TÜBİTAK

Germanyum Alttaş ve Optik Pencere Geliştirilmesi

Program Kodu: 1005

Proje No: 115F048

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Araştırmacılar:
Uzm. Dr. Tarık ASAR

Bursiyerler:
Neslihan BOZKURT
Yeliz ÖZKÖK

Yardımcı Personel:
Dr. Neslihan AKÇAY

KASIM 2017
ANKARA

Önsöz

Son yirmi yıldan buyana Ge tek-kristali optoelektronik ve elektronik uygulamalar için gittikçe önem kazanan bir yarıiletkendir. Czochralski (CZ) tekniği ile büyümüş hacimli (Ge) kristalleri; nükleer radyasyon dedektörleri, nano-elektronik, kızılötesi optik uygulamalar için aynalar ve mercekler, çok eklemli güneş hücreleri için düşük dirençli alttaş, optik prizma, ışın ayırıcı gibi birçok teknolojik uygulama alanlarına sahiptir. Ge kristallerinin düşük kusur yoğunluklu ve istenilen oranda katkılı olarak büyütülmesi uygulama alanına göre önem kazanmaktadır. Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenen projemiz ile ülkemizde henüz geliştirilmemiş bulunan Ge alttaş ve optik pencereleri geliştirilerek prototipleri üretilmiştir. Geliştirilen alttaşlar katkısız, p ve n-tipi olarak atomik ölçekte yüzey morfolojisine sahiptir. Geliştirilen optik pencereler, yansıma önleyici ile kaplanmış; 3-5 mikrometre bölgesinde >%90 ve 3-5 mikrometre bölgesinde >%85 optik geçirgenlik elde edilmiştir. Bu niteliği ile iki-bantta çalışan KÖ görüntüleme sistemleri için kullanıma uygun olduğu değerlendirilmektedir.

İçindekiler

Önsöz……..2
Tablo ve Şekiller Listesi……4
Özet……5
Abstract……6
Giriş……..7
Literatür Özeti……10
Gereç ve Yöntem……14
Bulgular ve Tartışma……18
Sonuç……35
Kaynaklar……..36

Tablo ve Şekiller Listesi

Tablo 1. Germanyum kristallerinin bazı uygulama alanları…….....11
Tablo 2: Proje kapsamında gerçekleştirilecek karakterizasyon teknik ve yöntemleri.....17
Tablo 3. Farklı Sb ve Ga katkı değerleri çin üretilen dilimlerin elektriksel parametreleri 22
Tablo 4. Büyütülen kristallere ait yapısal parametreler ..…….....26
Tablo 5. Bazı malzemelerin kırılma indisleri ve optik geçirgenlik aralığı …….....29
Tablo 6. ZnS filmlerinin kaplama parametreleri …….....31
Şekil 1. Gazi Fotonik'de bulunan PVA-Tepla Marka CGS-LAB model maksimum 102 mm çapa kadar hacimli tek kristal büyütme fırını ve büyütülen Ge tek-kristal külçe …...14
Şekil 2. Gazi Fotonik'te kurulu elmas telli kristal dilimleme cihazı 15
Şekil 3. Gazi Fotonik'de bulunan tesviye-parlarma sistemi: manuel ve otomatik modda çalışma, kalınlık kontrol imkanı.....17
Şekil 4. Czochralski süreç aşamaları: (a) Eritme aşaması (b) sıcaklığın durağanlaşmasını bekleme (c) rehber kristal daldırma (d) boyun büyütme (e) omuz büyütme (f) gövde büyütme aşamaları ..…….....19
Şekil 5. Büyütülen tek-kristal Germanyum külçeleri .....….....….20
Şekil 6. Dilimleme cihazı ve Ge dilim ….....21
Şekil 7. Lepleme, parlatma cihazı ve parlatılan Ge kristaller …….....22
Şekil 8. n- ve p-tipi Ge dilimlerin 2D ve 3D AFM görüntüleri 23
Şekil 9. Şekil 9. Sb (GZC017 ve GCZ019) ve Ga (GCZ021) katkılı optik pencerelerin geçirgenlik spektrumu 24
Şekil 10. Ge tek kristalinin HRXRD deseni:(a) GCZ017 (b)GCZ019 (c) GCZ021 ……...*25*
Şekil 11. (a) Ge tek kristalinin SE ölçümü sonucu elde edilen Δ ve Ψ spektroskopik parametrelerinin dalga boyuna göre değişimi, (b) Ölçüm sonucuna uygulanan modelleme sonucu elde edilen fit grafiği …….....27
Şekil 12. Spektroskopik modelleme sonucunda elde edilen kırılma indisi değişimi (literatür değeri ile karşılaştırmalı olarak verildi) …….....…….....27
Şekil 13. Şekil. 13. Tek yüzeyi (CTS629) ve çift yüzeyi (CTS628-629 ve CTS638) ZnS filmi ile kaplı Ge optiklerin geçirgenlikleri …..…….....32
Şekil. 14. Tek yüzeyi (CTS625) ve çift yüzeyi (CTS632-634 ve CTS640) ZnS filmi ile kaplı Ge optiklerin geçirgenlikleri …..…….....33
Şekil 15. ZnS kaplı Ge optik pencerenin XRD deseni ……..34

Özet

Bu proje ile Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma Merkezi'nde kurulu CZ sistemi kullanılarak Ar-Ge çalışmalarına dayalı Germanyum (Ge) tek kristallerini büyütmek; bu kristallerden alttaş geliştirmek-üretmek amaçlanmıştır. Yansıma önleyici ince film kaplamalar geliştirilerek, yüksek optik geçirgenliğe sahip Ge pencereler üretilmesi projemizin diğer bir amaçlandı.

Proje kapsamında, (i) yüksek kristal kalitesinde Ge tek-kristallerinin CZ tekniği ile büyütme süreçlerinin optimizasyonu (ii) katkı miktarı ve homojenliğinin optimizasyonu ve doğrulanması (iii) yüksek optik geçirgenlik sağlayacak şekilde yansıma önleyici katmanların tasarlanması ve geliştirilmesi (iv) kristallerin işlenerek prototip ürün haline getirilmesi çalışmaları yürütüldü.

Ge optik elemanların ve alttaşların geliştirilmesinde; eriyikten, sıvı-katı arayüzeyinin soğutulması ile kristal oluşturma prensibine dayalı CZ kristal büyütme yöntemi, kristallerin kesilmesi ve parlatılması yöntemleri; yansıma önleyici katman geliştirilmesi için eş-püskürtme tekniği kullanıldı. Yansıma önleyici geliştirmede öncelikle optik biliminin kuramlarına göre tasarım yapılarak kızılötesi bölgede (2-14 um) maksimum geçirgenlik sağlayan film yapıları belirlendi. Her basamakta geliştirilen malzeme ve üretilen ürünlerin yapısal, elektriksel, optik ve morfolojik karakterleri XRD, Hall Etkisi, FTIR ve AFM yöntem ve sistemleri ile gerçekleştirildi.

Proje kapsamında, katkısız (özdirenci > 50 Ohm-cm), p ve n-tipi katkılı (özdirenci 0.5-40 Ohm-cm, mobilitesi >= 2500, 3000 $cm^2/V.s$), 1-3 nm yüzey pürüzlülüğü kalitesinde alttaşların geliştirilerek prototip olarak üretildi. Kızılötesi bölgede >%95 geçirgenliğe ince film kaplamaların 1-3 nm yüzey pürüzlülüğü sahip Ge dilimleri üzerine kaplanarak optik pencereler geliştirildi.

Bu proje çıktılarının, Türkiye'de Germanyuma dayalı teknolojilerin geliştirilmesi çalışmalarına bir başlangıç olması beklenmektedir.

Abstract

In this project using Czochralski Growth Single Crystal (Cz) System in Gazi University Fotonics Research Center, it has been aimed to grow Ge single crystal depending on Research and Development (R&D) studies and to develope and product Ge substrates. The other purpose of the project is to develope thin films coating which preventing reflections for far infrared (IR) optical windows having high optical transmission and to product IR optical windows.

In the circumstance of this project; (i) the optimization of the growing phases of high quality Ge bulk single crystals by CZ technique, (ii) the optimization and satisfaction of the homogeneity and the doping amount, (iii) the designing and improving anti-reflecting layers providing high optical transmission, (iv) the creating prototype output by processing the crystals were realized.

In the developing Ge optical equipments and substrates; in the method of growing crystal with the pulling from the melting depending on CZ technique, the bulk Ge single crystals were grown by cooling solid-liquid interface and using equal injection technique. After cutting and polishing crystals grown, according to theories of optical science anti-reflection layers were improved. In every steps, the morphologic, structural, optical and electrical characterization of the improved materials and outputs were obtained using AFM, XRD, FTIR and Hall effect measurements, respectively.

In the scope of project, it is developed undoped (ρ > 50 Ω-cm), p and n type doped (ρ = 0,5-40 Ω-cm, $\mu \geq$2500, 3000 cm^2 / V.s) substrates with the quality of surface roughness of 1-3 nm. In addition, Ge optical windows were developed by thin film coating on optical Ge single crystals having a transmission >95 % in the IR region with the quality of surface roughness of 1-3 nm.

It has been expected that outcomes of this project give a start for the studies of improving Germanium based technologies in Turkey.

1. GİRİŞ

Son yirmi yıldan buyana Ge tek-kristali optoelektronik ve elektronik uygulamalar için gittikçe önem kazanan bir yarıiletkendir. Czochralski (CZ) tekniği ile büyümüş hacimli (Ge) kristalleri; nükleer radyasyon dedektörleri, nano-elektronik, kızılötesi optik uygulamalar için aynalar ve mercekler, çok eklemli güneş hücreleri için düşük dirençli alttaş, optik prizma, ışın ayırıcı gibi birçok teknolojik uygulama alanlarına sahiptir. Ge kristallerinin düşük kusur yoğunluklu ve istenilen oranda katkılı olarak büyütülmesi uygulama alanına göre önem kazanmaktadır. Ge ve GaAs çok küçük bir örgü uyumsuzluğu gösterdiğinden Ge, III-V grup epitaksiyel büyütmeler için alttaş olarak kullanılabilmektedir. Günümüzde eklemli güneş hücrelerinin veriminin %43 değerlerine ulaşmasında Ge kristalinin başat rolü vardır. Bunlara ilaveten Ge alttaşların GaAs'a göre üstün avantajları: yüksek kristalografik safsızlık, mekaniksel dayanım, Ge'un geri dönüşebilir ve böylece maliyet etkin olmasıdır. Bu faktörler, Ge alttaşların telekominikasyon uydularında GaAs/Ge güneş hücreleri için alttaş olarak geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Fizibilite çalışmaları lazer diyotlar, ışık veren diyotlar ve yüksek mobiliteli transistörler, magnetoresistivite sensörleri fabrikasyonlarında GaAs yerine daha çok Ge kullanıldığını göstermektedir. Bu aygıtların geliştirilmesinde alttaş olarak kullanılan Ge kristallerinde katkı miktarı ve kusur yoğunluğu aygıt verimliliği üzerinde etkendir. Ayrıca, radyasyon ve diğer çevresel şartlara dayanımlı kristal olan Ge, uygun yansıma önleyici kaplamalarla 2-14 um bölgesinde mükemmel bir optik geçirgendir. Ge optik elemanların yüzeyleri yanıma önleyici filmlerle kaplandığında geçirgenliği %90 değerini aşmaktadır. Ayrıca, Ge optik elemanlar, 10.6 um'deki yüksek geçirgenliği nedeniyle, CO2 lazer aynası olarak da kullanılmaktadır. Bu elemanlarda optik verim, geliştirilen yansıma önleyicinin niteliğine bağlıdır. Bazı uygulamalarda Ge optikler, arkasında bulunan elektro-optik sistemleri (dedektör ve sensörler) ışınım zararlarından korumak amacıyla yansıma önleyici kaplamasız olarak da üretilmektedir. Bu proje ile, Gazi Fotonik'te kurulu CZ sistemi kullanılarak Ar-Ge çalışmalarına dayalı Germanyum (Ge) tek kristallerini büyütmek; bu kristallerden alttaş geliştirmek-üretmek amaçlanmıştır. Yansıma önleyici ince film kaplamalar geliştirilerek, yüksek optik geçirgenliğe sahip Ge pencereler üretilmesi projemizin diğer bir amacıdır.

Hacimli kristaller bağımsız olarak elektro-optik ürün geliştirmede kullanıldığı gibi epitaksiyel yapıların alttaşı olarak kullanılmaktadır. Bu kristallerin çoğunluğu CZ tekniği ile üstün kristal kalitesinde üretilmektedir. Elektro-optik teknolojisinde kullanılabilir nitelikte, düşük kusur yoğunluğuna sahip Ge tek-kristallerinin CZ tekniği büyütülmesi, işlenerek alttaş üretilmesi, yansıma önleyici ince film geliştirerek bu kristallerden yüksek optik geçirgenliğe sahip optik pencere geliştirilmesi ve prototip üretimleri projemizin konusunu oluşturmaktadır. Ülkemizde, uydu bileşenlerinin geliştirilme çalışmaların başlanmasına bağlı olarak Ge alttaşların

kullanıldığı III-V grubu güneş hücreleri üzerindeki çalışmalar hız kazanmıştır. Ayrıca, Ge teknolojisine dayalı kızılötesi uygulama alanları ülkemizde hızla gelişmekte, yüksek geçirgenliğe sahip optik pencereler çeşitli savunma-sivil sistemlerde kullanılmaktadır. Bu teknolojik gelişim, ülkemizde Ge tek kristal ürünlerine ihtiyaç oluşturmuştur. Stratejik ve ticari niteliği olan bu teknolojik ürünler yurt dışından ithal edilmekte, ekonomik kaybın yanında teknolojik dışa bağımlılık oluşturmaktadır. Ayrıca Ge tek-kristallerinden proje kapsamında geliştirilecek ürünler bağımsız ticari ürün niteliğindedir. Kristal büyütme, makine-teçhizat altyapısının yanında bilgi ve deneyime sahip araştırmacıya ihtiyaç duymaktadır. Ge tek-kristalleri büyütmeye uygun CZ sistemi ülkemizde sadece Gazi Üniversitesinde kurulmuştur. Hali hazırda yurtdışından ithal edilen Ge tek-kristal ürünlerinin ülkemizde geliştirilmesine duyulan ihtiyaç, yeni altyapı kurmadan, sağlanacak Ar-Ge desteği ile bu ürünlerin geliştirilebilme şansının varlığı proje konusunun seçiminde belirleyici olmuştur.

Proje kapsamında, (i) yüksek kristal kalitesinde Ge tek-kristallerinin CZ tekniği ile büyütme süreçlerinin optimizasyonu (ii) katkı miktarı ve homojenliğinin optimizasyonu ve doğrulanması (iii) yüksek optik geçirgenlik sağlayacak şekilde yansıma önleyici katmanların tasarlanması ve geliştirilmesi (iv) kristallerin işlenerek prototip ürün haline getirilmesi yoğun Ar-Ge faaliyetleri gerektiren özgün çalışmalardır. Her aşamada gerçekleştirilecek karakterizasyon ve analiz çalışmaları ile nitelikli malzeme geliştirme ve üretim bilgisi çıktılarına ulaşılmıştır. Bu sayede üretilecek optik pencere ve alttaşlar yeni niteliklere sahip ürünler olacaktır.

Ge optik elemanların ve alttaşların geliştirilmesinde; eriyikten, sıvı-katı arayüzeyinin soğutulması ile kristal oluşturma prensibine dayalı CZ kristal büyütme yöntemi, kristallerin kesilmesi ve parlatılması yöntemleri; yansıma önleyici katman geliştirilmesi için eş-püskürtme tekniği kullanılmıştır. Yansıma önleyici geliştirmede öncelikle optik biliminin kuramlarına göre tasarım yapılarak kızılötesi bölgede (2-14 um) maksimum geçirgenlik sağlayan film yapıları belirlenmiştir. Her basamakta geliştirilen malzeme ve üretilen ürünlerin yapısal, elektriksel, optik ve morfolojik karakterleri XRD, SIMS, Hall Etkisi, FTIR ve AFM yöntem ve sistemleri ile belirlenmiştir.

Proje kapsamında, katkısız (özdirenci > 50 Ohm-cm), p ve n-tipi katkılı (özdirenci 0.5-40 Ohm-cm, mobilitesi >= 2500, 3000 $cm^2/V.s$), 1-3 nm yüzey pürüzlülüğü kalitesinde alttaşların geliştirilmesi-üretilmesi; Kızılötesi bölgede >%95 (10um referans olarak alınmıştır) geçirgenliğe ince film kaplamaların geliştirilmesi ve 1-3 nm yüzey pürüzlülüğü sahip Ge dilimleri üzerine kaplanarak optik pencereler üretilmesi çalışmaları yürütülmüştür.

Savunma ve sivil uygulamalarda Ge teknolojisine dayalı elektro-optik aygıt üretiminde kullanılan Ge alttaşlar ve yüksek geçirgenliğe sahip optik pencereler ülkemizde ürün olarak henüz üretilmemekte, bu alandaki ihtiyaçlar ithal yolla tedarik edilmektedir. Projemiz

sayesinde, ithal yolla temin edilen Ge tek-kristal elemanların yerli olarak geliştirilmesi ve üretilmesi için bir ön adım atılmıştır. Proje kapsamında yapılan Ar-Ge çalışmaları sonucunda nitelikli araştırmacı yetiştirilmesine katkı sağlanarak, nitelikli iş gücünün oluşumuna destek olunduğu düşünülmektedir. Bu proje çıktılarının, Türkiye'de Germanyuma dayalı teknolojilerin geliştirilmesi çalışmalarına bir başlangıç olması beklenmektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Proje kapsamında geliştirilecek en fazla 100 mm çaplı katkılı alttaşların özdirençlerinin 0.5-50 ohm-cm (katkısız >50 ohm-cm) olması hedeflenmektedir. Bu özdirenç için hedeflenen alt değeridir; özdirenç değerini artırmak mümkündür. Ayrıca geliştirilecek ürünlerin yüzey kalitesi 1-3 nm pürüzlülükte olacaktır. Maksimum 102 mm çapında, yansıma önleyici (YÖ) olmadan >= %45 geçirgenlikte geliştirilecek optik pencerelerin, YÖ kaplamalı >= %95 (10.0 um, referans olarak) optik geçirgenliğe sahip olması hedeflenmektedir. Düşük kusur yoğunluklu (<5.0E+3) Ge kristali büyütmek önemli bir araştırma problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca YÖ katman geliştirilmesinde, optik geçirgenliği artırıcı kaplamaların geliştirilmesinin yanında çevresel şartlara dayanımlı kaplamaların geliştirilmesi güncel araştırma problemleri arasında yer almaktadır. Yukarıda tanımlanan yapısal, optik ve elektriksel nitelikleri sağlayabilecek tasarım, optimizasyon ve tek-kristal büyütmenin yapılması; belirtilen optik ve elektriksel özelliklerin kazanılması için malzeme ve süreç geliştirilmesi projenin araştırma problemini oluşturmaktadır.

Günümüzde Ge ve GeO2, GeCl4 gibi bazı Ge bileşikleri geniş bir uygulama alanları için anahtar materyallerdir. Ge tek kristalinin temel uygulama alanları, kızılötesi ve termal görüntüleme sistemleri, gama dedektörleri için pencereler ve mercekler III-V grup tabanlı optoelektronik aygıtlar için alttaşlar olarak sayılabilir. Germanyumun kızılötesi bölgede iyi geçirgenliğe sahip olması, optik görüntüleme sistemlerinde pencere ve mercek olarak kullanımını sağlamıştır (Claeys ve Simoen 2007).

Son 20-30 yıldan bu yana Ge, optoelektronik ve elektronik uygulamalar için gittikçe önem kazanan bir yarıiletkendir. Ge ve GaAs çok küçük bir örgü uyumsuzluğu gösterdiğinden III-V grup epitaksiyel büyütmeler için Ge alttaş olarak kullanılabilmektedir. Günümüzde verimi %43 değerlerine ulaşan eklemli güneş hücrelerine ulaşmada Ge kristalinin başat rolü vardır. Bunlara ilaveten Ge alttaşların GaAs'a göre üstün avantajları: yüksek kristalografik safsızlık, mekaniksel dayanım ve Ge'un geri dönüşebilir olmasıdır. Bu faktörlerle, Ge alttaşlar telekominikasyon uydularında GaAs/Ge güneş hücreleri için alttaş olarak geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Derluyn vd. 2003). Bunlara ilaveten Ge-GaAs bağlantılı farklı güneş hücreleri için kayda değer rakiptir. Fizibilite çalışmaları lazer diyotlar (Hondt vd. 1998) ve yüksek mobiliteli transistörler (Thomas vd. 2005), magnetoresistivite sensörleri fabrikasyonlarında GaAs yerine daha çok Ge kullanıldığını göstermektedir. Bazı uygulama alanlarına göre germanyumun avantajları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Germanyum kristallerinin bazı uygulama alanları

Uygulama	Germanyumun yararı	Kristal özellikleri
Kızılötesi optik (lensler ve pencereler)	• 2 – 15 μm dalgaboyu aralığında şeffaf • yüksek kırılma indisi (n = 4) • düşük kromatik dispersiyon • yüksek mekanik mukavemet	• özdirenç 5 ± 40 Ωcm, n-tip • tek kristal • düşük gerilmeler
Gama-ışını dedektörleri	• yüksek yoğunluklu • < 10^{10} cm^3 safsızlıkta üretilebilme • elektriksel olarak aktif safsızlıklar • yüksek taşıyıcı hareketliliği	• tek kristal • Katkı seviyesi: 10^{10} – 10^{11} cm^{-3} • Dedektör boyutları bağlı olarak derin seviye yoğunluğu: 10^8 cm^3 • düşük kusur yoğunluğu
GaAs için alttaş opto-elektronik cihazlar (güneş hücreleri, LED'ler, diyot lazerler)	• GaAs ile yeterli örgü uyumu • yüksek mekanik mukavemet • düşük wafer maliyeti (GaAs'e kıyasla)	• tek kristal • düşük kusur yoğunluğu • Düşük mikro-kusur yoğunluğu

Son zamanlarda Ge, ileri nano-ölçekli transistor yapıların geliştirilmesinde, Silikon teknolojisinin karşı karşıya geldiği problemlere çözümler sunması nedeniyle yarıiletken teknolojisinde çok büyük önem kazanmıştır. Transistör sistemlerinin boyutlarının düşmesi, düşük maliyet ve yüksek performans gibi unsurlar geleneksel Si/SiO2 tabanlı materyal sistemlerinin fiziksel limitlerini zorlamaktadır. Transistörler için yeterli kesilme akımında yüksek transistor akımının elde edilmesi temel problemdir. Ge ve Si karşılaştırıldığında; Ge'nin elektron mobilitesi Si'un elektron mobilitesinden 2 kat daha büyük, deşik mobilitesi Si'un deşik mobilitesinden 4 kat daha büyüktür. Ge'nin bu özellikleri yüksek hızlı devrelerin yapımında ideal bir kanal materyali olmasını sağlar. Ge'un bu özelliği gerilmeli tabakalı Si yapılardan daha üstün performans sağlamıştır.

Ge tek kristalleri CZ tekniği ile başarılı olarak büyütülebilmekte ve birçok elektro-optik aygıtta veya aygıtın gelişiminde kullanılmaktadır (Claeys ve Simoen. 2007; Singh vd. 2011) Ge kristali içerisindeki safsızlık atomları, optik kalitede Ge üretimini olumsuz etkilemektedir. Bu safsızlıklardan önemlisi oksijen atomlarının yapı içerisinde 1.0E+17 atom/cm^3'den fazla olmasıdır. Oksijen safsızlığının giderilmesi için kristal büyütme süreçlerinin optimizasyonu gereklidir (Inoue vd. 2013). Ge kristalinin iletkenliğinin değişimi katkı (safsızlık) atomları ile sağlanmaktadır. Bazı uygulamalarda yüksek iletkenliğe sahip kristallere ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, katkılı Ge kristallerinin büyütülmesinde, katkı atomlarının yapı içerisinde oluşturabilecekleri gerilimler bu malzemelerden elde edilecek ürünlerin performansı üzerinde etkili olacağından, katkı sınırlarının tasarlanması ve büyütmede dikkate alınması önemlidir (Murao vd. 2011]. Kusurluluğun büyütme sürecinde önlenmesi amacıyla kısmen sıvı (B2O3) ile kapatma metodu bir yöntem olarak uygulanmaktadır (Taishi vd. 2009). Hacimli kristal büyütmede kaçınılması/minimuma indirilmesi gereken diğer bir problem nokta kusurlarıdır (Claeys ve Siomen, 2007; Murao vd. 2011; Taishi vd. 2009; Vanhellemont vd. 2009; Ciosek vd. 2003). Bu kusurlar, kristal büyütme şartlarının optimizasyonu ile en aza indirilmelidir.

Ge optik pencereler, iki tür yansıma önleyici kaplama ile 3-12um geniş bant multi-spektral uygulamalar ve 8-12 µm termal görüntüleme uygulamaları için idealdir. Yüksek kırılma indisine sahip (2-14 µm için 4.0 civarında) Ge kristal yüzeylerinde Fresnel kayıpları nedeniyle oluşan yansıma, YÖ kaplamalar sayesinde önlenerek bu bölgelerde yeterli optik geçirgenliğe ulaşmaktadır. Yüksek geçirgenliğe ulaşmak için YÖ katman geliştirme çalışmaları dünyada devam etmektedir (Rahmlow vd., 2008; Firoozifar, vd. 2011). KÖ uygulamalarda 8-12 µm spektral bölge için çinko-selenyum YÖ kaplamanın nitelikli olduğu görülmüştür. Ayrıca pencere yüzeyinin Bakır-Au ile kaplanması sayesinde CO2 lazer aynaları geliştirmek mümkün olmaktadır. Ge'un yüksek Knoop sertliği (780), diğer bir KÖ malzeme olan MgF2 den iki kat fazla olduğundan KÖ uygulamalarda tercih edilmektedir. Projemiz kapsamında literatürde mevcut YÖ kaplamalar eş-püskürtme tekniği ile geliştirilmiştir. Bununla birlikte eş-püskürtme tekniğinin sağladığı film kompozisyonunu geliştirme avantajı kullanılarak tek katmanlı yeni optik kaplamalar ve ince film yığınlarından oluşan YÖ'ler geliştirilmesi hedeflenmiş ve YÖ olarak ZnS filmi Ge kristali üzerine tek katman ve ön-arka yüzeye kaplanarak optik geçirgenlik üzerine etkisi irdelenmiştir.

Ge alttaşlar, yeryüzü ve uzayda kullanılabilen III-V grubu çok eklemli güneş hücreleri, LED ve çeşitli yarıiletken aygıtlar için önemli bir malzemedir. III-V grubu güneş hücrelerinin Ge alttaş üzerine geliştirilmesi çalışmaları yeni patentlere konu olmaktadır (Puetz vd. 2012) Güneş hücrelerindeki kullanım yaygınlığının yanında yüksek parlaklığa sahip LED geliştirmede son

yıllarda Ge alttaş olarak tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Son yıllarda nitelikleri nedeniyle Grafen üzerine yapılan çalışmalar artmış bununla birlikte uyumlu alttaş ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Ge alttaşların Grafen film geliştirmede çok uygun alttaş olduğu rapor edilmiştir (Wang vd. 2013). Alttaşlarda oluşan kusurlar, yük taşıyıcıları için birer tuzak merkezi oluşturmakta ve aygıt performansını olumsuz etkilemektedir. Ge alttaşların bu uygulamalarda kullanılabilmesi için çeşitli iletkenliklerde ve düşük kusur yoğunluklarında büyütülmeleri ve pürüzlülüğü düşük olarak işlenmeleri gereklidir. Ayrıca, Ge yakın KÖ foto-tepkisi nedeniyle düşük maliyetli yüksel verimliliğe sahip termofotovoltaik için ideal bir malzemedir (Van der Heide vd. 2009).

3. GEREÇ ve YÖNTEM

Proje kapsamında Ge kristal büyütme, kesme-parlatma ve yansıma önleyici kaplama çalışmaları, Gazi Fotonik'te mevcut olan, aşağıdaki sistemler ve yöntemlerle gerçekleştirildi:

1) Kristal büyütme: Czochralski sistemi
2) Kesme: elmas telli kesici
3) Yüzey işleme: Tesviye ve parlatma sistemi
4) Yansıma önleyici kaplama: Püskürtme (sputtering) ve eş-püskürtme sistemleri

Geliştirilen malzemelerin yapısal, elektriksel, optik ve morfoloji özellikleri Gazi Fotonik'te mevcut geniş karakterizasyon sistemleriyle gerçekleştirildi.



Şekil 1. Gazi Fotonik'de bulunan PVA-Tepla Marka CGS-LAB model maksimum 102 mm çapa kadar hacimli tek kristal büyütme fırını ve büyütülen Ge tek-kristal külçe.

Czochralski Tekniği: Czochralski (CZ) yöntemi tek kristal malzemeleri büyütmek için dünyada en çok tercih edilen ve tartışmasız en gelişmiş kristal üretim yöntemlerindendir. Gazi Fotonik'te kurulu cz sistemi şekil 2 gösterilmiştir. Bu yöntem, eritilmiş çoklu kristal malzemenin, bir rehber kristal eşliğinde çekilerek büyütülmesi sürecine dayanır. Czochralski (CZ) kristal büyütme sistemi genel olarak, çekici ve fırın olmak üzere iki ana birimden oluşmaktadır. Çekici, çekirdek kristal tutucu ve dönme mekanizmasından oluşur. Çekirdek kristal, büyütülecek kristalin özelliklerini içeren rehber kristaldir. Çekici mekanizması, eriyik içerisine daldırılmış

çekirdeği yukarıya doğru dönerek kaldırma ve böylece katı-sıvı ara-yüzeyinde eriyiğin soğumasına dayalı olarak kristalleşmenin gerçekleşmesini sağlar. Dönme ve çekme hızı büyütülen kristalin çapını belirleyen önemli parametrelerdir; bu parametrelerin ayarlanabilmesi ve kontrol edilebilmesi bir kontrol birimi tarafından sağlanır. Kristalin çapını etkileyen diğer bir parametre de kristali oluşturacak elementlerin içerisinde eritildiği potadır. Safir için kuartz, YAG için iridyum; Ge ve Si için ise grafit pota kullanılmaktadır.

Vakum altında kapalı makine ve kontrollü inert gaz akışı, sıcak bölümlerin optimum temizliğini sağlar. İstenmeyen gaz, kristal sürücü parçanın ve büyüyen kristalin kontaminasyonuna sebep olmadan ortamdan atılır. Vanalı kilitli hazne, sıcak bölgenin operasyon sıcaklığında tutulurken kristalin alınabilmesini sağlar. Isıtıcı sıcaklığının elektronik kontrolü ile ergime sıcaklığı sabit tutulabilir ve değiştirilebilir.



Şekil 2. Gazi Fotonik'te kurulu elmas telli kristal dilimleme cihazı

Pota asansörü, kristal asansörü ve döndürme motorları kapalı devre geri bildirimli sistemler ile kontrol edilmekte olup giriş voltajı ve tork değişikliklerinden etkilenmemektedir. Fırçasız motor yapısı ile sürücü ünitenin bakım gereksinimleri ortadan kalkar. Alt ve üst sürücü ünitenin hızlı hareketi çekirdek kristalin ve potanın hızlı ve doğru yerleştirilmesine izin verir. Kristal çekici, menü yardımı ile PC hard diskinden veya yerel ağdan (LAN) yüklenen birçok parametre dahil edilerek sürülmektedir. Bu yöntem dahilinde tüm proses değerleri (döngü, hız, gaz akışı,

basınç vb.) ve ayrıca PID-kontrol döngüleri ve resim okuma sistemi için parametreler mevcuttur. Proses parametrelerinin büyük bir çoğunluğu kristal uzunluğunun fonksiyonu olarak tanımlanabilmektedir. Diğerleri ise zamanın fonksiyonudur. Bu şekilde esnek bir proses kontrolü sağlanabilir. Operatörün sistem ile iletişimi grafiksel gösterim yeterliğine ve dokunmatik renkli ekrana sahip bir PC üzerinde çalışan kontrol sistemi ile sağlanabilmektedir. Kristal çekicinin kontrolü yazılım tarafından yapılmaktadır. Programlanabilir mantıksal kontrolörün paketlenmiş kodu mikro hafıza kartı (MMC) üzerinde saklanmakta olup, güç kesintileri durumunda veri kaybı engellenmektedir. Tüm gerekli proses değerleri (basınç, gaz akışı, su akışı, su sıcaklığı, ısıtıcı rezistansı, ısıtıcı gücü vb.) kristal büyümesi sırasında geçersiz set noktası sapmaları için izlenebilmekte ve optimize edilebilmektedir. CZ tekniğinde katkı kontrolü, çap ve büyüme doğrultusunda katkı homojenliğinin sağlanması önemli bir Ar-Ge çalışması gerektirmektedir. Her katkı malzemesinin ayırma sabiti dikkate alınarak, katkı ve eriyik kütlesi, dönme hızı, çekme hızı ve bunlara bağlı büyüme oranının optimize edilmesi gerekmektedir. Ge kristallerinin büyütülmesinde, kristal kusuru oluşumunun minimuma indirilmesi ayrıca önemli bir parametredir. (Claeys ve Siomen, 2007; Murao vd. 2011; Taishi vd. 2009; Vanhellemont vd. 2009; Ciosek vd. 2003). Kristal büyütme dinamik ve kinetiklerinin iyi yönetimi ve optimize edilmesi ile bu kusurlar en aza indirilecek ve hedeflenen çıktılara ulaşılabilecektir.

Elmas Telli Kesici (Şekil 2): Kesme-dilimleme cihazı Germanyum, Galyum Arsenik, Silikon, Safir, Silikon Karbit, quartz, seramik ve grafit gibi 200 mm çapa kadar kristal külçeleri 6^{o}'ye kadar bükümlü teğetsel otomatik kesim özelliğine; >= 0.5 mm kalınlıkta dilimleyebilme yeteneğine sahip; 200 µm kalınlığındaki elmas tel ile sıvı ortamında kesme işlemlerini mikrometre hassasiyetle yapabilmektedir.

Tesviye-Parlatma (lapping and polishing) Sistemi (Şekil 3): Otomatik plaka düzlük (yüzey düzlüğü) kontrol sistemine sahip, sürekli olarak plaka şeklini izleyebilen ve otomatik olarak önceden set edilmiş şekilden muhtemel sapmaları 1 mikro metre doğrulukla otomatik olarak düzeltebilen; 102 mm (4") çapa kadar dilimleri yüzey pürüzlülüğünü nm hassasiyetle oluşturabilme yeteneğine sahiptir.

Eş-püskürtme (co-sputternig): Laboratuvarımızda mevcut eş-püskürtme sistemi, 2 RF, 1 DC hedef kafasına sahiptir (Şekil 4). Bu kafalar istenilen açıda hedef üzerine yönlendirilebilmekte, istenilen oranda malzeme bileşiminin elde edilmesine imkan vermektedir. Ayrıca süreç yazılımla kontrol edilebilmekte ve ardışık filmlerin yığın halinde oluşumu sağlanabilmektedir. Alttaş tutucusunun merkezi eksen etrafında dönme kabiliyetine sahip olması sayesinde mükemmel homojenlik sağlanabilmektedir. Sistem 4" büyüklüğünde dikdörtgen ve daire formundaki alttaşların kaplanmasına uygundur. Ayrıca vakum kazanı içerisinde 2 adet ısıl

buharlaştırma elemanı mevcuttur; bu sayede filmleri içerisine ya da üzerine metal dahil edilmesi veya kaplanması da mümkün olmaktadır.



Şekil 3. Gazi Fotonik'de bulunan tesviye-parlarma sistemi: manuel ve otomatik modda

Yukarıda özetle tanımlanan, projede kullanılacak sistem ve yöntemler, projede hedeflenen düşük kusur yoğunluklu Ge tek-kristallerin katkılı ve katkısız büyütülmelerinin başarılması, kristallerin işlenerek alttaş ve pencere haline getirilmesi, pencere yüzeylerinin yansıma önleyici ile kaplanması için yetkin son teknolojik sistemlerdir. Proje kapsamında geliştirilecek kristallerin ve ince filmlerin karakterizasyonları ve bunlar için kullanılacak yöntem ve teknikler Tablo.2'de sunulmuştur.

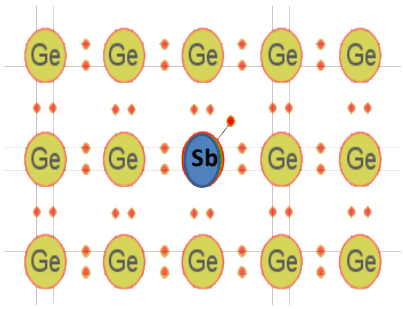
Tablo 2. Proje kapsamında gerçekleştirilecek karakterizasyon teknik ve yöntemleri

Yapılan Karakterizasyonlar	**Kullanılan Teknik ve Yöntemler**
Büyütülen kristallerin yapısal analizleri	X-Işını kırınımı tekniği ve anlizi
Kristal yüzeylerinin nanometre skalasında analizi	Atomik kuvvet mikroskobu yönetemi ile yüzey pürüzlülüğü belirleme yöntemi
Kristallerin kırılma indislerinin tayini	Spektroskobik Elipsometre ölçüm tekniği
KÖ optik geçirgenliklerinin belirlenmesi	Kızılötesi Spektrometre tekniği
Kristallerin taşıyıcı-katkı yoğunluklarının ve hareketliliklerinin belirlenmesi	Hall Etkisi analiz tekniği

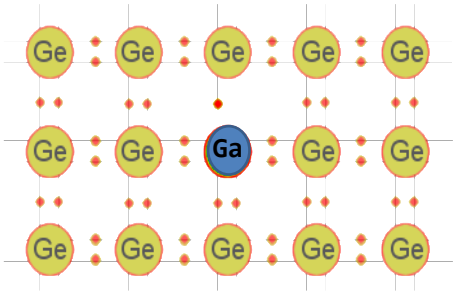
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Germanyum Tek-kristallerinin Büyütülmesi: Alttaş ve Optik Pencere Üretimi:

Proje kapsamında n- (Sb katkılı) ve p-tipi (Ga katkılı) Ge tek-kristal külçeler büyütülerek, Ge dilim ve optik pencere geliştirilmesi hedeflenmiştir. Proje kapsamında katkısız, Sb ve Ga katkılı Ge kristalleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi Fotonik) bünyesinde bulunan Czochralski sistemi (CGS-Lab-Ge) ile büyütüldü. Sistem maksimum 220 mm gövde uzunluğunda ve 102 mm çapında Ge tek kristal büyütebilmektedir. Sistemde büyütme sırasında yüksek saflıkta argon gazı kullanılmaktadır.



n-tipi germanyum



p-tipi germanyum

CGS-Lab-Ge sistemi kısaca; kilitli hazne, büyütme haznesi, kristal ve pota hareket mekanizmaları, ısıtıcı ve eriyik pirometreleri, vakum pompası, kamera, bilgisayar gibi temel kısımlardan oluşur. Büyütme haznesi içindeki sıcak bölge grafit malzemelerden oluşmaktadır. Büyütme haznesinin dış kısmında soğutma suyu dolandırılır.

Kilitli haznede çekirdek kristal bulunmaktadır ve büyütülen kristal bu kısımdan dışarı alınır. Kristal hareket mekanizması, kristalin aşağı-yukarı hareketini ve döndürülmesini sağlama amaçlıdır. Pota hareket mekanizması, potanın aşağı-yukarı hareketini ve döndürülmesini sağlar. Eriyik pirometresi, çekirdek kristal ile eriyiğin temas noktası yakınına odaklıdır. Isıtıcı pirometresi direkt ısıtıcıya odaklıdır.

Büyütme işlemi

Büyütülmesi amaçlanan kristali oluşturan kısımlar; boyun, omuz, gövde, son koni şeklindedir ve her bir aşamada kristal çapı farklı olmaktadır. Kristalin çapı; sıcaklığın azalması, çekme hızının azalması, argon gaz akışının artması, pota veya kristalin döndürme hızının artması ile artırılabilir. Tersi durumlarda ise çap küçülecektir.

Temizlik aşaması

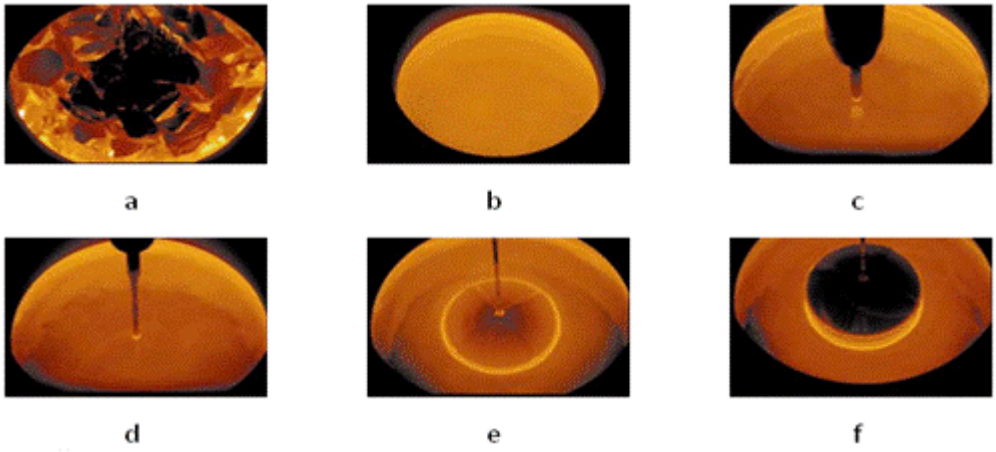
Büyütme öncesinde cihaz içindeki tüm grafit parçalar (ısıtıcı, pota, yalıtım malzemeleri..) sökülerek temiz bir yere konulur. Cihaz içinde herhangi bir toz veya kirliliğin kalmaması için sökülen grafit parçaların yerleştirildiği alt bölge, temiz toz bırakmayan bir bezle iyice temizlenir. Temizlik işleminin ardından sökülen grafit parçalar tekrar yerine yerleştirilir.

Yükleme aşaması

Ham madde (Ge) ve katkılı büyütme yapılması durumunda, katkı malzemesi (Sb veya Ga) pota içerisine dikkatli bir şekilde yerleştirilir. Çekirdek kristalin kontrolünden sonra sistem kapatılıp vakuma (~10^{-3} mbar) alınır. Daha sonra uygun büyütme reçetesi seçilerek büyütme süreci başlatılırbaşlatılır.

Vakum testi

Büyütmeye başlamadan önce cihaz reçetede yer alan işlem sırasına göre 8 defa atmosfer temizliği işleminin ardından sızdırmazlık testi gerçekleştirilir. Sızdırmazlık testi başarılı olduktan sonra eritme aşamasına geçilir.



Şekil 4. Czochralski süreç aşamaları: (a) Eritme aşaması (b) sıcaklığın durağanlaşmasını bekleme (c) rehber kristal daldırma (d) boyun büyütme (e) omuz büyütme (f) gövde büyütme aşamaları

Eritme

Sızıntı testinin başarıyla geçmesinin ardından ısıtıcının gücü artırıldı ve Ge külçelerin erimesi (Şekil 4a) sağlanır. Argon gaz akışı (40 L/dk) bu aşamada başlatılır ve ortam basıncı 20 mbar'a getirilir. Bu sırada reçetede yer alan bilgiler doğrultusunda pota ve kristal zıt yönlerde dönmeye (pota 15 rpm, kristal 5 rpm) başlar. Adım sonunda daldırma işlemini manüel yapılacağından cihaz otomatik moddan manüel moda alınır.

Daldırma

Daldırma işlemi için eriyik sıcaklığı, Ge' un erime sıcaklığı olan 937 ℃' ye getirilir. Bu işlem

sırasında, kristal çapının kamera tarafından doğru bir şekilde ölçülmesi için pota konumu ayarlanır. Eriyik sıcaklığı 937 ℃'de dengedeyken (111) yönelimli 8 mm çapında çekirdek (rehber) kristal eriyik içine daldırılır (Şekil 4-c) ve uygun şartlar gözlendiğinde, büyütme işlemi başlatılır.

Boyun

Boyun aşaması (Şekil 1-d), kristalde oluşan kusurları sonlandırmak için büyütülür. Bunun için kristal yüksek hızda (≈1mm/dk) çekilerek çapın küçük olması sağlanır ve kusurların kristal dışında sonlandığını gösteren çıkıntı gözlenmelidir. Çekme hızı artmasına rağmen çapında artması kusurların sonlandığını göstermektedir. Boyun 10 cm uzunluğuna ulaştığında otomatik modda iken omuz aşamasına geçilir.

Omuz

Bu aşamada büyütülen boyun çapından (≈3mm), gövde çapına (≈102 mm) geçiş sağlanır. Bunun için çekme hızı azaltılarak ve sıcaklık azaltılarak çapın artması sağlanır. Hedeflenen çapa ulaşıldığında omuz aşaması (Şekil 4-e) tamamlanmıştır ve sistem otomatik olarak gövde aşamasına geçecektir.

Gövde

İstenilen çap değerinde kristalin sabit olarak büyütülmesi gövde (Şekil 4-f) aşamasıdır. Bu adımda katılaşan kısım giderek artacağından ve bununda termal etkileşimden dolayı pota içerisindeki sıvı Ge'u katılaştırabileceğinden sıcaklık kademli olarak artırılır. Hedeflediğimiz gövde uzunluğuna eriştiğimizde son koni aşamasına geçilir.



Şekil 5. Büyütülen tek-kristal Germanyum külçeleri

Son koni

Son koni aşamasında, kristal ile eriyik, minimum temas noktasına sahipken ayırma işlemi yapılmalıdır. Bunun için sıcaklık ve çekme hızı kademeli artırılarak çap küçültülür ve minimum temas noktasında kristal eriyikten ayrılır.

Sonlandırma

Büyütme işlemi sonrasındaki sonlandırma adımında kristal düşük hızda (≈2mm) yukarı çekilir, pota aşağı indirilir ve ısıtıcının gücü kademeli olarak azaltılır. Argon gaz akışı düşük seviyede (8L/dk) devam ettirilir. Ardından işlem sonlandırılır ve sistem soğumaya bırakılır. Sonlanan büyütme işleminden 6 – 7 saat sonra Ge külçe dikkatli bir şekilde dışarı alınır. İşlem sonunda üretilen Ge külçelerinin resimleri Şekil 5'te görülmektedir.

Dilimleme

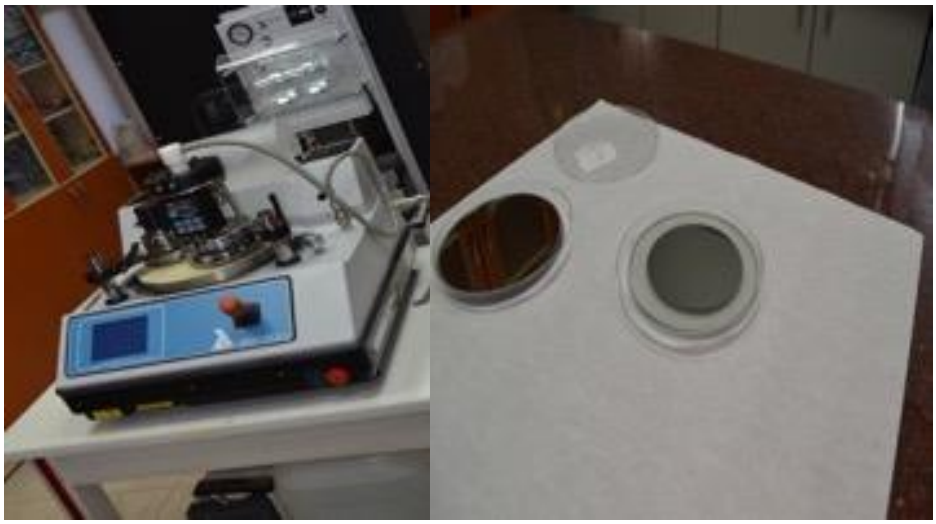
Tek kristal külçe kullanım ve analiz amaçlarına uygun bir şekilde farklı kalınlıklarda dilimlenir. Dilimleme işlemi için Gazi Fotonik'de bulunan elmas telli dilimleme sistemi (Şekil 7) kullanıldı. Dilimleme işlemleri için yaklaşık olarak 0,0222 mm/sn' lik hız kullanılır. Bu hız değerinin küçük olması, kesim sırasında kaliteli bir yüzey elde etmemiz açısından önemlidir.



Şekil 6. Dilimleme cihazı ve Ge dilim

Lepleme ve Parlatma

Dilimlenen Ge tek-kristalleri cam alttaş tutucuya bağlanarak lepleme işlemi için hazır hale getirilir. Gazi Fotonik'de bulunan lepleme ve parlatma cihazı (Şekil 7) yardımıyla malzeme yüzeyi aşındırılarak parlatılmaya hazır hale getirilir. Yapılan lepleme işlemlerinde sırasıyla 9 μm, 3 μm ve 1 μm Al_2O_3 partikülü içeren solüsyon kullanılır. Daha sonrada 30 nm Al_2O_3 partikülü içeren solüsyonu ile parlatılır.



Şekil 7. Lepleme, parlatma cihazı ve parlatılan Ge kristaller

Katkı optimizasyonu ve elektriksel karakterizasyon

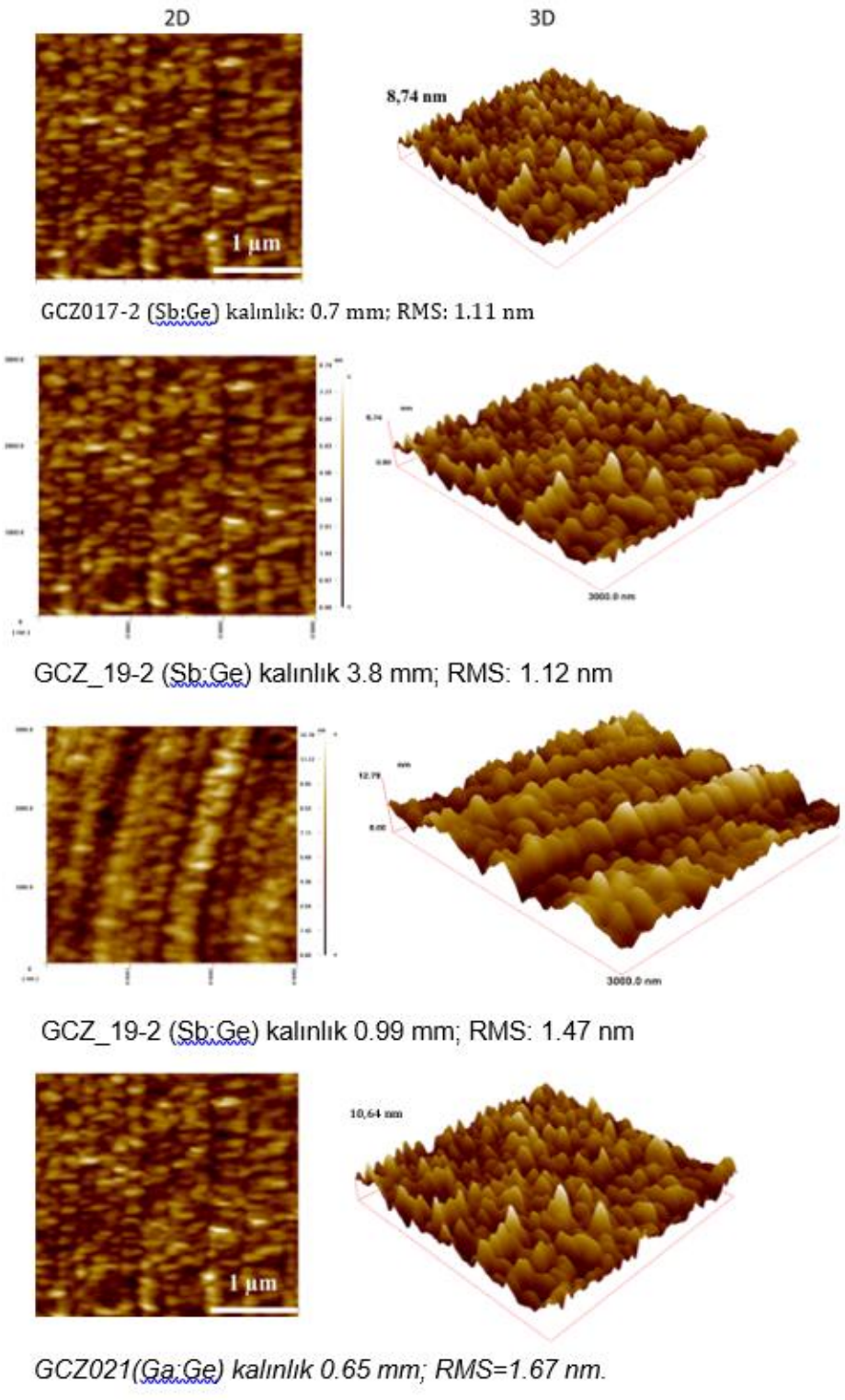
CZ yöntemiyle büyütülen Sb ve Ga ile katkılanmış Germanyum külçerinden üretilen numunelerin 300 K sıcaklığında, 1 Tesla manyetik alan altında, Van Der Pauw tekniği kullanılarak özdirenç ve Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Büyütülen GCZ17 ve GCZ19 (13 kg Ge sarf malzemesi içerisine, sırasıyla 5 mg ve 30 mg Sb katkılı) Ge dilimlerin taşıyıcı yoğunlukları 1.39E+14 ve 1,24E+14 atom/cm^3, mobilite değerleri 895 ve 1260 cm2/V.s olarak elde edildi. Katkı yoğunluğu optimizasyonu amacıyla büyütülen bu kristaller için elde edilen veriler referans alınarak; Büyütme sürecinde Sb oranı artırılarak (13 kg Ge sarf malzemesi içerisine, sırasıyla 60 mg ve 80 mg) GCZ17-2 ve GCZ19-2 munumeleri büyütüldü. Ölçümler sonucunda bu numunelere ve Ga katkılı (10 kg Ge sarf malzemesi içerisine 3g Ga katkılı) GCZ21 kristali üretildi. Ayrıca katkısız Ge külçesi (GCZ15) büyütülerek bu kristalden dilimler üretildi. Bu kristallerden üretilen dilimlere ait oda sıcaklığındaki özdirenç, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerleri Tablo 1' de sunuldu. Bu veriler, !0^{18} 1/cm^3 değerinde taşıyıcı (Sb ve Ga) yoğunluğu ve > 3000 cm^2/(VS) mobilite (Sb katkısı için) değerine sahip dilimlerin üretimlerinin başarıldığını göstermektedir.

Tablo 3. Farklı Sb ve Ga katkı değerleri için üretilen dilimlerin elektriksel parametreleri

Numune	Özdirenç [ohm/sqr]	Taşıyıcı yoğunluğu [1/cm^3]	Hall Mobilitesi [cm^2/(VS)]
CGZ15	6.38E+01	6.12E+13	1.67E+03
GCZ17-2 (Sb:Ge)	1.49E+01	-1.36E+17	-3.13E+03
GCZ19-2 (Sb:Ge)	6.48E+00	-3.68E+18	-2.64E+03
GCZ21 (Ga:Ge)	8,92E-03	2,17E+18	3,44E+02

Üretilen dilimlerin yüzey morfolojileri

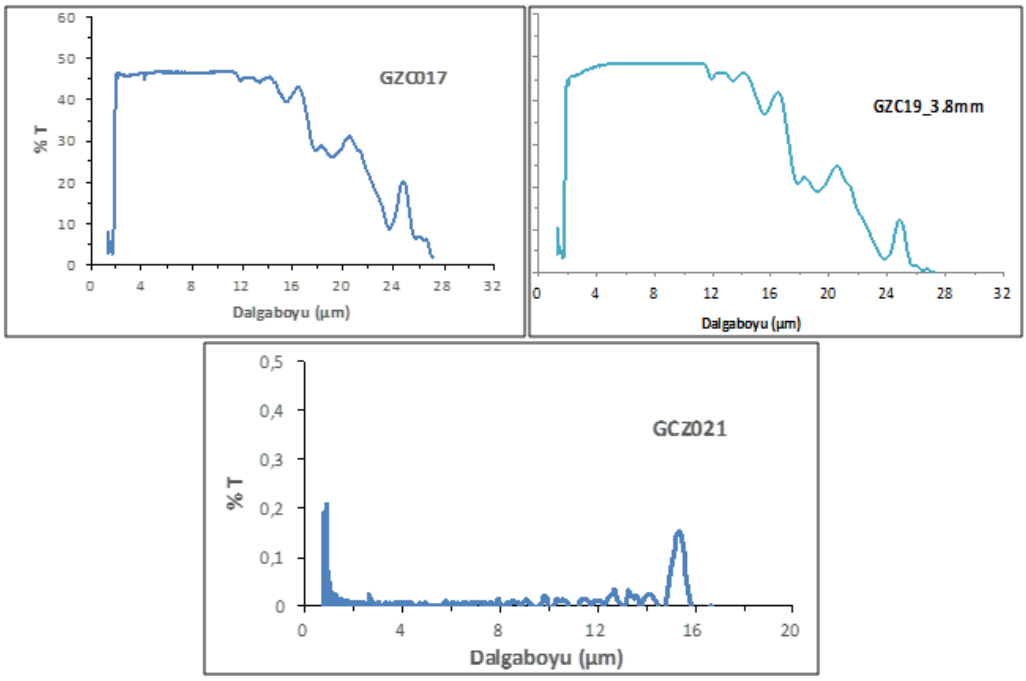
Üretilen ve iki yüzü parlatılan Ge dilimlerin yüzey pürüzlülükleri AFM tekniği ile belirlendi ve aşağıdaki şekillerde verildi.



Şekil 8. n- ve p-tipi Ge dilimlerin 2D ve 3D AFM görüntüleri.

Şekil 8'de atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile 3x3 μm^2'lik yüzey alanı taranarak gerçekleştirilen yüzey analizi sonucunda elde edilen görüntüler 2D (iki boyutlu) ve 3D (üç boyutlu) olarak sunuldu. AFM görüntülerinden hesaplanan yüzey pürüzlülüğü (RMS) değerlerinin < 2 nm olduğu gözlendi.

Optik Pencerelerin Geçirgenlikleri

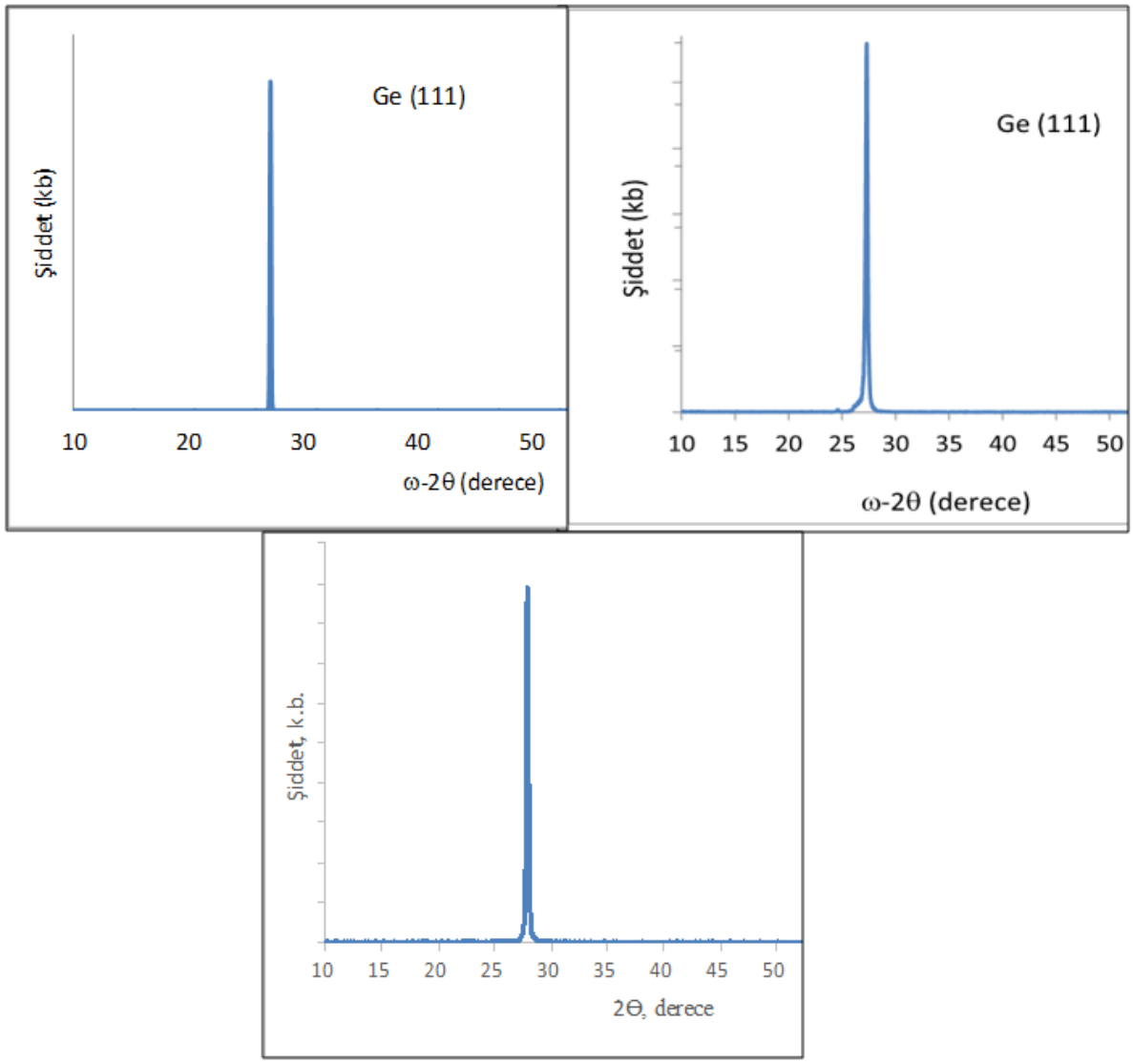


Şekil 9. Sb (GZC017 ve GCZ019) ve Ga (GCZ021) katkılı optik pencerelerin geçirgenlik spektrumu

Optik pencere uygulamalarında kullanılabilen 5 ve 30 mg Sb katkılı Ge dilimlerin (GZC017 ve GCZ019) optik geçirgenlik değeri (Şekil 9) 10.um'de %45 civarındadır. Elde edilen bu yüksek geçirgenlik değeri, üretilen ve yüzeyi işlenen Sb:Ge dilimlerinin optik pencere olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Ga katkısı (GCZ021) optik soğurmayı artırdığından geçirgenlik değeri sıfıra yakın çıkmaktadır. Bu nedenle Ga:Ge dilimleri optik pencere için uygun degildir; ancak Ga katkılı alttaş olarak kullanılmaktadır.

Yapısal Analizler

Kristallerin yüksek çözünürlüklü X-Işını kırınımı ölçümleri Bruker D8 Discover X-ışını kırınım cihazı ile yüksek çözünürlüklü Ge (002) monokromatörü kullanılarak yapıldı. Ölçümde $Cu_{K\alpha}$ (λ(Å)=1,540598) X-ışını kaynağı kullanıldı.



Şekil 10. Ge tek kristalinin HRXRD deseni: (a) GCZ017 (b) GCZ019 (c) GCZ021

Büyütülen Sb ve Ga katkılı Ge tek kristaller için HRXRD ölçümlerinden elde edilen ω-2θ X-ışını kırınım desenleri Şekil 10'da verildi. Şekiller incelendiğinde Ge tek kristallerin 111 yöneliminde tek-kristal olarak büyüdüğü görülmektedir. Büyütülen Ge tek kristal külçelerin örgü parametrelerini belirlemek amacı ile X-ışını kırınımı desenlerinden pik pozisyonları belirlendi. Bragg kanunu ($2d \sin\theta = n\lambda$) ve birim hücresi a örgü parametresi ile karakterize edilen kübik yapılı bir kristal için düzlemler arasındaki uzaklık ve örgü parametresi,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \qquad (1)$$

ve

$$a = \frac{\lambda}{2Sin\theta}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2)$$

eşitliği kullanılarak hesaplandı. Partikül büyüklüğü $Pb = \frac{0.9\lambda}{\beta Cos(\theta)}$ ifadesinden belirlendi. Burada β, X-ışını kırınım pikinin yarı genişlik (FWHM) değeridir.

Büyütülen tek-kristal Ge (111) kristallerinin XRD kırınım deseninden (111) yönelimine ait pik açısı değerleri katkısız ve katkılı Ge için sırasıyla 27.229° ve 27.285° olarak elde edildi. Bu açının literatür değeri 27.284° Swanson (1951) ile uyumlu olduğu görüldü. XRD verilerinden elde edilen Ge kristallerinin partikül büyüklüğü, kusur yoğunluğu ve mikro gerilme değerleri, Zhao ve Zhang (2008), gibi yapısal parametreler Tablo 2'de sunuldu. Ayrıca büyütülen tek kristaller için pik pozisyonları kullanılarak Eş. 2 ile örgü parametreleri katkısız, Sb ve Ga katkılı Ge tek kristalleri için sırasıyla 5.656 Å, 5.668 Å ve 5.560 Å olarak bulundu. Bu değerlerin de literatür değeri 5.657 Å Swanson (1951) ile uyumlu olduğu görüldü.

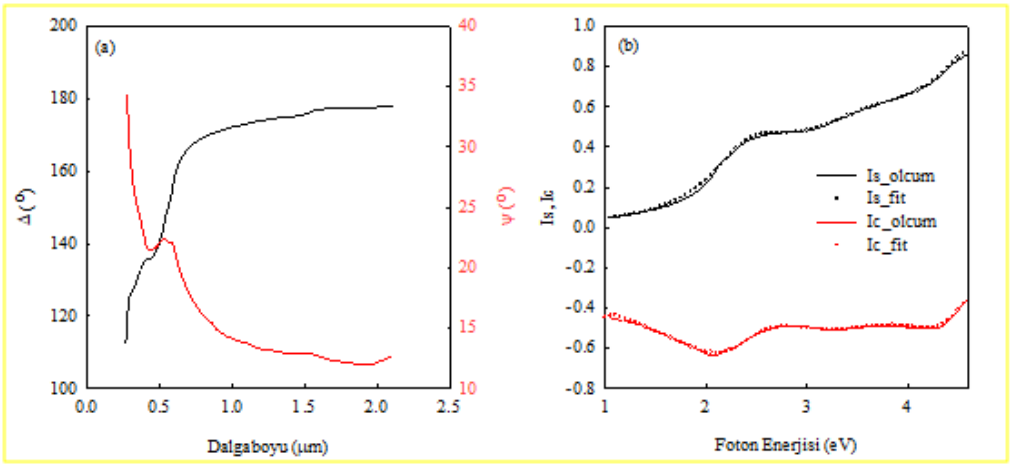
Tablo 4. Büyütülen kristallere ait yapısal parametreler

Numune	**h**	**k**	**l**	**2θ (der.)**	**θ (rad.)**	**β (rad.)**	**d (Å)**	**a (Å)**	**Partikül büy. (nm)**	**Kusur Yoğ. (x10^5 cm^{-2})**	**Mikro gerilme (10^{-3})**
GCZ_17 (Sb:Ge)	1	1	1	27.92	0.244	0.0038	3.193	5.530	37.943	0.694	1.683
GCZ_19 (Sb:Ge)	1	1	1	27.74	0.242	0.0039	3.213	5.565	36.588	0.747	1.756
CGZ_21 (Ga:Ge)	1	1	1	27.32	0.238	0.0027	3.262	5.650	52.627	0.361	1.240

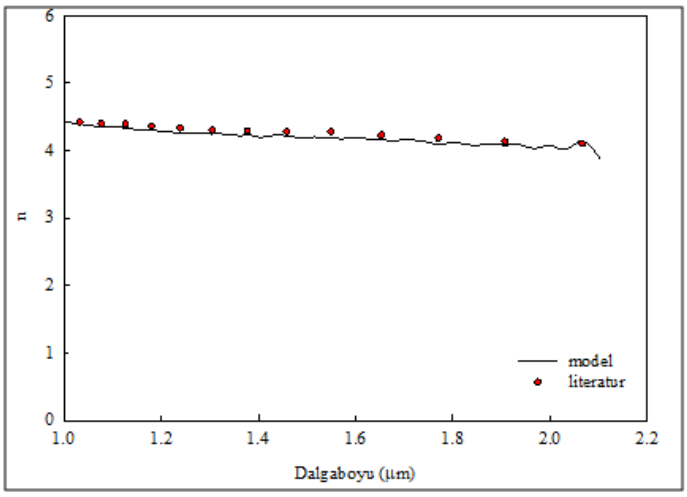
Spektroskopik elipsometre ölçümleri ve değerlendirilmesi

Spektroskopik Elipsometre ölçümleri, 75 W gücünde Xenon ışık kaynaklı faz modülasyonlu Jobin Yvon-Horiba Spektroskopik Elipsometre sistemi kullanılarak yapıldı. Spektroskopik elipsometre (SE) ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunda (Şekil 11) germanyum optik pencerenin kırılma indisi değişimi ölçüm sonuçları DeltaPsi yazılımı kullanılarak modellendi (Şekil.6b). Modellemede $\chi^2 = 0.44$ değerin ulaşılmıştır. Bu modelleme sonucunda elde edilen kırılma indisinin literatür ile kıyaslamalı olarak dalga boyuna göre değişimi Şekil 12'de sunuldu ve literatür ile uyumlu olduğu görüldü, Aspnes and Studna (1983). Ayrıca modelleme sonucunda

germanyumun yasak enerji aralığı değeri 0.66 eV olarak elde edildi.



Şekil 11. (a) Ge tek kristalinin SE ölçümü sonucu elde edilen Δ ve Ψ spektroskopik parametrelerinin dalga boyuna göre değişimi, (b) Ölçüm sonucuna uygulanan modelleme sonucu elde edilen fit grafiği.



Şekil 12. Spektroskopik modelleme sonucunda elde edilen kırılma indisi değişimi (literatür değeri ile karşılaştırmalı olarak verildi).

Spektroskopik elipsometre (SE) ile gerçekleştirilen ölçüm sonucunda germanyum optik pencerenin kırılma indisi ve yasak enerji aralığı değeri modelleme sonucunda elde edildi. Kırılma indisinin literatür ile kıyaslamalı olarak dalga boyuna göre değişimi incelendiğinde literatür ile uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca modelleme sonucunda germanyumun yasak enerji aralığı değeri 0.66 eV olarak elde edildi.

Yansıma Önleyici Geliştirilmesi

Germanyum optik özelliklerinden dolayı kızılötesi görüntülemede popüler mercek malzemelerinden biridir. Ayrıca germanyum yüksek kırılma indisinden dolayı yani hava – malzeme ara yüzeyinde oldukça yüksek yansıtıcı olmaktadır. Bu problem sadece germanyum için değil aynı zamanda 2 – 14 μm aralığında kullanılan diğer malzemelerinde yüksek kırılma indisinden dolayı termal görüntüleme sistemlerinde yansıma önleyici kaplamaların kullanılması şarttır. Kullanılan malzemelerin yüzeyini uygun optik yol farkına sahip başka malzeme ile kaplamak yansımaları en aza indirir. Bu kaplamalar "yansıma önleyici kaplamalar (YÖ, ARC)" olarak adlandırılır.

Kızılötesi (KÖ) görüntüleme sistemleri, atmosferik şeffaf pencere olan 3-5 μm ve 8-12 μm spektral aralıkta alglama kapasitesine sahiptir. Bu sistemlerde optik pencere ve mercek olarak kullanılan Germanyum (Ge) tekkristali, 2-14 μm aralığında optik geçirgenliğe sahiptir. Bununla birlikte sahip olduğu yüksek krılma indisi (10 μm'de 4.00) nedeni ile %50'nin üzerinde Fresnel yansıma kaybına sahiptir. Ge üzerine, kırılma indisi daha düşük yansıma önleyici film kaplama sayesinde optik yansıma değeri azaltılarak optik geçirgenlik değeri, %46 dolayındaki başlangıç değerinden %90'nın üzerine çıkabilmektedir. İlgili spektral bölgede maksimum optik geçirgenliğe ulaşmak için kırılma indisine bağlı olarak Fresnel denklemleri yardımı ile tasarım parametrelerine bağlı olarak film kalınlığı belirlenmelidir. Optik yansıma önleyici kaplama geliştirmede, krılma indisi ve kalınlığı yanında filmin mikro yapısı başat role sahiptir ve bu nicelik kaplama tekniği ve şartları ile doğrudan ilişkilidir. Yansıma önleyici filmler tek katmandan oluştuğu gibi çok katmanlı olarak da tasarlanabilmektedir.

Yansıma önleyici kaplamalar, için birçok malzeme görünür bölge uygulamalarında kullanılırken kızılötesi uygulamalarında kullanılan malzemenin soğurma katsayısıyla ve istikrarlı kalması gibi problemler nedeni ile malzeme seçimi sınırlı sayıda kalmaktadır. Bu yüzden kullanılan malzeme radyoaktif olmayan, düşük soğurma katsayılı, kullanılacağı sıcaklık aralığı ve en önemlisi kırılma indisi gibi problemlere cevap verebilecek karakteristiği olmalıdır.
Germanyum üzerine kaplama malzemeleri ilk şart olarak kırılma indisine göre belirlenir. Kırılma indisi secimi düşük (1.3 ~1.5), orta (2 ~ 2.4) ve yüksek (3 ~ 4) olarak seçim ve tasarım yapılmalıdır. Bazı malzemelerin kırılma indisleri ve optic geçirgenlik aralığı Tablo 5'de verildi.

Tablo 5. Bazı malzemelerin kırılma indisleri ve optik geçirgenlik aralığı

Düşük kırılma indisli malzemeler			
Malzeme adı	Kırılma indisi (4 μm)	Kırılma indisi (10 μm)	Geçirgenlik aralığı (μm)
Sezyum Bromür (CsBr)	1.66	1.66	0.35 – 32
Baryum Florid (BaF_2)	1.33	1.42	0.25 – 15
Seryum Florid (CeF_3)	1.42	1.47	0.3 – 13
Orta kırılma indisli malzemeler			
Kadmiyum Tellür (CdTe)	2.69	2.67	0.9 – 25
Kadmiyum Selenid (CdSe)	2.4	2.4	0.7 – 25
Kadmiyum Sülfür (CdS)	2.4	2.26	0.5 – 14
Çinko Selenid (ZnSe)	2.43	2.4	0.6 – 15
Çinko Sülfür (ZnS)	2.25	2.20	0.4 - 15
Yüksek kırılma indisli malzemeler			
Kurşun Tellür (PbTe)	5.6	5.6	3.5 – 40
Toryum Florid (ThF_4)	4.15	4.15	0.7 – 25
AMTIR(Ge,As,Se)	2.51	2.50	0.5 - 14

Düşük kırılma indisli malzeme ile yüksek kırılma indisli malzemelerden oluşturulacak YÖ kaplama, kaplama yapılacak alttaş üzerine bir düşük bir yüksek kırılma indisli malzeme kullanılarak optimize edilip kırılma indisi orta düzeye indiğinde kullanılabilir. Düşük ve yüksek kırılma indisli malzemelerden çok katmanlı yansıma önleyici kaplama geliştirilebilir. Orta düzeyli kırılma indisli malzemeler Ge kristali için kırılma indisi açısından uygun olduğundan için tek katman yansıma önleyici kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. İstenilen kırılma indisli malzeme seçilip YÖ kaplaması yapıldığında, Germanyumun geçirgenliği artacaktır. Proje önerisinde yansıma önleyici olarak elmas benzeri karbon filmi geliştirilmesi hedeflenmiş ancak bu filmlerin başarılı olarak geliştirilmesi gerçekleştirilemediği görüldüğünden, çalışmamızda, kaplama malzemesi olarak literatürde Ge optik pencereler için uygun malzeme olan ZnS materyali seçilmiştir.

Çinko sülfür geniş bant aralığına sahip (3.6 – 3.93 eV) olmasından optoelektronik uygulamaları için önemli bir malzemedir. ZnS, yansıma önleyici kaplama olarak güneş hücreleri, fotoiletkenlik, alan etkili transistor, optik sensörler, fotokatalizör gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. ZnS, hegzağonal würtzite yapısında 3.79 – 3.93 eV olan bant aralığı, kübik yapıda 3.6 eV civarında olması (Nadeem ve Ahmed, 2000) ve diğer yarı iletkenlerle

karşılaştırıldığında düşük toksin etkisinden dolayı çok kullanılmaktadır. ZnS ince film; termal buharlaştırma, RF sputtering, moleküler beam epitaxy (MBE), kimyasal banyo kaplama gibi birçok yöntemle yapılabilir.

Çinko sülfürün kırılma indisi 4 μm de 2.25, 10 μm 2.20 civarında olması (Nadeem ve Ahmed, 2000), tek katman film kaplamada kullanılan alttaşın kırılma indisinin karekköküne ne kadar yakın olursa geçirgenlik değerinin yüksek olmasına olanak sağladığından bu çalışmada ZnS kullanılmıştır. ZnSe de kırılma indisleri 2.50 civarı olması teorik sonuçlarda ZnS 'ye göre düşük sonuçlar verdiğinden tercih edilmemiştir.

Filmlerin kaplaması ve karakterizasyonu

Yansıma önleyici kaplamalarımız için kullandığımız teknik püskürtme tekniğidir. Püskürtme yöntemi, hedef malzeme yüzeyinin, genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarının bombardıman edilerek, atomların yüzeyinden sıçratılması ve hedef malzeme yüzeyinden koparılan atomların buhar fazına geçirilerek alttaş malzemesi üzerine biriktirilmesi esasına dayanır. Püskürtme yöntemi ile çeşitli iletken, yarıiletken veya yalıtkan malzemeler elde edilebilir. İletken olan malzemeler DC Magnetron Püskürtme, yalıtkan malzemeler ise RF Magnetron Püskürtme yöntemiyle oluşturulur.

Çinko Sülfür (ZnS) ince filmleri RF Magnetron Püskürtme yöntemiyle Ge alttaş üzerine başarıyla kaplanmıştır.

Kaplamada, Fresnel Eşitliklerinden elde edilen geçirgenlik

$$T_{min} = \frac{4n_i n_s}{(n_i+n_s)^2} \qquad T_{max} = \frac{4n^2 n_i n_s}{(n_i n_s+n^2)} \tag{3}$$

ve

$$n = \sqrt{n_i n_s} \qquad nd = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4} \ldots \tag{4}$$

formülleri kullanılarak filmlerin kalınlık hesapları yapılmıştır.

RF Magnetron Püskürtme yöntemi ile Ge alttaş üzerine ZnS kaplanmasında 99.95 saflıkta ZnS hedefi kullanılmıştır. Örnek olarak kullanılan Ge, 20 mm X 20 mm boyutlu 2.1 mm kalınlıkta deneme numuneleri olarak belirlenmiştir. Kullanılan Germanyumlar, deiyonize su ile yıkandıktan sonra 5 dakika Aseton-ultrasonik banyo, 5 dakika propanol alkol-ultrasonik banyo ile temizliği yapılmış ve kaplama yapılmak için numune tutucuya yerleştirilmiştir. Sisteme

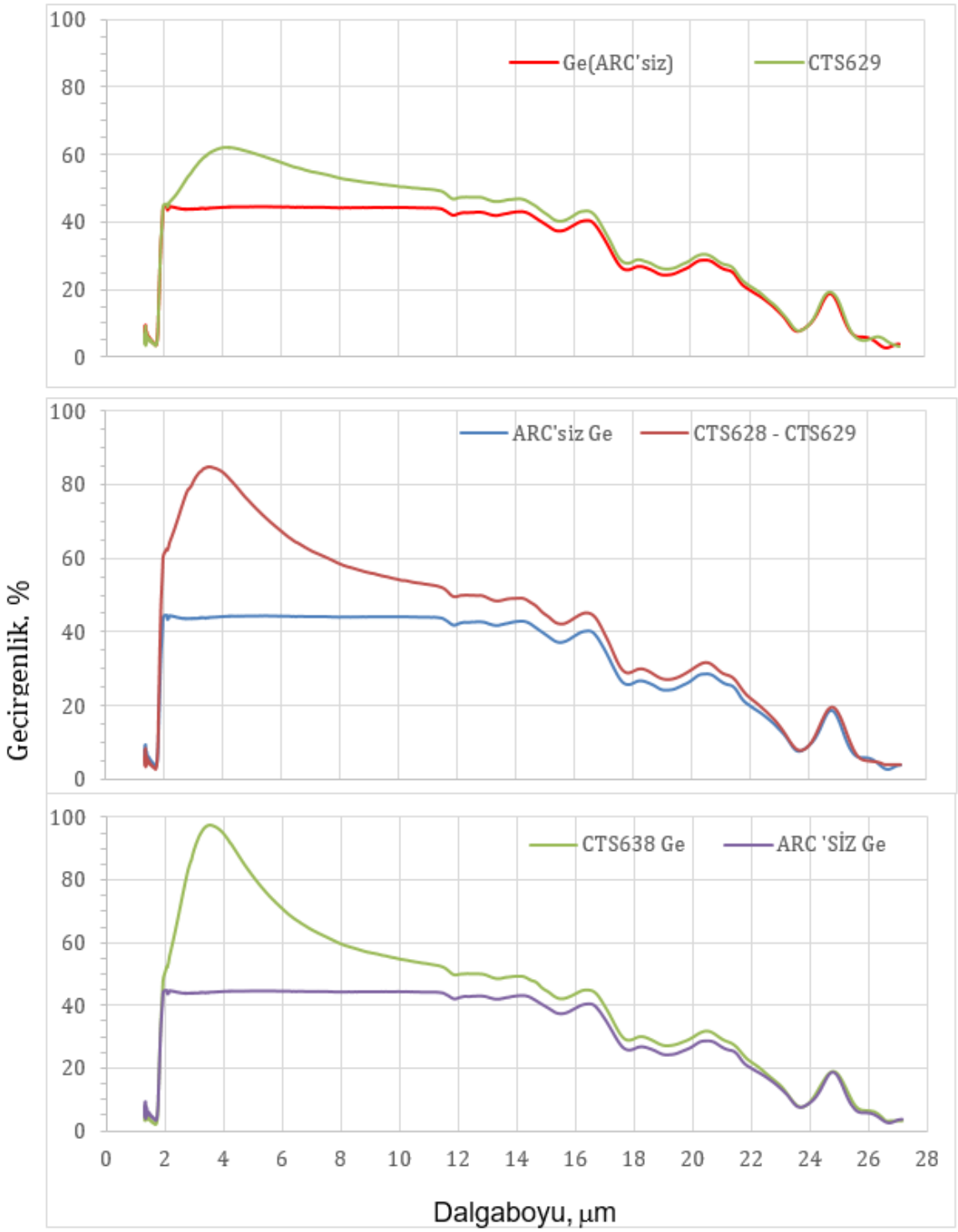
yüklemesi yapılan germanyumlar 100℃ alttaş sıcaklığında ve 100 Watt güçte kaplama yapılmıştır. Diğer parametre olan basınç film özellikleri incelemek için 3 mTorr, 20 mTorr ve 30 mTorr olarak belirlenmiş her büyütme de geçirgenlik değişikleri incelenmiştir. ZnS filmlerinin kaplama parametreleri Tablo 6'da sunulmuştur:

Tablo 6. ZnS filmlerinin kaplama parametreleri

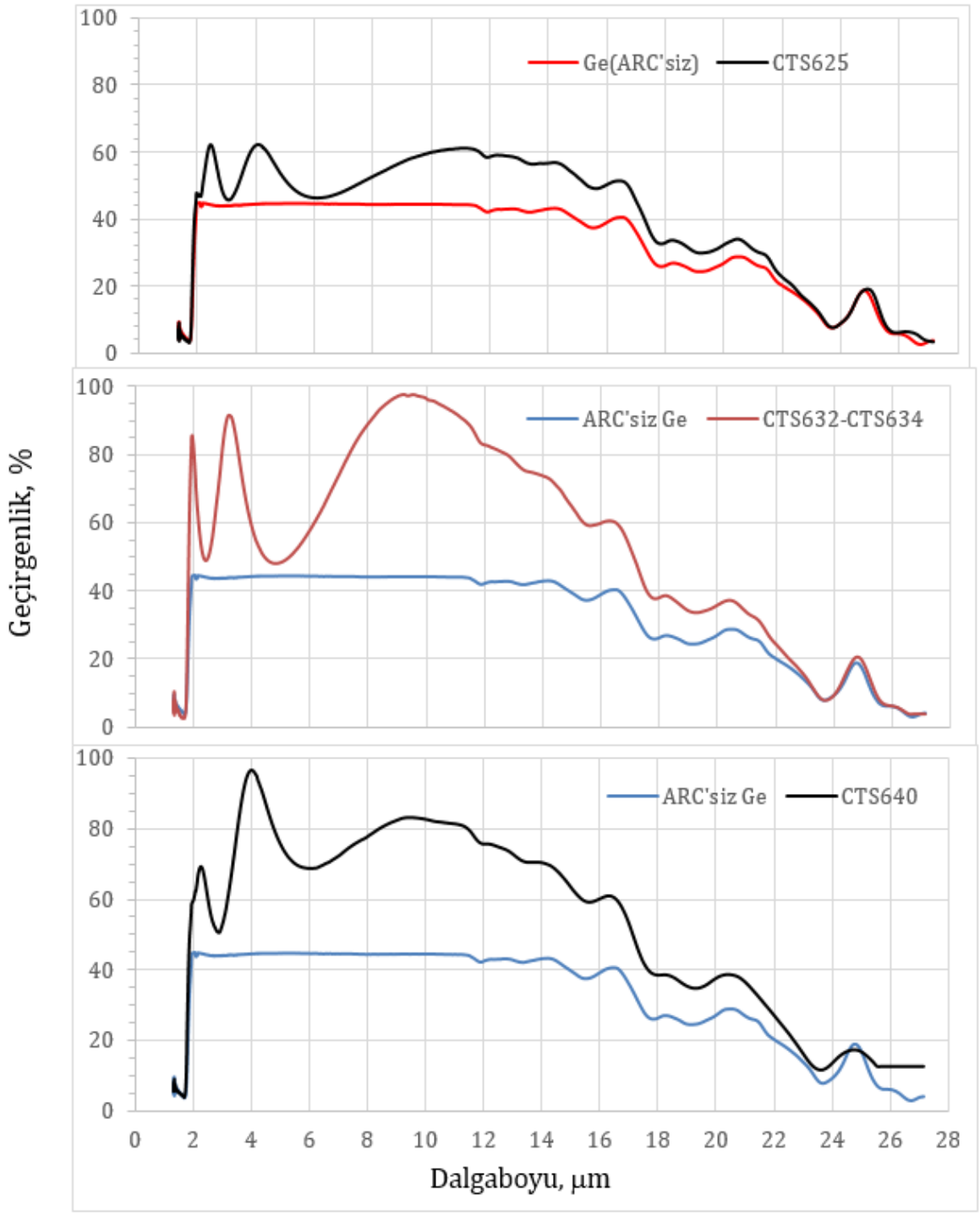
No	Numune	Kaplama Kalınlığı (ön/arka), nm	Kaplama Basıncı mTorr	Kaplama Süresi dak.
1	CTS629	430/0	20	100
2	CTS628-629	430/210	20	100/60
3	CTS638	335/335	30	115/115
4	CTS625	1166/0	3	195
5	CTS632-634	850/850	3/20	180/180
6	CTS640	1195/390	3/3	195/390

Geçirgenlik spektrulmarı Şekil 13'te verilen Ge optik pencereler için, 3-5 μm bölgesine uygun olarak CTS629 nolu numunesinin tek yüzeyi, CTS628-629 (bu numune tekrarlanabilirliği göstermek amacıyla iki kez üretilmiştir) ve CTS638 numunelerinin ise iki yüzeyi ZnS ile kaplanmıştır.

8-12 μm bölgesine uygun olarak CTS622 nolu numunesinin tek yüzeyi, CTS632 (bu numune tekrarlanabilirliği göstermek amacıyla CTS634 olarak iki kez üretilmiştir) ve CTS640 nolu Ge optik pencerelerin iki yüzeyi ZnS ile kaplanmış ve bu numunelerin geçirgenlik spektrumları Şekil 14'te vermiştir.



Şekil. 13. Tek yüzeyi (CTS629) ve çift yüzeyi (CTS628-629 ve CTS638) yansıma önleyici ZnS filmi ile kaplı Ge optiklerin geçirgenlikleri

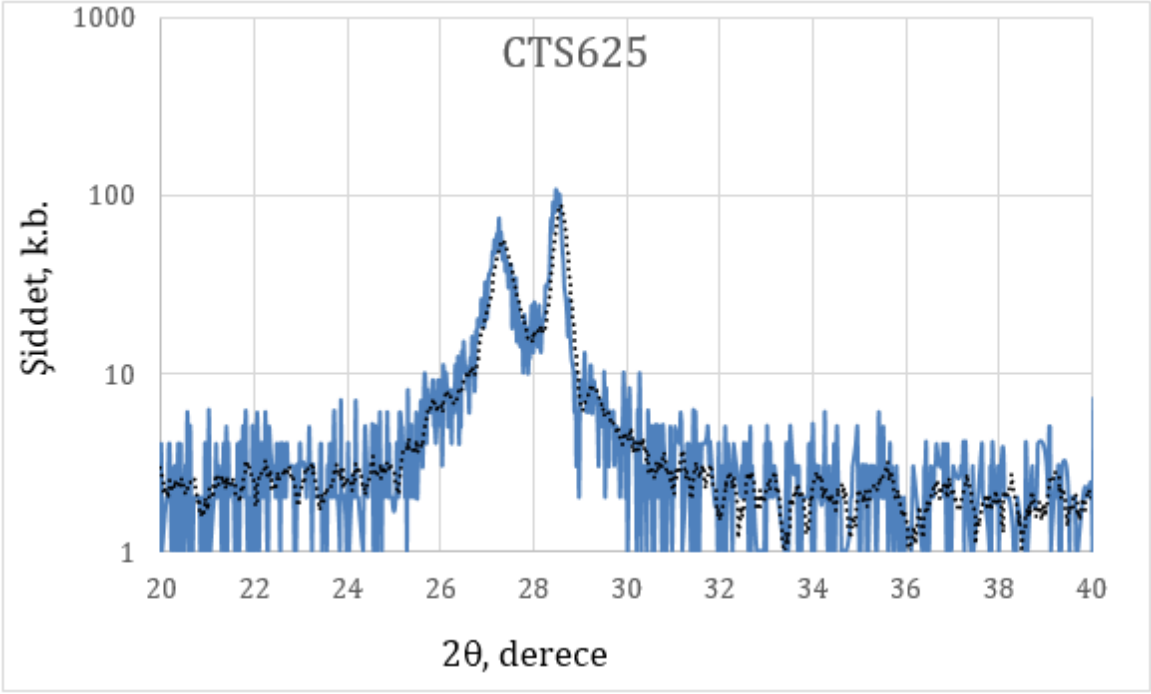


Şekil. 14. Tek yüzeyi (CTS625) ve çift yüzeyi (CTS632-634 ve CTS640) ZnS filmi ile kaplı Ge optiklerin geçirgenlikleri

İki yüzü ZnS yansıma önleyici ile kaplanmış Ge optik pencerenin (CTS632-634) 8-12 μm aralığında >%95 optik geçirgenliğe ulaştığı ve, ayrıca, 2-4 μm aralığında %90 civarında optik geçirgenliğe sahip olduğu Şekil 14'de görülmektedir. Film kalınlığının artırılması ile geçirgenlik

spektrumunun büyük dalgaboyuna kaydığı (CTS640) anlaşılmaktadır. Benzer durum 3-5 μm aralığı için yapılan kaplamalarda da gözlenmiş ve iki yüzü 335 nm ZnS ile kaplanmış Ge optiğin geçirgenlik değerinin >%95 civarına ulaştığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, literatürde çok katmanlı ZnS YÖ kullanılarak elde edilen Ge optiklerle uyum içerisindedir (Rahmlow, vd. 2008). Elde edilen optik geçirgenlik değerleri Firoozifar, vd. 2011 tarafından yapılan çalışmada elde edilen değerlerden daha yüksektir. Ayrıca, üretilen ZnS yansıma önleyici filmler, mekanik yapışmaları açısından bant testi ile test edilerek filmlerin Ge yüzeyine iyi bir tutunmaya sahip oldukları görülmüştür.

ZnS kaplı numunelerin XRD desenleri alınmış ve benzer kırınım deseni veren filmler içerisinden CTS625 numunesinin kırınım deseni bir örnek olarak Şekil 15'de verilmiştir. Alınan ölçüm sonuçlarına göre 111 yönelimli germanyumun (2θ=27.284), üzerine kaplanan çinko sülfürün 002 (2θ=28.501) yönelimli pikii görülmüştür.



Şekil 15. ZnS kaplı Ge optik pencerenin XRD deseni

5. SONUÇ

Proje hedefleri doğrultusunda;

1) (111) kristal yönelimine sahip elmas kübik yapıda katkısız, Sb ve Ga katkılı Ge külçeleri Czochralski tekniği ile büyütüldü. Üretilen Ge kristallerin enerji bant aralığının 0.66 eV; yoğunluğunun 5.30 g/cm^3 olduğu belirlendi.
2) Ge külçeleri farklı kalınlıklarda dilimlenerek yüzey temizleme işlemleri gerçekleştirildi.
3) Yüzey pürüzlülük değerleri <2 nm olan iki tarafı parlatılmış 102 mm çaplı dilimler (alttaş ve optik pencere) üretildi.
4) Yapısal, elektriksel, optik ve morfolojik karakterleri belirlenen dilimlerin hem alttaş hem de kızılötesi uygulamalar için optik pencere olarak kullanılabileceği belirlendi.
5) Proje kapsamında, katkısız (özdirenci > 50 Ohm-cm), p ve n-tipi katkılı (özdirenci 0.5-40 Ohm-cm, mobilitesi >= 2500, 3000 cm^2/V.s), 1-3 nm yüzey pürüzlülüğü kalitesinde alttaş prototiplerinin üretimleri gerçekleştirildi. Üretilen alttaşların kusur yoğunlukları n-tipi için 6.94-7.4E04 ve p-tipi için 3.61E04 cm^{-2} olduğu belirlenmiştir.
6) 3-5 ve 8-12 μm kızılötesi bölgede >%95 geçirgenliğe sahip ZnS film kaplamaların 1-2 nm yüzey pürüzlülüğü sahip Ge dilimleri üzerine kaplanarak optik pencereler geliştirildi.

Bu proje çıktılarının, Türkiye'de Germanyuma dayalı teknolojilerin geliştirilmesi çalışmalarına bir başlangıç olması beklenmektedir. Üretilen alttaşların, üzerine III-V grubu epitaksiyel kristal büyütülmsinede ortaya çıkan antifaz kusurlarını gidermek amacıyla, farklı düzlemlere göre açılı olarak kesilmesi ileri çalışma olarak önerilmektedir. Ayrıca, Ge tek kristallerinin radyasyon dedektörü olarak da kullanımı mümkündür. Bu amaçla Ge kullanımı için 7-8N saflıkta üretilmesi çalışmaları yürütmek önerilmektedir. Yapılan çalışmada geliştirilen ve yüzey tutunması iyi düzeyde edeğerlendirilen ZnS tek katmanlı yansıma önleyici film sayesinde 2 bantta yüksek optik geçirgenlik elde edilmiştir. Bu sonuçlar, ZnS kaplamasının geliştirilerek KÖ uygulamalar için kullanımının yaygınlaştırılabileceğini göstermektedir. Proje kapsamında geçekelştirilen çalışmalar ve elde edilen bilimsel sonuçlar ulusal ve uluslararası konferanslarda sözlü bildiri ve poster olarak sunularak paylaşımı sağlanmıştır. Katılım sağlanan konferanslar: WITAM-2016 (sözlü bildiri), Fotonik-2017 Çalıştayı (poster), ICG2017 Milano/İtalya (poster). Ayrıca, proje kapsamında bir adet Yüksek Lisans tezi tamamlanmak üzeredir.

Projede üretilen Ge alttaşlar, farklı kurumlardaki araştırmacılara ve araştırmacılara kristal temin eden bazı firmalara tanıtılmıştır. Üretilen ZnS yansıma önleyicili optik pencere savunma sanayi firmalarına tanıtılmıştır. Bu kapsamda elde edilen başarı, Roketsan A.Ş. tarafından önemli görülmüş; optik kaplamalar konusunda işbirliği kararı oluşmuştur.

Kaynaklar

Aspnes, D.E., Studna, A.A. 1983. “Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV”, *Phys. Rev. B*: 27, 985-1009.

Ciosek, J., Firak, J., Stanislawek, U. 2003. “Wideband antireflection coatings on germanium and filters for second optical window” Proceedings of The Society Of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) 5230, 30-33.

Claeys, C. and Simoen, E. 2007. “Germanium-Based Technologies:öFrom Materials to Devices” Oxford OX5 1GB, UK., Elsevier.

Derluyn, A.J., Dessein, K., Flamand, G., Mols, Y., Poortmans, J., Borgh, G.s and Moerman, I. 2003. “Comparison of MOVPE grown GaAs solar cells using different substrates and group-V precursors” J. Cryst. Growth 247, 237-244.

Firoozifar, S.A.R., Behjat, A., Kadivar, E., Ghorashi, S.M.B., Borhani, Zarandi, M. 2011. “A study of the optical properties and adhesion of zinc sulfide anti-reflection thin film coated on a germanium substrate” Applied Surface Science 258, 818– 821.

Hondt, M.D., Yu, Z.O., Depreter, B., Sys, C., Moerman, I., Demeester, P. and Mijlemans, P. 1998. “High quality InGaAs/AlGaAs lasers grown on Ge substrates” J. Cryst. Growth 195, 655-659.

Inoue, K., Taishi, T., Tokumoto, Y., Murao,Y., Kutsukake,K., Ohno, Y., Suezawa, M. 2013. and Yonenaga, I., “Interstitial oxygen behavior for thermal double donor formation in germanium: Infrared absorption studies” J. Appl. Phys. 113, 073501.

Murao, Y., Taishi, T., Tokumoto, Y., Ohno, Y. and Yonenaga, I. 2011. “Impurity effects on the generation and velocity of dislocations in Ge” J. Appl. Phys. 109, 113502.

Nadeem, M.Y. and Ahmed, W. 2000. “Optical Properties of ZnS Thin Films” Turk J. Phy. 24, 651-659.

Puetz, N., Farad, S., Riel, B.J. 2012. “Method of fabricating semiconductor devices on a group IV substrate with controlled interface properties and diffusion tails” Patent No: US2012012541.

Rahmlow, T.D., Lazo-Wasem, J.E., Wilkinson, S. and Tinker, F. 2008. “Dual band antireflection coatings for the infrared” Proc. of SPIE Vol. 6940, 69400T.

Singh, S.G., Desai, D.G., Singh, A.K., Sen, S., Gadkari, S.C., and Gupta, S.K. 2011. “Growth of Germanium Single Crystals by Czochralski Technique” Solid State Physics: Proceedings of the 56th DAE Solid State Physics Symposium

Swanson, T. 1951. “Response pooling between chromatic and luminance systems” *Natl. Bur. Stand. (U.S.),* 539 (I).

Taishi, T., Ohno, Y., Yonenaga, I. 2009. “Reduction of grown-in dislocation density in Ge Czochralski-grown from the B2O3-partially-covered melt” Journal of Crystal Growth 311, 4615–4618.

Thomas, S.G., Johnson, E.S. , Tracy, C., Maniar, P., Li, X., Roof, B., Hartmann, Q. and Ahmari, D.A. 2005. “Fabrication and characterization of InGaP/GaAs heterojunction bipolar transistors on GOI substrates” IEEE Electron Dev. Lett. 26, 438-440.

Van der Heide, X., Posthuma, N.E., Flamand, G., W. Geens, W., Poortmans, J. 2009. “Cost-efficient thermophotovoltaic cells based on germanium substrates” Solar Energy Materials & Solar Cells 93, 1810–1816.

Vanhellemont, J., Spiewak, P., Sueoka, K. and Romandic, I. 2009. “On intrinsic point defect cluster formation during Czochralski crystal growth” Phys. Status Solidi C 6, No. 8, 1906–1911.

Wang, G., Zhang, M., Zhu, Y., Ding, G., Jiang, D., Guo, Q., Liu, S., Xie,V, Chu, P.K., Di, Z. & Wang, X. 2013. “Direct Growth of Graphene Film on Germanium Substrate” SCIENTIFIC REPORTS |3:2465| DOI: 10.1038/srep02465.

Zhao, Y. and Zhang, J. 2008. “Microstrain and grain-size analysis from diffraction peak width and graphical derivation of high- pressure thermomechanics” J. Appl. Cryst. 41, 1095–1108.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. SÜLEYMAN ÖZÇELİK
Proje No:	115F048
Proje Başlığı:	Germanyum Alttaş Ve Optik Pencere Geliştirilmesi
Proje Türü:	1005 - Yeni Fikirler ve Ürünler
Proje Süresi:	18
Araştırmacılar:	TARIK ASAR, MEHMET KASAP
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	GAZİ Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2015 - 01/03/2017
Onaylanan Bütçe:	274320.0
Harcanan Bütçe:	154824.57
Öz:	Bu proje ile, Gazi Fotonik?te kurulu CZ sistemi kullanılarak Ar-Ge çalışmalarına dayalı Germanyum (Ge) tek kristallerini büyütmek; bu kristallerden alttaş geliştirmek-üretmek amaçlanmıştır. Yansıma önleyici ince film kaplamalar geliştirilerek, yüksek optik geçirgenliğe sahip Ge pencereler üretilmesi projemizin diğer bir amaçlandı. Proje kapsamında, (i) yüksek kristal kalitesinde Ge tek-kristallerinin CZ tekniği ile büyütme süreçlerinin optimizasyonu (ii) katkı miktarı ve homojenliğinin optimizasyonu ve doğrulanması (iii) yüksek optik geçirgenlik sağlayacak şekilde yansıma önleyici katmanların tasarlanması ve geliştirilmesi (iv) kristallerin işlenerek prototip ürün haline getirilmesi çalışmaları yürütüldü. Ge optik elemanların ve alttaşların geliştirilmesinde; eriyikten, sıvı-katı arayüzeyinin soğutulması ile kristal oluşturma prensibine dayalı CZ kristal büyütme yöntemi, kristallerin kesilmesi ve parlatılması yöntemleri; yansıma önleyici katman geliştirilmesi için eş-püskürtme tekniği kullanıldı. Yansıma önleyici geliştirmede öncelikle optik biliminin kuramlarına göre tasarım yapılarak kızılötesi bölgede (2-14 um) maksimum geçirgenlik sağlayan film yapıları belirlendi. Her basamakta geliştirilen malzeme ve üretilen ürünlerin yapısal, elektriksel, optik ve morfolojik karakterleri XRD, Hall Etkisi, FTIR ve AFM yöntem ve sistemleri ile gerçekleştirildi. Proje kapsamında, katkısız (özdirenci 50 Ohm-cm), p ve n-tipi katkılı (özdirenci 0.5-40 Ohm-cm, mobilitesi 2500, 3000 cm2/V.s), 1-3 nm yüzey pürüzlülüğü kalitesinde alttaşların geliştirilerek prototip olarak üretildi. Kızılötesi bölgede %95 geçirgenliğe ince film kaplamaların 1-3 nm yüzey pürüzlülüğü sahip Ge dilimleri üzerine kaplanarak optik pencereler geliştirildi. Bu proje çıktılarının, Türkiye?de Germanyuma dayalı teknolojilerin geliştirilmesi çalışmalarına bir başlangıç olması beklenmektedir.
Anahtar Kelimeler:	Germanyum, tek-kristal, alttaş, optik pencere, yansıma önleyici
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- a-Ge/c-Ge İnce Filmlerin Üretimi, Yapısal ve Elektriksel Karakterizasyonu (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum),

TÜBİTAK