Bir Smith şeması ile gösterilen grafenin simüle edilmiş (düz hat) ve ölçülen (dalgalı çizgiler) yansıma katsayısına göre Salisbury ekran. Simülasyonda, frekans 1-23 GHz arasında değişiyor ve levha direnci 0,2-5,0 kΩ arasında değişiyor. Deneysel ölçümler için frekans aralığı 7-15 GHz'dir. (b) Rezonanstaki yansıma genliğinin deneysel ve hesaplanan değerlerinin karşılaştırılması, levha direncine karşı çizilmiştir. (c) Çeşitli frekanslarda fazın değişimi, tabaka direncine karşı çizilmiştir. Kesintisiz çizgiler simülasyon ile sağlanır.

Deneysel gözlemimizi desteklemek için, transfer matrisi biçimciliğini kullanarak cihazımız için niceliksel bir model geliştirdik. Grafen kalınlığı ile mikrodalga dalga boyu arasındaki büyük uyumsuzluk nedeniyle, Sonlu Elemanlar analizi uygun değildir. Bu problemin üstesinden gelmek için, grafeni iletken bir sınır olarak temsil ettik. Biz elektrik ve

manyetik alanlarının teğet bileşenlerinin sürekliliğini kullanarak sınır Fresnel yansıma katsayısı hesaplanır. Sınırın iletkenliği, grafenin frekansa bağlı iletkenliği ile tanımlanır ve bu bantlar arası ve bant içi katkıları, Mikrodalga frekansları için, bantlar katkısından dolayı toplam iletkenliği düşük frekanslı iletkenlik ($\omega << 1/\tau$) verir. İletkenlik Drude modellenebilir ile tanımlanabilir. Metalik bir yüzeye çeyrek-dalga mesafesinde yerleştirilen süperkapasitör geometrisinde, iki grafen katmanın levha direncini 0.2 kΩ'dan 5.0 kΩ'a değiştirdiğimiz için Fresnel yansıma katsayılarını hesapladık. Şekil 4, 7-15 GHz frekans aralığı için deneysel ve hesaplanan sonuçların karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 4-14a'daki Smith grafiği, deneysel ve hesaplanmış karmaşık empedans değerleri arasında güzel bir anlaşma göstermektedir. Grafende levha direnci $2Z_0=754\Omega$ olduğu zaman, rezonans durumu karşılanır ve yansıma deney ve simülasyonda sıfır olur. Tabaka direncinin azaltılması, toplam giriş empedansı azalırken yansımayı daha da arttırır. Şekil 4-14'teki çıkartılmış levha direnci kullanılarak, genlik ve fazın değişimi, grafenin levha direncinin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Model ve deneyler arasında mükemmel bir anlaşma sağladık. Rezonansın yakınında fazda keskin bir değişim görülürken değişim daha uzak frekanslarda daha yumuşak hale gelir. Yoğunluk, dar bir frekans penceresinde geniş modülasyon göstermesine rağmen, faz modülasyonu daha geniş bir pencerede belirgin bir şekilde genişler. Bunun rezonant cihaz mimarisinin benzersiz bir özelliği olduğuna inanıyoruz.



Şekil 4-15. Çift yönlü Faz kontrolü: (a) Aygıtın kesit görüntüsü. Elektrolitin kalınlığı ve grafen tabakaları arasındaki asimetrik doping, pozitif ve negatif ön gerilim voltajları için iki ayrı rezonans verir. (b) Rezonans genliklerinin ön gerilim gerilimi ile değişimi, pozitif ve negatif ön gerilimli gerilimlerdeki rezonansların yoğunlukları benzerdir. (c) Pozitif ve negatif ön gerilim voltajlarında rezonans spektrumu. Üç farklı bölgede $f>f_+$, K_+ için çapraz gerilimi ile aynı fazda (d) ayarlanabilirliği, $<f<f_-$, $f> f_-$.

Aygıtımız, aygıt yapısı nedeniyle uygulanan ön gerilim voltajı ile çift yönlü faz kontrol için ilginç bir yetenek sunmaktadır (Şekil 4-15 (a)). Pozitif ve negatif önyargı voltajları için genlik modülasyonu için simetrik davranış gözlemlenirken, ters polarite yanlı voltajları için biraz farklı rezonans frekansları gözlemledik (Şekil 4-15 (b), (c)). Hafif elektron-delik asimetrisinin kombinasyonu ve elektrolit ortamının kalınlığı, pozitif ve negatif ön gerilim voltajlarındaki rezonanslar arasında 0.1 GHz frekans kayması sağlar (Şekil 4-15c)). Çünkü bu farklı rezonanslarda *(f_+, f_-)* gerilimli voltaj faz kaymaları için üç farklı davranış gözlendi. Birinci bölge $f<f_+$ olarak, bias voltajı polaritesi negatif faz kayma bağımsız görülmektedir. Hem elektron hem de delik yükleme için simetrik negatif faz kayması gözlemledik. Aynı şekilde, üçüncü bölgede, *f>f-* ön yargı voltajının iki polarizasyonu için bir

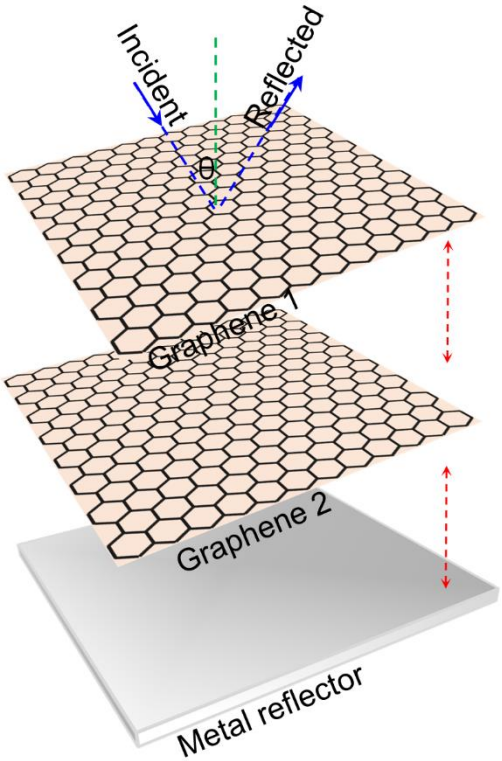
pozitif faz kayması gözlenmektedir. Bu davranış, rezonans etrafında faz kayması gibi basamakla anlaşılabilir. Bununla birlikte, ara bölgede, $f_+ < f < f_-$ dalganın frekansı iki rezonans frekansları arasında olan, ön gerilimleri asimetrik faz kayması gözlenmektedir. Pozitif gerilim uygulamak bu ara frekans bölgesi için, faz kayması, ancak negatif voltajlarda, rezonans frekans kayması, bir negatif faz kayma elde edilmesi *f*- için pozitiftir. Bu, cihazın yükleme ve yapısının asimetrisinden kaynaklanan benzersiz bir avantajdır. Çift yönlü faz kontrolü dar bir frekans penceresi için görünse de grafen katmanları arasındaki mesafeyi artırarak pencerenin genişliği büyütülebilir.

Sonuç olarak, aktif grafen temelli Salisbury ekranını kullanarak elektromanyetik dalgaların fazını kontrol etmenin bir metodunu sunduk. Metodumuz, rezonans etrafında bir faz kayması veren elektriksel olarak kontrollü rezonansa dayanmaktadır. Kendiliğinden kaplanmış grafen kondansatörü, bir metalik reflektörden çeyrek dalga boyu uzaklığına yerleştirildiğinde, elektrik geçitlemeyle kontrol edilebilen bir rezonant yansıma sağlar. Bu konfigürasyonda grafen ayarlanabilir emici tabaka olarak çalışır. Aygıtın yüzey empedansı boş alan empedansı ile eşleştiğinde, 60 dB de bir emilim ve bir faz kayması rezonans durumunda elde edilmiştir. Ölçülen karmaşık yansıma kullanılarak, grafen katmanlarının levha direncinin varyasyonunu ön gerilim voltajı ile çıkarabiliriz. Ayrıca, yüklemenin asimetrisi kullanılarak, uygulanan ön gerilim voltajı ile çift yönlü faz kontrolünü gösterdik. Sonuçlarımız, uzun dalga boyları için ışık-madde etkileşimini kontrol altında tutmak için önemli bir adım teşkil ediyor ve elektriksel olarak kontrollü faz yeteneğinin aktif mikrodalga cihazları için mümkün kılacağını öngörüyoruz.

4.8 Geniş Frekans Bandında Çalışan Grafen Tabanlı Elektriksel Olarak Kontrol Edilebilen Radar Emici Aygıtların Geliştirilmesi

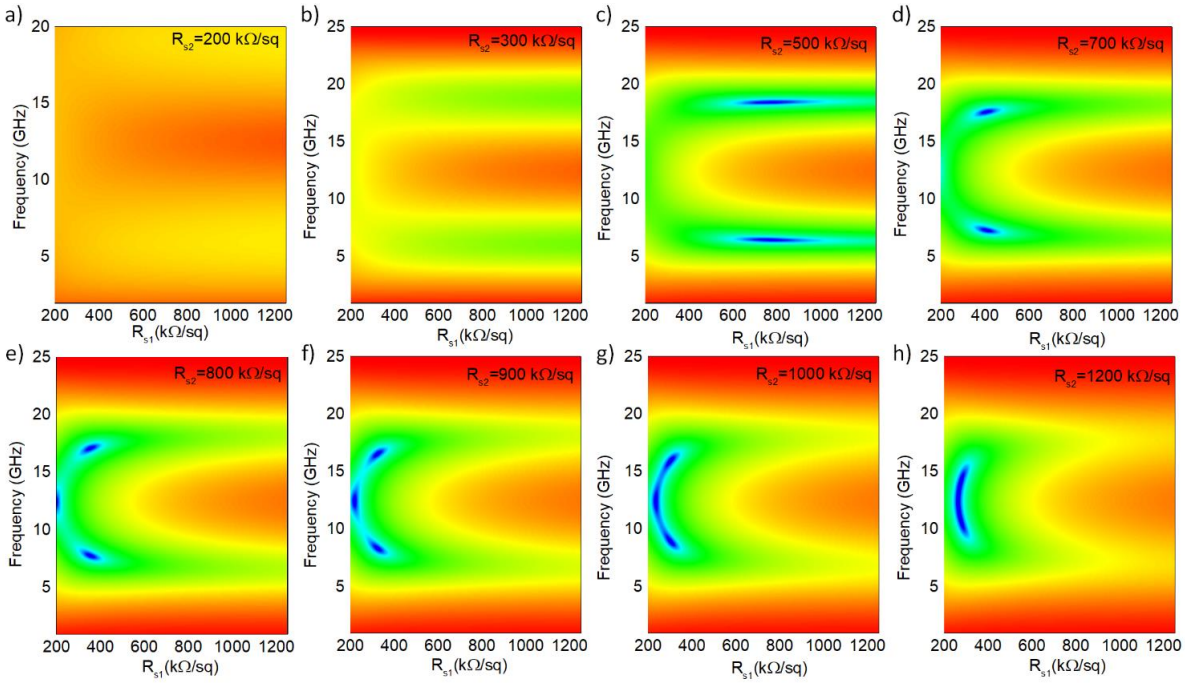
Günümüz radar görüntüleme sistemleri gelişen teknoloji ve aygıt çeşitliliği sayesinde tek bir dalga boyunda çalışmayıp bazen bir frekans bandını bazen de bir elektromanyetik nabıza yüklenmiş geniş spektrumlu dalgaları içermektedir. Bu nedenle geliştirilen radar emici yüzeylerin tek bir dalga boyunda ya da dar bir spektrumda çalışıyor olması geliştirilen metodun gelişen teknolojiler içerisinde sürekli olarak kullanılabilme ihtimalini oldukça azaltmaktadır. Bu proje kapsamında geliştirdiğimiz grafen tabanlı ve aktif kontrol edilebilen radar emici yüzeyler geliştirilme ve çalışma prensibinin gösterilmesi aşamalarında dar bir frekans bandında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu aygıtların kontrol edilebilir biçimde geniş bir bant aralığında çalışabilmesi için daha önce geliştirdiğimiz aygıt yapısına bir katman grafen kapasitör ekleyerek kontrol edilebilir iki farklı oyuğun etkileşmesi amaçlanmıştır. Mikrodalga frekansında elektriksel olarak kontrol edebilen optik özelliklerinden dolayı

kullandığımız grafen kapasitörler bize geniş bant aralığında açılıp kapanabilen radar emici yüzeyler yapmamıza olanak sağlamaktadırlar.



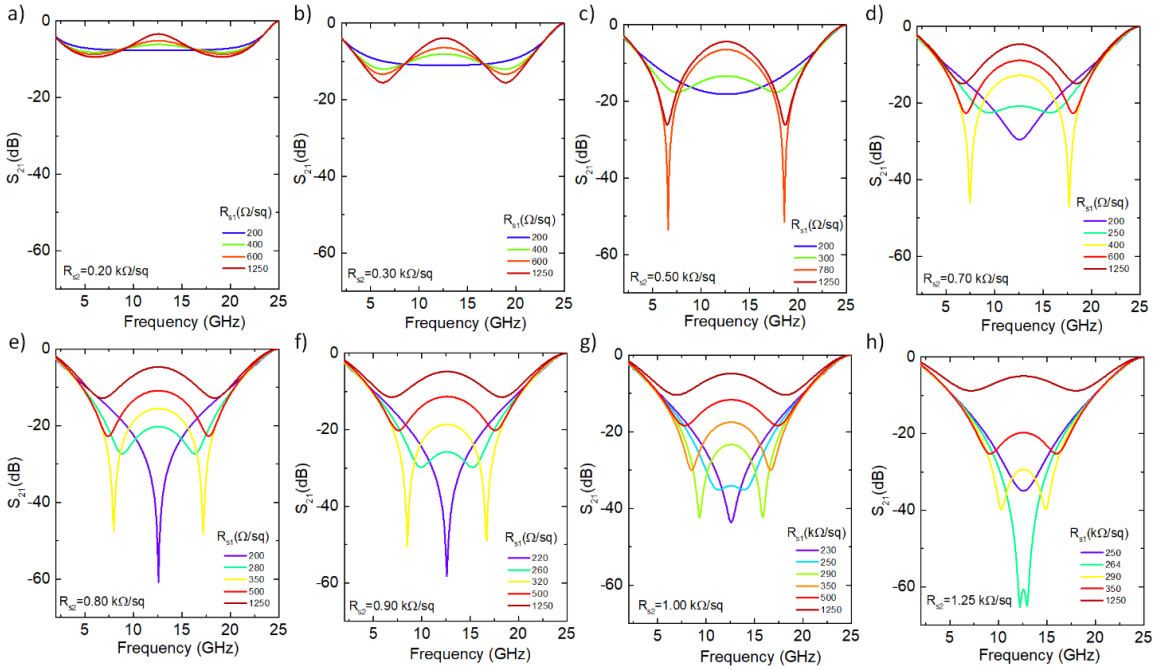
Şekil 4-16. Geniş bant aralığında radar sinyallerini emebilen ve elektriksel olarak kontrol edilebilen iki tabaka grafen kullanılarak tasarlanmış radar emici aygıtın modellemede kullanılan şematik gösterimi.

Tasarladığımız aygıt yapısının optik olarak ne ölçüde etkin çalışabileceğini anlamak amacı ile aygıt yapısını sadeleştirerek transfer matris yöntemi kullanarak simülasyonunu yaptık. Simülasyonu yapılan yapı Şekil 4-16'de gösterilmektedir. İki tane birbirinden elektriksel olarak bağımsız grafen tabakası ile bir yansıtıcı metal yüzey aralarında belirli bir d uzaklığı olacak şekilde yerleştirdik. Daha sonra grafen ve metal yüzeylerinde Maxwell denklemini kullanarak elektrik alanın bu yüzeylerdeki devamlılığı denklemlerini çözerek bu yüzeylerin altında ve üstünde seyahat eden elektromanyetik dalga yoğunluklarını hesapladık. Bu yoğunluklar aslında grafen yüzeylerin iletkenliklerine oldukça bağımlı şekilde değişebilmektedir çünkü grafenin optik özellikleri mikrodalga bölgesinde etkili bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Direnci değişen grafen yüzeyler daha metalik veya daha yalıtkan davranarak yüzeyinden yansıyan ve içinden geçen ve de ayrıca grafenin emdiği mikrodalga yoğunluğunu değiştirebilmektedirler. Bu modellenen aygıt yapısı ile birlikte grafenin bu kontrol edilebilir optik özelliklerini de birleştirerek tasarladığımız geniş bant aralığında çalışabilen radar emici yüzeyleri modelledik.

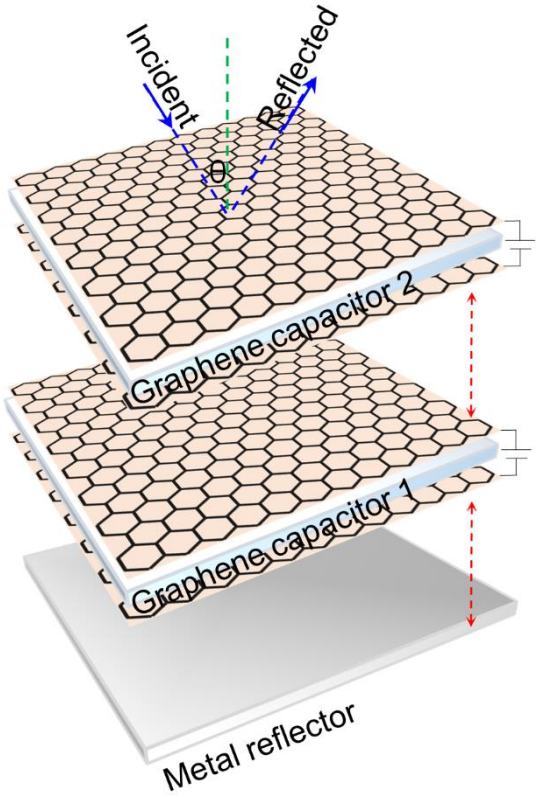


Şekil 4-17. Modellenen grafen tabanlı Jaumann radar emici yüzeylerin grafen yüzeylerin direnci ile değişen yansıma grafikleri. Her bir resimde ortadaki grafenin direnci sabit tutularak en üstteki grafenin direnci taranmış ve yansıyan mikrodalga yoğunluğu kaydedilmiştir. İkinci grafenin direnci 200-ohm dan 1250 ohm'a kadar a)'dan h)'ye kadar değiştirilmiştir.

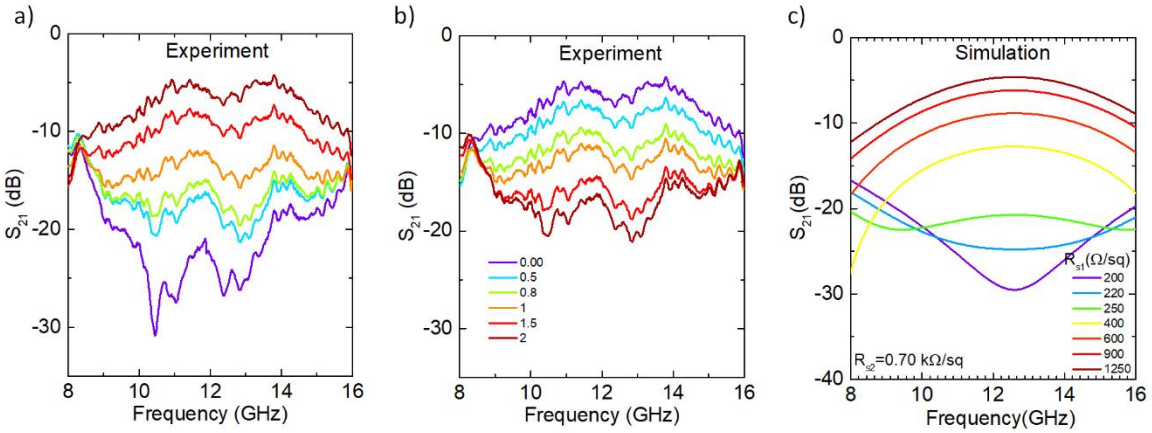
Tasarladığımız aygıt yapısında birbirinden elektriksel olarak bağımsız iki grafen tabakası bulunmaktadır. Bu aygıtın mikrodalga frekansındaki optik özelliklerini anlamak için iki grafen tabakasının direncini birbirinden bağımsız şekilde taradık ve aygıtın yüzeyinden yansıyan mikrodalga yoğunluğunu hesapladık. Ama burada değişken olarak hem frekans hem elektromanyetik dalga yoğunluğu hem de grafen yüzeylerin dirençleri olduğundan her bir resimde ortada bulunan grafen yüzeyinin direncini sabit tutarak en üstteki grafen yüzeyin direncini çok ince aralıklarla değiştirdik. Ortadaki grafen 200-ohm dirence sahip iken birinci grafendeki direnç değişimi yansımada çok önemli bir değişiklik sağlamadı (Şekil 4-17a). İkinci grafenin direncini 300 ohm'a arttırdığımızda yansıyan mikrodalgada biraz geniş bir bantta yoğunluk azalması oluşmuştur (Şekil 4-17b). İkinci grafenin direncini 500-ohm'a yükselttiğimizde birinci grafenin direnci yaklaşık 800-ohm civarına geldiğinde yansıyan mikrodalga yoğunluğu -50 dB seviyelerine kadar düşmüştür. İkinci grafenin direncini daha da arttırdığımızda rezonans oluşması için birinci grafenin sahip olması gereken direnç değeri 200-ohm'lara kadar düşmüştür. En son 1200-ohm seviyelerine geldiğinde rezonansın genişliği giderek daralmaya başlamaktadır.



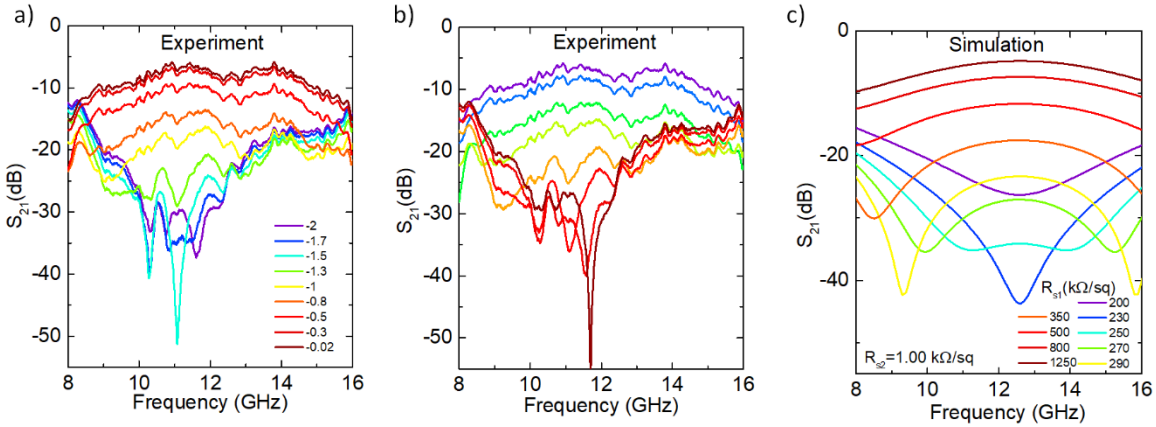
Şekil 4-18. Modellenen grafen tabanlı Jaumann radar emici yüzeylerin grafen yüzeylerin direnci ile değişen yansıma spektrumları gösterilmiştir. Birinci ve ikinci grafenin dirençleri 200-ohm'dan 1250-ohm'a kadar değiştirilmiştir.



Şekil 4-19. İki tabaka grafen kapasitör kullanılarak üretilen grafen tabanlı Jaumann radar emici yüzeylerin şematik gösterimi.



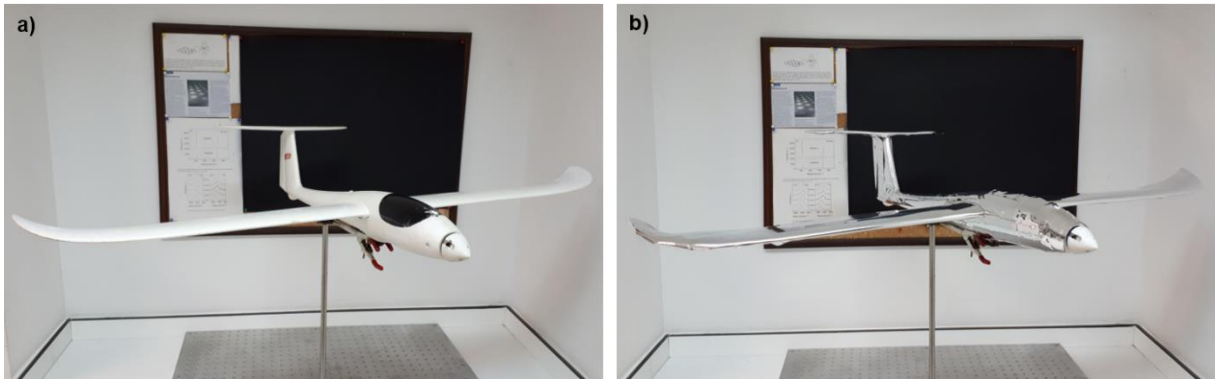
Şekil 4-20. Üretilen ve modellenen geniş bant aralığında çalışabilen radar emici yüzeylerin karşılaştırılması. Birinci grafen kapasitöre uygulanan voltaj taranırken ikinci grafen kapasitördeki voltaj 0 V da tutulmuştur.



Şekil 4-21. Üretilen ve modellenen geniş bant aralığında çalışabilen radar emici yüzeylerin karşılaştırılması. Birinci grafen kapasitöre uygulanan voltaj taranırken ikinci grafen kapasitördeki voltaj 0.6 V da tutulmuştur.

4.9 Prototip üretilmesi

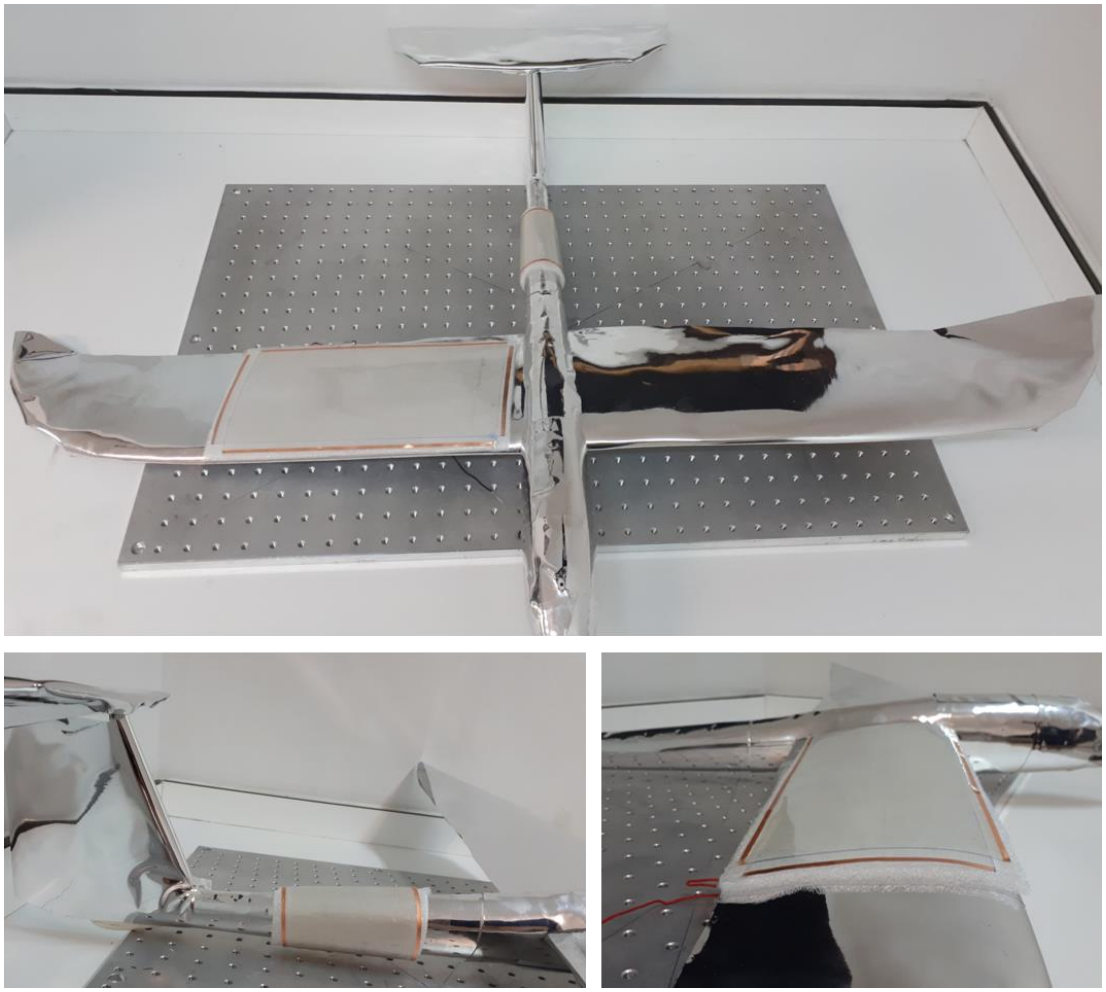
Bu bölümün amacı projede geliştirdiğimiz aygıtların laboratuvar ortamında geniş alanlarda üretilebileceğini ve bir uçak modelinin eğri yüzeyleri ile entegre edilebildiğinin gösterilmesidir. Bu bölümde grafen tabanlı radar kesit alanı değişebilen yüzeylerin uygulaması olarak bir model uçağın kanat ve gövde parçalarının grafen ile kaplanması ve radar kesit alanı ölçümleri ile ilgili çalışmalar anlatılmıştır. Bu çalışmalar için polistren malzemeden üretilmiş kanat açıklığı 110 cm ve uzunluğu 75 cm olan bir model uçak kullanılmıştır. Bu model uçak Şekil 4-22.a'da görülebilmektedir. Daha sonra uçak yüzeyi bir yüzeyi kâğıt diğer yüzeyi alüminyum olan malzeme ile alüminyum tarafı dışarı gelecek şekilde kaplanmıştır. Uçak yüzeyinin alüminyum ile kaplanma amacı ölçümler sırasında kullanılacak olan 7,5 - 18 GHz frekans aralığına denk gelen yaklaşık olarak 39 – 16 mm dalga boyları aralığındaki mikrodalgalar için yansıtıcı bir yüzey elde etmektir. Uçağın kaplanmış hali Şekil 4-22.b'de görülebilmektedir.



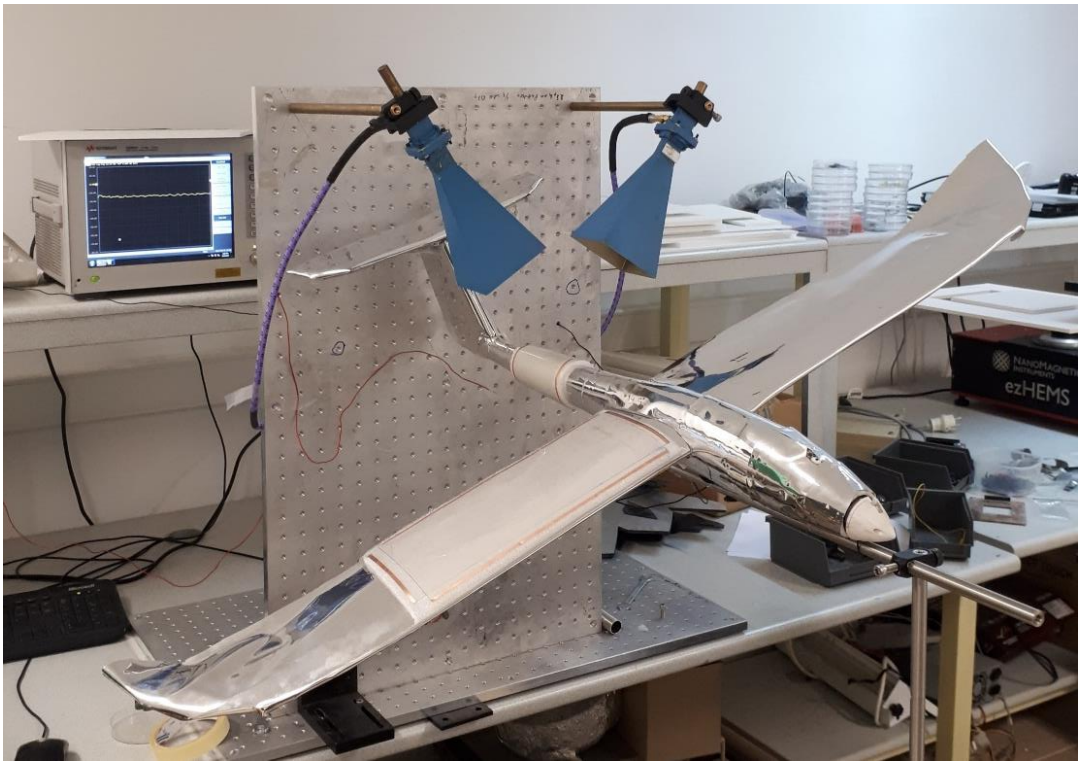
Şekil 4-22. (a) Çalışmalarda kullanılan model uçak, (b) uçak yüzeyinin mikrodalgaları yansıtan alüminyum levha ile kaplandıktan sonraki hali

Uçak yüzeyi iletken alüminyum malzeme ile kaplandıktan sonra kanatları ve gövdesi grafen tabanlı aygıt ile kaplanmıştır. Bu aygıtın her iki elektrodu da CVD ile büyütülmüş grafenden oluşmaktadır ve bu iki elektrodun arası iyonik sıvı ile doldurulmuştur. İki grafen arası boşluk yaklaşık olarak 5 mm'dir. Bakır folyolar üzerinde büyütülen tek katmanlı grafenler daha sonra PVC malzeme üzerine laminasyon ile transfer edilmiştir ve son olarak bakır malzeme kaldırılarak PVC üzerinde tek katmanlı grafen elde edilmiştir. Alltaş olarak PVC'nin seçilmesinin sebebi hem grafene destek tabaka olması hem de çalışılan dalga boyu aralığında geçirgen olmasından kaynaklanmaktadır. Bu işlem sırasında kanat ve gövde üzerine yerleştirilen grafen tabanlı cihazlar Şekil 4-23'de görülebilmektedir. Radar kesit alanı

ölçümleri alınırken uçak farklı açılarda döndürülerek Şekil 4-24'de görülen deneysel düzenek ile ölçümler alınmıştır.



Şekil 4-23. Kanat ve gövde üzerine yerleştirilmiş grafen tabanlı aygıtlar, kanat düzlemsel yüzey ve gövde ise dairesel yüzey olarak farklı geometrilere sahip aygıtların üretilmesini gerek kılmıştır.



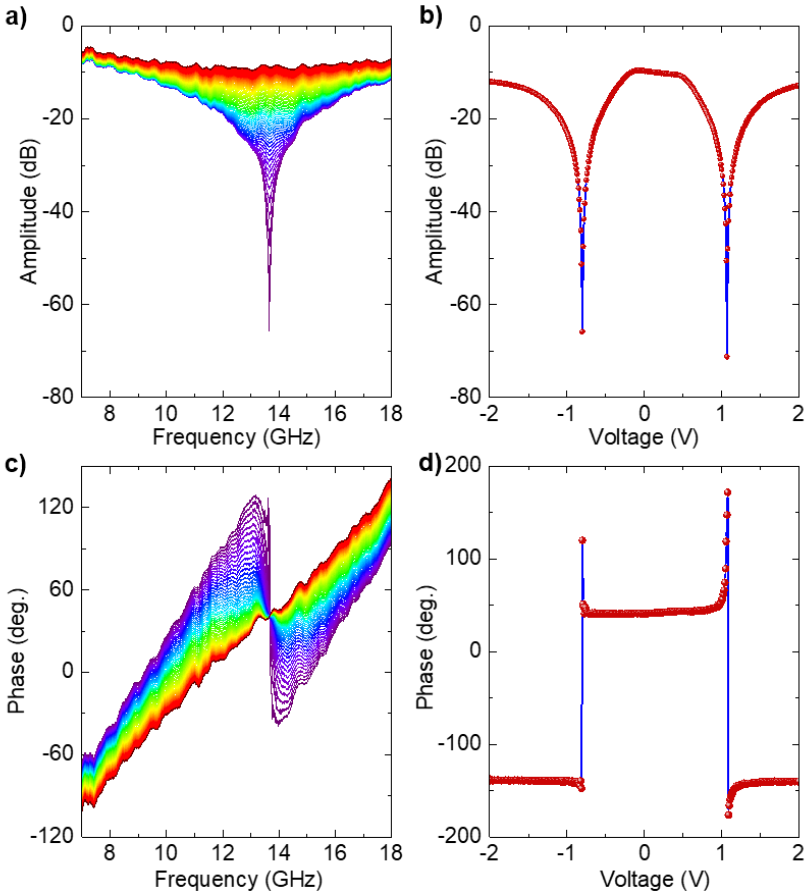
Şekil 4-24. Ölçümler sırasında kullanılan deneysel düzenek ve farklı açılarda radar kesit alanı ölçümleri.

Uçak yüzeyi farklı geometrik şekillerden oluştuğu için düzlemsel yüzeyleri temsilen kanat bölgesi ve dairesel yüzeyleri temsilen ise gövde üzerinden yansıma ölçümleri yapılmıştır. Gövde yüzeyi dairesel olduğu için uçak gövde ekseni etrafında döndürülerek bu yüzey üzerinden alınan ölçümler farklı açılarda tekrarlanmıştır. Ölçümler 0,1 GHz – 18 Ghz çalışma aralığı olan bir network analizörü ve horn tipi yayıcı ve alıcı antenler kullanılarak 7,5 – 18 Ghz frekans aralığı taranarak yapılmıştır. Bir güç kaynağı yardımıyla grafen tabanlı aygıtlara -2V – 2V aralığında gerilim uygulanmıştır. Her iki elektrodu da grafenden oluşan bu aygıtlarda bir grafen elektrota voltaj uygulanmış diğeri ise topraklanmıştır.

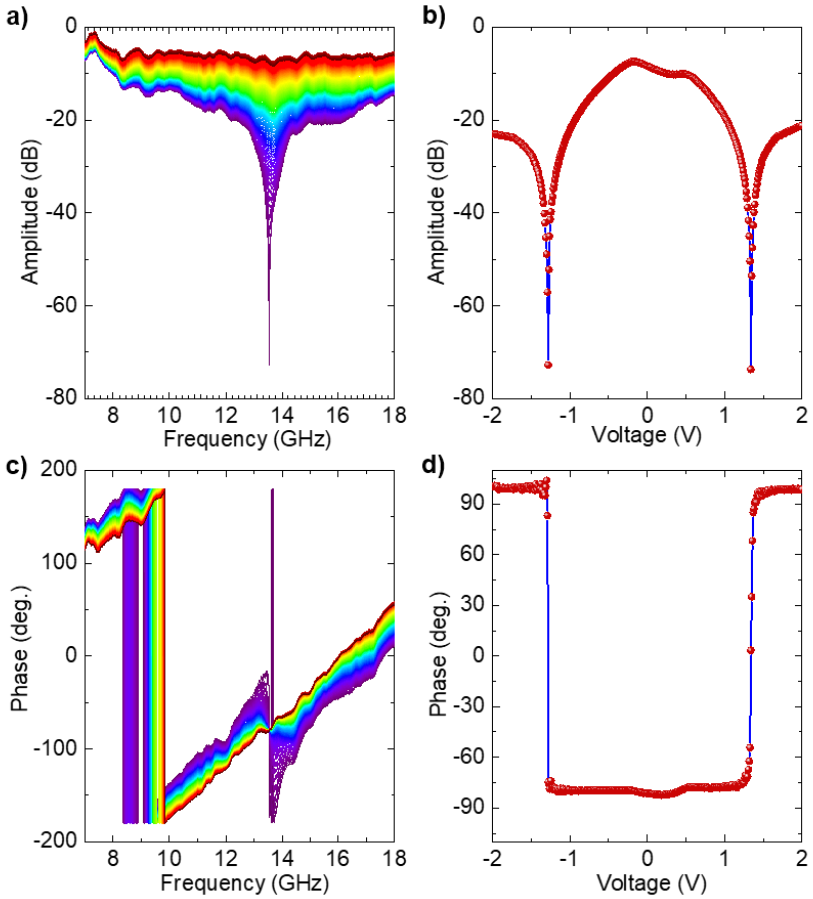
Alüminyum yüzey üzerine gelen elektromanyetik mikrodalgalar için yansıtıcı yüzey görevi görmektedir. Grafenin intraband optik geçirgenliği ise uygulanan voltaj ile kontrol edilebilmektedir. Pozitif ya da negatif ön gerilim voltajları uygulanarak optik geçirgenlik Dirak noktasının her iki tarafında simetrik olarak kontrol edilebilmektedir. İntraband optik geçirgenlik belli bir voltaj değerine gelindiğinde minimum olmakta ve bu noktada grafen üzerine gelen elektromanyetik mikrodalgaların bir kısmını emmekte ve diğer kısmı için ise yansıtıcı yüzey görevi görmektedir. Aygıtta iki grafen arasındaki boşluğun 4 katına eşdeğer gelen dalga boyunda grafen yüzeyinde yansıyan mikrodalgalar alt tarafta yer alan alüminyum yüzeyden yansıyan mikrodalgalar ile birleşerek birbirini iptal etmektedir. Sonuç olarak yüzeye

gönderilen elektromanyetik dalgalar geriye yansımamakta ve geriye yansıyan bir sinyal olmadığı için de radar görünmezliği sağlanmış olmaktadır.

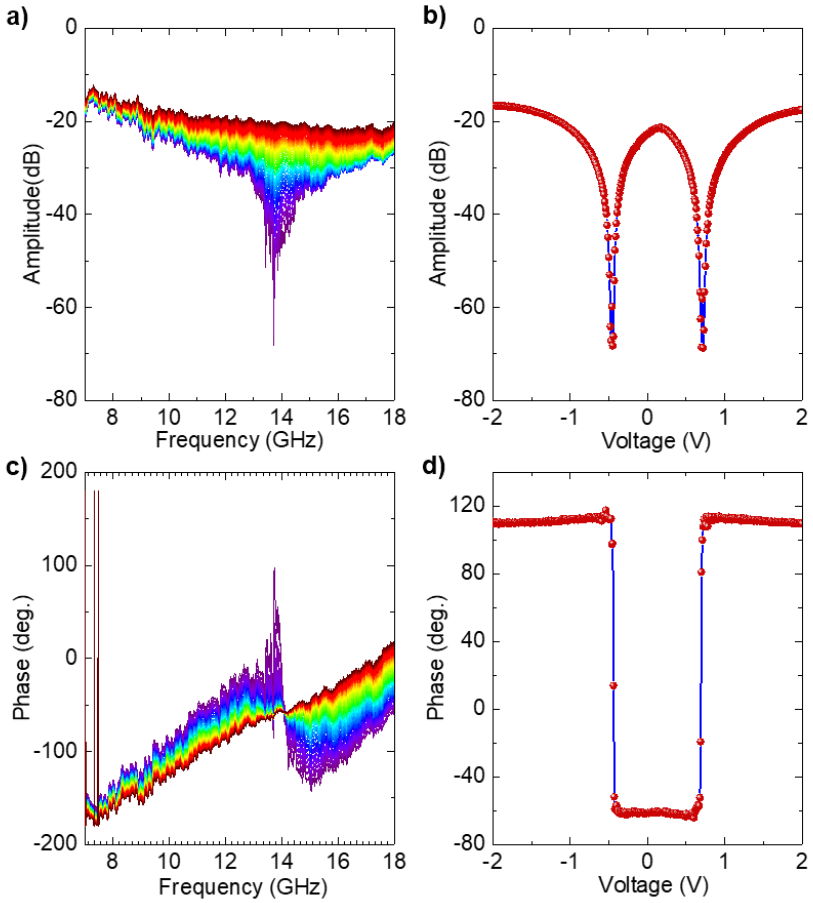
Düzlemsel yüzey olarak kanat bölgesinden s ve p polarize dalgalar ve dairesel gövde yüzeyi üzerinden s polarize dalgalar kullanılarak yapılan ölçümlerin sonuçları sırasıyla Şekil 4-23, Şekil 4-24 ve Şekil 4-25'da gösterilmiştir. Şekiller sırasıyla dalga gücündeki ve fazındaki değişimleri voltaja bağlı olarak gösterirken, -2V ve 2V aralığında rezonans frekansındaki dalga gücü ve faz değişimlerini göstermektedir. Uçak yüzeyinde hem düzlemsel (kanat) hem de dairesel (gövde) bölgeler üzerinde iki grafen arasındaki 5mm'lik boşluğa bağlı olarak 14 GHz civarında rezonans frekansı olduğu tespit edilmiştir. 14 GHz frekansı dalga boyu olarak 21 mm yani aradaki 5 mm'lik boşluğun yaklaşık olarak 4 katına denk geldiği için bu frekansta alüminyum yüzey ve grafenden yansıyan mikrodalgalar birbirlerini iptal etmektedir. Rezonans frekansının uçak parçalarının geometrik şekillerinden bağımsız olarak, farklı geometrik şekillere sahip bölgeler üzerinde değişmeden sabit kaldığı tespit edilmiştir. Rezonans frekansında aygıt yüzeyinden yansıyan mikrodalgaların genliğinde 60dB'lik düşüş gözlemlenmiştir. -60 dB'lik bu değişim aygıt yüzeyinden yansıyan dalga oranının %0,00 olduğu anlamına gelmektedir. Ölçümler sırasında elde edilen rezonans frekansının uçağın farklı bölgelerinde sabit ancak rezonansın elde edildiği voltajların düzlemsel ve dairesel yüzeyler üzerinde farklılık göstermesinin sebebi olarak yüzey geometrilerinin farklı olması düşünülmektedir. Kanat bölgesi üzerinden hem s hem de p polarize ölçümler yapılırken dairesel gövde parçası üzerinden sadece s polarize ölçüm yapılmasının sebebi ise gövde yüzeyi dairesel olduğu için antenler ve aygıt yüzeyi arasındaki mesafenin sabit olmamasından kaynaklı olarak p polarize dalgaların değişken ve s polarize dalgaların sabit güç ve fazda olmasındandır.



Şekil 4-25. Kanat bölgesi üzerinden alınmış s polarize ölçüm sonuçları, (a) farklı voltajlarda frekansa bağlı güç değişimi, (b) farklı voltajlarda frekansa göre fazın değişimi, (c) rezonans frekansında voltaja göre güç değişimi, (d) rezonans frekansında voltaja göre fazın değişimi



Şekil 4-26. Kanat bölgesi üzerinden alınmış p polarize ölçüm sonuçları, (a) farklı voltajlarda frekansa bağlı güç değişimi, (b) farklı voltajlarda frekansa göre fazın değişimi, (c) rezonans frekansında voltaja göre güç değişimi, (d) rezonans frekansında voltaja göre fazın değişimi



Şekil 4-27. Gövde bölgesi üzerinden alınmış s polarize ölçüm sonuçları, (a) farklı voltajlarda frekansa bağlı güç değişimi, (b) farklı voltajlarda frekansa göre fazın değişimi, (c) rezonans frekansında voltaja göre güç değişimi, (d) rezonans frekansında voltaja göre fazın değişimi

5. SONUÇ

Sonuç olarak bu proje kapsamında yeni nesil akıllı mikrodalga yüzeyler geliştirilmiştir. Geniş alan grafen kimyasal buhar biriktirme metodu ile bakır alttaş üzerinde sentezlendikten sonra mikrodalga geçirgen polimer alttaşlar üzerine aktarılmıştır. İki geniş alan grafen arasına iyonik sıvı elektrolit konularak elde edilen süperkapasitör yapısı aygıt üzerinden yansıyan mikrodalgaların elektriksel olarak kontrol edilmesine olanak sağlamıştır. Bu proje sayesinde literatürde ilk defa, aktif grafen aygıtlar yardımıyla mikrodalgaların yansıması ve geçirgenliği voltaj ile kontrol edilmiştir. Proje kapsamında üretilen aktif mikrodalga yüzeyler metamalzemeler ile bütünleştirilerek daha fonksiyonel aktif metamalzemeler üretilmiştir. Projede elde edilen sonuçları bir adım daha ileriye götürerek, mikrodalgaların fazını da kontrol etmeyi başardık. Projenin son kısmında üretilen aktif mikrodalga yüzeyler bir model

uçak üzerinde uygulanarak geniş alan eğri yüzeylerde de bu aygıtların çalışabileceği gösterildi.

6. KAYNAKLAR

Ando, T., A. B. Fowler, vd. 1982. "Electronic-Properties of Two-Dimensional Systems", Reviews of Modern Physics, 54(2), 437-672.
Aydin, K. and E. Ozbay. 2007. "Capacitor-loaded split ring resonators as tunable metamaterial components", Journal of Applied Physics, 101(2).
Balci, O., N. Kakenov, vd. 2017. "Controlling phase of microwaves with active graphene surfaces" Applied Physics Letters, 110(16).
Balci, O., E. O. Polat, vd. 2015. "Graphene-enabled electrically switchable radar-absorbing surfaces", Nat Commun, 6.
Balci, O., E. O. Polat, vd. 2015. "Graphene-enabled electrically switchable radar-absorbing surfaces ", Nature Communications, 6, 6628.
Baylam, I., M. N. Cizmeciyan, vd. 2014. "Femtosecond pulse generation with voltage-controlled graphene saturable absorber", Optics Letters, 39(17), 5180-5183.
Chen, H. T., W. J. Padilla, vd. 2009. "A metamaterial solid-state terahertz phase modulator", Nature Photonics, 3(3), 148-151.
Chen, H. T., W. J. Padilla, vd. 2006. "Active terahertz metamaterial devices", Nature 444(7119), 597-600.
Chen, H. Y., C. T. Chan, vd. 2010. "Transformation optics and metamaterials", Nature Materials, 9(5), 387-396.
Costa, F., A. Monorchio, vd. 2011. "Tunable High-Impedance Surface With a Reduced Number of Varactors", Ieee Antennas and Wireless Propagation Letters, 10, 11-13.
Cui, T. J., M. Q. Qi, vd. 2014. "Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials", Light-Science & Applications, 3.
Della Giovampaola, C. and N. Engheta. 2014. "Digital metamaterials", Nature Materials, 13(12), 1115-1121.
Emani, N. K., T. F. Chung, vd. 2012. "Electrically Tunable Damping of Plasmonic Resonances with Graphene", Nano Letters, 12(10), 5202-5206.
Ford, K. L. and B. Chambers. 2000. "Smart microwave absorber", Electronics Letters, 36(1), 50-52.
Freeman, J. L., B. J. Lamberty, vd. 1992. "Optoelectronically Reconfigurable Monopole Antenna", Electronics Letters, 28(16), 1502-1503.
Gardner, D. F., J. S. Evans, vd. 2011. "Towards Reconfigurable Optical Metamaterials: Colloidal Nanoparticle Self-Assembly and Self-Alignment in Liquid Crystals", Molecular Crystals and Liquid Crystals, 545, 1227-1245.
Goldflam, M. D., T. Driscoll, vd. 2011. "Reconfigurable gradient index using VO2 memory metamaterials", Applied Physics Letters, 99(4).
Golovin, A. B. and O. D. Lavrentovich. 2009. "Electrically reconfigurable optical metamaterial based on colloidal dispersion of metal nanorods in dielectric fluid", Applied Physics Letters, 95(25).
Grewal, G. and G. W. Hanson. 2003. "Optically-controlled solid-state plasma leaky-wave antenna", Microwave and Optical Technology Letters, 39(6), 450-453.
Han, J. and A. Lakhtakia. 2009. "Semiconductor split-ring resonators for thermally tunable terahertz metamaterials", Journal of Modern Optics, 56(4), 554-557.
Han, J. G., A. Lakhtakia, vd. 2008. "Terahertz metamaterials with semiconductor split-ring resonators for magnetostatic tunability", Optics Express, 16(19), 14390-14396.
Hand, T. H. and S. A. Cummer. 2010. "Reconfigurable Reflectarray Using Addressable Metamaterials", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 9, 70-74.
Hansen, R. C. and M. Burke. 2000. "Antennas with magneto-dielectrics", Microwave and Optical Technology Letters, 26(2), 75-78.
Haupt, R. L. and M. Lanagan. 2013. "Reconfigurable Antennas", Ieee Antennas and Propagation Magazine, 55(1), 49-61.
Jackson, J. D. 1962. Classical electrodynamics. New York etc: Wiley.

Ju, L., B. S. Geng, vd. 2011. "Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials", Nature Nanotechnology 6(10), 630-634.
Kakenov, N., O. Balci, vd. 2016. "Observation of Gate-Tunable Coherent Perfect Absorption of Terahertz Radiation in Graphene", ACS Photonics 3(9), 1531-1535.
Kakenov, N., T. Takan, vd. 2015. "Graphene-enabled electrically controlled terahertz spatial light modulators", Optics Letters, 40(9), 1984-1987.
Kim, J., H. Son, vd. 2012. "Electrical Control of Optical Plasmon Resonance with Graphene", Nano Letters, 12(11), 5598-5602.
Koppens, F. H. L., D. E. Chang, vd. 2011. "Graphene Plasmonics: A Platform for Strong Light-Matter Interactions", Nano Letters, 11(8), 3370-3377.
Lee, C. M., C. Zhang, vd. 2015. "4 Gbps direct modulation of 450 nm GaN laser for high-speed visible light communication", Optics Express, 23(12), 16232-16237.
Lee, J., W. Bao, vd. 2014. "Switching Individual Quantum Dot Emission through Electrically Controlling Resonant Energy Transfer to Graphene", Nano Letters, 14(12), 7115-7119.
Lee, S. H., J. Choi, vd. 2013. "Ultrafast refractive index control of a terahertz graphene metamaterial", Scientific Reports, 3.
Lee, S. H., M. Choi, vd. 2012. "Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials", Nature Materials, 11(11), 936-941.
Li, Q., Z. Tian, vd. 2015. "Dual control of active graphene-silicon hybrid metamaterial devices", Carbon, 90, 146-153.
Liu, A. S., R. Jones, vd. 2004. "A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor", Nature, 427(6975), 615-618.
Liu, P. Q., I. J. Luxmoore, vd. 2015. "Highly tunable hybrid metamaterials employing split-ring resonators strongly coupled to graphene surface plasmons", Nat Commun, 6, 8969.
Ma, F. S., Y. S. Lin, vd. 2014. "Tunable multiband terahertz metamaterials using a reconfigurable electric split-ring resonator array", Light-Science & Applications, 3.
Mak, K. F., L. Ju, vd. 2012. "Optical spectroscopy of graphene: From the far infrared to the ultraviolet", Solid State Communications, 152(15), 1341-1349.
Miao, Z. Q., Q. Wu, vd. 2015. "Widely Tunable Terahertz Phase Modulation with Gate-Controlled Graphene Metasurfaces", Physical Review X, 5(4).
Mirsaneh, M., E. Furman, vd. 2010. "Frequency dependent electrical measurements of amorphous GeSbSe chalcogenide thin films", Applied Physics Letters, 96(11).
Ou, J. Y., E. Plum. vd. 2013. "An electromechanically reconfigurable plasmonic metamaterial operating in the near-infrared", Nature Nanotechnology, 8(4), 252-255.
Ozbay, E. 2006. "Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions", Science, 311(5758), 189-193.
Pendry, J. B., D. Schurig, vd. 2006. "Controlling electromagnetic fields", Science, 312(5781), 1780-1782.
Polat, E. O., O. Balci, vd. 2014. "Graphene based flexible electrochromic devices", Scientific Reports, 4.
Polat, E. O. and C. Kocabas. 2013. "Broadband Optical Modulators Based on Graphene Supercapacitors", Nano Letters, 13(12), 5851-5857.
Pozar, D. M. and V. Sanchez. 1988. "Magnetic Tuning of a Microstrip Antenna on a Ferrite Substrate", Electronics Letters, 24(12), 729-731.
Pryce, I. M., K. Aydin, vd. 2010. "Highly Strained Compliant Optical Metamaterials with Large Frequency Tunability", Nano Letters, 10(10), 4222-4227.
Ren, L., Q. Zhang, vd. 2012. "Terahertz and Infrared Spectroscopy of Gated Large-Area Graphene", Nano Letters, 12(7), 3711-3715.
Reynet, O. and O. Acher 2004. "Voltage controlled metamaterial", Applied Physics Letters, 84(7), 1198-1200.
Rouhi, N., S. Capdevila, vd. 2012. "Terahertz graphene optics" Nano Research, 5(10), 667-678.
Sensale-Rodriguez, B., T. Fang, vd. 2011. "Unique prospects for graphene-based terahertz modulators", Applied Physics Letters, 99(11).
Sensale-Rodriguez, B., R. S. Yan, vd. 2012. "Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions", Nat Commun, 3.
Sensale-Rodriguez, B., R. S. Yan, vd. 2012. "Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions", Nature Communications, 3.
Sensale-Rodriguez, B., R. S. Yan, vd. 2013. "Graphene for Reconfigurable Terahertz Optoelectronics", Proceedings of the IEEE, 101(7), 1705-1716.

Sensale-Rodriguez, B., R. S. Yan, vd. 2012. "Extraordinary Control of Terahertz Beam Reflectance in Graphene Electro-absorption Modulators", Nano Letters, 12(9), 4518-4522.
Shcherbin, K., I. Gvozdovskyy, vd. 2016. "Infrared sensitive liquid crystal light valve with semiconductor substrate", Applied Optics, 55(5), 1076-1081.
Shin, D., Y. Urzhumov, vd. 2012. "Broadband electromagnetic cloaking with smart metamaterials", Nat Commun, 3.
Sun, S. L., Q. He, vd. 2012. "Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves", Nature Materials, 11(5), 426-431.
Tao, H., W. J. Padilla, vd. 2011. "Recent Progress in Electromagnetic Metamaterial Devices for Terahertz Applications", Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 17(1), 92-101.
Tao, H., A. C. Strikwerda, vd. 2009. "Reconfigurable Terahertz Metamaterials", Physical Review Letters, 103(14).
Tao, H., A. C. Strikwerda, vd. 2011. "MEMS Based Structurally Tunable Metamaterials at Terahertz Frequencies", Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 32(5), 580-595.
Tassin, P., T. Koschny, vd. 2013. "Graphene for Terahertz Applications", Science, 341(6146), 620-621.
Turpin, J. P., J. A. Bossard, vd. 2014. "Reconfigurable and Tunable Metamaterials: A Review of the Theory and Applications", International Journal of Antennas and Propagation.
Urzhumov, Y., J. S. Lee, vd. 2012. "Electronically reconfigurable metal-on-silicon metamaterial", Physical Review B, 86(7).
Valmorra, F., G. Scalari, vd. 2013. "Low-Bias Active Control of Terahertz Waves by Coupling Large-Area CVD Graphene to a Terahertz Metamaterial", Nano Letters, 13(7), 3193-3198.
Vendik, O. G., E. K. Hollmann, vd. 1999. "Ferroelectric tuning of planar and bulk microwave devices", Journal of Superconductivity, 12(2), 325-338.
Wang, J. Q., S. C. Liu, vd. 2013. "Reconfigurable liquid metal based terahertz metamaterials via selective erasure and refilling to the unit cell level", Applied Physics Letters, 103(22).
Werner, D. H., D. H. Kwon, vd. 2007. "Liquid crystal clad near-infrared metamaterials with tunable negative-zero-positive refractive indices", Optics Express, 15(6), 3342-3347.
Wright, P. V., B. Chambers, vd. 2000. "Progress in smart microwave materials and structures", Smart Materials & Structures, 9(3), 273-279.
Wu, Y., C. La-o-Vorakiat, vd. 2015. "Graphene Terahertz Modulators by Ionic Liquid Gating", Advanced Materials, 27(11), 1874-+.
Xia, J. L., F. Chen, vd. 2009. "Measurement of the quantum capacitance of graphene", Nature Nanotechnology, 4(8), 505-509.
Xu, Q. F., B. Schmidt. vd. 2005. "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator", Nature, 435(7040), 325-327.
Yao, Y., M. A. Kats, vd. 2013. "Broad Electrical Tuning of Graphene-Loaded Plasmonic Antennas", Nano Letters,13(3), 1257-1264.
Zheludev, N. I. and Y. S. Kivshar. 2012. "From metamaterials to metadevices", Nature Materials, 11(11), 917-924.
Zhu, B., Y. J. Feng, vd. 2010. "Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector/absorber", Optics Express, 18(22), 23196-23203.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. COŞKUN KOCABAŞ
Proje No:	114F052
Proje Başlığı:	Grafen Tabanlı Radar Kesit Alanı Değisebilen Yüzeyler
Proje Türü:	1003 - Öncelikli Alanlar (2. Aşama)
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İHSAN DOĞRAMACI BİLKENT Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/12/2014 - 15/06/2017
Onaylanan Bütçe:	724234.0
Harcanan Bütçe:	553651.45
Öz:	Mikrodalgalar elektromanyetik spektrumun dalga-boyu 1mm ile 1m arasındaki bölgeyi kapsamaktadır. Radar teknolojileri mikrodalgaların yüzeylerden yansımasını ölçerek cisimlerin şeklinin ve büyüklüğünün uzaktan algılanmasını sağlamaktadır. Metal yüzeyler mikrodalgaları yansıttığı için radarlar tarafından rahatlıkla algılanmaktadır. Radar emici malzemeler mikrodalgaların yüzeyden yansımalarını azaltarak cisimlerin uzaktan algılanmalarını engellemek için kullananılmaktadır. Radar emici yüzeyler genel olarak elektriksel iletkenliği düşük karbon ve metal parçacıklarının karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Radar emici yüzeyler pasif yüzeylerdir ve mikrodalga yansımaları aktif olarak kontrol edilememektedir. Elektriksel olarak kontrol edilebilen radar emiçi yüzeyler günümüz teknolojisinde mevcut degildir. Bu proje kapsamında geniş alan grafen elektrotlar kullanarak akıllı radar emici yüzeyler üretilmiştir. Projenin ana hedefi 1-20 GHz frekans bandında çalışan mikrodalga yansıması voltaj ile değişebilen, radar sinyallerini 0-100% arasında soğurabilen aktif yüzeylerin üretilmesidir. Grafen elektrotlar arsına iyonik sıvı electrolit konularak üretilen kapasitör yapısı ile grafen üzerindeki yüklerin yoğunluğu kontrollü bir şekilde ayarlanblmektedir. Grafenin tek atom kalınlığındaki yapısı sayesinde, mikrodalga yansıması yük yogunluğunu değiştirerek kontrol edilmektedir. Bu proje kapsamında 3 farklı resonant aygıt yapısı kullanarak grafen elektrotarın mikrodalgaların kontrollü bir şekilde emmesi sağlanacaktır. Projede 1. Aktif Salibury yüzeyi, 2. Aktif metamalzeme yüzeyi, ve 3. Jaumann yüzey üretildi. Bu aygıtların performanslarını artırmak için farklı iyonik sıvılar ve kapasitör yapıları test edildi. Projenin son kısmında geliştirilen aktif mikrodalga yüzeyleri kullanarak bir prototip ürettik. Bir maket uçağın gövdesi ve kanatları projede geliştirilecek aktif yüzeyler ile kaplanarak mikrodalga yansıması voltaj ile kontrol edildi. Bu projenin sonuçları prestijli 3 bilimsel makale ile sonuçlandı. Bu proje kapsamında yürütülen bilimsel çalışmalar, proje yöneticisinin ve araştırmacıların akademik kariyerine katkıda bulunmuştur.
Anahtar Kelimeler:	Grafen, radar, mikrodalga, 2-boyutlu yarıiletkenler, kimyasal buhar biriktirme, süperkapasitör,
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Graphene-enabled electrically switchable radar-absorbing surfaces (Makale - Diğer Hakemli Makale),

TÜBİTAK