



**T.C.
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**TESTERE DİŞİ ÜÇLÜ ÜÇGEN BARIYER YAPISINDA
REZONANS TÜNELLEME OLAYININ İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Gonca CORUH

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet BATI**

**RİZE
2023**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında, Doç. Dr. Mehmet BATI danışmanlığında, Gonca CORUH tarafından hazırlanan *Testere Dişi Üçlü Üçgen Bariyer Yapısında Rezonans Tünelleme Olayının İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 12/01/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı, Adı SOYADI

İmza

Başkan :

Prof. Dr. Mehmet ŞAHİN

Üye :

Prof. Dr. Mehmet ERTAŞ

Üye :

Doç. Dr. Mehmet BATI

ETİK BEYAN

Fizik Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Testere Dişi Üçlü Üçgen Bariyer Yapısında Rezonans Tünelleme Olayının İncelenmesi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, enstitünüz tez yazım kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

12/01/2023

Gonca CORUH

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında testere dişi üçlü üçgen bariyer yapısında rezonans tünelleme özellikleri incelenmiştir. Rezonans enerji seviyeleri testere dişi üçlü üçgen bariyer yapısı için tespit edilmiştir. Elektronların yapıdan geçme olasılıklarının yapı parametrelerine bağlı değişimleri Airy fonksiyonu bazlı transfer matris metodu kullanılarak incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimimde bu çalışmamı tamamlayabilmem için desteklerini esirgemeyen herkese öncelikle teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu tezin bu noktaya gelmesinde danışmanlığımı üstlenen çalışmalarım süresince kesintisiz her an ulaşabildiğim, her türlü yardım ve ilgisini gördüğüm, yapıcı eleştirileri ile beni sürekli yönlendiren, Sayın Doç. Dr. Mehmet BATI'ya yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamı sona ulaştırabilmek için karşılaştığım zorlukları yenmemde büyük emeği olan, bugünlere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anneme ve babama sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Gonca CORUH
2023/RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
KISALTMALAR.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
GİRİŞ.....	1
1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2. MODEL VE YÖNTEM	8
2.1. Model.....	8
2.2. Yöntem	9
3. BULGULAR.....	16
4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	28
4.1. Öneriler.....	29
KAYNAKÇA.....	30

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı : Fizik

Tez Türü : Yüksek Lisans

Danışman : Doç. Dr. Mehmet BATI

Hazırlayan : Gonca CORUH

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 41

ÖZET

TESTERE DİŞİ ÜÇLÜ ÜÇGEN BARIYER YAPISINDA REZONANS TÜNELLEME OLAYININ İNCELENMESİ

Testere dişi üçlü üçgen bariyer yapısında rezonans tünelleme özellikleri incelenmiştir. Elektronların yapıdan geçme olasılıklarının yapı parametrelerine bağlı değişimleri transfer matris yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Üçlü bariyerler çift kuantum kuyusu yapılarındaki enerji seviyelerinin yeri yapı parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Yapıdan elektronların tamamının geçebildiği enerji seviyelerinin yeri yani rezonans tünelleme yaptığı rezonans enerjileri potansiyelinin şekline (kuyu ve bariyer genişlikleri, bariyer yüksekliği) bağlılığı incelenmiştir. Ayrıca elektrik bias altında yapının elektronların yapıdan geçme olasılıkları incelenmiştir. İletim katsayısındaki rezonans pikinin, öngerilim alanına ve yapı parametrelerine kuvvetli bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kuantum kuyuları, Transfer matris metodu, Rezonans tünelleme, Testere dişi üçlü üçgen bariyeri

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Physics

Thesis Type : Master Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mehmet BATI

Author : Gonca CORUH

Year : 2023

Pages : 41

ABSTRACT

INVESTIGATION OF RESONANCE TUNNELING IN SAWTOOTH TRIPLE TRIANGLE BARRIER STRUCTURE

The resonant tunneling properties of the sawtooth triple triangle barrier structure were investigated. The changes in the probability of electrons passing through the structure depending on the structure parameters were obtained by using the transfer matrix method. The location of energy levels in triple barrier double quantum well structures varies depending on the structure parameters. The location of the energy levels through which all of the electrons can pass through the structure, that is, the dependence on the shape of the resonant energies potential (well and barrier widths, barrier height) through which it makes resonant tunneling has been investigated. In addition, the probability of electrons passing through the structure under electrical bias was investigated. It shows that the resonance peak in the transmission coefficient is strongly dependent on the bias field and the structure parameters.

Keywords: Quantum wells, Transfer matrix method, Resonant tunneling, Sawtooth triple triangle barrier

KISALTMALAR

E_{res}	: Rezonans Enerjisi
k	: Dalga Sayısı
L_W	: Kuyu Genişliği
meV	: Mili Elektron Volt
nm	: Nanometre
RTD	: Rezonans Tünelleme Diyotu
T	: İletim Olasılığı
TMM	: Transfer Matris Metodu
V_L	: Sol Bariyer Potansiyel Yüksekliği
V_M	: Orta Bariyer Potansiyel Yüksekliği
V_R	: Sağ Bariyer Potansiyel Yüksekliği
L_{BL}	: Sol potansiyel bariyer taban genişliği
L_{BM}	: Orta potansiyel bariyer taban genişliği
L_{BR}	: Sağ potansiyel bariyer taban genişliği

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Elektrik biası değişimi ile ilk dört rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyelerdeki geçiş olasılıkları. Sistem parametreleri $LB=MB=RB=5$ nm, $VL = VM = VR=250$ meV olarak alınmıştır..... 25



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Testere dişi üçlü üçgen bariyer potansiyel bariyer çift kuyu yapısının şematik gösterimi	8
Şekil 2. Testere dişi üçlü bariyer çift kuyu farklı potansiyel bölgeleri.....	10
Şekil 3. Elektronların engeli geçme olasılığının gelen elektron enerjisi ile değişimi grafiği.....	16
Şekil 4. Rezonans enerjisinin bariyer yükseklikleri ile değişim grafiği.	17
Şekil 5. İletim olasılığın üç farklı orta potansiyel bariyeri için gelen elektron enerjisine göre değişimi	17
Şekil 6. Rezonans enerjisinin orta potansiyel bariyeri yüksekliğine bağlı değişimi grafiği.....	18
Şekil 7. Elektronların bariyerleri geçme olasılığın üç farklı bariyer genişlikleri için gelen elektron enerjisine göre değişimi.	18
Şekil 8. Rezonans enerjisinin bariyer genişliklerine bağlı değişimi grafiği.	19
Şekil 9. Elektronların bariyerleri geçme olasılığın üç farklı orta bariyer genişlikleri için gelen elektron enerjisine göre değişimi.	20
Şekil 10. Rezonans enerjisinin orta bariyer genişliğine bağlı değişim grafiği	20
Şekil 11. Elektronların bariyerleri geçme olasılığın üç farklı kuyu genişlikleri için gelen elektron enerjisine göre değişimi.	21
Şekil 12. Rezonans enerjisinin kuyu genişliklerine bağlı değişim grafiği	21
Şekil 13. Elektronların geçme olasılığın üç farklı sağ kuyu genişliği için gelen elektron enerjisine göre değişimi	22
Şekil 14. Rezonans enerjisinin sağ kuyu genişliğine bağlı değişim grafiği	22
Şekil 15. Elektrik alan biası ile potansiyel profilinin değişimi.....	23
Şekil 16. Elektronun engeli geçme olasılığının elektrik alan biasının üç farklı değeri için değişimi.....	23
Şekil 17. Elektrik alan biası ile rezonans enerji seviyelerinin değişimi,	24
Şekil 18. Rezonans pik genliğinin elektrik alanla değişimi.....	24

GİRİŞ

Yarı iletken endüstrisi son elli yılda inanılmaz ilerleme kaydetmiştir. Bugün teknoloji, bilinen tüm teknik ve fiziksel sınırları aşma yolundadır. Günümüzde mühendisler, birkaç atomdan oluşan kümeler ve birkaç elektronun akımıyla çalışabilmektedir. Bu teknolojinin açıkça kuantum mekaniksel yorumlamaya ihtiyacı vardır. En iyi bilinen kuantum olaylarından biri kuantum tünellemedir. Tünel olayı gelen parçacığın enerjisi bariyerin yüksekliğinden daha az olmasına rağmen, potansiyel engelinden geçebilmesidir. Ders kitaplarında bulunan standart kuantum tünelleme örneği, dikdörtgen bir bariyerdan tünellemedir (Bransden, ve Joachain, 2000; Nouredine, 2009). Diğer ilginç örnekler, doğrusal olarak değişen potansiyellerden tünellemedir. (Chamnan, ve Krunavakarn, 2017; Iwamoto, Aquino, ve Aguilera-Navarro, 2003). Örneğin yamuk potansiyeli (trapezoid) incelenen bariyer, dikdörtgen bir potansiyelin üstüne yerleştirilmiş üçgen bir potansiyeldir. Bir metal-yalıtkan-yalıtkan-metal yapı (Tung, 2014) veya bir metal-yalıtkan-metal yapı için bir bariyer modeli olarak düşünülebilir. (Abdolkader, Shaker, ve Alahmadi, 2018). Bu tip yapılar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Nutku, 2014).

Yarı iletken heteroyapıları teorik ve pratik çerçeveler içinde incelemek, kuantum mekanik tünellemeye dayalı bazı optoelektronik ve iletişim cihazlarının geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Teknolojide tünellemenin önemli bir rol oynadığı birçok uygulama vardır. Bu uygulamalar arasında moleküler biyoloji (Arndt, Juffmann, ve Vedral, 2009), taramalı tünelleme mikroskopu (Magoga, Archambault ve Cerdá, 2012), kuyular (Levi, 2012), kuantum kademeli lazerler (Jérôme, F., 2013) ve modern elektronik cihazlar (Mendez, ve Domínguez-Adame, 1994; Jasprit, 1995) bulunur.

Epitaksiyel kristal büyütme tekniklerinin gelişmesi ve yeni elektron cihazlarının önerisi ve üretimi ile elektron cihazlarının potansiyel profilleri, üçgen bariyerler, yamuk bariyerler vb. gibi çeşitlilik kazanmaktadır. Bunların arasında, tek üçgen veya yamuk metal oksit yarı iletken yapılarda (Wang, Ma, ve Tian, 2001; Khairurrijal, Noor, ve Sukirno, 2005) veya metal-yalıtkan-metal yapılarda (Shu, Jiang, ve Meng, 2002) görünen bariyer, mevcut yüksek teknolojik ilginin bir örneğidir. Diğer kuantum heteroyapıları arasında, üçgen kuantum kuyuları kullanıldığında elektroabsorpsiyonun deneysel ölçümünde absorpsiyon katsayısı değeri azaldığından,

üçgen kuantum kuyuları da önemli sistemlerdir (Gerber, Droopad, ve Maracas, 1993). Ayrıca, üçgen kuantum profilinin akım absorpsiyon spektrumu daha düşük ön besleme voltajlarıyla çalışabilmektedir (Ishikawa, ve Tada, 1989).

İki veya daha fazla bariyerli yapılarda karşılaşılan diğer önemli kuantum mekaniksel olgulardan biri de rezonans tünelleme olayıdır. Tünelleme olayında parçacıkların tamamının geçtiği enerji seviyeleri ile karşılaşılmakta bu olaya rezonans tünelleme olayı denilmektedir. Bu etki sayesinde nano aygıtlarda anahtarlama yapılabilmektedir. Belirli enerjideki parçacıkların geçebildiği durumlar sayesinde parçacık enerjisinin artırılması veya azaltılması ile geçiş kontrol edilebilmektedir. Rezonans tünelleme aygıtları, doğası gereği hızlı bir süreç olan kuantum mekanik tünellemeyi kullanır ve bu nedenle oda sıcaklığında çalışan kompakt ve uyumlu terahertz yayıcıları olan ihtiyacı karşılamak için umut verici adaylar olarak kabul edilir. Rezonans tünelleme özelliği gösteren yapıların üretimi için bu yapıların hangi koşullarda rezonans tünelleme olayının gerçekleştirdiği önceden simülasyonlarla tahmini hem ekonomik hem zaman açısından önem arz etmektedir.

Elektronik aygıtların sürekli küçülmesi ile kuantum tünelleme gibi kuantum mekanik etkiler birçok cihaz uygulamasında daha etkili hale gelmektedir. Bu boyutlarda kuantum etkilerin incelenebilmesi için kuantum mekaniksel hesaplama teknikleri kullanılmalıdır. Denge dışı Green fonksiyonu tekniği, Wigner fonksiyonu tekniği, Yoğunluk matrisi yöntemi, Transfer matris yöntemi gibi yöntemler mevcuttur (Pourfath, 2007). Bu yöntemler kullanılarak rezonans tünelleme yapıları incelenmiştir. Çoğu optoelektronik cihazdaki heteroeklem ve yarıiletken malzeme katman yapısı göz önüne alındığında transfer matris yöntemi kuantum olaylarını araştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca transfer matris yöntemi sayısal olarak verimlidir, uygulanması daha kolaydır ve en önemlisi diğer yaklaşımlara kıyasla daha fazla fizik bilgisi sağlar. Genel olarak çift bariyer yapılarından dikdörtgen, trapezoidal, parabolik ve üçgen yapılar üzerinde çalışılmıştır. Daha karmaşık ve daha az çalışılmış üçlü bariyer yapı tasarımlarını kullanan rezonans tünelleme aygıtları, geleneksel çift bariyer yapılarından daha yüksek frekanslarda ve daha fazla çıkış gücü ile çalışma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, bu yapıların artan karmaşıklık derecesi nedeniyle, üçlü bariyer yapılarının davranışının tam olarak anlaşılması gerekmektedir. Bu tür yapıların analiz edilmesi, cihazlarda meydana gelen temel süreçlerin

anlaşılmasını sağlarken, oda sıcaklığında yapılan çalışmalar pratik uygulamalar için verimli yapıların tasarımını kolaylaştıracaktır.

Üç ve daha fazla bariyer içeren çalışmalarda farklı yöntemlerle çalışılmış olup bilginiz dahilinde testere dişi üçlü üçgen bariyer yapısında rezonans tünelleme olayı incelenmemiştir. Bu tez çalışmasında transfer matris metodu kullanılarak testere dişi üçlü üçgen bariyer yapısında rezonans tünelleme olayı incelenecektir. Rezonans tünellemenin olduğu enerji seviyeleri, iletim olasılığının gelen elektron enerjisine bağlı olarak değişimi incelenerek tespit edilmiştir.



1. LİTERATÜR ÖZETİ

Düşük boyutlu yarı iletken kuantum sistemleri olarak sınıflandırılan kuantum kuyusu, kuantum nokta ve kuantum teli heteroyapıları yarıiletken çalışmalarının önemli bir parçası haline gelmiştir (Fejer, vd., 1989; Harrison, ve Valavanis, 2016). Teorik ve pratik araştırmalar yüksek kaliteli kuantum heteroyapıları üretmek için bazı olanaklar sunmaktadır. GaAs/AlAs'tan oluşan malzemeler, heteroyapıların araştırılmasında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yapılar nanometre mertebesinde üretilmekte ve kullanışlı aygıtlar tasarlanmaktadır. Bu mertebede kuantum mekaniksel olaylar gözlemlenmektedir.

1958'de, kuantum mekanik tünellemenin etkisini kullanan Leo Esaki (Esaki., 1992) tarafından negatif direnç sergileyen yeni bir diyot rapor edildi. Esaki'nin yarı iletken malzemelerde elektron tünelleme konusundaki öncü çalışması, Giaever ile birlikte 1973 Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmasını sağlamıştır (Esaki, 1992). 1970'de Esaki ve Tsu, süper örgülerde "rezonans tünelleme" olarak adlandırılan yeni bir tünelleme olgusunun ilk gözlemlerini bildirdiler (Esaki, ve Tsu, 1970; Tsu, ve Esaki, 1973) ve 1974 yılında GaAs/AlGaAs yarı iletken çift bariyer yapılarındaki ilk rezonans tünelleme (RT) gözlemleri Chang ve arkadaşları tarafından yapıldı (Chang, Esaki, ve Tsu, 1974).

Aradan geçen dönemde, çalışmaların çoğu geleneksel çift bariyer yapılarına odaklanarak, rezonans tünelleme aygıtları (RTA) üzerine önemli miktarda araştırma yapılmıştır. Hem temel tünelleme süreçleri (Guéret, vd., 1989; Nicholls, vd., 2019) hem de elektronik ve optoelektronik uygulamalar (Malik, Godfrey, ve Dawson, 1999; Ferry, 2001) üzerinde araştırmalar yürütülmüştür, en dikkate değer cihaz geliştirmesi kuantum kademeli lazerdir (Faist, J. vd., 1993; Faist, vd. 1996; Jérôme, 2013). 1990'ların başı Birleştirilmiş kuantum kuyu sistemleri, kuantum girişimi ve tutarlı elektron salınımları ile ilişkili fiziksel olayların incelenmesi için de çok zengin bir alan olduğu kanıtlanmıştır (Faist, vd.,1993; Strutz, ve Shiraki, 1996). Rezonans tünelleme anahtarlarındaki üçgen bariyer yapıları (Guo, 1996; Guo, 1998) cihaz tasarımına geniş çapta uygulanabilir; RT doğrultucularındaki girintili bariyer yapıları (Schulz, ve Goncalves da Silva, 1988; Ventra, Papp, ve Coluzza, 1996) yüksek hızlı elektronikte uygulama bulmaktadır.

Elektronik cihazların sürekli küçülmesi ile kuantum tünelleme gibi kuantum mekanik etkiler birçok cihaz uygulamasında daha etkili hale gelmektedir. Bu boyutlarda kuantum etkilerin incelenebilmesi için kuantum mekaniksel hesaplama teknikleri kullanılmalıdır. Basit engeller için literatürde analitik ifadeler bulunabilir. Örneğin, dikdörtgen bir bariyerin tünelleme olasılığı birçok lisans ders kitabında standart bir örnektir (Bransden, ve Joachain, 2000; Nouredine, 2009). Üçgen bariyer potansiyeli ve tersi (üçgen kuyu), çözümleri Airy fonksiyonları cinsinden bulunan tam olarak çözülebilir potansiyellerdir (Ghatak, Sauter, ve Goyal, 1997). Potansiyelin bağlı durumlarının tespiti (Airy fonksiyonları açısından), ilk olarak Ferrari ve Mashhoon (Ferrari, ve Mashhoon, 1984; Mashhoon, 1983) tarafından elde edilmiştir. Ayrıca tekli üçgen bariyer yapıları farklı yöntemler ile hem teorik (Gossard, vd., 1982; Venturi, vd. 1991) hem de deneysel (Gupta, Chilana, ve Srivastava, 1986; Forbes, ve Deane, 2011) olarak çalışılmıştır.

İkili ve üçlü dikdörtgen bariyerler kapsamlı bir çalışmanın konusu olmuştur (Zhao, vd. 1996). Ancak birden fazla engeli olan daha karmaşık yapılar için analitik çözümler elde etmek çok zorlaşır. Bu tür yapılara çözüm bulmak için sayısal yöntemlerin kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir. Kullanılan en önemli yaklaşımlardan biri Wentzel–Kramers–Brillouin (WKB) yöntemidir (Garg, 2000). Ne yazık ki, iletim katsayısını hesaplamak için kullanılan bu geleneksel yöntem, örneğin rezonans tünelleme fenomenini açıklamakta başarısız olmaktadır. Ayrıca heteroeklem ara yüzleri gibi birçok durumda karşılaşılan potansiyel profilin hızla değiştiği bölgelerde iletim katsayısını hesaplamak zordur. Fakat sonlu farklar yöntemi (FDM) (Van der Maelen, Granda, ve Velázquez, 1996; Boykin, ve Klimeck, 2005), transfer matrisi yöntemi (TMM) (Abdolkader, 2007; Ando, ve Itoh, 1987) ve iletim hattı yöntemi (TLM) (Anwar, ve Jahan, 1995; Khondker, Khan, ve Anwar, 1988) gibi tünelleme problemlerini çözmek için sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Çoğu optoelektronik cihazdaki heteroeklem ve yarı iletken malzeme katman yapısı göz önüne alındığında, transfer matrisi yöntemi kuantum olaylarını araştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca transfer matrisi yöntemi sayısal olarak verimlidir, uygulanması daha kolaydır ve en önemlisi diğer yaklaşımlara kıyasla daha fazla fizik bilgisi sağlar.

Abdolkader ve arkadaşları, MATLAB ortamında, keyfi bir potansiyel bariyer üzerinden tünelleme olasılığını ve akımı hesaplamak için üç farklı sayısal tekniği karşılaştıran sayısal bir simülasyon aracı geliştirilmiştir: Sonlu Farklar Metodu (FDM), Transfer Matrisi Metodu (TMM) ve İletim Hattı Metodu (TLM). Kıyaslama için araç, her biri analitik çözümlerle karşılaştırılan ve hatanın ağ noktalarının sayısına bağımlılığını veren dikdörtgen tekli bariyer, dikdörtgen çiftli bariyer ve sürekli çan şeklindeki potansiyel bariyer gibi birçok bariyer şekli çalışmasına uygulanmıştır. Ek olarak, güneş pilleri için doğrultucu olarak kullanılan metal-yalıtkan-metal diyot (MIM) ve metal-yalıtkan-yalıtkan-metal diyot (MIIM) diyotlarının özelliklerinin kapsamlı bir çalışması yapılmıştır (Abdolkader, Shaker, ve Alahmad, 2018). Üçlü bariyerli heteroyapılarda rezonant tünellemenin ilk raporu 1986'da Nakagawa ve diğerleri tarafından yapılmıştır (Nakagawa, vd., 1986).

1983 yılında Sollner ve ark.(Sollner, vd., 1983), çift bariyerli yapılarda oda sıcaklığında rezonant tünellemenin ilk gözlemini bildirdiler ve dc I(V) eğrilerini karşılaştırarak rezonans tünelleme yapılarında yük aktarımının çok hızlı olabileceğini gösterdiler. Bu durum rezonant tünel yapılarının yüksek hızlı osilatör uygulamaları için uygun olduğu anlamına geliyordu. Çift bariyer yapılarında RT üzerine birçok çalışma yapılmış (Abdalla, vd., 2018; Bati, 2019) ve yapılmaktadır. Schulz (Schulz, ve Goncalves da Silva, 1988) ve Papp (Papp, Ventra, ve Coluzza, 1995) önyargılı iki girintili bariyer oluşturduğunda ve aralarında yarı bağlı bir seviye görüldüğünde elektronların RT özelliği gösterdiği iki aşamalı bariyer yapısının iletim katsayısını ve akım yoğunluklarını hesaplamışlardır. Dikdörtgen çift bariyer yapısında RT olayı üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (Encomendero, vd., 2019). Batı çift ters parabolik bariyer yapısının RT özelliklerini denge dışı Green fonksiyonu yöntemini kullanarak incelemiştir (Bati, Sakiroglu, ve Sokmen, 2016; Batı, 2017). Ohmukai üçgen çift bariyer yapısında RT olayının yapı parametresine bağıllığını transfer matrisi yöntemi ile incelemiştir (Ohmukai, 2005). Ayrıca Wang ve arkadaşları üçgen çift bariyer yapısını elektrik alan altında yine transfer matrisi yöntemiyle incelemiştir (Wang, Xu, ve Zhang, 2006). Bu yapıda iletkenlik hesabı Luo tarafından hesaplanmıştır (Luo, Yu, ve Xia, 2015). Testere dişli ikili üçgen bariyer yapısında RT olayı Batı tarafından incelenmiştir (Batı, 2017). AlGaN tabanlı ultraviyole ışık yayan diyotların (UV-LED'ler) performanslarını iyileştirmek için Guang üçgen kuantum

bariyerler tasarlanmış ve incelenmiştir (Li, vd., 2018) LED'ler veya LD'ler tasarlamak için InGaN tabanlı üçgen kuyu ve bariyer yapıları incelenmiştir (Choi, vd., 2003). Cihaz özelliklerini geliştirmek için birkaç araştırma grubu dikdörtgen, parabolik, üçgen ve asimetrik üçgen çift kuantum kuyuları gibi kuantum kuyu konfigürasyonlarını da incelemiştir (Wang, vd., 1993; Singh, ve Siddiqui, 2017).

Rezonans tünelleme aygıtlarının (RTA) performansının, malzemenin davranışını etkileyen arayüzlerdeki atom ölçeğine ve ilgili işlemlere son derece duyarlı olduğunu belirtmek önemlidir (Shahjahan, vd., 2010). Bir RTA'deki tünelleme süreçlerinin teorik araştırması, tek ve çoklu üçgen ve yamuk bariyerler gibi karmaşık yapıların montajı için bir reçete sağlayarak epitaksiyel kristal büyüme teknolojisinin geliştirilmesine yönelik önemli bir bilgi kaynağını temsil eder (Wang, Xu, ve Zhang, 2006). Bu yapılar, optik sinyal işleme için önemli bir cihaz olarak rezonans tünellemeli üçgen bariyerli optoelektronik anahtarın kullanılmasına izin verir (Sakata, Utaka, ve Matsushima, 1994). Üçgen çoklu bariyer sistemleri, yüksek hızlı cihazlar için alternatif bir aday olarak kullanılmıştır (Guo, 1998; Leite, ve de Oliveira, 2011). Örneğin Terahertz frekans aralığında çalışması için optimize edilmiş InGaAs/AlAs üçlü bariyer RT heteroyapıları incelenmiştir (Allford, ve Buckle, 2017).

Clochiatti ve çalışma arkadaşları üç bariyerli Rezonans Tünelleme Diyodundan (RTD) oluşan bir geniş bant THz dedektörü tasarlamış ve deneysel ölçümlerini yapmıştır (Clochiatti, vd., 2021).

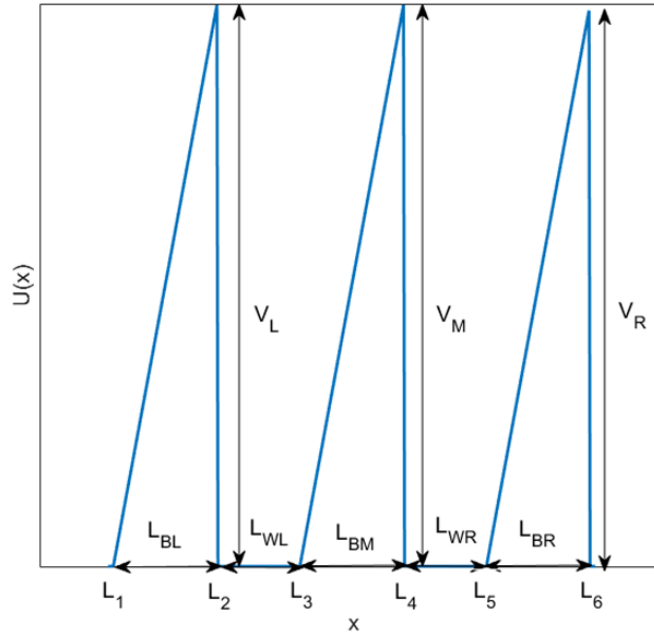
RTD'ler, terahertz salınımı ve/veya algılama özellikleri için InP tabanlı bileşik yarı iletken heteroyapıları temelinde araştırılmıştır (Aikawa, vd., 2019). AlGaIn/GaN heteroyapılarına dayalı asimetrik üçlü bariyerli rezonans tünelleme diyotlarının (TBRTD'ler) performansı sayısal simülasyonlar kullanılarak incelenmiştir (Rong, vd., 2019; Almansour, 2020). Sabit bir elektrik alan varlığında tek boyutlu üçgen iki bariyerli yapı için akım yoğunluğu ifadesi türetilmiştir (Luo, Yu, Lin, ve Su., 2014).

2. MODEL VE YÖNTEM

Rezonant tünelleme, elektronik cihazlarda kapsamlı bir şekilde incelenen ve uygulanan kuantum mekaniksel bir olgudur. Bu çalışmada çift kuyu yapısında rezonant tünelleme incelenmiştir. Rezonans enerjilerinin değerleri iletim olasılıklarının gelen elektronun enerjisine göre değişim grafiklerinden elde edilmiştir. Aşağıdaki alt bölümlerde model ve kullanılan yöntem detaylı olarak verilmiştir.

2.1. Model

Testere dişi üçlü üçgen bariyer potansiyelinin şematik gösterimi Şekil-1 deki gibidir. V_L , V_M ve V_R sırasıyla sol, orta ve sağ potansiyel bariyer yüksekliğini $L_{BL} = (L_2 - L_1)$, $L_{BM} = (L_4 - L_3)$ ve $L_{BR} = (L_6 - L_5)$ sırasıyla sol, orta ve sağ potansiyel bariyer taban genişliklerini ve $L_{WL} = (L_3 - L_2)$ ve $L_{WR} = (L_5 - L_4)$, sol ve sağ kuyu genişliklerini (veya bariyerler arası mesafeyi) göstermektedir. Her bir bölge sınırı konumları L_i ($i = 1 - 6$) ile belirtilmektedir.



Şekil 1. Testere dişi üçlü üçgen bariyer potansiyel bariyer çift kuyu yapısının şematik gösterimi

Bu çalışmada Transfer Matris kullanılacaktır. Bir boyutta zamandan bağımsız Schrödinger dalga denklemi

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi}{dx^2} + U(x)\psi = E\psi \quad (1)$$

Şeklinde yazılır. Burada, E elektron enerjisi ve m^* elektronun etkin kütlesidir.

TDÜB yapısının potansiyel enerji profilinin fonksiyonel formu

$$U(x) = \begin{cases} 0, & x < L_1 \\ \left(\frac{V_L}{L_{BL}}\right)(x - L_1), & L_1 \leq x \leq L_2 \\ 0, & L_2 < x < L_3 \\ \left(\frac{V_M}{L_{BM}}\right)(x - L_3), & L_3 \leq x \leq L_4 \\ 0, & L_4 < x < L_5 \\ \left(\frac{V_R}{L_{BR}}\right)(x - L_5), & L_5 \leq x \leq L_6 \\ 0, & x > L_6 \end{cases} \quad (2)$$

şeklindedir.

Çalışmamızda nümerik olarak hesapların daha kolay yapılabilmesi için boyutsuz parametrelerle çalışacağız. Uzunluklar etkin Bohr yarıçapı ($a_0^* = 4\pi\epsilon_r\hbar^2/m_e^2$), enerjiler etkin Hartree enerjisi ($E_H^* = \hbar^2/ma_B^{*2}$) cinsinden, ölçeklendirilecektir. Böylelikle ölçeklendirilmiş Schrödinger dalga denklemi boyutsuz nicelikler $\tilde{x}$ ve $\tilde{U}$ cinsinden,

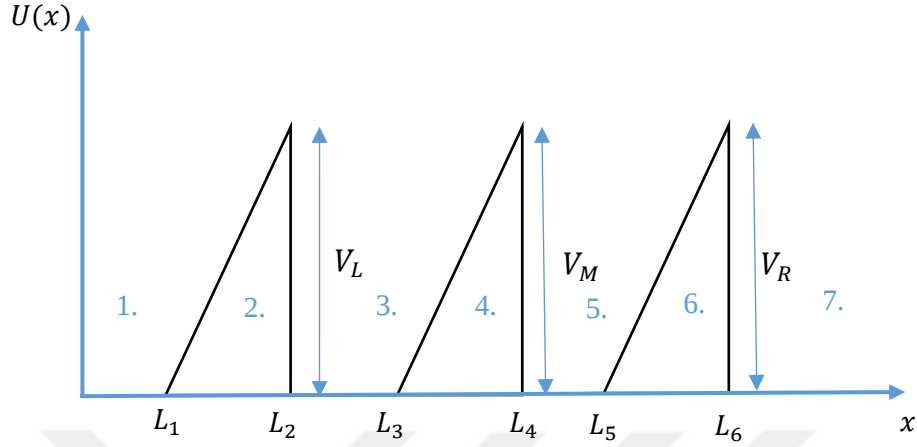
$$-\frac{1}{2} \frac{d^2\psi}{d\tilde{x}^2} + \tilde{U}(\tilde{x})\psi = \tilde{E}\psi \quad (3)$$

olarak yazılabilir.

2.2. Yöntem

Airy fonksiyonu yöntemi, doğrusal potansiyel segmentini verimli bir şekilde modellemek için uygundur ancak neredeyse düz potansiyellerde ıraksama sorununa sahip olabilir (Jirauschek, Liu ve Fukuma,). Öte yandan, serbest dalga transfer matrisi yöntemi, düz potansiyeli verimli bir şekilde modeller, ancak doğrusal potansiyel durumu için airy fonksiyonu çözümleri kullanmak daha doğrudur. Düzensiz şekle sahip potansiyel profilin bir kısmı için, serbest dalga transfer matrisi yöntemi, verimlilik ve sayısal kararlılık açısından Airy fonksiyonuna kıyasla kesinlikle daha iyi bir adaydır (Jirauschek). Uzay N bölgeye ayrılarak düz potansiyel yaklaşımı kullanılabilir. Tezimizde ise her bölgedeki potansiyel şekli düz veya doğrusal potansiyel olduğundan

düz potansiyellerde düzlem dalga çözümleri, doğrusal potansiyellerde Airy fonksiyonları çözümleri kullanılacaktır.



Şekil 2. Testere dişi üçlü bariyer çift kuyu farklı potansiyel bölgeleri

1., 3., 5. ve 7. bölgelerde $U(x) = 0$ olduğundan zamandan bağımsız Schrödinger dalga denklemi

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} = E\psi$$

uzunluklar etkin Bohr yarıçapına göre ($x = a_0^* \tilde{x}$), enerjiler etkin Hartree enerjisine göre ($E = E_H^* \tilde{E}$) ölçeklendirilirse, ($l = 1, 3, 5$ ve 7 . bölgeyi temsil etmek üzere),

$$-\frac{1}{2} \frac{d^2\psi_l}{d\tilde{x}^2} = \tilde{E}\psi_l \quad (4)$$

Ölçeklendirilmiş (boyutsuz) formunda yazılır.

Bu diferansiyel denklemin çözümü $k_l = \sqrt{2\tilde{E}}$ olmak üzere,

$$\psi_l = A_l e^{ik\tilde{x}} + B_l e^{-ik\tilde{x}} \quad (5)$$

şeklindedir.

2., 4. ve 6. bölgelerde konuma lineer bağlı potansiyeller söz konusudur.

Örneğin 2. bölge ($L_1 < x < L_2$) için SDD,

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi_2}{dx^2} + \left(\frac{V_L}{L_{BL}}\right)(x - L_1)\psi_2 = E\psi_2 \quad (6)$$

şeklindedir. Uzunluklar etkin Bohr yarıçapına ($x = a_0^* \tilde{x}$), enerjiler etkin Hartree enerjisine göre ($E = E_H^* \tilde{E}$) ölçeklendirilirse $\tilde{V}_L$, $\tilde{L}_1$ ve $\tilde{L}_{BL}$ ölçekli parametreler olmak üzere;

$$\frac{d^2 \psi_2}{d\tilde{x}^2} - \left[\left(\frac{2\tilde{V}_L}{\tilde{L}_{BL}} \right) (\tilde{x} - \tilde{L}_1) - 2\tilde{E} \right] \psi_2 = 0 \quad (7)$$

Ölçeklendirilmiş SDD elde edilir.

$$z = \left(\frac{2\tilde{V}_L}{\tilde{L}_{BL}} \right) (\tilde{x} - \tilde{L}_1) - 2\tilde{E} \text{ değişken dönüşümü yapılır ise;}$$

$$\begin{aligned} \text{(Zincir kuralı uygulanarak } \frac{d}{d\tilde{x}} = \frac{dz}{d\tilde{x}} \frac{d}{dz}, \quad \frac{d}{d\tilde{x}} = \frac{2\tilde{V}_L}{\tilde{L}_{BL}} \frac{d}{dz} \Rightarrow \frac{d^2}{d\tilde{x}^2} = \left(\frac{2\tilde{V}_L}{\tilde{L}_{BL}} \right)^2 \frac{d^2}{dz^2}) \\ \frac{d^2 \psi_2}{d\tilde{x}^2} - \left[\left(\frac{\tilde{L}_{BL}}{2\tilde{V}_L} \right)^2 z \right] \psi_2 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$y'' = \frac{d^2 y(x)}{dx^2}$ olmak üzere, Airy diferansiyel denklemi $y'' - k^2 xy = 0$ çözümü

$y = C_1 Ai\left(k^{\frac{2}{3}}x\right) + C_2 Bi\left(k^{\frac{2}{3}}x\right)$ şeklindedir (Weisstein, 2015)

$\alpha_2 = \left(\frac{\tilde{L}_{BL}}{2\tilde{V}_L} \right)^{2/3}$ ve $z_2 = \left(\frac{2\tilde{V}_L}{\tilde{L}_{BL}} \right) (\tilde{x} - \tilde{L}_1) - 2\tilde{E}$ olmak üzere;

$$\psi_2 = A_2 Ai(\alpha_2 z_2) + B_2 Bi(\alpha_2 z_2) \quad (9)$$

4.bölge için, $\alpha_4 = \left(\frac{\tilde{L}_{BM}}{2\tilde{V}_M} \right)^{2/3}$ ve $z_4 = \left(\frac{2\tilde{V}_M}{\tilde{L}_{BM}} \right) (\tilde{x} - \tilde{L}_3) - 2\tilde{E}$ olmak üzere;

$$\psi_4 = A_4 Ai(\alpha_4 z_4) + B_4 Bi(\alpha_4 z_4) \quad (10)$$

6. bölge için, $\alpha_6 = \left(\frac{\tilde{L}_{BR}}{2\tilde{V}_R} \right)^{2/3}$ ve $z_6 = \left(\frac{2\tilde{V}_R}{\tilde{L}_{BR}} \right) (\tilde{x} - \tilde{L}_5) - 2\tilde{E}$ olmak üzere;

$$\psi_6 = A_6 Ai(\alpha_6 z_6) + B_6 Bi(\alpha_6 z_6) \quad (11)$$

Parçacıkların sisteme soldan geldikleri kabul edilirse her bölge için çözümler,

$$\psi_1 = A_1 e^{ik\tilde{x}} + B_1 e^{-ik\tilde{x}} \quad (12)$$

$$\psi_2 = A_2 Ai(\alpha_2 z_2) + B_2 Bi(\alpha_2 z_2) \quad (13)$$

$$\psi_3 = A_3 e^{ik\tilde{x}} + B_3 e^{-ik\tilde{x}} \quad (14)$$

$$\psi_4 = A_4 Ai(\alpha_4 z_4) + B_4 Bi(\alpha_4 z_4) \quad (15)$$

$$\psi_5 = A_5 e^{ik\tilde{x}} + B_5 e^{-ik\tilde{x}} \quad (16)$$

$$\psi_6 = A_6 Ai(\alpha_6 z_6) + B_6 Bi(\alpha_6 z_6) \quad (17)$$

$$\psi_7 = A_7 e^{ik\tilde{x}} \quad (18)$$

olarak elde edilir. Dalga fonksiyonu ve türevi sürekli olması gerektiğinden sınır koşulları örneğin 1. bölgeden 2. bölgeye geçişte

$$\psi_1|_{\tilde{x}=\tilde{L}_1} = \psi_2|_{\tilde{x}=\tilde{L}_1} \quad (19)$$

$$\left. \frac{d\psi_1}{d\tilde{x}} \right|_{\tilde{x}=\tilde{L}_1} = \left. \frac{d\psi_2}{d\tilde{x}} \right|_{\tilde{x}=\tilde{L}_1} \quad (20)$$

olmalı. Sınır koşulları uygulanırsa,

$$\begin{aligned} z_{2L_1} &= z_{4L_3} = z_{6L_5} = z_0 = -2\tilde{E}, \\ z_{2L_2} &= 2\tilde{V}_L - 2\tilde{E}, \quad z_{4L_4} = 2\tilde{V}_M - 2\tilde{E}, \quad z_{6L_6} = 2\tilde{V}_R - 2\tilde{E}, \\ z'_2 &= \frac{2\tilde{V}_L}{\tilde{L}_{BL}}, \quad z'_4 = \frac{2\tilde{V}_M}{\tilde{L}_{BM}}, \quad z'_6 = \frac{2\tilde{V}_R}{\tilde{L}_{BR}}, \end{aligned}$$

olmak üzere,

$$A_1 e^{ik\tilde{L}_1} + B_1 e^{-ik\tilde{L}_1} = A_2 Ai(\alpha_2 z_0) + B_2 Bi(\alpha_2 z_0) \quad (21)$$

$$A_1 e^{ik\tilde{L}_1} - B_1 e^{-ik\tilde{L}_1} = A_2 \frac{\alpha_2 z'_2}{ik} Ai'(\alpha_2 z_0) + B_2 \frac{\alpha_2 z'_2}{ik} Bi'(\alpha_2 z_0) \quad (22)$$

$$A_2 Ai(\alpha_2 z_{2L_2}) + B_2 Bi(\alpha_2 z_{2L_2}) = A_3 e^{ik\tilde{L}_2} + B_3 e^{-ik\tilde{L}_2} \quad (23)$$

$$A_2 Ai'(\alpha_2 z_{2L_2}) + B_2 Bi'(\alpha_2 z_{2L_2}) = A_3 \frac{ik}{\alpha_2 z'_2} e^{ik\tilde{L}_2} - B_3 \frac{ik}{\alpha_2 z'_2} e^{-ik\tilde{L}_2} \quad (24)$$

$$A_3 e^{ik\tilde{L}_3} + B_3 e^{-ik\tilde{L}_3} = A_4 Ai(\alpha_4 z_0) + B_4 Bi(\alpha_4 z_0) \quad (25)$$

$$A_3 e^{ik\tilde{L}_3} - B_3 e^{-ik\tilde{L}_3} = A_4 \frac{\alpha_4 z'_4}{ik} Ai'(\alpha_4 z_0) + B_4 \frac{\alpha_4 z'_4}{ik} Bi'(\alpha_4 z_0) \quad (26)$$

$$A_4 Ai(\alpha_4 z_{4L_4}) + B_4 Bi(\alpha_4 z_{4L_4}) = A_5 e^{ik\tilde{L}_4} + B_5 e^{-ik\tilde{L}_4} \quad (27)$$

$$A_4 Ai'(\alpha_4 z_{4L_4}) + B_4 Bi'(\alpha_4 z_{4L_4}) = A_5 \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} e^{ik\tilde{L}_4} - B_5 \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} e^{-ik\tilde{L}_4} \quad (28)$$

$$A_5 e^{ik\tilde{L}_5} + B_5 e^{-ik\tilde{L}_5} = A_6 Ai(\alpha_6 z_0) + B_6 Bi(\alpha_6 z_0) \quad (29)$$

$$A_5 e^{ik\tilde{L}_5} - B_5 e^{-ik\tilde{L}_5} = A_6 \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Ai'(\alpha_6 z_0) + B_6 \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Bi'(\alpha_6 z_0) \quad (30)$$

$$A_6 Ai(\alpha_6 z_{6L_6}) + B_6 Bi(\alpha_6 z_{6L_6}) = A_7 e^{ik\tilde{L}_6} \quad (31)$$

$$A_6 Ai'(\alpha_6 z_{6L_6}) + B_6 Bi'(\alpha_6 z_{6L_6}) = A_7 \frac{ik}{\alpha_6 z'_6} e^{ik\tilde{L}_6} \quad (32)$$

ifadeleri elde edilir.

(21) ile (22) nolu denklemler taraf tarafa toplanarak A_1 yalnız bırakılırsa,

$$A_1 = A_2 \frac{e^{-ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Ai(\alpha_2 z_0) + \frac{\alpha_2 z'_2}{ik} Ai'(\alpha_2 z_0) \right] + B_2 \frac{e^{-ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Bi(\alpha_2 z_0) + \frac{\alpha_2 z'_2}{ik} Bi'(\alpha_2 z_0) \right] \quad (33)$$

(21) ile (22) nolu denklemler taraf tarafa çıkarılarak B_1 yalnız bırakılırsa,

$$B_1 = A_2 \frac{e^{ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Ai(\alpha_2 z_0) - \frac{\alpha_2 z'_2}{ik} Ai'(\alpha_2 z_0) \right] + B_2 \frac{e^{ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Bi(\alpha_2 z_0) - \frac{\alpha_2 z'_2}{ik} Bi'(\alpha_2 z_0) \right] \quad (34)$$

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad (35)$$

Elde edilen denklemler matris formda yazılacak olursa;

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Ai(\alpha_2 z_0) + \frac{\alpha_2 z_2'}{ik} Ai'(\alpha_2 z_0) \right] & \frac{e^{-ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Bi(\alpha_2 z_0) + \frac{\alpha_2 z_2'}{ik} Bi'(\alpha_2 z_0) \right] \\ \frac{e^{ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Ai(\alpha_2 z_0) - \frac{\alpha_2 z_2'}{ik} Ai'(\alpha_2 z_0) \right] & \frac{e^{ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Bi(\alpha_2 z_0) - \frac{\alpha_2 z_2'}{ik} Bi'(\alpha_2 z_0) \right] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad (36)$$

M1 matrisi

M1=

$$\begin{pmatrix} \frac{e^{-ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Ai(\alpha_2 z_0) + \frac{\alpha_2 z_2'}{ik} Ai'(\alpha_2 z_0) \right] & \frac{e^{-ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Bi(\alpha_2 z_0) + \frac{\alpha_2 z_2'}{ik} Bi'(\alpha_2 z_0) \right] \\ \frac{e^{ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Ai(\alpha_2 z_0) - \frac{\alpha_2 z_2'}{ik} Ai'(\alpha_2 z_0) \right] & \frac{e^{ik\tilde{L}_1}}{2} \left[Bi(\alpha_2 z_0) - \frac{\alpha_2 z_2'}{ik} Bi'(\alpha_2 z_0) \right] \end{pmatrix} \quad (37)$$

elde edilir.

NOT: Airy fonksiyonları $Ai(x)Bi'(x) - Ai'(x)Bi(x) = 1/\pi$ özdeşliğine sahiptir.

(23) nolu denklemi $Bi'(\alpha_2 z_{2L_2})$ ile çarpıp, (24) nolu denklemi $-Bi(\alpha_2 z_{2L_2})$ ile çarpıp denklemleri taraf tarafa toplarsak

$$A_2 = A_3 \pi e^{ik\tilde{L}_2} \left[Bi'(\alpha_2 z_{2L_2}) - \frac{ik}{\alpha_2 z_2'} Bi(\alpha_2 z_{2L_2}) \right] + B_3 \pi e^{-ik\tilde{L}_2} \left[Bi'(\alpha_2 z_{2L_2}) + \frac{ik}{\alpha_2 z_2'} Bi(\alpha_2 z_{2L_2}) \right] \quad (38)$$

(23) nolu denklemi $-Ai'(\alpha_2 z_{2L_2})$ ile çarpıp, (24) nolu denklemi $Ai(\alpha_2 z_{2L_2})$ ile çarpıp denklemleri taraf tarafa toplarsak

$$B_2 = A_3 \pi e^{ik\tilde{L}_2} \left[-Ai'(\alpha_2 z_{2L_2}) + \frac{ik}{\alpha_2 z_2'} Ai(\alpha_2 z_{2L_2}) \right] + B_3 \pi e^{-ik\tilde{L}_2} \left[-Ai'(\alpha_2 z_{2L_2}) - \frac{ik}{\alpha_2 z_2'} Ai(\alpha_2 z_{2L_2}) \right] \quad (39)$$

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M2_{11} & M2_{12} \\ M2_{21} & M2_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_3 \\ B_3 \end{pmatrix} \quad (40)$$

Elde edilen denklemler matris formda yazılacak olursa M2 matrisi;

M2 =

$$\begin{pmatrix} \pi e^{ik\tilde{L}_2} \left[Bi'(\alpha_2 z_{2L_2}) - \frac{ik}{\alpha_2 z_2'} Bi(\alpha_2 z_{2L_2}) \right] & \pi e^{-ik\tilde{L}_2} \left[Bi'(\alpha_2 z_{2L_2}) + \frac{ik}{\alpha_2 z_2'} Bi(\alpha_2 z_{2L_2}) \right] \\ \pi e^{ik\tilde{L}_2} \left[-Ai'(\alpha_2 z_{2L_2}) + \frac{ik}{\alpha_2 z_2'} Ai(\alpha_2 z_{2L_2}) \right] & \pi e^{-ik\tilde{L}_2} \left[-Ai'(\alpha_2 z_{2L_2}) - \frac{ik}{\alpha_2 z_2'} Ai(\alpha_2 z_{2L_2}) \right] \end{pmatrix} \quad (41)$$

(25) ile (26) nolu denklemler taraf tarafa toplanır ise;

$$A_3 = A_4 \frac{e^{-ik\tilde{L}_3}}{2} \left[Ai(\alpha_4 z_0) + \frac{\alpha_4 z_4'}{ik} Ai'(\alpha_4 z_0) \right] + B_4 \frac{e^{-ik\tilde{L}_3}}{2} \left[Bi(\alpha_4 z_0) + \frac{\alpha_4 z_4'}{ik} Bi'(\alpha_4 z_0) \right] \quad (42)$$

(25) ile (26) nolu denklemler taraf tarafa çıkarılır ise;

$$B_3 = A_4 \frac{e^{ik\tilde{L}_3}}{2} \left[Ai(\alpha_4 z_0) - \frac{\alpha_4 z'_4}{ik} Ai'(\alpha_4 z_0) \right] + B_4 \frac{e^{ik\tilde{L}_3}}{2} \left[Bi(\alpha_4 z_0) - \frac{\alpha_4 z'_4}{ik} Bi'(\alpha_4 z_0) \right] \quad (43)$$

$$\begin{pmatrix} A_3 \\ B_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M3_{11} & M3_{12} \\ M3_{21} & M3_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_4 \\ B_4 \end{pmatrix} \quad (44)$$

$$M3 = \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik\tilde{L}_3}}{2} \left[Ai(\alpha_4 z_0) + \frac{\alpha_4 z'_4}{ik} Ai'(\alpha_4 z_0) \right] & \frac{e^{-ik\tilde{L}_3}}{2} \left[Bi(\alpha_4 z_0) + \frac{\alpha_4 z'_4}{ik} Bi'(\alpha_4 z_0) \right] \\ \frac{e^{ik\tilde{L}_3}}{2} \left[Ai(\alpha_4 z_0) - \frac{\alpha_4 z'_4}{ik} Ai'(\alpha_4 z_0) \right] & \frac{e^{ik\tilde{L}_3}}{2} \left[Bi(\alpha_4 z_0) - \frac{\alpha_4 z'_4}{ik} Bi'(\alpha_4 z_0) \right] \end{pmatrix} \quad (45)$$

(27) nolu denklemi $Bi'(\alpha_4 z_{4L_4})$ ile çarpıp, (28) nolu denklemi $-Bi(\alpha_4 z_{4L_4})$ ile çarpıp denklemleri taraf tarafa toplarsak

$$A_4 = A_5 \pi e^{ik\tilde{L}_4} \left[Bi'(\alpha_4 z_{4L_4}) - \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} Bi(\alpha_4 z_{4L_4}) \right] + B_5 \pi e^{-ik\tilde{L}_4} \left[Bi'(\alpha_4 z_{4L_4}) + \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} Bi(\alpha_4 z_{4L_4}) \right] \quad (46)$$

(27) nolu denklemi $-Ai'(\alpha_4 z_{4L_4})$ ile çarpıp, (28) nolu denklemi $Ai(\alpha_4 z_{4L_4})$ ile çarpıp denklemleri taraf tarafa toplarsak

$$B_4 = A_5 \pi e^{ik\tilde{L}_4} \left[-Ai'(\alpha_4 z_{4L_4}) + \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} Ai(\alpha_4 z_{4L_4}) \right] + B_5 \pi e^{-ik\tilde{L}_4} \left[-Ai'(\alpha_4 z_{4L_4}) - \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} Ai(\alpha_4 z_{4L_4}) \right] \quad (47)$$

$$\begin{pmatrix} A_4 \\ B_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M4_{11} & M4_{12} \\ M4_{21} & M4_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_5 \\ B_5 \end{pmatrix} \quad (48)$$

$M4 =$

$$\begin{pmatrix} \pi e^{ik\tilde{L}_4} \left[Bi'(\alpha_4 z_{4L_4}) - \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} Bi(\alpha_4 z_{4L_4}) \right] & \pi e^{-ik\tilde{L}_4} \left[Bi'(\alpha_4 z_{4L_4}) + \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} Bi(\alpha_4 z_{4L_4}) \right] \\ \pi e^{ik\tilde{L}_4} \left[-Ai'(\alpha_4 z_{4L_4}) + \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} Ai(\alpha_4 z_{4L_4}) \right] & \pi e^{-ik\tilde{L}_4} \left[-Ai'(\alpha_4 z_{4L_4}) - \frac{ik}{\alpha_4 z'_4} Ai(\alpha_4 z_{4L_4}) \right] \end{pmatrix} \quad (49)$$

(29) ile (30) nolu denklemler taraf tarafa toplanır ise;

$$A_5 = A_6 \frac{e^{-ik\tilde{L}_5}}{2} \left[Ai(\alpha_6 z_0) + \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Ai'(\alpha_6 z_0) \right] + B_6 \frac{e^{-ik\tilde{L}_5}}{2} \left[Bi(\alpha_6 z_0) + \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Bi'(\alpha_6 z_0) \right] \quad (50)$$

(29) ile (30) nolu denklemler taraf tarafa çıkarılır ise;

$$B_5 = A_6 \frac{e^{ik\tilde{L}_5}}{2} \left[Ai(\alpha_6 z_0) - \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Ai'(\alpha_6 z_0) \right] + B_6 \frac{e^{ik\tilde{L}_5}}{2} \left[Bi(\alpha_6 z_0) - \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Bi'(\alpha_6 z_0) \right] \quad (51)$$

$$\begin{pmatrix} A_5 \\ B_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M5_{11} & M5_{12} \\ M5_{21} & M5_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_6 \\ B_6 \end{pmatrix} \quad (52)$$

$$M5 = \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik\tilde{L}_5}}{2} \left[Ai(\alpha_6 z_0) + \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Ai'(\alpha_6 z_0) \right] & \frac{e^{-ik\tilde{L}_5}}{2} \left[Bi(\alpha_6 z_0) + \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Bi'(\alpha_6 z_0) \right] \\ \frac{e^{ik\tilde{L}_5}}{2} \left[Ai(\alpha_6 z_0) - \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Ai'(\alpha_6 z_0) \right] & \frac{e^{ik\tilde{L}_5}}{2} \left[Bi(\alpha_6 z_0) - \frac{\alpha_6 z'_6}{ik} Bi'(\alpha_6 z_0) \right] \end{pmatrix} \quad (53)$$

(31) nolu denklemi $Bi'(\alpha_6 z_{6L_6})$ ile çarpıp, (32) nolu denklemi $-Bi(\alpha_6 z_{6L_6})$ ile çarpıp denklemleri taraf tarafa toplarsak

$$A_6 = A_7 \pi e^{ik\tilde{L}_6} \left[Bi'(\alpha_6 z_{6L_6}) - \frac{ik}{\alpha_6 z_6'} Bi(\alpha_6 z_{6L_6}) \right] \quad (54)$$

(31) nolu denklemi $-Ai'(\alpha_6 z_{6L_6})$ ile çarpıp, (32) nolu denklemi $Ai(\alpha_6 z_{6L_6})$ ile çarpıp denklemleri taraf tarafa toplarsak

$$B_6 = A_7 \pi e^{ik\tilde{L}_6} \left[-Ai'(\alpha_6 z_{6L_6}) + \frac{ik}{\alpha_6 z_6'} Ai(\alpha_6 z_{6L_6}) \right] \quad (55)$$

$$\begin{pmatrix} A_6 \\ B_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{611} & 0 \\ M_{621} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_7 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (56)$$

$$M_6 = \begin{pmatrix} \pi e^{ik\tilde{L}_6} \left[Bi'(\alpha_6 z_{6L_6}) - \frac{ik}{\alpha_6 z_6'} Bi(\alpha_6 z_{6L_6}) \right] & 0 \\ \pi e^{ik\tilde{L}_6} \left[-Ai'(\alpha_6 z_{6L_6}) + \frac{ik}{\alpha_6 z_6'} Ai(\alpha_6 z_{6L_6}) \right] & 0 \end{pmatrix} \quad (57)$$

Elektronların engellerden geçme olasılığı

$$T = \frac{|A_7|^2}{|A_1|^2} \quad (58)$$

ifadesi ile hesaplanır.

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \underbrace{M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot M_4 \cdot M_5 \cdot M_6}_M \begin{pmatrix} A_7 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (59)$$

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_7 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (60)$$

$A_1 = M_{11}A_7$ olduğundan

$$T = \frac{1}{|M_{11}|^2} \quad (61)$$

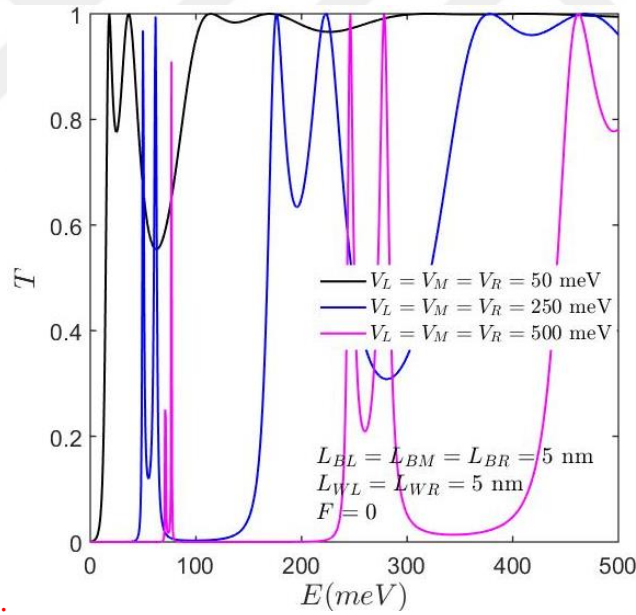
ifadesinden elde edilir. Nümerik kolaylık için boyutsuz hesaplamalar yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar tekrar boyutlu hale çevrilerek sunulmuştur.

3. BULGULAR

Bu bölümde transfer matris yöntemi kullanılarak iletim olasılığı (T) hesaplanmıştır. Bu bölümde, iletim katsayısının (T) sayısal hesabı, transfer matris yöntemi kullanılarak yapılmış, Hesaplananelde edilen iletim katsayılarından olasılıklarından rezonans enerjileri (Eres) tespit edilmiştir. Elde edilmiştir.

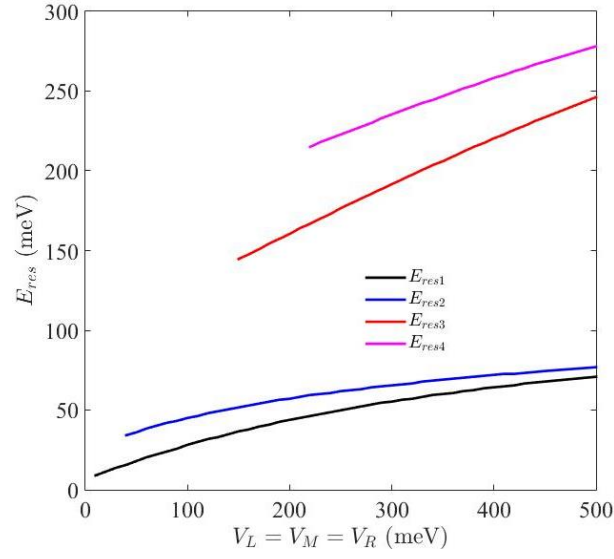
Sistemimizin GaAs/AlGaAs tan oluştuğu varsayılmıştır. malzemeleri ile inşa edildiğini varsayılmıştır. Dolayısıyla her durumda, hesap kolaylığı açısından etkin bir elektron kütlesinin ($0.067 \times$ serbest elektron kütlesi) sistem boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca bağıl dielektrik sabiti 12.7 (Sze, Li, ve Ng, 2021) etkin Bohr yarıçapı=10.1061 nm ve etkin Hartree enerjisi =11,2193 meV dir.

Çalışmada sayısal kolaylık açısından enerji ve uzunluklar boyutsuz ölçekli formda kullanılmıştır. Ancak sayısal hesaplamalardan sonra sonuçlar boyutsal boyutlu form ile verilmiştir



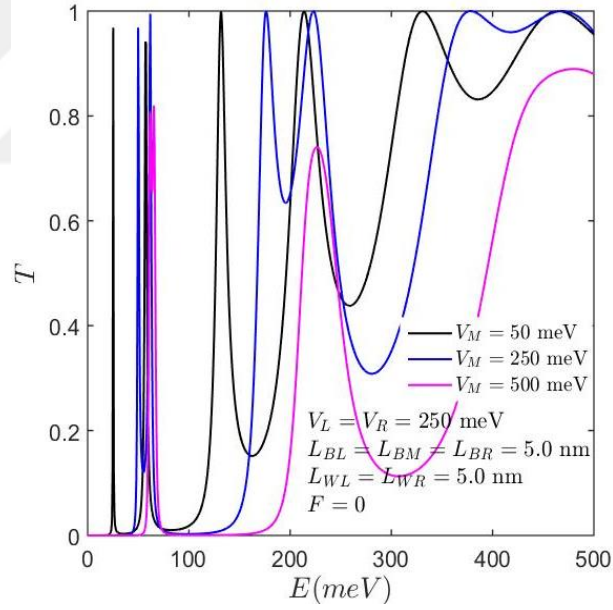
Şekil 3. Elektronların engeli geçme olasılığının gelen elektron enerjisi ile değişimi grafiği

Şekil 3'te bariyer yükseklikleri simetrik olarak $V_L=V_M=V_R=50, 250$ ve 500 meV değişmektedir.



Şekil 4. Rezonans enerjisinin bariyer yükseklikleri ile değişim grafiği.

Şekil 4’de sistem parametreleri $L_{BL}=L_{BM}=L_{BR}$ 5 nm, $L_{WL}=L_{WR}=5$ nm ve $F=0$ olarak seçilmiştir. Bariyer yüksekliği arttıkça rezonans enerjisi artış göstermektedir.

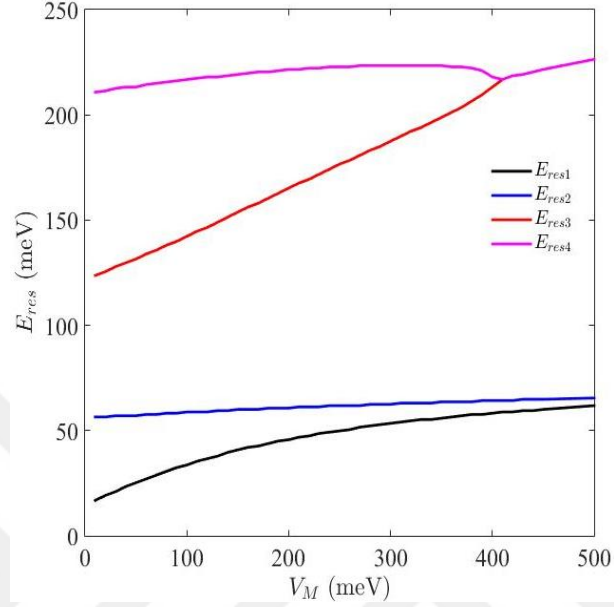


Şekil 5. İletim olasılığın üç farklı orta potansiyel bariyeri için gelen elektron enerjisine göre değişimi

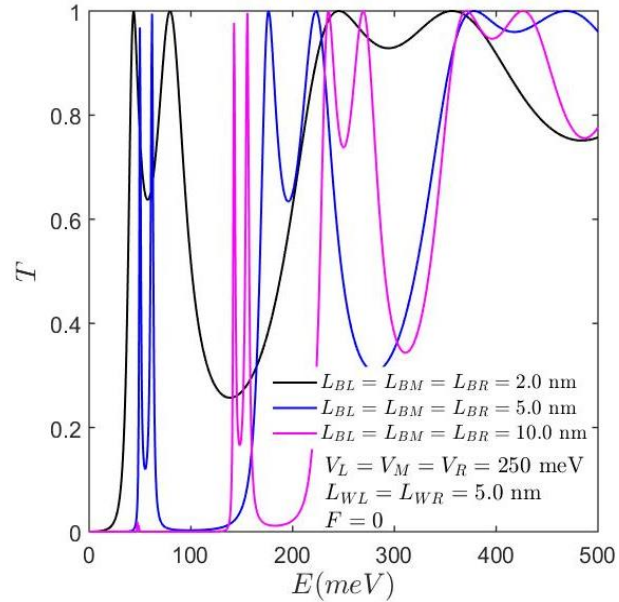
Şekil 5’te orta potansiyel bariyer yüksekliği (V_M) için 50, 250 ve 500 meV değerleri kullanılmıştır.

İletim katsayısının üç farklı potansiyel yükseklik parametresi için gelen elektronun enerjisine bağlı değişimi gösterilmiştir. Elektronların geçiş olasılığının üç

farklı bariyer kalınlıkları ($L_{BL}=L_{BM}=L_{BR}=2.0, 5.0$ ve 10.0 nm) için gelen elektronun enerjisine bağılılığı çizilmiştir. Rezonans enerji seviyelerinde elektronların neredeyse tümünün geçtiği görülmektedir. ($T(E_{res}) \approx 1$) Bariyer kalınlıkları artması durumunda da kuşatmanın kuvvetlenmesi söz konusu olduğundan rezonans pikleri daralmaktadır.



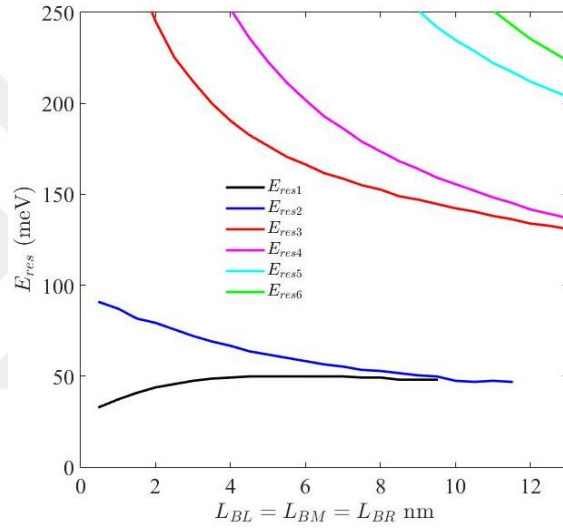
Şekil 6. Rezonans enerjisinin orta potansiyel bariyeri yüksekliğine bağlı değişimi grafiği



Şekil 7. Elektronların bariyerleri geçme olasılığının üç farklı bariyer genişlikleri için gelen elektron enerjisine göre değişimi.

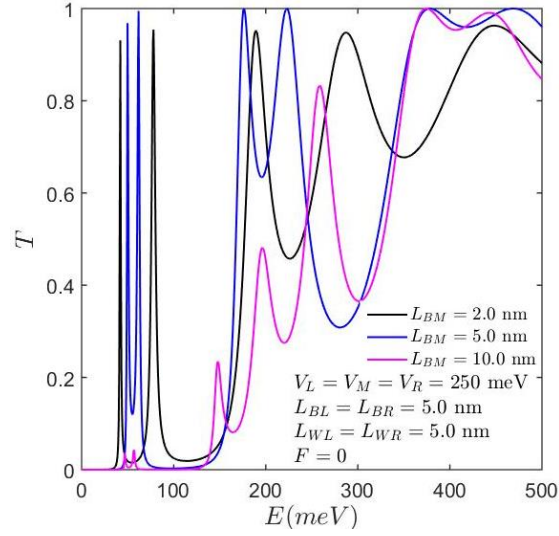
Şekil 7’de geçiş olasılığın üç farklı orta bariyer genişlikleri için ($L_{BM}=2.0, 5.0$ ve 10.0 nm) gelen elektron enerjisine göre değişimi çizilmiştir. Kenar bariyer kalınlıkları sabit ($L_{BL} = L_{BR}=5$ nm) orta bariyer kalınlıkları değişmesi yapıdaki asimetriyi artırmakta ve pik boylarının yani geçiş olasılığını azalttığı gözlemlenmektedir.

Bariyer kalınlıkları arttıkça birinci rezonans enerji seviyesi hariç diğer enerji seviyelerinin daha düşük enerjilere kaymaktadır (kırmızıya kayma). 1. Enerji seviyesinde bariyer genişliklerinin kuyu genişliklerine denk olana kadar artmakta daha sonra sabit değer almaktadır. Enerji seviyeleri aralarındaki fark bariyer kalınlıkları arttıkça azalmaktadır.



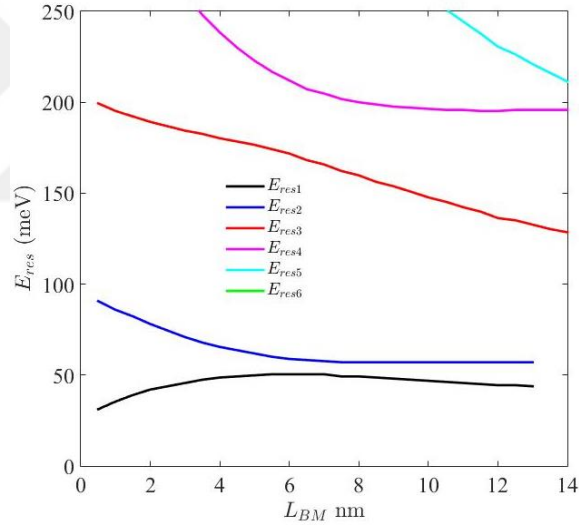
Şekil 8. Rezonans enerjisinin bariyer genişliklerine bağlı değişimi grafiği.

Sistem parametreleri $L_{WL}=L_{WR}=5$ nm, $V_L=V_M=V_R=250$ meV ve $F=0.0$ olarak seçilmiştir.



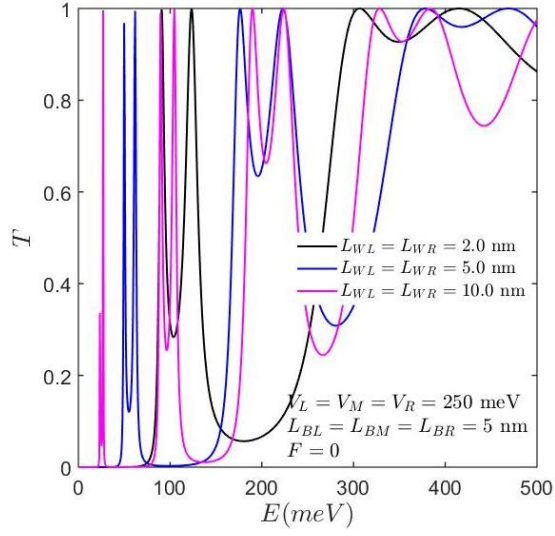
Şekil 9. Elektronların bariyerleri geçme olasılığın üç farklı orta bariyer genişlikleri için gelen elektron enerjisine göre değişimi.

Orta bariyer (L_{BM}) için 2.0, 5.0 ve 10.0 nm değerleri kullanılmıştır.

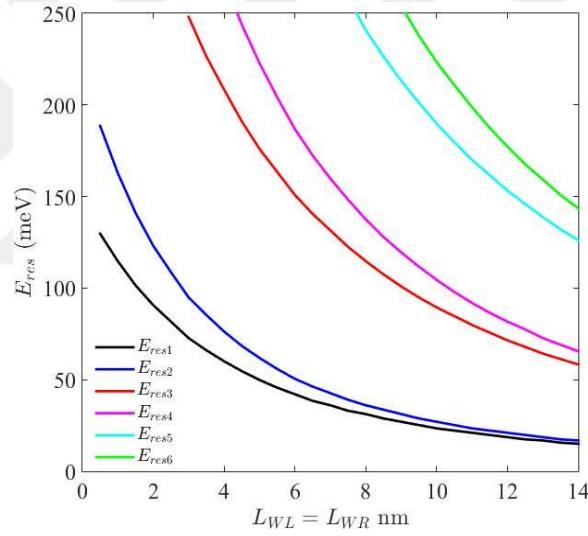


Şekil 10. Rezonans enerjisinin orta bariyer genişliğine bağlı değişim grafiği

Şekil 10’da rezonans enerji seviyelerinin orta bariyer genişliğine bağlı değişimi çizilmiştir. Sistem parametreleri $L_{BL}=L_{BR}=5$ nm, $L_{WL}=L_{WR}=5$ nm, $V_L=V_M=V_R=250$ meV ve $F=0.0$ olarak seçilmiştir. Şekil 8 ile kıyaslandığında orta bariyerdeki değişim 3. enerji seviyesinin daha düşük 4. rezonans enerji seviyesinin daha yüksek enerjide ortaya çıkmasına neden olmuştur. Genel olarak bariyer genişlikleri arttıkça rezonans enerjilerinde azalma görülmüştür.



Şekil 11. Elektronların bariyerleri geçme olasılığın üç farklı kuyu genişlikleri için gelen elektron enerjisine göre değişimi.

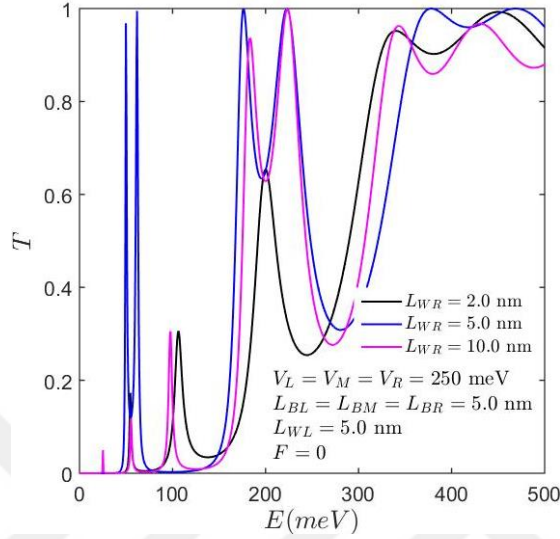


Şekil 12. Rezonans enerjisinin kuyu genişliklerine bağlı değişim grafiği

Şekil 12’de sistem parametreleri $L_{BL}=L_{BM}=L_{BR}=5$ nm, $V_L=V_M=V_R=250$ meV ve $F=0.0$ olarak seçilmiştir.

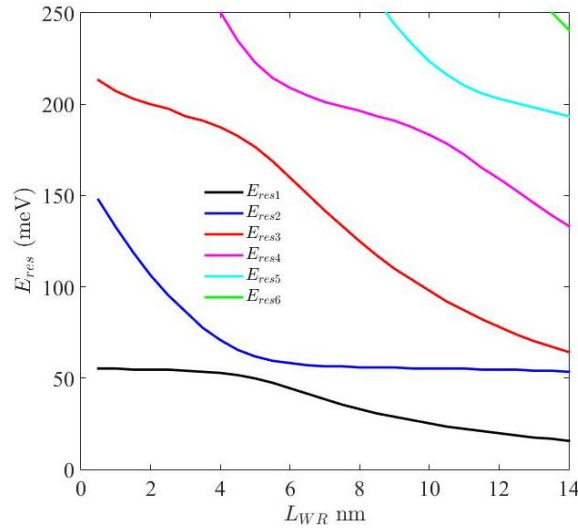
Şekil 11 kuyu genişliklerinin rezonans tünellemeye etkisini araştırmak için çizilmiştir. Şekilde elektronların geçiş olasılığının üç farklı kuyu genişlikleri ($L_{WL}=L_{WR}=2.0, 5.0$ ve 10.0 nm) için gelen elektronun enerjisine bağlılığı çizilmiştir. Şekil 12’de ise rezonans enerji seviyelerinin yerinin kuyu genişliklerine bağlı değişimi görülmektedir. Kuyular genişledikçe rezonans enerji seviyeleri eksponansiyel olarak daha düşük enerjiye kaymaktadır. Kuyu genişledikçe kuyu içerisindeki enerji

seviyeleri daha düşük enerjilerde oluştuğundan dolayı bu durum gerçekleşmektedir. Ayrıca kuyu genişledikçe kuyu içerisinde kalan enerji seviyesi sayısı artar, böylece rezonans enerjisi dolayısıyla rezonans piki sayısında artma olur.



Şekil 13. Elektronların geçme olasılığının üç farklı sağ kuyu genişliği için gelen elektron enerjisine göre değişimi

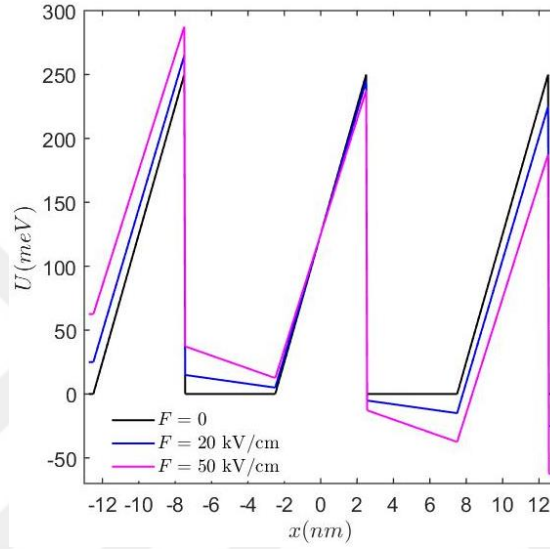
Şekil 13'te sistem parametreleri $L_{WR}=2.0, 5.0$ ve 10.0 nm olarak seçilmiştir.



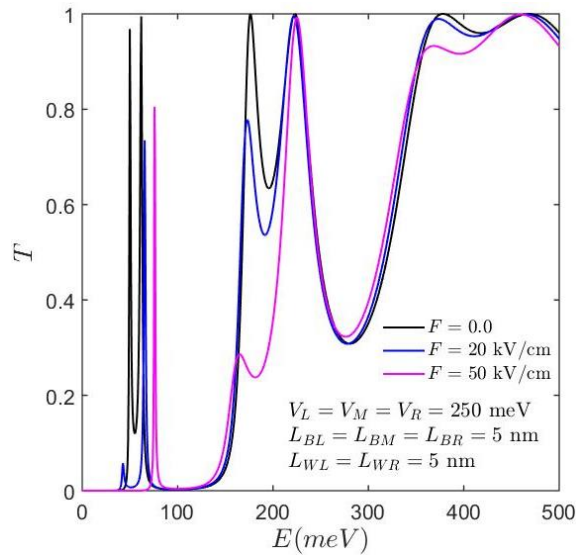
Şekil 14. Rezonans enerjisinin sağ kuyu genişliğine bağlı değişim grafiği

Sol kuyu genişliği sabit ($L_{WL}=5$ nm) iken sol kuyunun genişliği değişmesi durumunda rezonans tünelleme olayını incelemek için şekil 13 çizilmiştir. Üst şekilde kuyu genişlikleri simetrik 5 nm iken rezonans pik boyları 1 iken yani gelen tüm

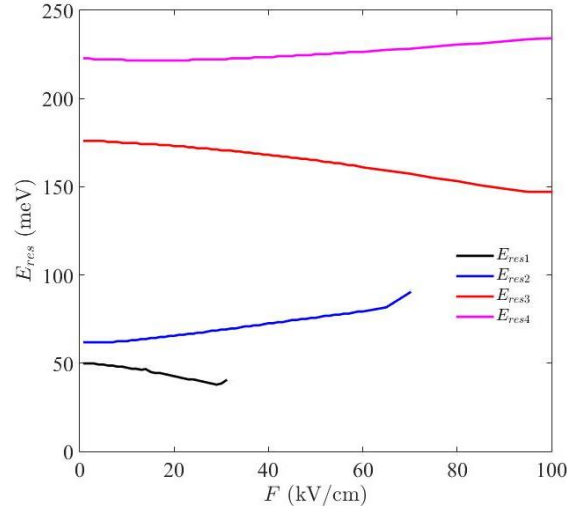
elektronlar tünelledebilmekte iken kuyuların genişlikleri arasında asimetri olması durumunda rezonans pik boyları oldukça küçülmektedir. Şekil 14 rezonans enerjisinin sağ kuyu genişliğine bağlı değişim grafiği çizilmiştir. Sistem parametreleri $L_{WR}=5$ nm, $L_{BL}=L_{BM}=L_{BR}=5$ nm, $V_L=V_M=V_R=250$ meV ve $F=0.0$ olarak seçilmiştir. Asimetri durumunda rezonans enerjilerindeki ekponansiyel değişim gözlenmemektedir. Fakat sağ kuyu genişliğinin artması yine rezonans enerji seviyelerinin daha düşük enerjilerde oluşmasına neden olmaktadır.



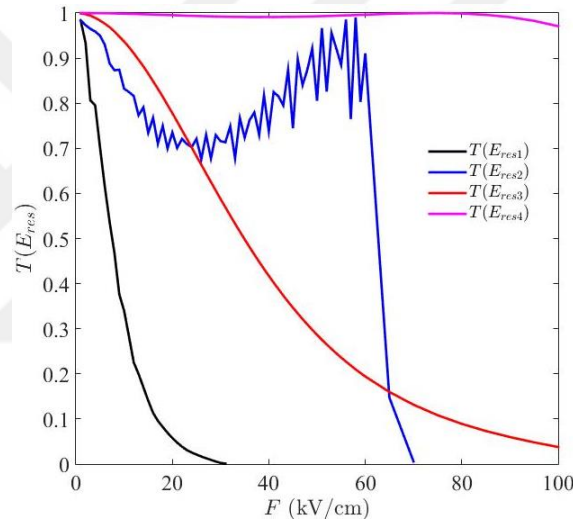
Şekil 15. Elektrik alan biası ile potansiyel profilinin değişimi



Şekil 16. Elektronun engeli geçme olasılığının elektrik alan biasının üç farklı değeri için değişimi



Şekil 17. Elektrik alan biası ile rezonans enerji seviyelerinin değişimi,



Şekil 18. Rezonans pik genliğinin elektrik alanla değişimi.

Şekil 15’te elektrik alan biası (eFx) uygulanması durumunda $F=0, 20$ ve 50 kV/cm olması durumunda potansiyel şekli görülmektedir. Sistem parametreleri $L_{WL}=L_{WR}=5$ nm $L_{BL}=L_{BM}=L_{BR}=5$ nm ve $V_L=V_M=V_R=250$ meV olarak seçilmiştir.

Şekil 16 da gelen elektronların engeli geçme olasılığının elektrik alan biasının üç farklı değeri ($F=0, 20$ kV/cm, 50 kV/cm) için değişimi görülmektedir. Sistem parametreleri $L_{WL}=L_{WR}=5$ nm, $L_{BL}=L_{BM}=L_{BR}=5$ nm ve $V_L=V_M=V_R=250$ meV olarak seçilmiştir. Elektrik alan biası arttıkça rezonans pik genliğinin küçüldüğü görülmektedir. Şekil 17’de rezonans enerji seviyelerinin elektrik alan biasına bağlı değişimleri görülmektedir. Elektrik alan biası arttıkça 1. ve 3. rezonans enerji seviyesi yani sağ kuyu enerji seviyeleri daha düşük enerjiye kaydığı gözlemlenmektedir. 2. ve

4. Enerji seviyeleri ise daha yüksek enerjiye kaymaktadır. Şekil 18’de ise rezonans pik genliğinin elektrik alan biası ile değişimi görülmektedir. Elektrik alan biası artıkça rezonans pik genliğinin küçüldüğü görülmektedir. Elektrik biasının etkisi sayısal olarak görülmesi amacıyla ayrıca tablo olarakta verilmiştir. Tablo 1 de elektrik biası değişimi ile ilk dört rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyelerdeki geçiş olasılıkları verilmiştir. Elektrik alan biasının artması ile rezonans enerji seviyelerinin 1. ve 3. seviyeler için düşük enerjilere kaydığı 2. ve 4. seviyeler için ise yüksek enerjiye doğru kaydığı bulunmuştur. Elektrik alan biasının artması ile rezonans pik şiddetlerinde yani geçiş olasılıklarında azalma gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Elektrik biası değişimi ile ilk dört rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyelerdeki geçiş olasılıkları. Sistem parametreleri $L_B = M_B = R_B = 5$ nm, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV olarak alınmıştır.

F (kV/cm)	Eres1 (meV)	T(Eres1)	Eres2 (meV)	T(Eres2)	Eres3 (meV)	T(Eres3)	Eres4 (meV)	T(Eres4)
1	49.85	0.98	61.86	0.98	176	0.99	222.8	1
2	49.85	0.93	61.86	0.97	176	0.99	222.8	1
3	49.85	0.81	61.86	0.97	176	0.99	222.2	1
4	49.25	0.80	61.86	0.96	176	0.98	222.2	1
5	49.25	0.70	61.86	0.95	176	0.98	222.2	1
6	48.65	0.62	61.86	0.93	175.4	0.97	222.2	1
7	48.65	0.53	61.86	0.89	175.4	0.96	222.2	1
8	48.05	0.47	62.46	0.87	175.4	0.96	222.2	1
9	48.05	0.38	62.46	0.87	174.8	0.95	222.2	1
10	47.45	0.34	62.46	0.83	174.8	0.94	221.6	1
11	46.85	0.28	63.06	0.82	174.8	0.93	221.6	1
12	46.85	0.23	63.06	0.82	174.8	0.91	221.6	1
13	46.25	0.20	63.66	0.77	174.2	0.90	221.6	1
14	46.65	0.17	63.66	0.79	174.2	0.88	221.6	1
15	45.05	0.14	64.26	0.73	174.2	0.86	221.6	1
16	44.44	0.11	64.26	0.77	174.2	0.85	221.6	1
17	44.44	0.10	64.86	0.71	173.6	0.83	221.6	1

Tablo 2 (Devam). Elektrik biası değişimi ile ilk dört rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyelerdeki geçiş olasılıkları. Sistem parametreleri $L_B = M_B = R_B = 5$ nm, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV olarak alınmıştır.

F (kV/cm)	Eres1 (meV)	T(Eres1)	Eres2 (meV)	T(Eres2)	Eres3 (meV)	T(Eres3)	Eres4 (meV)	T(Eres4)
18	43.84	0.08	64.86	0.71	173.6	0.81	221.6	1
19	43.24	0.07	65.47	0.70	173.6	0.80	221.6	1
20	42.64	0.06	65.47	0.74	173	0.78	221.6	1
21	42.04	0.05	66.07	0.70	173	0.76	221.6	1
22	41.44	0.04	66.07	0.72	173	0.74	221.6	1
23	40.84	0.03	66.67	0.71	172.4	0.72	221.6	1
24	40.84	0.03	66.67	0.70	172.4	0.70	222.2	1
25	40.24	0.02	67.27	0.72	171.8	0.68	222.2	1
26	39.64	0.02	67.27	0.67	171.8	0.66	222.2	1
27	39.04	0.02	67.87	0.73	171.8	0.64	222.2	1
28	38.44	0.01	68.47	0.68	171.2	0.63	222.2	1
29	37.84	0.01	68.47	0.73	171.2	0.61	222.2	1
30	38.44	0.00	69.07	0.72	170.6	0.59	222.2	1
31	40.24	0.00	69.07	0.71	170.6	0.57	222.2	1
32	-	-	69.67	0.75	170.6	0.55	222.8	1
33	-	-	69.67	0.68	170	0.53	222.8	1
34	-	-	70.27	0.77	170	0.52	222.8	1
35	-	-	70.87	0.72	169.4	0.50	222.8	1
36	-	-	70.87	0.76	169.4	0.48	222.8	1
37	-	-	71.47	0.78	168.8	0.46	223.4	1
38	-	-	71.47	0.73	168.8	0.45	223.4	1
39	-	-	72.07	0.82	168.2	0.43	223.4	1
40	-	-	72.67	0.74	168.2	0.41	223.4	1
41	-	-	72.67	0.83	167.6	0.40	223.4	1
42	-	-	73.27	0.82	167.6	0.39	224	1
43	-	-	73.27	0.80	167	0.37	224	1
44	-	-	73.87	0.87	167	0.36	224	1
45	-	-	74.47	0.74	166.4	0.35	224	1

Tablo 3 (Devam). Elektrik biası değişimi ile ilk dört rezonans enerji seviyeleri ve bu seviyelerdeki geçiş olasılıkları. Sistem parametreleri $L_B = M_B = R_B = 5$ nm, $V_L = V_M = V_R = 250$ meV olarak alınmıştır.

F (kV/cm)	Eres1 (meV)	T(Eres1)	Eres2 (meV)	T(Eres2)	Eres3 (meV)	T(Eres3)	Eres4 (meV)	T(Eres4)
46	-	-	74.47	0.90	166.4	0.33	224.6	1
47	-	-	75.08	0.84	165.8	0.32	224.6	1
48	-	-	75.08	0.87	165.8	0.31	224.6	1
49	-	-	75.68	0.92	165.2	0.30	224.6	1
50	-	-	75.68	0.81	165.2	0.29	225.2	1
51	-	-	76.28	0.97	164.6	0.28	225.2	1
52	-	-	76.88	0.83	164	0.27	225.2	1
53	-	-	76.88	0.96	164	0.26	225.2	1
54	-	-	77.48	0.92	163.4	0.25	225.8	1
55	-	-	77.48	0.88	163.4	0.24	225.8	1
56	-	-	78.08	0.99	162.8	0.23	225.8	1
57	-	-	78.08	0.77	162.2	0.22	226.4	1
58	-	-	78.68	0.99	162.2	0.21	226.4	1
59	-	-	79.28	0.80	161.6	0.20	226.4	1
60	-	-	79.28	0.91	161	0.19	226.4	1
65	-	-	81.68	0.15	159.2	0.16	227.6	1
70	-	-	90.09	0.01	157.4	0.13	228.2	1
75	-	-	-	-	155	0.10	229.4	1
80	-	-	-	-	153.2	0.09	230.6	1
85	-	-	-	-	150.8	0.07	231.2	0.99
90	-	-	-	-	148.9	0.06	232.4	0.99
95	-	-	-	-	147.1	0.05	233.6	0.98
100	-	-	-	-	147.1	0.04	234.2	0.97

4.TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında testere dişi üçlü üçgen bariyer yapısında rezonans tünelleme olayı incelenmiştir.

Rezonant tünelleme, çift veya daha fazla bariyerli yapılara gelen yük taşıyıcılarının, kuantum kuyusundaki enerji seviyelerinden birine karşılık gelen bir enerjide yapıyı geçtiği süreçtir. Bu enerji seviyelerine rezonant enerjileri denilmektedir. Rezonant enerjilerde yük taşıyıcılarının tamamı veya büyük bir oranı tüneller, rezonans enerji seviyelerinin tespiti hızlı anahtarlama yapılabilen kullanışlı nano cihaz uygulamalarında önemlidir.

Bu çalışmada testere dişi üçgen üçlü kuantum bariyer çift kuyu rezonans tünelleme yapısındaki rezonans enerjilerinin kuyu genişliği, potansiyel bariyeri yükseklikleri, ve genişliklerine bağlılığı incelenmiştir. Çalışmada transfer matris metodu kullanılmıştır.. Potansiyel bariyer yapı parametrelerinin belirli değerleri için rezonant enerji seviyesine denk enerjilerde gelen bütün parçacıklar potansiyel engelini geçer. Geçiş olasılığı bir dir.Yapının simetrisi bozulduğunda iletim olasılığı azalır yani rezonans tünelleme pik şiddeti düşer. Yapıda kuyuların genişliği artığında rezonans tünelleme enerjisi daha düşük enerji değerlerine gözlemlenir. Kuantum bariyer potansiyel yüksekliklerinin artmasıyla rezonans enerji seviyeleri daha yüksek enerjilerde görülmektedir. Bariyer yüksekliklerinin değişiminin rezonans enerji seviyesindeki geçil olasılığını önemli ölçüde etkilememektedir.. Elde edilen sonuçlara göre yapı parametrelerinin rezonant tünelleme özelliklerini güçlü bir şekilde etkilediğini ve bu nedenle rezonans enerji seviyelerinin ve tünellenmenin bu parametreler tarafından kontrol edilebileceğini göstermiştir.

4.1. Öneriler

Testere dişi çift bariyer yapısında rezonans enerjisinin kuyu genişliği, bariyer genişlikleri ve yüksekliklerine bağılılığı transfer matris metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Elektrik alan biası çok zayıf iken rezonans tünelleme enerjisinde gelen tüm parçacıklar tüneller yani iletim katsayısı bir (1) değerindedir. Simetri bozulduğunda veya elektrik alan şiddeti simetrik yapıda arttırıldığında iletim olasılığı azalır yani rezonans tünelleme pik şiddeti düşer. Rezonans tünelleme enerjisi kuyu genişliği arttıkça daha düşük enerji değerlerine kayarken, bariyer yüksekliklerinin artmasıyla daha yüksek enerjilere kaymaktadır. Bariyer yüksekliklerinin değişiminin rezonans pik şiddetine etkisi yok denecek kadar azdır. Sonuç olarak üçlü bariyer yapılarında rezonans tünelleme karakteristiği bu parametreler ile kontrol edilerek kullanışlı aygıt uygulamaları geliştirilebilir. Elektrik alan biasının farklı formlardaki etkileri ayrıca incelenebilir. Yapının manyetik alan altındaki iletim özellikleri çalışılabilir.

Çoklu bariyer yapılarında (veya kuyularında) rezonans piklerinin sayısı artar ve süperörgü durumlarında bantlar oluştururlar. Bu tip yapılar dikdörgen bariyerler için çalışılmış olup farklı tip gerçekçi bariyerler için de çalışılabilir. Kristal yapılarında karşılaşılabilecek potansiyeller modellenerek bu yapıların elektronik iletim özellikleri araştırılabilir. Ayrıca elektronik taşıyım için kullanılabilecek farklı yöntemlerle de bu yapıların rezonans tünelleme özellikleri çalışılabilir.

KAYNAKÇA

- Abdalla, A. S., Eisa, M. H., Alhathloul, R. ve Aldaghri O. (2018). Quantum resonant tunneling in semiconductor double-barrier structure, *Optik*, 170, 314-320. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.095>.
- Abdolkader, T. M. (2007). A new approach for numerical simulation of quantum transport in double-gate SOI. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 20(6), 299–309. <https://doi.org/10.1002/jnm.647>
- Abdolkader, T. M., Shaker, A., ve Alahmadi, A. N. M. (2018). Numerical simulation of tunneling through arbitrary potential barriers applied on MIM and MIIM rectenna diodes. *European Journal of Physics*, 39(4), 045402. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aab5cf>
- Abdolkader, T. M., Shaker, A. ve Alahmadi, A. N. M. (2018). Numerical simulation of tunneling through arbitrary potential barriers applied on MIM and MIIM rectenna diodes, *European Journal of Physics*, 39, 045402.
- Aikawa, K. Suhara, M. Asakawa, K. Arzi, K. Weimann, N. ve Prost, W. (2019). Characterization of the Effective Tunneling Time and Phase Relaxation Time in Triple-Barrier Resonant Tunneling Diodes, 2019 Compound Semiconductor Week (CSW), 2019, pp. 1-2, doi: 10.1109/ICIPRM.2019.8819043.
- Allford, C. P. ve Buckle, P. D. (2017). Strain Compensated InGaAs/AlAs Triple Barrier Resonant Tunneling Structures for THz Applications, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7, 772-779. doi: 10.1109/TTHZ.2017.2758266.
- Almansour, S. (2020). Theoretical study of electronic properties of resonant tunneling diodes based on double and triple AlGaAs barriers. *Results in Physics*, 17, 103089. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103089>
- Ando, Y., ve Itoh, T. (1987). Calculation of transmission tunneling current across arbitrary potential barriers. *Journal of Applied Physics*, 61(4), 1497–1502. <https://doi.org/10.1063/1.338082>
- Anwar, A., ve Jahan, M. (1995). Traversal time in an asymmetric double-barrier quantum-well structure. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 31(1), 3–7. <https://doi.org/10.1109/3.341701>
- Arda, A. (2017). Triangular quantum profiles: transmission probability and energy spectrum. *TURKISH JOURNAL OF PHYSICS*, 41, 72–80. <https://doi.org/10.3906/fiz-1607-8>
- Arndt, M., Juffmann, T., ve Vedral, V. (2009). Quantum physics meets biology. *HFSP Journal*, 3(6), 386–400. <https://doi.org/10.2976/1.3244985>

- Ballo, P., ve Harmatha, L. (2011). Quantum tunneling through a very narrow triangular potential barrier exact and WKB solution, Proceedings 17 International Conference on Applied Physics of Condensed Matter, (p. 328). Slovakia: University of Zilina.
- Barut, A. O., Inomata, A., ve Wilson, R. (1987). Algebraic treatment of second Pöschl-Teller, Morse-Rosen and Eckart equations. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 20(13), 4083–4096. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/20/13/017>
- Batı, M. (2017). Testere Dişi Çift Bariyer Yapısında Rezonant Tünelleme Olayının İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 91–96. <https://doi.org/10.21541/apjes.319961>
- Batı, M. (2018). Resonant tunneling properties of inverted Morse double quantum barrier. *Chinese Journal of Physics*, 56(2), 593–597. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2018.01.013>
- Batı, M. (2019). Electronic Transport and Resonant Tunneling Properties of Hyperbolic Pöschl-Teller Double-Barrier Structures, *Journal of Computational and Theoretical Transport*, 48, 66-76. <https://doi.org/10.1080/23324309.2019.1608563>.
- Batı, M., Sakiroglu, S., ve Sokmen, I. (2016). Electron transport in electrically biased inverse parabolic double-barrier structure. *Chinese Physics B*, 25(5), 057307. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/25/5/057307>
- Boykin, T. B., ve Klimeck, G. (2005). The discretized Schrödinger equation for the finite square well and its relationship to solid-state physics. *European Journal of Physics*, 26(5), 865–881. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/26/5/020>
- Bransden, B. H. and Joachain, C. J. (2000). *Quantum Mechanics*, Prentice Hall, 2. Baskı, ISBN: 978-0582356917.
- Bransden, B. H. (2022). *Quantum Mechanics* (2nd ed.). PEARSON INDIA.
- C. Jirouschek, “Accuracy of transfer matrix approaches for solving the effective mass Schrodinger equation,” *IEEE. J. Quantum. Electron.*, vol. 45, no. 9, pp. 1059–1067, Sep. 2009.
- Chamnan, N., ve Krunavakarn, B. (2017). Quantum reflection in the linearly downward potential. *Journal of Physics: Conference Series*, 901, 012113. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/901/1/012113>
- Chang, L. L., Esaki, L., ve Tsu, R. (1974). Resonant tunneling in semiconductor double barriers. *Applied Physics Letters*, 24(12), 593-595. <https://doi.org/10.1063/1.1655067>
- Clochiatti, S., Mutlu, E., Preuss, C., Kress, R., Prost, W. and Weimann, N. (2021). Broadband THz Detection Using InP Triple-Barrier Resonant Tunneling Diode

- With Integrated Antenna," 2021 Fourth International Workshop on Mobile Terahertz Systems (IWMTS), pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/IWMTS51331.2021.9486794>
- Choi, R. J., Hahn, Y. B., Shim, H. W., Han, M. S., Suh, E. K. ve Lee, H. J. (2003). Efficient blue light-emitting diodes with InGaN/GaN triangular shaped multiple quantum Wells, *Applied Physics Letters*, 82, 2764-2766. doi: 10.1063/1.1570511.
- Cordero, S., ve García-Calderón, G. (2009). Invisibility of quantum systems to tunneling of matter waves. *Physical Review A*, 79(5). <https://doi.org/10.1103/physreva.79.052103>
- Cordero, S., ve García-Calderón, G. (2014). Multibarrier-tunneling invisible systems. *Physical Review A*, 90(6). <https://doi.org/10.1103/physreva.90.062101>
- Do, V. N., Dollfus, P., ve Lien Nguyen, V. (2006). Transport and noise in resonant tunneling diode using self-consistent Green's function calculation. *Journal of Applied Physics*, 100(9), 093705. <https://doi.org/10.1063/1.2364035>
- Droopad, R., Gerber, D. S., Choi, C., ve Maracas, G. N. (1993). Pseudomorphic InGaAs/GaAs and GaAs/AlGaAs asymmetric triangular quantum wells grown by MBE for optoelectronic device applications. *Journal of Crystal Growth*, 127(1-4), 606-610. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(93\)90693-q](https://doi.org/10.1016/0022-0248(93)90693-q)
- Dujardin, E., Thio, T., Lezec, H., ve Ebbesen, T. W. (2001). Fabrication of mesoscopic devices from graphite microdisks. *Applied Physics Letters*, 79(15), 2474-2476. <https://doi.org/10.1063/1.1407306>
- Encomendero, J., Protasenko, V., Sensale-Rodriguez, B., Fay, P., Rana, F., Jena, D., ve Xing, H. G. (2019). Broken Symmetry Effects due to Polarization on Resonant Tunneling Transport in Double-Barrier Nitride Heterostructures. *Physical Review Applied*, 11(3). <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.11.034032>
- Esaki, L. (1958). New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions. *Physical Review*, 109(2), 603-604. <https://doi.org/10.1103/physrev.109.603>
- Esaki, L. (1974). Long Journey into Tunneling. *Science*, 183(4130), 1149-1155. <https://doi.org/10.1126/science.183.4130.1149>
- Esaki, L., ve Tsu, R. (1970). Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors. *IBM Journal of Research and Development*, 14(1), 61-65. <https://doi.org/10.1147/rd.141.0061>
- Esaki, L. (1992). Nobel Lectures in Physics 1971-1980. Ed. Lundqvist, S. World Scientific Publishing Co., 1992. Chap. A Long Journey into Tunneling, pp. 116-133. ISBN: 978-981-02-0727-4.

- Faist, J. (2018). Quantum Cascade Lasers (Reprint ed.). Oxford University Press.
- Faist, J., Capasso, F., Hutchinson, A. L., Pfeiffer, L., ve West, K. W. (1993). Suppression of optical absorption by electric-field-induced quantum interference in coupled potential wells. *Physical Review Letters*, 71(21), 3573–3576. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.3573>
- Faist, J., Capasso, F., Sirtori, C., Sivco, D., Hutchinson, A., Chu, S., ve Cho, A. (1993). Quantum-well intersub-band electroluminescent diode at $\lambda = 5\mu\text{m}$. *Electronics Letters*, 29(25), 2230. <https://doi.org/10.1049/el:19931497>
- Faist, J., Capasso, F., Hutchinson, A. L., Pfeiffer L. ve West. K.W. (1993). Suppression of optical absorption by electric-eld-induced quantum interference in coupled potential wells, *Physical Review Letters*, 71, 3573-3576.
- Faist, J., Capasso, F., Sivco, D. L., Sirtori, C., Hutchinson A. L. ve Cho, A. Y. (1994). Quantum cascade laser, *Science*, 264, 553-556.
- Faist, J., Capasso, F., Sirtori, C., Sivco, D. L., Hutchinson, A. L., Hybertsen, M. S., ve Cho, A. Y. (1996). Quantum Cascade Lasers without Intersubband Population Inversion. *Physical Review Letters*, 76(3), 411–414. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.76.411>
- Fejer, M. M., Yoo, S. J. B., Byer, R. L., Harwit, A., ve Harris Jr., J. S. (1989). Observation of extremely large quadratic susceptibility at $9.6\text{--}10.8\mu\text{m}$ in electric-field-biased AlGaAs quantum wells. *Physical Review Letters*, 62(9), 1041–1044. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.62.1041>
- Ferrari, V. ve Mashhoon, B. (1984). Oscillations of a Black Hole, *Physical Review Letters*, 52, 1361-1364. Doi:10.1103/PhysRevLett.52.1361.
- Ferrari, V. ve Mashhoon, B. (1984). New approach to the quasinormal modes of a black hole, *Physical Review D*, 30, 295-304. doi:10.1103/PhysRevD.30.295.
- Ferrer-Galindo, L., Betancourt-Riera, R., Betancourt-Riera, R., ve Riera, R. (2018). Electron states and electron Raman scattering in an asymmetrical double quantum well: External electric field. *Physica B: Condensed Matter*, 545, 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.06.017>
- Ferry, D. (2001) *Quantum Mechanics: An Introduction for Device Physicists and Electrical Engineers*, 2. Baskı, CRC Press, ISBN : 978-0750307253.
- Ferry, D. (2020). *Quantum Mechanics*. Amsterdam University Press.
- Ferry, D. K., Goodnick, S. M. ve Bird, J. (2009). *Transport in nanostructures*. Cambridge: Cambridge University Press. 2. Baskı, ISBN: 978-0521877480
- Forbes, R. G. ve Deane, J. H. B. (2011). Transmission coefficients for the exact triangular barrier: an exact general analytical theory that can replace Fowler &

- Nordheim's 1928 theory, *Proceedings of the Royal Society A*, 467, 2927-2947. Doi: 10.1098/rspa.2011.0025.
- Garg, A. (2000). Tunnel splittings for one-dimensional potential wells revisited, *American Journal of Physics*, 68, 430-637.
- Gerber, D. S., Droopad, R., ve Maracas, G. N. (1993). Comparison of electroabsorption in asymmetric triangular and rectangular GaAs/Al_xGa_{1-x}As multiple quantum wells. *Applied Physics Letters*, 62(5), 525–527. <https://doi.org/10.1063/1.108900>
- Ghatak, A. K., Sauter, E. G., ve Goyal, I. C. (1997). Validity of the JWKB formula for a triangular potential barrier. *European Journal of Physics*, 18(3), 199–204. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/18/3/013>
- Gossard, A. C., Kazarinov, R. F., Luryi, S. ve Wiegmann, W. (1982). Electric properties of unipolar GaAs structures with ultrathin triangular barriers, *Applied Physics Letters*, 40, 832-833; doi: 10.1063/1.93245;
- Grover, S., ve Moddel, G. (2011). Applicability of Metal/Insulator/Metal (MIM) Diodes to Solar Rectennas. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1(1), 78–83. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2011.2160489>
- Guéret, P., Rossel, C., Schlup, W., ve Meier, H. P. (1989). Investigations on resonant tunneling in III-V heterostructures: Comparison between experimental data and model calculations. *Journal of Applied Physics*, 66(9), 4312–4316. <https://doi.org/10.1063/1.343977>
- Guo, K. X. ve Chen, C. Y. (1995). Polaron effects on the optical rectification in electric-field-biased parabolic quantum wells, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 7, 6583-6589.
- Guo, D. F. (1996). Resonant tunneling characteristics of a delta-doped strained-layer quantum-well switching device (δ -SQSD). *Solid-State Electronics*, 39(11), 1637–1641. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(96\)00074-3](https://doi.org/10.1016/0038-1101(96)00074-3)
- Guo, D. F. (1998). Negative-differential-resistance characteristics in a triangular-barrier resonant tunnelling switch. *Semiconductor Science and Technology*, 13(2), 231–235. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/13/2/013>
- Guo, D.-F. (1998). An Optoelectronic Switch Based on a Triangular-Barrier Structure *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 34, 1882-1885. Doi: 10.1109/ICIPRM.2000.850240.
- Guo, D. F. (1998). Negative-differential-resistance characteristics in a triangular-barrier resonant tunnelling switch, *Semiconductor Science and Technology*, 13, 231-235. Doi: 10.1088/0268-1242/13/2/013.

- Guo, K. X., ve Chen, C. Y. (1995). Polaron effects on the optical rectification in electric-field-biased parabolic quantum wells. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 7(32), 6583–6589. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/7/32/023>
- Gupta, R. S., Chilana, G. S. and Srivastava, G. P. (1986). Barrier height enhancement of triangular barrier diodes, *Journal of Applied Physics*, 59, 4103-4107. doi: 10.1063/1.336719
- Harrison, P. ve Valavanis, A. (2016). *Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures*, 4. Baskı, Wiley, ISBN:978-1118923368.
- Hayrapetyan, D., Kazaryan, E., ve Tevosyan, H. (2013). Optical properties of spherical quantum dot with modified Pöschl–Teller potential. *Superlattices and Microstructures*, 64, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.09.002>
- Ishikawa, T., ve Tada, K. (1989). Observation of Quantum-Confined Stark Effect in a Graded-Gap Quantum Well. *Japanese Journal of Applied Physics*, 28(Part 2, No. 11), L1982–L1984. <https://doi.org/10.1143/jjap.28.l1982>
- Iwamoto, H., Aquino, V. M., ve Aguilera-Navarro, V. C. (2003). Scattering Coefficients for a Trapezoidal Potential. *International Journal of Theoretical Physics*, 42(8), 1795–1807. <https://doi.org/10.1023/a:1026191507292>
- Jasprit, S. (1995). *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology*, McGraw-Hill Education, 1. Baskı, ISBN: 978-0071135771.
- Jérôme, F. (2013) *Quantum Cascade Lasers*, Oxford University Press, 1. Baskı, ISBN: 978-0198528241.
- Khairurrijal, Noor, F. A., ve Sukirno. (2005). Electron direct tunneling time in heterostructures with nanometer-thick trapezoidal barriers. *Solid-State Electronics*, 49(6), 923–927. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2005.03.016>
- Khondker, A, Khan, M. R. ve Anwar, A. (1988). Traversal time in an asymmetric double-barrier quantum-well structure, *Journal of Applied Physics*, 63, 5191-5193. Doi:10.1109/3.341701.
- Leite, T. N. ve de Oliveira, H. P. (2011). Tunneling Processes in a Triangular Multibarrier Semiconductor Heterostructure *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58, 716-719. doi: 10.1109/TED.2010.2100399.
- Leo, J., ve MacDonald, A. H. (1991). Disorder-assisted tunneling through a double-barrier resonant-tunneling structure. *Physical Review B*, 43(12), 9763–9771. <https://doi.org/10.1103/physrevb.43.9763>
- Levi, A. F. J. (2012). *Applied Quantum Mechanics* Cambridge University Press; 2. Baskı, ISBN: 978-0521183994.

- Li, B., Guo, K. X., Zhang, C. J., ve Zheng, Y. B. (2007). The second-harmonic generation in parabolic quantum dots in the presence of electric and magnetic fields. *Physics Letters A*, 367(6), 493–497. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.03.046>
- Li, G., Song, W., Wang, H., Luo, X., Luo X. ve Li, S. (2018). Performance Improvement of UV Light-Emitting Diodes With Triangular Quantum Barriers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 30, 1071-1074. doi: 10.1109/LPT.2018.2827371.
- Liboff, R. L. (2002). *Introductory Quantum Mechanics*, Addison Wesley, 4. Baskı, ISBN: 978-0805387148.
- Luo, M., Yu, G. Lin, Y. ve Su, J. (2014). Calculation of current density for triangular multi-barrier structure in a constant electric field, *Superlattices and Microstructures*, 74, 78-84. Doi: 10.1016/j.spmi.2014.06.004
- Luo, M., Yu, G., ve Xia, L. (2015). Calculation of conductance for triangular multi-barrier structure in a constant electric field. *Superlattices and Microstructures*, 83, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.02.015>
- Magoga, M., Archambault, F., ve Cerdá, J. I. (2012). Nt_STM: A step forward in Scanning Tunneling Microscopy (STM) simulations. *Computer Physics Communications*, 183(6), 1246–1249. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.02.003>
- Malik, A. M., Godfrey, M. J., ve Dawson, P. (1999). Tunneling of heavy holes in semiconductor microstructures. *Physical Review B*, 59(4), 2861–2866. <https://doi.org/10.1103/physrevb.59.2861>
- Martinz, S., ve Ramos, R. (2016). Double quantum well triple barrier structures: analytical and numerical results. *Canadian Journal of Physics*, 94(11), 1180–1188. <https://doi.org/10.1139/cjp-2016-0037>
- Mashhoon, B. (1983). Quasi-normal modes of a black hole, in *Proceedings of the third Marcel Grossmann meeting on General Relativity*, ed: H. Ning, Science Press, 599-608.
- Méndez, B., ve Domínguez-Adame, F. (1994). Numerical study of electron tunneling through heterostructures. *American Journal of Physics*, 62(2), 143–147. <https://doi.org/10.1119/1.17633>
- Miranda, M. G., Sun, G. H., ve Dong, S. H. (2010). The Solution Of The Second Pöschl-Teller Like Potential By Nikiforov-Uvarov Method. *International Journal of Modern Physics E*, 19(01), 123–129. <https://doi.org/10.1142/s0218301310014704>
- Nakagawa, T., Imamoto, H., Kojima, T., ve Ohta, K. (1986). Observation of resonant tunneling in AlGaAs/GaAs triple barrier diodes. *Applied Physics Letters*, 49(2), 73–75. <https://doi.org/10.1063/1.97356>

- Neamen, D. A. (2011). *Semiconductor Physics And Devices: Basic Principles* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Nicholls, J., Dimitrijević, S., Tanner, P., ve Han, J. (2019). Description and Verification of the Fundamental Current Mechanisms in Silicon Carbide Schottky Barrier Diodes. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40287-1>
- Nouredine, Z. (2009). *Quantum Mechanics: Concepts and Applications*, Wiley, 2. Baskı, ISBN: 978-0470026793.
- Nutku, F. (2014). Quasi-bound levels, transmission and resonant tunneling in heterostructures with double and multi rectangular, trapezoidal, triangular barriers. *Journal of Computational Electronics*, 13(2), 456–465. <https://doi.org/10.1007/s10825-014-0556-1>
- Ohmukai, M. (2005). Triangular double barrier resonant tunneling. *Materials Science and Engineering: B*, 116(1), 87–90. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.09.021>
- Papp, G., Ventra, M. D. ve Coluzza, C. (1995). Current rectification through a single-barrier resonant tunneling quantum structure, *Superlattices Microstructure*, 77, 273-275. Doi:10.1016/j.physleta.2006.04.007
- Papp, G., di Ventra, M., Coluzza, C., Baldereschi, A., ve Margaritondo, G. (1995). Current rectification through a single-barrier resonant tunneling quantum structure. *Superlattices and Microstructures*, 17(3), 273. <https://doi.org/10.1006/spmi.1995.1049>
- Pourfath, M. (2007). *Numerical Study of Quantum Transport in Carbon Nanotube Based Transistors*, Doktora Tezi, Eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik von, Wien, Österreich.
- Pöschl, G., ve Teller, E. (1933). Bemerkungen zur Quantenmechanik des anharmonischen Oszillators. *Zeitschrift Für Physik*, 83(3–4), 143–151. <https://doi.org/10.1007/bf01331132>
- Radovanović, J., Milanović, V., Ikonić, Z., ve Indjin, D. (2000). Intersubband absorption in Pöschl–Teller-like semiconductor quantum wells. *Physics Letters A*, 269(2–3), 179–185. [https://doi.org/10.1016/s0375-9601\(00\)00238-3](https://doi.org/10.1016/s0375-9601(00)00238-3)
- Ricco, B., ve Azbel, M. Y. (1984). Physics of resonant tunneling. The one-dimensional double-barrier case. *Physical Review B*, 29(4), 1970–1981. <https://doi.org/10.1103/physrevb.29.1970>
- Rong, K. Suhara, M. Asakawa, K. Arzi, K. Weimann, N. and Prost, W. (2019). Characterization of the Effective Tunneling Time and Phase Relaxation Time in Triple-Barrier Resonant Tunneling Diodes, 2019 Compound Semiconductor Week (CSW), 2019, pp. 1-2, <https://doi:10.1109/ICIPRM.2019.8819043>

- Rong, T., Yang, L. A., Zhao, Z., Zhang, K., ve Hao, Y. (2019). Theoretical Modeling of Triple-Barrier Resonant-Tunneling Diodes Based on AlGaIn/GaN Heterostructures. *Physica Status Solidi (a)*, 216(23), 1900471. <https://doi.org/10.1002/pssa.201900471>
- Roskos, H. G., Nuss, M. C., Shah, J., Leo, K., Miller, D. A. B., Fox, A. M., Schmitt-Rink, S., ve Köhler, K. (1992). Coherent submillimeter-wave emission from charge oscillations in a double-well potential. *Physical Review Letters*, 68(14), 2216–2219. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.2216>
- Sakata, H., Utaka, K. ve Matsushima, Y. (1994). Novel bistable device Resonant-tunneling triangular-barrier optoelectronic switch (R-tops), *Electronics Letters*, 30, 1714-1716. Doi:10.1049/el:19941167.
- Santiago, R. B., ve Guimarães, L. (2002). Extended eigenfunctions in asymmetric double triangular quantum wells in weak electric fields. *Solid-State Electronics*, 46(1), 89–96. [https://doi.org/10.1016/s0038-1101\(01\)00267-2](https://doi.org/10.1016/s0038-1101(01)00267-2)
- Sarikurt, S. (2013). Electronic Structure of Parabolic Confining Quantum Wires with Rashba ve Dresselhaus Spin-Orbit Coupling in a Perpendicular Magnetic Field. Ph.D. thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Saurabh, S. ve Kumar M. J. (2016). *Fundamentals of Tunnel Field-Effect Transistors* CRC Press, 1. Baskı, ISBN:978-1315367354.
- Schulz, P. A., ve Gonçalves Da Silva, C. E. T. (1988). Two-step barrier diodes. *Applied Physics Letters*, 52(12), 960–962. <https://doi.org/10.1063/1.99241>
- Shahjahan, M., Khatun, M. H., Sawada, K., ve Ishida, M. (2010). TEM study of RTD structure fabricated with epi-Si/ γ -Al₂O₃ heterostructure. *Thin Solid Films*, 518(8), 2295–2298. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.08.151>
- Shizgal, B. D. (2016). Pseudospectral method of solution of the Schrödinger equation with non classical polynomials; the Morse and Pöschl–Teller (SUSY) potentials. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1084, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2016.03.002>
- Shu, Q., Jiang, Y., Meng, S., Lin, G., ve Ma, W. (2002). Exactly solvable model for metal–insulator–metal stepped boundary tunnel junctions. *Thin Solid Films*, 414(1), 136–142. [https://doi.org/10.1016/s0040-6090\(02\)00455-8](https://doi.org/10.1016/s0040-6090(02)00455-8)
- Singh, J. (1995). *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology*. McGraw-Hill Education (ISE Editions).
- Singh, M. M., ve Siddiqui, M. (2017). Electrical characterization of triple barrier GaAs/AlGaAs RTD with dependence of operating temperature and barrier lengths. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 58, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2016.10.014>

- Skolnick, M. S., Hayes, D. G., Simmonds, P. E., Higgs, A. W., Smith, G. W., Hutchinson, H. J., Whitehouse, C. R., Eaves, L., Henini, M., Hughes, O. H., Leadbeater, M. L., ve Halliday, D. P. (1990). Electronic processes in double-barrier resonant-tunneling structures studied by photoluminescence spectroscopy in zero and finite magnetic fields. *Physical Review B*, 41(15), 10754–10766. <https://doi.org/10.1103/physrevb.41.10754>
- Sollner, T. C. L. G., Goodhue, W. D., Tannenwald, P. E., Parker, C. D., ve Peck, D. D. (1983). Resonant tunneling through quantum wells at frequencies up to 2.5 THz. *Applied Physics Letters*, 43(6), 588–590. <https://doi.org/10.1063/1.94434>
- Strutz, T., ve Shiraki, Y. (1996). Room-temperature quantum interference in an asymmetric triple-barrier resonant-tunnelling diode. *Semiconductor Science and Technology*, 11(1), 103–106. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/11/1/022>
- Sutherland, B. R., Keating, S. ve Shrivastava, I. (2015). Transmission and reflection of internal solitary waves incident upon a triangular barrier, *Journal of Fluid Mechanics*, 775, 304–327. doi:10.1017/jfm.2015.306. 304.
- Sze, S. M., Li, Y., ve Ng, K. K. (2021). *Physics of Semiconductor Devices* (4th ed.). Wiley.
- Tanoue, T., Mizuta, H., ve Takahashi, S. (1988). A triple-well resonant tunneling diode for multiple-valued logic application. *IEEE Electron Device Letters*, 9(8), 365–367. <https://doi.org/10.1109/55.745>
- Tao, B., Wan, C., Tang, P., Feng, J., Wei, H., Wang, X., Andrieu, S., Yang, H., Chshiev, M., Devaux, X., Hauet, T., Montaigne, F., Mangin, S., Hehn, M., Lacour, D., Han, X., ve Lu, Y. (2019). Coherent Resonant Tunneling through Double Metallic Quantum Well States. *Nano Letters*, 19(5), 3019–3026. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00205>
- Tong, B. (1997). Scattering states of the Sech-squared potential. *Solid State Communications*, 104(11), 679–682. [https://doi.org/10.1016/s0038-1098\(97\)10009-6](https://doi.org/10.1016/s0038-1098(97)10009-6)
- Tsang, W. T. (1982). Extremely low threshold (AlGa)As graded-index waveguide separate-confinement heterostructure lasers grown by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 40(3), 217–219. <https://doi.org/10.1063/1.93046>
- Tsang, W. T., Wu, M. C., Tanbun-Ek, T., Logan, R. A., Chu, S. N. G., ve Sargent, A. M. (1990). Low threshold and high power output 1.5 μm InGaAs/InGaAsP separate confinement multiple quantum well laser grown by chemical beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 57(20), 2065–2067. <https://doi.org/10.1063/1.103942>
- Tsu, R., ve Esaki, L. (1973). Tunneling in a finite superlattice. *Applied Physics Letters*, 22(11), 562–564. <https://doi.org/10.1063/1.1654509>

- Tung, R. T. (2014). The physics and chemistry of the Schottky barrier height. *Applied Physics Reviews*, 1(1), 011304. <https://doi.org/10.1063/1.4858400>
- Van der Maelen Uría, J. F., García-Granda, S., ve Menéndez-Velázquez, A. (1996). Solving one-dimensional Schrödinger-like equations using a numerical matrix method. *American Journal of Physics*, 64(3), 327–332. <https://doi.org/10.1119/1.18242>
- Ventra, M.D., Papp, G., Coluzza, C., Baldereschi, A., ve Schulz, P. A. (1996). Indented barrier resonant tunneling rectifiers. *Journal of Applied Physics*, 80(7), 4174–4176. <https://doi.org/10.1063/1.363290>
- Venturi, F., Sangiorgi, E., Luryi, S., Poli, P., Rota, L. ve Jacoboni, C. (1991). Energy Oscillations in Electron Transport Across a Triangular Barrier, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 38, 611-618. DOI: 10.1109/IEDM.1991.235345.
- Visser, M. (1999). Some general bounds for one-dimensional scattering. *Physical Review A*, 59(1), 427–438. <https://doi.org/10.1103/physreva.59.427>
- W. W. Liu ve M. Fukuma, “Exact solution of the Schrodinger equation across an arbitrary one-dimensional piecewise-linear potential barrier,” *J. Appl. Phys.*, vol. 60, no. 5, pp. 1555–1559, 1986.
- Wang, S. M., Treideris, G., Chen, W. Q. ve Anderson, T. G. (1993). Growth of analog Al_xGa_{1-x}As/GaAs parabolic quantum wells by molecular beam epitaxy, *Applied Physics Letters*, 62, 61-62. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.108819>.
- Wang, G., ve Guo, K. (2001). Excitonic effects on the third-harmonic generation in parabolic quantum dots. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 13(35), 8197–8206. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/35/324>
- Wang, J., Ma, Y. T. ve Tian, L. L. (2001). Fabrication of mesoscopic devices from graphite microdisks, *Applied Physics Letters*, 79, 1831.
- Wang, H., Xu, H., ve Zhang, Y. (2006). A theoretical study of resonant tunneling characteristics in triangular double-barrier diodes. *Physics Letters A*, 355(6), 481–488. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2006.04.007>
- Wang, H. M., Xu, H. Z. ve Zhang, Y. F. (2006). A theoretical study of resonant tunneling characteristics in triangular double-barrier diodes, *Physics Letter A*, 355, 481-488. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2006.04.007>.
- Yu, Y. B., ve Guo, K. X. (2003). Exciton effects on nonlinear electro-optic effects in semi-parabolic quantum wires. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 18(4), 492–497. [https://doi.org/10.1016/s1386-9477\(03\)00190-5](https://doi.org/10.1016/s1386-9477(03)00190-5)
- Yu, Y. B., Guo, K. X., ve Zhu, S. N. (2005). Polaron influence on the third-order nonlinear optical susceptibility in cylindrical quantum wires. *Physica E: Low-*

Dimensional Systems and Nanostructures, 27(1–2), 62–66.
<https://doi.org/10.1016/j.physe.2004.10.004>

Zettili, N. (2022). Quantum Mechanics: Concepts and Applications (3rd ed.). Wiley.

Zhao, X. D., Yamamoto, H., Chen, Z. M., ve Taniguchi, K. (1996). Comparison of resonance conditions in double-barrier structures and triple-barrier structures. Journal of Applied Physics, 79(9), 6966–6974.
<https://doi.org/10.1063/1.361461>

