

**RESONANT TÜNELLEME
TRİSTÖRLERİNİN İNCELENMESİ**

Buket D. BARKANA

Doktora Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2005

**RESONANT TUNNELING SEMICONDUCTOR
POWER SWITCHES**

Buket D. BARKANA

**Ph.D. Thesis
Electric-Electronic Engineering**

2005

**RESONANT TÜNELLEME
TRİSTÖRLERİNİN İNCELENMESİ**

Buket D. BARKANA

**Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Bilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır.**

**Danışman: Prof. Dr. Hasan Hüseyin ERKAYA
Temmuz-2005**

ÖZET

Bu çalışmada Resonant Tünelleme Yarıiletken Kontrollü Anahtarı (RT-SCR) adıyla bir hetero eklem yapılı bir p-n-p-n-p-n yarıiletken anahtar cihazı önerilmiştir. Bu yapıya ait akım gerilim ilişkileri iki transistor modeli ile ele alınmıştır. Cihazın dizaynında, tezde sunulan RTT dizaynı temel alınmış ve iki-transistör temelli bir model gerçekleştirilmiştir. AlGaAs/GaAs malzemeleri kullanılmıştır. Geometrik ve fiziksel özelliklere göre, RT-SCR'ye ait farklı akım-gerilim çalışma karakteristikleri elde edilmiştir. Resonant Tünelleme yapısı ile yarıiletken güç anahtarlarının normal yapıya göre daha küçük akımlarla kontrol edilebileceği gösterilmiştir.

ABSTRACT

In this study, a p-n-p-n-p-n semiconductor switch design with heterojunction structure is suggested to be called Resonant Tunneling Semiconductor Controlled Switch (RT-SCR). Current-voltage characteristics of this structure is studied with a two-transistor model. In the design of the device, an RTT and a regular BJT are used. AlGaAs/GaAs materials are used in the structure. For various geometrical and physical features, different current-voltage characteristics for RT-SCR are found. Resonant Tunneling semiconductor power switches require less turn-on currents than the conventional semiconductor power switches.

TEŞEKKÜR

Anne ve Babam'a

Bu çalışmada, öncelikle, danışman hocam Prof.Dr. Hasan Hüseyin Erkaya'ya göstermiş olduğu anlayış, rehberlik ve destek için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Prof.Dr.Muhsin Zor hocama, karşılaştığımız problemlerin çözümünde yardımcı olabilmek için ayırdığı vakit ve verdiği fikirler için teşekkür ederim. Ayrıca, Prof.Dr.Atila Barkana'ya matematiksel kısımlardaki yararlı önerileri için, Yrd.Doç.Dr.İnci Sarıçiçek'e tezin yazımındaki ve diğer birçok konudaki yardımları ve destekleri için, Prof.Dr. Atalay Barkana ve Çiğdem Barkana'ya yardımları için çok teşekkür ederim.

Son olarak, eğitimimi en başından beri maddi ve manevi büyük bir özveri ve sabırla destekleyen anne ve babam, Zeynep ve Orhan Dedeakayoğulları'na, eşim Tamer Barkana'ya saygılarımı ve sevgilerimi sunuyorum.

Buket D. Barkana'nın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "RESONANT TÜNELLEME TRİSTÖRLERİNİN İNCELENMESİ" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

..../.../2005

Üye: Prof. Dr. Hasan Hüseyin Erkaya

Üye: Prof. Dr. Muhsin Zor

Üye: Doç. Dr. M. Celalettin Baykul

Üye: Yrd. Doç. Dr. Salih Köse

Üye: Yrd. Doç. Dr. Bünyamin Tamyürek

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nungün ve
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ	xiii
SİMGELER DİZİNİ.....	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. RESONANT TÜNELLEME YAPISI VE RESONANT TÜNELLEME DİYOTLARI	3
2.1. Resonant Tünellemeye Genel Bakış	3
2.2. Kuantum Boyut Etkileri	4
2.3. Kuantum Kuyuları.....	5
2.4. Tünelleme Karakteristiği ve Transfer Matris Metodu.....	7
2.5. Resonant Tünelleme Diyodu	11
2.6. Resonant Tünelleme Diyodunun Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	16
3. RESONANT TÜNELLEME TRANSİSTÖRLERİ.....	18
3.1. Geleneksel Bipolar Junction Transistörler	18
3.2. Akım Kazıncı Faktörlerinin Matematiksel Olarak Üretilmesi.....	22
3.2.1. Emetör verimliliği faktörü.....	22
3.2.2. Baz içindeki taşınım faktörü	24
3.3. Farklı Eklem Bipolar Transistörler	26
3.4. Resonant Tünelleme Transistörleri	29
3.5. Resonant Tünelleme Bipolar Transistörün Modellenmesi.....	33
3.6. Resonant Tünelleme Bipolar Transistörü Modellemeye Ait Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	39

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam)

	<u>Sayfa</u>
4. RESONANT TÜNELLEME YARIİLETKEN KONTROLLÜ DOĞRULTUCU	41
4.1. Yarıiletken Kontrollü Doğrultucuların Temel Karakteristikleri	42
4.1.1. Ters kutuplama durumu	44
4.1.2. İleri kutuplama durumu	47
4.2. Akım Denklemleri	48
4.3. Gerilim Denklemleri	49
4.4. İleri Yöndeki Kırılma Gerilimi	51
4.5. Kullanılan Yarıiletken Kontrollü Doğrultucu Yapısına Ait Sonuçlar	55
4.6. Resonant Tünelleme Yarıiletken Kontrollü Doğrultucunun Modellenmesi	59
4.6.1. Akım denklemleri	59
4.6.2. Gerilimdenklemleri	61
4.7. Modelin Fiziksel Yapısı	62
4.8. Modele Ait Sonuçlar	63
4.9. Sonuçların Karşılaştırılması	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR DİZİNİ	
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1	Değişik yarıiletkenler için band aralığının kafes sabitine bağlı grafiği..... 4
2.2	Sözde-iki boyutlu bölge içersindeki kuantum size etkilerinin gösterimi 6
2.3	Resonant tünelleme diyodundaki potansiyel dağılım..... 7
2.4	AlGaAs-GaAs ten oluşan bir tünelleme yapısı 10
2.5	Matris metodu ile hesaplanan iki-katlı bir bariyer heteroyapısındaki tünelleme olasılığının enerji bağımlılığı 10
2.6	k_x düzlemsel bileşen değişiminin tünelleme olasılığı üzerindeki etkisi 11
2.7	Çalışmada kullanılan resonant tünelleme diyodunun yapısı 12
2.8	Resonant tünel diyodunun tipik akım-gerilim karakteristikleri 12
2.9	Beslemenin olduğu ve olmadığı durumda, bariyer yapısının şematik gösterimi..... 13
2.10	Bu çalışmada kullanılan resonant tünelleme diyodunun yapısı 16
2.11	Yukarıda tünelleme olasılığı eğrisi verilen yapı kullanılarak oluşturulan bir RTD için akım-gerilim karakteristiği..... 17
2.12	RTD için akım-gerilim karakteristiğinin sıcaklığa bağlı değişimi..... 17
3.1	Kesim durumundaki geleneksel transistörün enerji band diyagramı 19
3.2	İletim durumundaki geleneksel transistörün enerji band diyagramı 20
3.3	Tünellemeyi gösteren enerji band diyagramı 20
3.4	İleri-aktif moddaki npn-tipi BJT için akım yoğunlukları 21
3.5	İleri-aktif moddaki n-p-n tipi BJT için akım yoğunluğu bileşenleri 22
3.6	AlGaAs/GaAs HBT ye ait kesit görünüşü 29
3.7	AlGaAs/GaAs HBT için; (a) abrupt E-B eklemi. (b) derecelendirilmiş E-B eklemi 29
3.8	Sabit emetör-kollektör geriliminde farklı baz akımları için RTBT enerji band diyagramları..... 31

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.9	RTBT lerin teknoloji alanında diğer cihazlara göre bulunduğu yer..... 33
3.10	RTBT için kullanılan Ebers-Moll modeli temelli modellemenin ayrıntılı ve basit gösterimi 35
3.11	RTBT yapısının akım-gerilim karakteristiğinin bulunmasında uygulanacak akış diyagramı 36
3.12	Resonant tünelleme bipolar transistörünün kesitten görünüşü..... 39
3.13	RTBT için $V_{ce}=1.5$ V iken I_c - V_{be} karakteristiği 40
3.14	RTBT için $V_{ce}=1.5$ V iken I_c - I_b - V_{be} karakteristiği 41
3.15	RTBT için $V_{ce}=1.5$ V iken değişik V_{be} gerilimleri için I_c - V_{ce} karakteristiği . 41
4.1	Anot, katot ve bir gate elektrodundan oluşan üç-üçlü bir SCR nin geometrisi ve devre sembolleri 43
4.2	(a) Dört tabakalı pnpn diyodu. (b) Bir SCR nin katkılama profili (c) Isıl dengede enerji band profili 44
4.3	Bir p-n-p-n diyodun akım-gerilim karakteristiği..... 45
4.4	Bir SCR nin ters besleme durumu 46
4.5	Kırılmadaki kritik elektrik alanın bir taraflı eklem için, katkılama yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak gösterilmesi..... 47
4.6	(a) Üç uçlu tristör için iki transistör yaklaşımının gösterimi 49 (b) Transistör sembolleri kullanılarak gösterimi 49
4.7	İleri kutuplama bölgesi için enerji band diyagramı..... 52
4.8	SCR yapısında J2 eklemine oluşan asıl delik ve elektron akımları..... 54
4.9	Tünelleme olmadığı durumdaki scr kesiti 55
4.10	Farklı kapı akımları için scr yapısının 300 K deki akım-gerilim karakteristikleri..... 56

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.11	Kullanılan scr yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin gerilimle değişimi 57
4.12	Kullanılan scr yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin, farklı n2 bölgesi genişliklerinde, gerilimle değişimi 57
4.13	Kullanılan scr yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin, farklı p1 bölgesi genişliklerinde, gerilimle değişimi 58
4.14	Kullanılan scr yapısının, 300 K ve 1 mA kapı akımı uygulandığı durumdaki farklı p1 bölgesi genişlikleri için akım-gerilim karakteristikleri..... 58
4.15	300 K ve 1 mA kapı akımı ve farklı n2 bölgesi katkı yoğunlukları için, $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin gerilime bağlı değişimi 59
4.16	300 K ve 1 mA kapı akımı ve farklı n2 bölgesi katkı yoğunlukları için, scr nin akım gerilim karakteristikleri 59
4.17	Resonant tünelleme tristörüne ait yapılan modellemede akımların gösterimi ... 61
4.18	Resonant tünelleme tristörüne ait yapılan modellemede gerilimlerin gösterimi 62
4.19	Resonant Tünelleme Tristörünün Kesitten Görünüşü 63
4.20	İki-transistör modeli kullanılarak oluşturulmuş rt-scr nin kesitten görünüşü 64
4.21	$I_g=0$ için rt-scr yapısının 300 K deki akım-gerilim karakteristikleri 65
4.22	Farklı kapı akımları için rt-scr yapısının 300 K deki akım-gerilim karakteristikleri..... 65
4.23	Kullanılan rt-scr yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin gerilimle değişimi 66
4.24	Kullanılan rt-scr yapısındaki akım değerinin, farklı p1 bölgesi genişliklerinde, gerilimle değişimi..... 66
4.25	Kullanılan rt-scr yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin, farklı n2 bölgesi yoğunluklarında, gerilimle değişimi 67
4.26	Kullanılan rt-scr yapısındaki akım değerinin, farklı n2 bölgesi yoğunluklarında, gerilimle değişimi 67
4.27	Normal scr ve rt-scr yapısına ait akım-gerilim karakteristiği 68
4.28	Normal scr ve rt-scr yapısına ait $(\alpha_1 + \alpha_2)$ -gerilim karakteristiği..... 69

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
3.1	AlGaAs/GaAs HBT ve Si BJT transistörlerinin karşılaştırılması.....	28
3.2	GaAs için malzeme parametreleri	37
3.3	$Al_xGa_{1-x}As$ için Malzeme Parametreleri	38

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
m^*	Malzeme içindeki elektronun bulk etkin kütlesi
k_{\parallel}	Ters yöndeki dalga vektörünün büyüklüğü
D_{3d}	Üç-boyutlu durum yoğunluğu,
ψ_k	Elektronun dalga fonksiyonu
$U_0(r)$	İletim bandı kenarıyla ilgili olan cell-periodic fonksiyonu
k_z	Dalga vektörünün z bileşeni
α	Nonparaboliklik katsayısı
k_{li}	Oluşan elektronun longitudinal dalga sayısı
k_{lt}	İletilen elektronun longitudinal dalga sayısı
T_U	Tünelleme katsayısı
k_p	p-inci kısmın dalga vektörü
d_p	p-inci kısmın genişliği
m_p^*	p-inci kısmın band-sınır etkin kütlesi
V_p	p-inci kısmın band-sınır enerjisi
k_t	Dalga vektörünün düzlemsel bileşeni
J_{nE}^-	Emetörden baz bölgesine enjekte edilen elektron akışı
J_{nC}^-	kollektöre ulaşan elektron akışı
J_{pE}^*	Baz bölgesinden emetöre ulaşan deliklerin akışı
J_{pC0}^*	B-C eklemesindeki ideal ters-saturasyon akımı
J_{nE}	$x = 0$ da baz bölgesi içindeki azınlık taşıyıcı elektronların difüzyonu nedeniyle oluşan akım

SİMGELER DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
J_{nC}	$x = x_B$ de baz bölgesi içindeki azınlık taşıyıcı elektronların difüzyonu nedeniyle oluşan akım
J_{RB}	J_{nE} ve J_{nC} arasındaki fark akımı
J_{pE}	$x' = 0$ da emetör bölgesindeki azınlık taşıyıcı deliklerin difüzyonu nedeniyle oluşan akım
J_R	İleri yönde beslenmiş B-E eklemindeki taşıyıcıların birleşmesi nedeniyle oluşan akım
J_{pC0}	$x'' = 0$ da kollektör bölgesindeki azınlık taşıyıcı deliklerin difüzyonu nedeniyle oluşan akım
J_G	Ters beslenmiş B-C eklemdeki taşıyıcıların üretimi ile oluşan akım
β	Transistörün ortak emetör akım kazancı
γ	emetör verimliliği
α_T	baz içinde taşınma faktörü
D_B	baz bölgesindeki difüzyon sabiti
D_E	emetör bölgesindeki difüzyon sabiti
N_E	emetör içerisindeki saf katkı yoğunluğu
N_B	baz içerisindeki saf katkı yoğunluğu
m_{nB}^*	Baz bölgesindeki intrinsic azınlık elektronların etkin kütlesi
m_{pB}^*	Baz bölgesindeki intrinsic azınlık deliklerin etkin kütlesi
m_{nE}^*	Emetör bölgesindeki intrinsic azınlık elektronların etkin kütlesi
m_{pE}^*	Emetör bölgesindeki intrinsic azınlık deliklerin etkin kütlesi
W	Fakirleşme bölgesi genişliği
N_a	p-tipi bölgenin katkı yoğunluğu

SİMGELER DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
N_d	n-tipi bölgenin katkı yoğunluğu
τ_F	İleri transit zamanı
V_a	Early gerilim
C_{cs}	Kollektör-substrate kapasitesi
R_b	Baz direnci
ΔE_g	Enerji band aralığı
I_n	Emetörden baz bölgesine olan elektron enjeksiyon akımı
I_p	Bazdan emetöre olan ve istenmeyen delik enjeksiyon akımı
q	Elektronik yük
k	Boltzmann sabiti
D_n	Baz bölgesindeki elektron difüzyon sabiti
D_p	Emetördeki delik difüzyon sabiti
ϵ_s	Ortamın geçirgenlik katsayısı
ΔE_C	İletim bandı süreksizliği
ΔV_p	Delik enjeksiyonu
ΔV_n	Elektron enjeksiyonu
V_{REV}	Ters besleme gerilimi
p_{iv}	Ters tepe gerilimi
V_{BF}	İleri kırılma gerilimi
L_p	Emetördeki delik difüzyon uzunluğu
V_{CE}	Kollektör-emetör gerilimi
I_B	Baz akımı

SİMGELER DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
I_C	Kollektör akımı
$V_{BE_{RTT}}$	RTBT yapısına ait baz-emetör gerilim
V_{RTD}	RTD yapısındaki gerilim düşümü
$V_{BE_{HBT}}$	HBT yapısındaki baz-emetör gerilimi
χ	Elektron affinity
E_g	Enerji band aralığı
μ_p, μ_n	Delik ve elektronun mobilitesi
τ_p, τ_n	Delik ve elektronun ömrü
N_C	İletim bandı etkin yoğunluğu
N_V	Valans bandı etkin yoğunluğu
I_S	Anahtarlama akımı
I_h	Tutma akımı
V_h	Tutma gerilimi
E_{crit}	Kritik elektrik alan
V_{PT}	Punch-through gerilimi
α_1	Ortak baz akım kazancı
L_{n1}	n1 bölgesindeki delik difüzyon uzunluğu
I_{CO}	Akımı kollektör-baz ters kesim akımı
I_g	Kapı akımı
V_{BF}	İleri yönde kırılma gerilimini
M_n	Elektronlar için çığ çoğalması faktörü
M_p	Delikler için çığ çoğalması faktörü

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
BJT	Bipolar Eklem Transistörleri (B ipolar J unction T ransistors)
DB	İki katlı Bariyer (D ouble B arrier)
GTO	Gate Turn-off Tristörleri (G ate T urn- O ff T hristors)
HBT	Heterojunction Bipolar Transistör (H eterojunction B ipolar T ransistors)
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
QW	Kuantum Kuyusu (Q uantum W ell)
RTT	Resonat Tünelleme Transistörü (R esonant T unneling T ransistors)
SCR	Yarıiletken Kontrollü Doğrultucu (S emiconductor C ontrolled R ectifier)

1. GİRİŞ

Yarıiletken teknolojisinde moleküler demet epitaksi kristal büyütme yöntemindeki gelişmeler keskin arayüzeyle farklı malzemelerin çok ince tabakalar halinde üretilmesine olanak sağlamıştır. Elektron demet litografisi ve X-ray litografisi gibi yeni litografi teknolojisindeki gelişme, cihazların boyutunu 200 angström mertebelerine çekmiştir. Bu ölçeklerde, bir elektronun etkin dalga uzunluğu cihazın büyüklüğünden daha uzundur ki, kuantum girişim olayı sadece gözlenebilir olmakla kalmaz aynı zamanda bu cihazların karakteristikleri üzerinde baskın rol oynar. Resonant tünelleme cihazları benzeri kuantum interference cihazları, fonksiyonellikleri ve çoklu durum (*multi-state nature*) özellikleri sayesinde yeni bilgisayar mimarisi olmak üzere bir çok alanda yeni yollar açacaktır.

Kuantum cihazlarına ait en eski örnek 1950 yıllarında Esaki tarafından çalışılan Esaki (tünel) diyotudur. Cihazın temeli, bir p-n eklemelinin band aralığı boyunca elektronun tünellemesidir. Fakat Esaki diyodu sadece iki uçlu bir cihaz olması ve güvenilirlik problemleri olması nedeniyle çok geniş bir alanda kullanılamamıştır. Daha sonra, 1973 yılında Chang, Tsu ve Esaki AlGaAs/GaAs malzemelerini kullanarak ilk çift bariyer resonant tünelleme diyodunu rapor etmişlerdir. Bundan sonra özellikle resonant tünelleme diyotları üzerinde bir çok çalışmalar yapılmıştır.

Resonant tünelleme diyotları üzerinde yapılan ayrıntılı çalışmalar resonant tünelleme transistörleri fikrini doğurmuş ve özellikle son on yılda bu konuda teorik ve deneysel bir çok çalışmalar yapılmıştır. (Pan et al, 2001; Cheng et al, 1999; Tsai, 2001; Lacombe and Jain, 1996; Bigelow and Leburton, 1994; Taniyama et al, 1994). Bu çalışmalarda, malzeme olarak genellikle AlGaAs, GaAs ve InGaAs malzemeleri kullanılmış ve 140 mertebelerinde akım kazançları elde edilmiştir. Yüksek performanslı cihazların dizaynında kullanılabilecekleri vurgulanmıştır.

Resonant tünelleme tristörleri (RT-SCR), yarıiletken teknolojisinde yeni bir kavram olarak düşünülebilir. Üzerinde şu ana kadar çok fazla ayrıntılı çalışma yapılmamıştır.

Çalışmamızın ikinci bölümünde, rezonant tünelleme hakkında genel bilgi verilmiş ve rezonant tünelleme diyodunun karakteristiği incelenmiştir. Tünelleme katsayısının hesaplanmasında kullanılan transfer matris metodu sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, rezonant tünelleme transistörleri incelenmiştir. Cihazın fiziksel yapısı ve kullanılan malzemeler Wu ve arkadaşları tarafından deneysel olarak incelenmiş bir yapıdır. Bu yapı için Ebers-Moll Modeli temelli bir model oluşturulmuş ve Matlab paket programı kullanılarak modelin sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümde ise çalışmanın temel amacı olan rezonant tünelleme olayının tristörler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Öncelikle tünelleme olmadığı durumdaki tristörün akım-gerilim karakteristiği hesaplanmıştır. Üçüncü bölümde sunulan rezonant tünelleme transistöründe kullanılan model yardımıyla RT-SCR yapısı modellenmiş ve akım gerilim karakteristiği incelenmiştir.

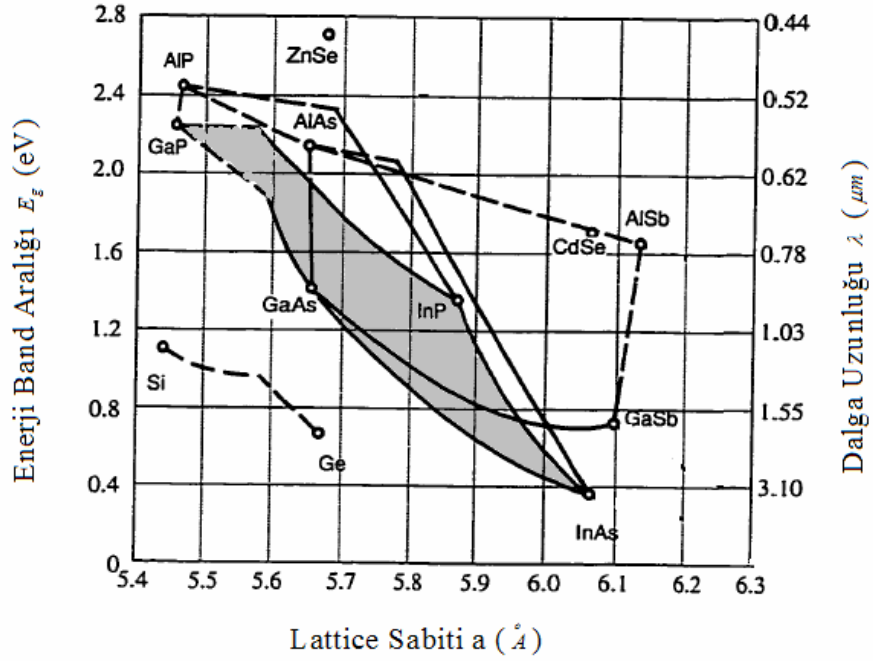
Beşinci bölümde, tüm elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve ileriki çalışmalar için neler yapılabileceği konusunda fikir önerilmiştir.

2. RESONANT TÜNELLEME YAPISI VE RESONANT TÜNELLEME DİYOTLARI

2.1. Resonant Tünellemeye Genel Bakış

III-V yarıiletkenleri bir elemanı periyodik tablonun III. grubundan diğeri V. grubundan olan bileşik yarıiletkenlerdir. Bu grup yarıiletkenler üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır. GaAs, bir çok avantajı nedeniyle, bu grup içinde en popüler olan bileşik yarıiletkenidir. GaAs direkt band aralığına sahiptir. Bu nedenle, LED ve lazerler gibi optoelektronik alanında tercih edilen bir malzemedir (Chen et al, 1993; Prakash et al, 1994). Birleşik yarıiletkenler, üçlü veya dörtlü alaşımların oluşturulmasını da mümkün kılar. Enerji band aralığı gibi yarıiletken özellikleri de ayarlanabilir. $Al_xGa_{1-x}As$ üçlü yarıiletken alaşımlarına bir örnektir. Alüminyum ve Galyum periyodik tablonun III grubunda bulunan malzemelerdir. Ayrıca, GaAs, iletim bandı elektronları daha düşük bir etkin kütleyle sahip olduğu için, hızlı cihazlarda tercih edilmektedir.

Aynı zamanda, birleşik yarıiletkenler, epitaksiyel kristal büyütme teknikleri için birçok avantajlar sağlamaktadır. Fakat, iyi kalitede epitaksiyel heteroyapıları üretmek için farklı tabakaların kafes sabiti önemli bir kriterdir. Eğer kafes sabiti aynı değil ise, sistemin arayüzey kalitesi ve epitaksiyel tabakanın kalınlığında sınırlamalar, katmanlarda gerilmeler ve yanlış yerleşmeler oluşur. Şekil 2.1 değişik yarıiletkenlerin enerji band aralığını kafes sabitine bağlı olarak göstermektedir. Düz çizgilerle bağlanan değişik bileşikler direkt band aralıklı, kesikli çizgilerle gösterilenler ise dolaylı band aralıklıdır. Dikey eksen üzerinde aynı noktada veya yakın noktalarda bulunan malzemeler hetero yapıların oluşturulması için en uygun olanlardır. AlAs ve GaAs birleşik yarıiletkenlerinin kafes sabitleri birbirine çok yakındır. İki belirgin alaşım arasındaki arayüzeyde, enerji band aralığı arasındaki fark iletim ve valans band enerjilerinde ciddi değişimlere neden olur.



Şekil 2.1 Değişik yarıiletkenler için band aralığının kafes sabitine bağlı grafiği (Sze, 1981).

Farklı malzemelerden ince tabakaları birleştirerek istenilen elektronik potansiyel profilleri oluşturulabilir. Eğer tabakalar ince ise, kuantum büyüklük etkileri önemli olacaktır. $Al_xGa_{1-x}As$ sistemlerinde kalınlık 200 Å dan küçük olarak alınmaktadır (Deshpande, 1997).

2.2. Kuantum Boyut Etkileri

İlk olarak, özellikle potansiyel kuyu içerisindeki enerji kuantalama olmak üzere kuantum boyut etkilerinin temel özellikleri üzerinde durulacaktır. Kuantalanmış durumların bir tanesi boyunca elektronun tünellemesi resonant tünelleme olarak bilinir. Klasik fizikte karşılığı olmayan tünelleme olayı kuantum mekaniğinde önemli bir yer tutar. Resonant tünelleme davranışı üzerindeki çoğu çalışmalar iki-katlı bariyer yapıları üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunun nedeni, daha büyük bir negatif direnç üretme yeteneğine sahip olmalarıdır. İki-katlı bariyer tünelleme yapısı kullanılarak negatif direnç cihazı gerçekleştirme ihtimali ilk kez 1974 yılında Chang tarafından gösterilmiştir (Chang and Esaki, 1974).

2.3. Kuantum Kuyuları

Kuantum boyut etkilerini açıklamak için en basit yapı kuantum kuyusudur. Bir kuantum kuyusu, bir malzeme içine gömülmüş ikinci bir malzemenin ince bir tabakasından oluşur. İnce tabakalı malzemenin iletim bandı kenarı, kendisini çevreleyen malzemenin iletim bandı kenarının altında yerleşir. Tabakanın kalınlığı 200\AA dan küçük olursa, kuyu içindeki izin verilen enerji ayrımı yeterince büyük olur. İnce tabakanın elektronik yapısı artık sürekli değildir ve tabaka sözde-iki boyutlu (quasi-two dimensional) olur (Weusbuch and Vinter, 1991). GaAs/AlGaAs gibi malzemeler için, bariyer yüksekliği yeterince yüksektir. Şekil 2.2 (a) da gösterilen, kesikli enerji seviyeleri şu şekilde verilir,

$$E_n = \frac{(\pi\hbar)^2}{2m^*L^2}n^2 \quad (2.1)$$

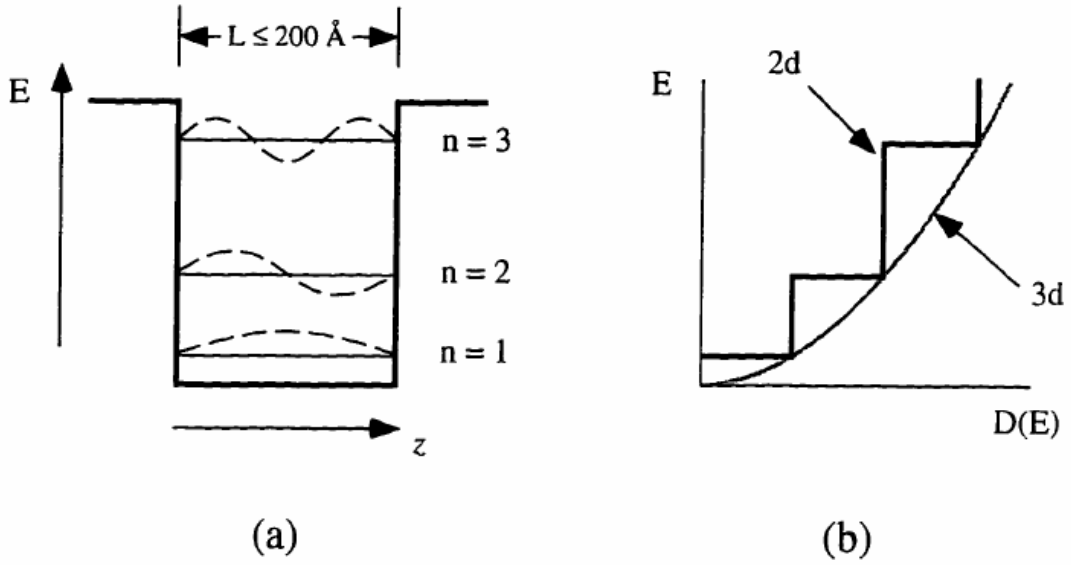
m^* malzeme içindeki elektronun etkin kütesidir ve n doğal bir sayıdır. Hapsedilme yönündeki izin verilen enerjiler kesiklidir ve tersi yönde böyle bir değişiklik yoktur. Böylece, kuantum kuyusu için toplam dağılım ilişkisi şu şekilde verilir,

$$E_n(k) = E_n + \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m^*} \quad (2.2)$$

k_{\parallel} , ters yöndeki dalga vektörünün büyüklüğüdür ve şu şekilde verilir,

$$k_{\parallel}^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (2.3)$$

Şekil 2.2 (a)'da iletim bandı hapsedilme yönünde sadece kesikli izin verilen enerjiye sahiptir. Aynı zamanda ters yönde sürekli durum yoğunluğuna sahiptir. Şekil 2.2 (b)'de durum yoğunluğu hapsedilme yönünde, her bir kesikli enerji seviyesiyle ilgili olarak kesikli adımlarla artar.



Şekil 2.2 Sözde-iki boyutlu bölge içersindeki kuantum büyüklük etkilerinin gösterimi.

Hapsedilmiş enerji seviyelerinin oluştuğu enerjilerde, iki-boyutlu durum yoğunluğunun değeri ilgili üç-boyutlu durum yoğunluğunun değerine eşittir. Bir gövde malzeme için üç-boyutlu durum yoğunluğu,

$$D_{3d} = \frac{2^{1/2} m^{*3/2}}{\pi^2 \hbar^3} E^{1/2} \quad (2.4)$$

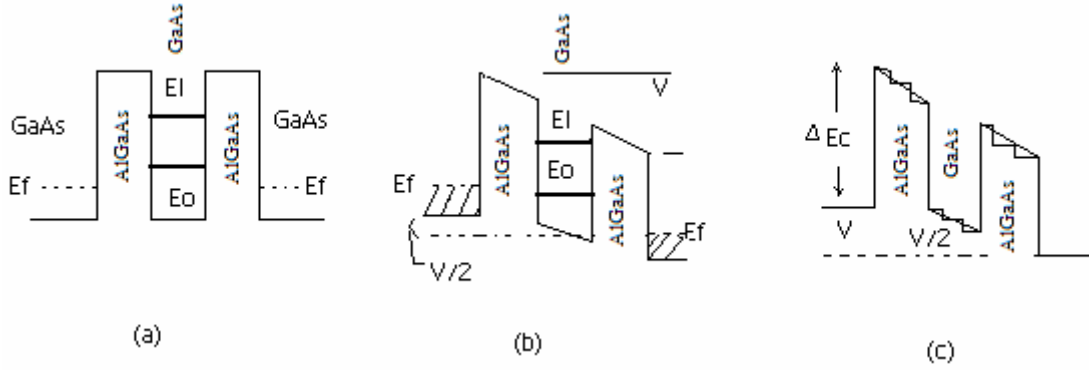
şeklinde verilir. Her bir n değeri için, bir sürekli durum yoğunluğu vardır.

$$D_{2d} = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} \quad (2.5)$$

Her bir kesikli enerji seviyesi, Şekil 2.2(b) de gösterildiği gibi toplam durum yoğunluğuna sabit bir durum yoğunluğu ekler. Durum yoğunluğunun enerji aralığındaki tek değişiklik, en düşük enerji gövde iletim bandı kenarı yerine, n=1 de hapsedilmiş seviye ile bağlantılıdır. Kuyunun genişliği arttırılırsa, hapsedilmiş durumların enerji aralığı azalır ve iki-boyutlu durum yoğunluğu üç-boyutlu durum yoğunluğuna yaklaşır.

2.4. Tünelleme Karakteristiği ve Transfer Matris Metodu

Resonant tünelleme karakteristiği çıkartılırken, ΔE_C ; iletim bandı offset'i (kayma) olduğu uç tabakaların dejenere olduğu ve bariyer tabakaları ile sandöviçlenmiş kuyu tabakasının katkılanmamış olduğu varsayılmıştır (Nag, 2002).



Şekil 2.3 Resonant tünelleme diyodundaki potansiyel dağılımı. (a) Dış bir gerilim olmadığında potansiyel dağılımı. E_C : İletim band kıyı enerjisi, E_F : Fermi enerjisi, E_0 , E_1 : kuyu içindeki kuantalanmış en düşük ve bir sonraki enerjiler. (b) Kontakt uçları arasına V gerilimi uygulandığı zamanki potansiyel dağılımı. (c) Adımlarla benzetilen (simulated) potansiyel değişimi.

Yapının iletim olasılığı zarf fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Elektronun dalga fonksiyonu ψ_k dir.

$$\psi_k = U_0(r) \exp[i(k_z z + k_t \rho)] \quad (2.6)$$

$U_0(r)$ iletim bandı kenarıyla ilgili olan hücre-periyodik fonksiyonudur. k_z ve k_t sırasıyla dalga vektörünün z ve düzlemsel bileşenidir. Dalga vektörü ile ilgili enerji;

$$E = E_{ci} + (\hbar k)^2 / 2m^* \quad (2.7)$$

m^* band-kenar (band-edge) kütlelidir.

$$k^2 = k_z^2 + k_t^2 \quad (2.8)$$

Bandın nonparabolikliği Kane nonparabolik dispersiyon ilişkisi kullanılarak hesaplanabilir.

$$(\hbar k)^2 / 2m^* = (E - E_{ci})[1 + \alpha(E - E_{ci})] \quad (2.9)$$

α nonparaboliklik katsayısıdır. Bu ilişki yasak bandda (forbidden band) olduğu gibi iletim bandında da geçerli sayılır. Nonparaboliklik katsayısı yaklaşık olarak aşağıdaki denklem kullanılarak bulunabilir.

$$\alpha \approx \frac{1}{E_g} \left(1 - \frac{m_n}{m_e} \right)^2 \quad (2.10)$$

İletim katsayısı birim genlikli bir elektron dalgasının yapı üzerinde oluştuğu varsayılarak hesaplanır.

Elektron dalgasının R genlikli bir kısmı yansıtılır ve T_U genlikli bir kısmı iletilir. İletim katsayısı;

$$T_U^* T_U \left[\left(\frac{\partial E}{\partial k_{it}} \right) \left(\frac{\partial E}{\partial k_{it}} \right)^{-1} \right] \quad (2.11)$$

olarak verilir (Nag, 2000). Parantez içindeki terim çıkan ve gelen grup hızlarının oranını verir. k_{it} ve k_{it} sırasıyla oluşan ve iletilen elektronun boyuna dalga sayısını verir. $T_U^* T_U$ çıkan elektronun olasılık yoğunluğudur. Tünelleme katsayısı T_U , cihaz içerisindeki potansiyel dağılımı için envelop (zarf) fonksiyon denkleminin analitik çözümüyle bulunabilir. Fakat, bazı çözümler karmaşık hesaplamaları içeren Airy fonksiyonlarını içerir. Potansiyelin lineer değil de adım adım değiştiğini varsayan matris metodu T_U hesabında daha uygundur. Zarf fonksiyonları için çözümler dikdörtgensel bariyerler veya kuyular olarak davranan her bir kısım için bulunur. Bu çözümler, olasılık yoğunluğunun süreklilik ifadesi uygulanarak, kısımlar arasındaki arayüzeylerde eşleştirilir. Bu işlem, aşağıda sunulan R , T_U ve engele gelen dalga ile ilişkili matris denklemlerini meydana çıkartır.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} = M_0 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_n \cdot \begin{bmatrix} T_U \\ 0 \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} T_U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

p inci kısımdaki matris,

$$M_p = \left(\frac{1}{2} \right) \begin{bmatrix} \exp(ik_p d_p) & 0 \\ 0 & \exp(ik_p d_p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 + r_p k_{p+1} / k_p & 1 - r_p k_{p+1} / k_p \\ 1 - r_p k_{p+1} / k_p & 1 + r_p k_{p+1} / k_p \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

k_p ve d_p sırasıyla p inci kısmın dalga vektörü ve genişliğidir. Sıfıncı kısmın genişliği sıfır alınır. Dalga vektörünün tanımı aşağıdaki gibi verilir.

$$k_p^2 = \left(\frac{2m_p^*}{\hbar^2} \right) (E - V_p) [1 + \alpha_p (E - V_p)] - k_t^2 \quad (2.14)$$

k_p : bariyer tabakalarında imajiner, kuyu tabakalarında gerçek sayıdır.

m_p^* : p inci kısmın band-sınır etkin kütlesi

V_p : p inci kısmın band-sınır enerjisi (uygulanan voltajı içerir)

α_p : nonparaboliklik katsayısı

k_t : dalga vektörünün düzlemsel bileşeni (olasılık yoğunluğunun sürekliliği nedeniyle tüm kısımlarda aynıdır)

r_p : p inci ve (p+1) inci kısmın hız etkin kütlelerinin oranıdır.

$$r_p^2 = \left(\frac{m_p^*}{m_{p+1}^*} \right) [1 + 2\alpha_p (E - V_p)] [1 + 2\alpha_{p+1} (E - V_{p+1})]^{-1} \quad (2.15)$$

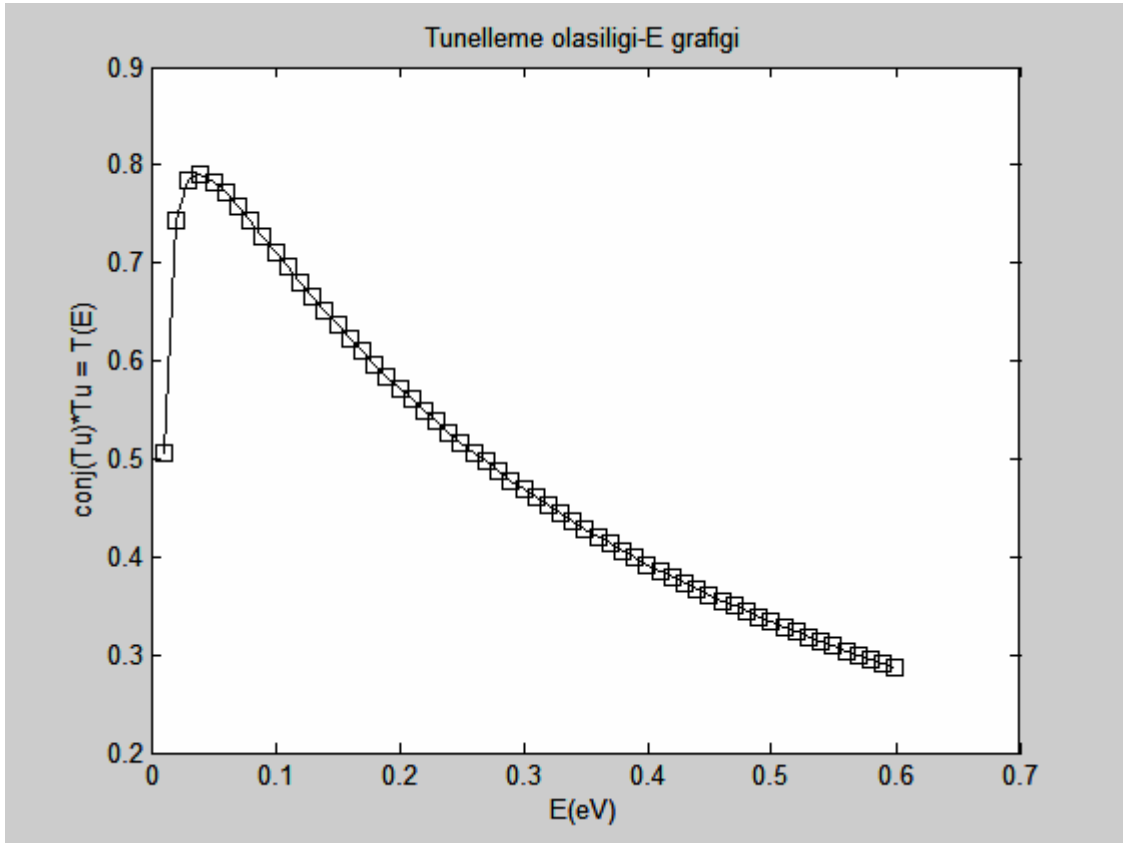
$$T_U = \frac{1}{m_{11}} \quad (2.16)$$

m_{11} , M matrisinin ilk elemanıdır. Bu metod sadece n adet bölge için V_p değerinin hesaplanmasını, r_p ve k_p değerlerinin hesaplanmasını içerir (Nag, 2000).

Katkılanmamış AlGaAs
Katkılanmamış GaAs
Katkılanmamış AlGaAs

Şekil 2.4 AlGaAs-GaAs ten oluşan bir tünelleme yapısı.

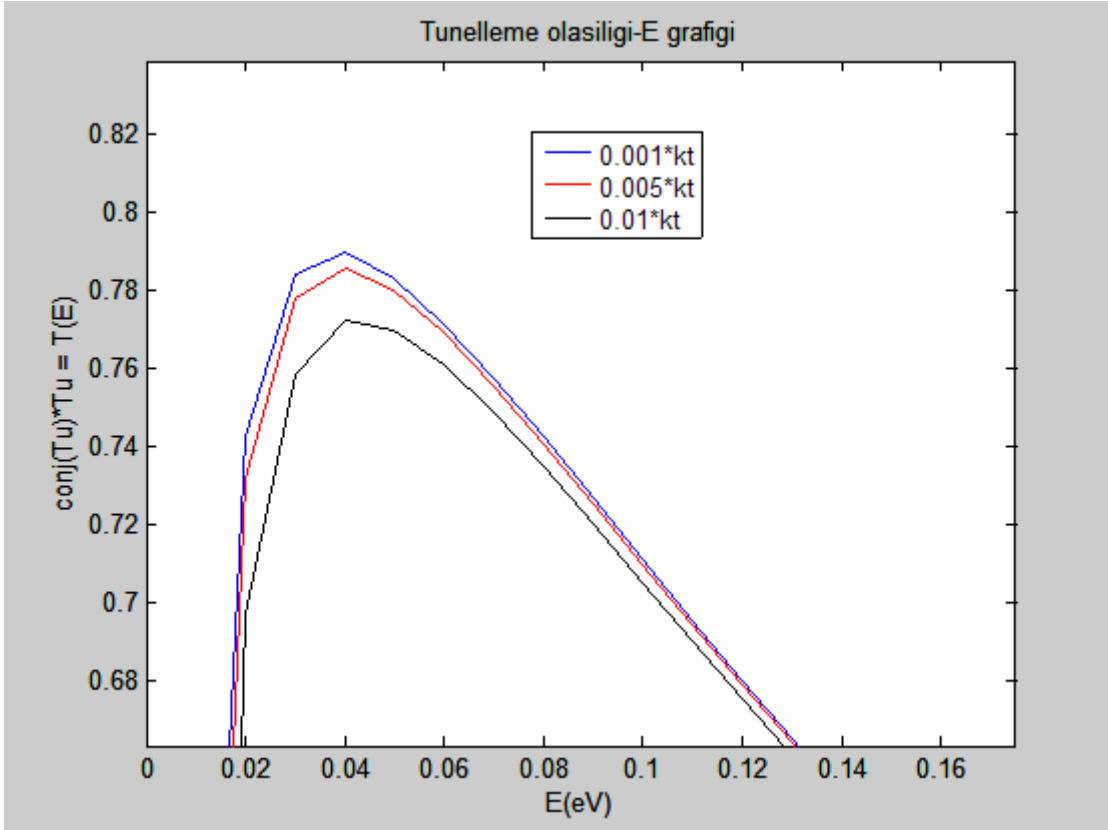
Yukarıda verilen tünelleme yapısı için transfer-matris metodu kullanılarak elde edilen tünelleme olasılığının enerjiye bağlı değişimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Burada simetrik AlGaAs/GaAs yapısı bulunmaktadır. Hesaplamalar $d_1 = d_2 = d_3 = 10(nm)$, 300K için yapılmıştır. Düzlemsel bileşen sıfır alınmıştır. Hesaplamalarda Matlab 6.5 paket programı kullanılmıştır.



Şekil 2.5 Matris metodu ile hesaplanan iki-katlı bir bariyer heteroyapısındaki tünelleme olasılığının enerji bağımlılığı.

Dalga vektörünün k_x düzlemsel bileşeninin tünelleme olasılığı üzerindeki etkisi

Şekil 2.6'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 2.6 k_i düzlemsel bileşen değişiminin tünelleme olasılığı üzerindeki etkisi.

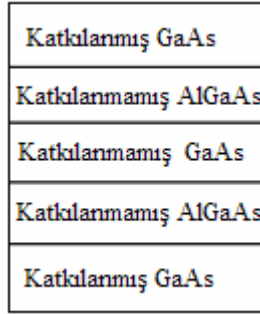
Düzlemsel bileşenin arttırılması bariyer yüksekliğini azaltıp band genişliğinin artmasını sağlar.

2.5. Resonant Tünelleme Diyodu

1923 yılında, DeBroglie tarafından, parçacık-dalga duality teorisi olarak bilinen, dalga karakteristiklerinin olabileceği sunuldu. 1926 yılında da Schrödinger bu tekniği Schrödinger dalga denklemi ile kesin bir formda ortaya koydu. Elektron veya parçacığı temsil eden bu dalga fonksiyonu klasik bariyer bölgelerini delip geçme yeteneği ve klasik olarak bir bölgeden diğerine tünelleme olasılığı hakkında bilgi vermektedir. Son zamanlarda hız kazanan resonant tünelleme cihazlarına ait çalışmalar bu ilk iki çalışmanın sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Resonant Tünelleme Diyotları (RTD) ve Resonant Tünelleme Transistörleri (RTT) üzerinde en çok çalışılan yapılarıdır. Transistor boyutlarının sürekli küçülmesi özellikle bilgisayar üreticileri tarafından arzu

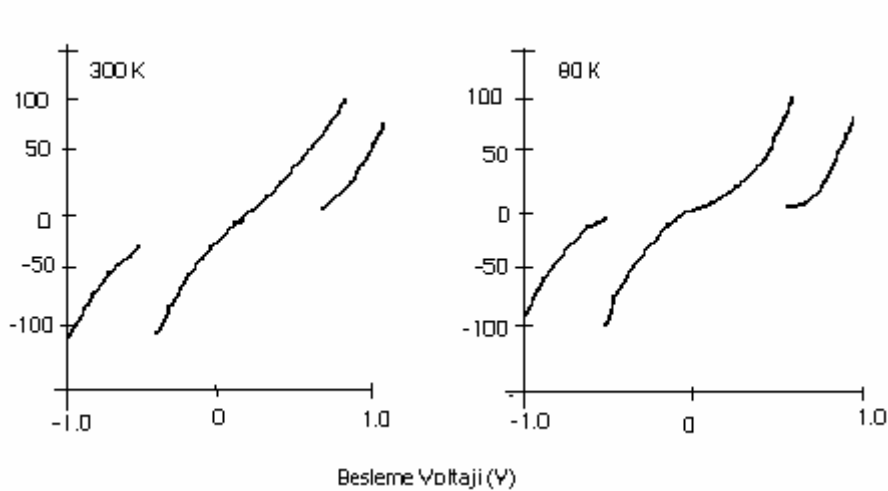
edilen bir durumdur. Resonant tünelleme transistörleri de bu alanda yeni ufuklar açmıştır.

Resonant tünelleme diyodunun (RTD) yapısı, katkılanmamış iki-barrier tabakasının arasına sıkıştırılmış katkılanmamış bir kuyu tabakasından oluşur. Şekil 2.6'da bir resonant tünelleme diyot yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Çalışmada kullanılan resonant tünelleme diyodunun yapısı.

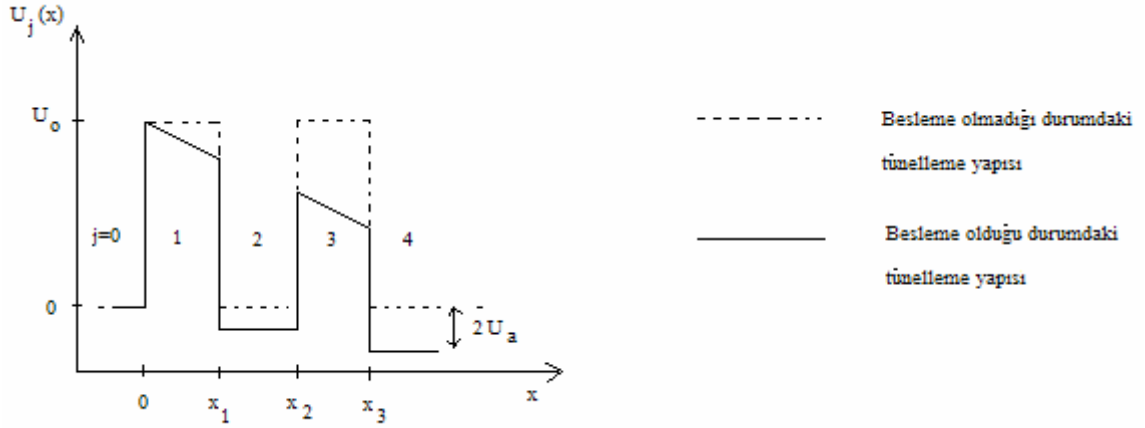
İki dış yüzey üzerinde katkılanmış kontak tabakaları bulunur. Yapı boyunca akım iki üç tabaka boyunca gerilimle artarak tepe değerine ulaşır ve sonra gerilim artmaya devam ederken akım azalmaya başlar. Daha yüksek voltajlarda akım ikinci tepe değerine ulaşır. Bu durum da Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Resonant tünel diyodunun tipik akım-gerilim karakteristikleri.

Bir resonant tepe gösterilmiştir. Simetrik olan karakteristikler gerilimin her iki polaritesinde benzerdir. Resonant tünelleme davranışı üzerindeki çalışmaların çoğu iki-

katlı bariyer yapıları (DBS) üzerinde yoğunlaşmıştır. İki katlı bariyer yapısının şematik gösterimi Şekil 2.8’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.9 Beslemenin olduğu ve olmadığı durumda, bariyer yapısının şematik gösterimi.

Elektronlar hetero-arayüzeyinde normal eksen boyunca hareket ederler. j inci bölgedeki potansiyel enerji yüksekliği $U_j(x)$ olarak gösterilir. Tünelleme yapısına bir besleme uygulandığı zaman, uygulanan tüm V_a besleme geriliminin ilk ve son bariyerler üzerine doğrusal olarak düştüğü varsayılır (Pan *et al*, 2001). Her bir bariyer üzerindeki band bükülmesi şu şekilde verilir.

$$U_a = qL_B E_a = \frac{qV_a}{2} \quad (2.17)$$

L_B ; bariyer genişliği ve E_a ; beslenmiş bariyer üzerindeki elektrik alanıdır. Beslenmemiş bölgelerdeki potansiyel yüksekliği şöyle tanımlanabilir.

$$U_j(x) = \begin{cases} 0 & j = 0 \\ -2U_a & j = 4 \end{cases} \quad (2.18)$$

Besleme altındaki bariyerler için potansiyel enerji $U_j(x)$ ise

$$U_j(x) = \begin{cases} U_o - \frac{x_1}{L_B} U_a & j = 1 \\ U_o - \left(1 + \frac{x - x_2}{L_B}\right) U_a & j = 3 \end{cases} \quad (2.19)$$

olarak tanımlanır. Yapı içerisindeki potansiyel dağılım Şekil 2.3'te verildiği gibidir. İki-katlı bariyer kuantum kuyu yapısı bir Fabry-Perot rezonatör olarak davranır, İletim katsayısı rezonant frekanslarda maksimumdur. Eğer bir elektronun enerjisi kuantalanmış seviyeye yakınsa bir kontakten diğer kontağa yapı boyunca tünelleyebilir. En düşük kuantalama seviyesi olan E_0 , kontak tabakasındaki E_F Fermi seviyesinin üzerindedir. Ancak, kontak uçları arasına V gerilimi uygulandığı zaman, enerji seviyeleri bir uçta yukarıya doğru, diğer uçta aşağıya doğru $\frac{|e|V}{2}$ kadar itilir. Bariyerlerin benzer (özdeş) ve gerilimin cihaz boyunca düzgün dağıldığı varsayılarak kuyu içerisindeki enerji seviyeleri referans alınır.

$E_F + \frac{|e|V}{2}$ değeri E_0 a eşit olduğunda akım akmaya başlar ve E_0 enerjisi $E_c + \frac{|e|V}{2}$ den küçük olana kadar akmaya devam eder. Daha büyük gerilim değerlerinde E_0 , E_c nin altına düştüğü için akım sıfıra düşer. Buradan akımın bir tepe değerinin $V = \frac{2(E_0 - E_c)}{|e|}$ civarında olacağı beklenir. Cihaz içerisindeki elektronların tünellemesiyle oluşturulan akım, frekans, cihazın hız limiti ve etkin cihaz kapasitansı tarafından kontrol edilir. Bu yapı içerisindeki bu iki parametre çok büyük oldukları için cihazın işletim frekansı ve anahtarlama hızları diğer cihazlarından çok daha yüksek beklenir. Cihaz boyunca akım yoğunluğu aşağıdaki gibi verilir (Nag, 2000).

$$J = \left(\frac{2e}{8\pi^3 \hbar} \right) \int (\nabla_{k_i} E) T_u^* T_u [f(E) - f(E + |e|V)] d^3 k \quad (2.20)$$

k_i ; eklem arayüzeylerine dik yöndeki elektron dalga vektörünün bileşenidir. E ; alttan iletim bandına kadar ölçülen elektron enerjisidir. V ; uygulanan gerilim ve $d^3 k$ ise

dalga vektör uzayındaki hacim elemanıdır. Elektron dağılım fonksiyonu olan $f(E)$ Fermi-fonksiyonu,

$$f(E) = \{\exp[(E - E_F)/k_B T] + 1\}^{-1} \quad (2.21)$$

E_F fermi enerjisi, k_B Boltzmann sabiti, T ise kafes sıcaklığıdır. k_l ve k_t dalga vektörü bileşenleriyle ilgili olan E enerjisi, E_l ve E_t olarak iki bileşene ayrılabilir.

$$E = E_l + E_t \quad (2.22)$$

Son olarak akım yoğunluğu yukarıda verilen bilgiler ışığında, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$J = \frac{em^* k_B T}{2\pi^2 \hbar^3} \int_{T_u^* T_u} \ln \left\{ \frac{1 + \exp[(E_F - E_l)/k_B T]}{1 + \exp[(E_F - |e|V - E_l)/k_B T]} \right\} dE_l \quad (2.23)$$

RTD'lerin akım-gerilim karakteristikleri çıkartılırken, elektronun hiç empedansı olmayan bir yapı içinde hareket ettiği varsayılmıştır. Gerçek diyotta ise durum böyle değildir. Karakteristiklerin hesaplanmasında birçok önemli mekanizma rol oynar.

$eV \geq E_F$ için,

$$J = \frac{em^* k_B T}{2\pi^2 \hbar^3} \int_0^{E_F} (E_F - E) T(E) dE \quad (2.24)$$

ve $eV < E_F$ için,

$$J = \frac{em^* k_B T}{2\pi^2 \hbar^3} \left[eV \int_0^{E_F - eV} (E_F - E) T(E) dE + \int_{E_F - eV}^{E_F} (E_F - E) T(E) dE \right] \quad (2.25)$$

2.6. Resonant Tünelleme Diyodunun Akım-Gerilim Karakteristikleri

Çalışmada kullanılan resonant tünelleme diyodunun yapısı Şekil 2.10'da verilmiştir.

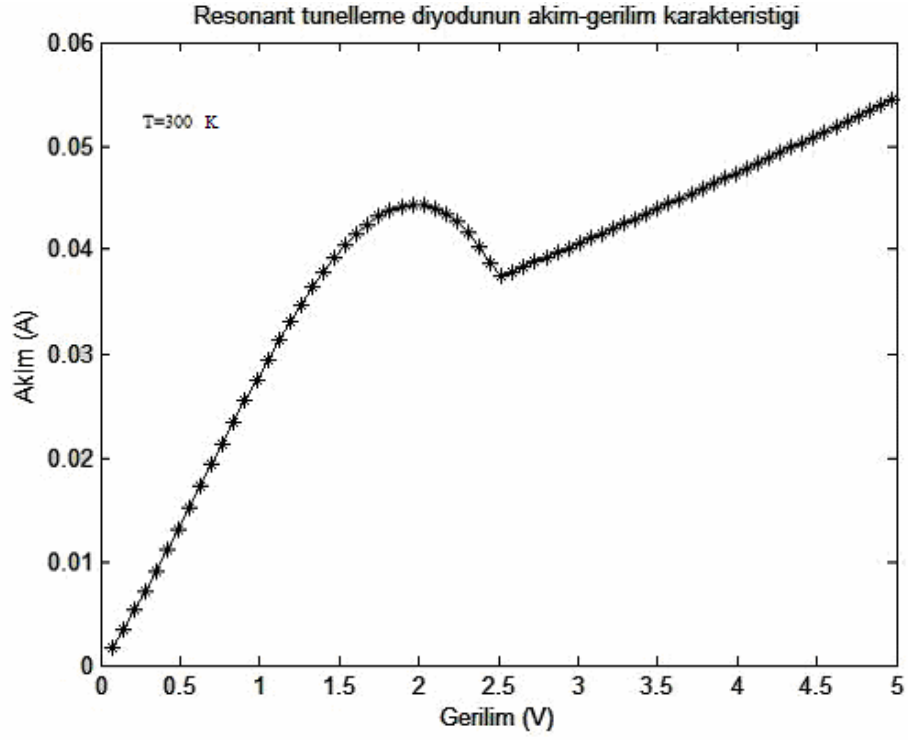
p+ GaAs
Katkılanmamış Al _{0.3} Ga _{0.7} As
Katkılanmamış GaAs
Katkılanmamış Al _{0.3} Ga _{0.7} As
n- GaAs
n+ GaAs

Şekil 2.10. Resonant tünelleme diyodunun yapısı.

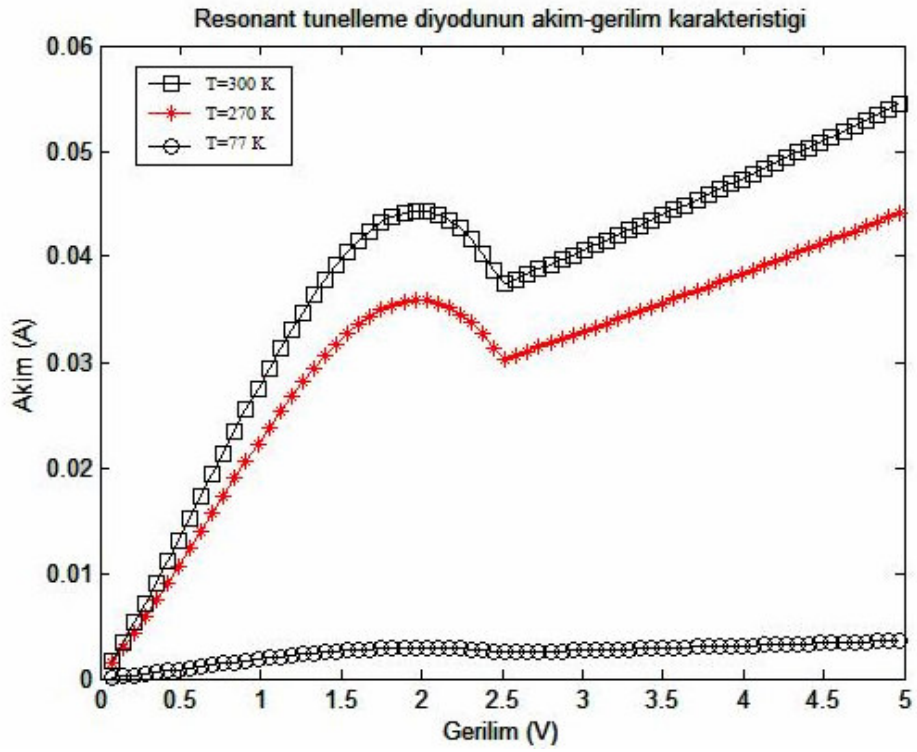
p ve n-tipi bölgelerin katkılama yoğunlukları $10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ olarak seçilmiştir. Katman kalınlıkları bariyer bölgeleri için 5 (nm), kuyu bölgesi için 3 (nm) alınmıştır.

Şekil 2.10'da bahsedilen RTD için akım-gerilim karakteristiği Şekil 2.11'de verilmiştir. Akım-gerilim karakteristiklerinin hesaplanmasında Şekil 2.5'te verilen tünelleme olasılığı eğrisi kullanılmıştır.

Şekil 2.12'de RTD yapısı için farklı sıcaklıklardaki akım-gerilim karakteristiği araştırılmıştır. Geleneksel bir diyotta olduğu gibi sıcaklık arttıkça aynı gerilim değerinde diyottan geçen akım artmıştır.



Şekil 2.11 RTD için akım-gerilim karakteristiği.



Şekil 2.12 RTD için akım-gerilim karakteristiğinin sıcaklığa bağlı değişimi.

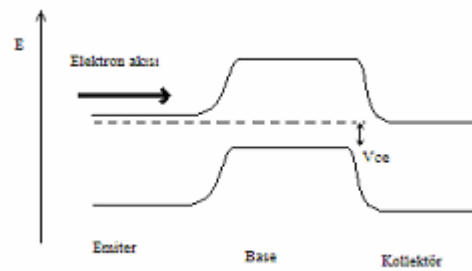
3. RESONANT TÜNELLEME TRANSİSTÖRLERİ

Bu kısımda, resonat tünelleme transistörüne (RTT) ait Ebers-Moll modeli temelli bir modelleme sunulmuştur. Resonant tünelleme transistörlerinin yapısının daha iyi anlaşılması ve cihaz için kullanılan malzemelerin seçilme nedenlerinin açıklanması açısından, öncelikle Geleneksel Bipolar Eklem Transistörleri (BJT), Farklı Eklem Bipolar Transistörlerin (HBT) çalışma prensipleri kısaca verilmiştir.

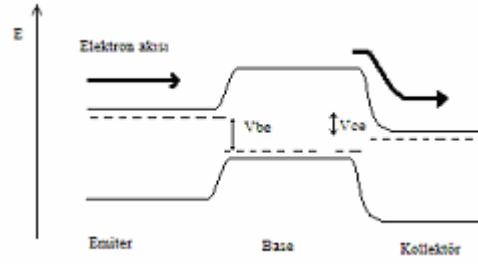
3.1. Geleneksel Bipolar Junction Transistörler

Geleneksel transistörler yük akışını kontrol etmek için potansiyel engelleri kullanırlar. Engellerin en genel iki tipi, bipolar transistör içindeki p-n eklemleri ve elektrostatik fakirleşme bölgeleridir. Aşağıdaki Şekil 3.1’de bipolar transistörün enerji band diyagramı gösterilmiştir. Sol kısım emetör, sağ kısım kollektör, orta kısım ise baz potansiyel bariyer kısmıdır.

Başlangıç olarak, emetör ve kollektör arasına bir gerilim uygulanır. Bazdaki potansiyel engel transistör boyunca akım akmasını önler ve transistör “kesim” durumunda olur (Şekil 3.1). Baz bölgesi boyunca voltaj emetöre göre arttırıldığında emetör tarafındaki bariyerin yüksekliği azalır. Bu azalmadan dolayı çok daha fazla elektron baz bölgesine geçebilir ve kollektör boyunca ilerler. Transistör böylece “iletim” durumuna gelir (Şekil 3.2).

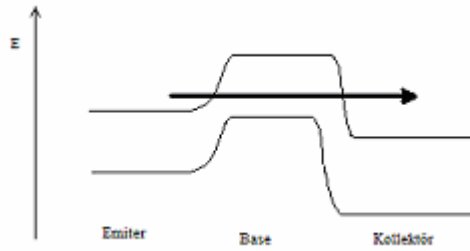


Şekil 3.1 “Kesim” durumundaki geleneksel transistörün enerji band diyagramı.



Şekil 3.2 “İletim”durumundaki geleneksel transistörün enerji band diyagramı.

Elektronların bir uçtan diğer uca akışını kontrol eden bariyerin kullanımı tüm transistörler için temeldir. Bu tasarımın problemi şudur: Bazdaki potansiyel bariyerin genişliği daima bir elektronun dalga uzunluğundan yeterince büyük olmak zorundadır. Eğer büyük değil ise elektronlar tünellemeye başlayacaktır. Şekil 3.3’te tünelleme gösterilmiştir.

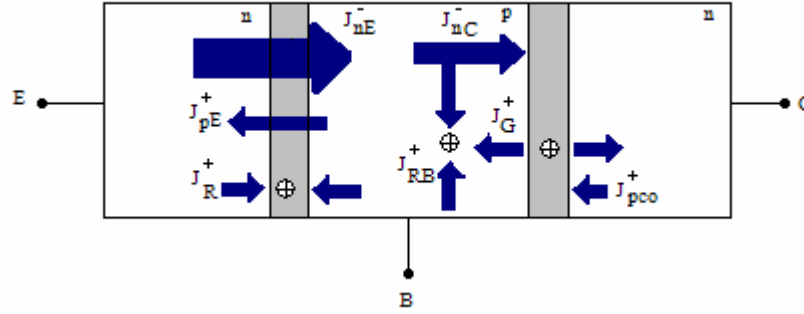


Şekil 3.3 Tünellemeyi gösteren enerji band diyagramı.

Geleneksel bir transistörde tünellemenin başlaması, bu transistörün sızdırmasına neden olur ve eğer bariyerin genişliği azaltılırsa bu sızıntı daha da artacaktır. Transistör sızdırmaya başladıktan sonra bir daha “kesim” durumuna getirilemeyecektir. Sonuç olarak, transistör anahtarlama cihazı olma özelliğini yitirecektir. Ancak, rezonant tünelleme cihazları geleneksel transistörlerdeki bu tünelleme problemini avantaj olarak kullanır.

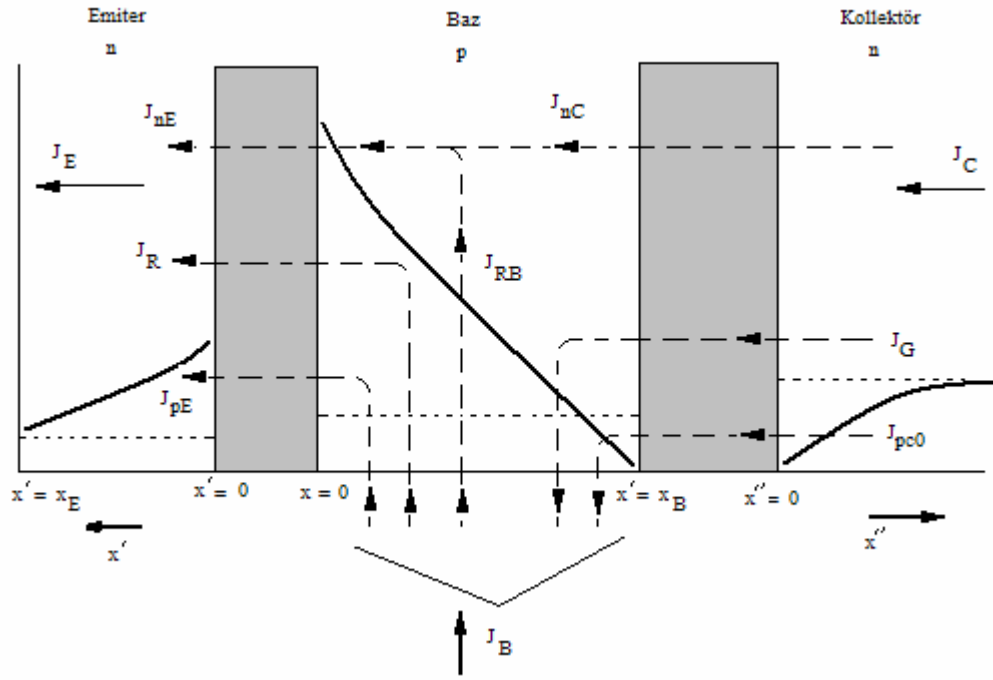
Geleneksel bir npn-tipi BJT içerisinde birçok değişik parçacık akışı oluşmaktadır. Bu akış bileşenleri, BJT nin toplam akımını belirlerler. Şekil 3.4’te gösterilen bu akımlar kısaca şu şekilde tanımlanabilir:

J_{nE}^- emetörden baz bölgesine enjekte edilen elektron akışıdır. Elektronlar baz bölgesine yayıldığında, birkaçı baz bölgesindeki deliklerle birleşecektir. Elektronlar ile birleşen çoğunluk taşıyıcıları delikler baz bölgesinden yeniden doldurulmak zorundadır. Bu değiştirilen delik akışı J_{RB}^+ olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.4 İleri-aktif moddaki npn-tipi BJT için akım yoğunlukları (Neamen, 2003).

J_{nC}^- kollektöre ulaşan elektron akışıdır. Baz bölgesinden emetöre ulaşan deliklerin akışı J_{pE}^+ ile gösterilmiştir. Bazı elektron ve delikleri, baz-emetör bölgesinin ileri beslenmesi durumunda nötr bölgede birleşeceklerdir. Bu birleşmeden J_{RE}^+ akımı oluşacaktır. Elektron ve deliklerin üretimi ters beslenmiş baz-kollektör eklemine oluşacaktır. Bu üretim J_{pB}^+ delik akışına neden olacaktır. Son olarak, B-C eklemine ideal ters-doyma akımı J_{pC0}^+ olarak gösterilmiştir. Bu npn transistörü için ilgili akım yoğunluğu bileşenleri, ileri-aktif modda azınlık taşıyıcı yoğunlukları ile Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 İleri-aktif moddaki npn tipi BJT için akım yoğunluğu bileşenleri (Neamen, 2003).

BJT içerisindeki akımlar, azınlık taşıyıcı difüzyon akımları olarak tanımlanırlar. Şekil 3.5 teki akım yoğunlukları şu şekilde tanımlanırlar.

J_{nE} : $x = 0$ da baz bölgesi içindeki azınlık taşıyıcı elektronların difüzyonu nedeniyle oluşan akımdır.

J_{nC} : $x = x_B$ de baz bölgesi içindeki azınlık taşıyıcı elektronların difüzyonu nedeniyle oluşan akımdır.

J_{RB} : J_{nE} ve J_{nC} arasındaki fark akımıdır.

J_{pE} : $x' = 0$ da emetör bölgesindeki azınlık taşıyıcı deliklerin difüzyonu nedeniyle oluşan akımdır.

J_R : İleri yönde beslenmiş B-E eklemesindeki taşıyıcıların birleşmesi nedeniyle oluşan akımdır.

J_{pc0} : $x'' = 0$ da kollektör bölgesindeki azınlık taşıyıcı deliklerin difüzyonu nedeniyle oluşan akımdır.

J_G : Ters beslenmiş B-C eklindeki taşıyıcıların üretimi ile oluşan akımdır.

J_{RB} , J_{pE} ve J_R akımları sadece baz-emetör eklemine oluşan akımlardır ve kollektör akımını desteklemezler. J_{pC0} ve J_G akımları ise sadece baz-kollektör eklemi akımlarıdır. Bu akım bileşenleri transistör davranışını veya akım kazancını etkilemezler (Neamen, 2003). Transistörün emetör, baz ve kollektör akım yoğunlukları sırasıyla şu şekilde yazılabilir.

$$J_E = J_{nE} + J_R + J_{pE} \quad (3.1)$$

$$J_B = J_{pE} + J_R + J_{nE} - J_G - J_{pC0} \quad (3.2)$$

$$J_C = J_{nC} + J_G + J_{pC0} \quad (3.3)$$

Transistörün ortak emetör akım kazancı,

$$\beta = \frac{J_C}{J_B} = \frac{J_{nC} + J_G + J_{pC0}}{J_{pE} + J_R + J_{nE} - J_G - J_{pC0}} \quad (3.4)$$

emetör verimliliği,

$$\gamma = \frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_{pE}} \quad (3.5)$$

ve baz içinde taşınma faktörü,

$$\alpha_T = \frac{J_{nC}}{J_{nE}} \quad (3.6)$$

olarak yazılabilir.

3.2. Akım Kazancı Faktörlerinin Matematiksel Olarak Üretilmesi

Transistörün akım kazancı faktörleri ve dolayısıyla akım kazancı, transistörün elektriksel ve geometrik özelliklerine bağlı olarak değişir. Bir transistör dizaynının iyi veya kötü olarak değerlendirilmesinde etkili olan akım kazancı faktörlerinin daha ayrıntılı olarak ifade edilmesinde yarar olacaktır.

3.2.1. Emetör Verimliliği Faktörü:

Emetör verimliliği faktörü, emetör bölgesi içerisindeki azınlık taşıyıcı delik difüzyon akımını hesaba katar. Bu akım emetör akımının bir parçasıdır fakat kollektör akımını

etkilemez. Şekil 3.5'te sunulan akım bileşenlerinde tanımlanan J_{nE} akım yoğunluğu x-ekseninin tersi yönünde olduğundan,

$$J_{nE} = (-)qD_B \frac{d(\delta n_B(x))}{dx} \Big|_{x=0} \quad (3.7)$$

ve

$$J_{pE} = -qD_E \frac{d(\delta p_E(x'))}{dx'} \Big|_{x'=0} \quad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadelerdeki D_B ve D_E katsayıları sırasıyla baz ve emetör bölgelerindeki difüzyon sabitleridir. $\delta p_E(x')$ ve $\delta n_B(x)$ ifadelerinin türevleri alındıktan sonra (3.7) ve (3.8) nolu denklemleri şu şekilde yazılabilir.

$$J_{pE} = \frac{qD_E p_{E0}}{L_E} \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] \cdot \frac{1}{\tanh(x_E / L_E)} \quad (3.9)$$

$$J_{nE} = \frac{qD_B n_{B0}}{L_B} \left\{ \frac{1}{\sinh(x_B / L_B)} + \frac{[\exp(qV_{BE} / kT) - 1]}{\tanh(x_B / L_B)} \right\} \quad (3.10)$$

B-E eklemının yeterince ileri yönde beslendiğini, $qV_{BE} \gg kT$ varsayarak; $\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \gg 1$ ve $\frac{\exp(qV_{BE} / kT)}{\tanh(x_B / L_B)} \gg \frac{1}{\sinh(x_B / L_B)}$ olarak yazılabilir. Bu durumda, emetör verimliliği,

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{p_{E0} D_E L_B}{n_{B0} D_B L_E} \cdot \frac{\tanh(x_B / L_B)}{\tanh(x_E / L_E)}} \quad (3.11)$$

olarak ifade edilebilir. Tek eklem yapılar için ;

$$p_{E0} = \frac{n_i^2}{N_E} \text{ ve } n_{B0} = \frac{n_i^2}{N_B} \text{ şeklindedir. } N_E \text{ ve } N_B \text{ sırasıyla emetör ve baz içerisindeki}$$

net katkı yoğunluklarıdır. Emetör verimliliğinin bire yakın olması için, emetör bölgesi katkı yoğunluğunun baz bölgesi katkı yoğunluğuna göre büyük olması gerekmektedir.

$x_B \ll L_B$ ve $x_E \ll L_E$ durumunda emetör verimliliği kısaca,

$$\gamma \approx \frac{1}{1 + \frac{N_B}{N_E} \cdot \frac{D_E}{D_B} \cdot \frac{x_B}{x_E}} \quad (3.12)$$

olarak verilebilir. Farklı eklem (heterojunction) yapılar için eklemeler arasında enerji band aralığı farkı bulunacaktır ve bu fark emetör verimliliğini etkileyecektir. $\Delta E_g = E_{gE} - E_{gB}$ baz ve emetör bölgeleri arasındaki enerji band aralığı farkıdır. (3.11) nolu emetör verimliliği ifadesindeki p_{E0} ve n_{B0} terimleri yerine,

$$p_{E0} = \frac{n_{iE}^2}{N_E} \quad (3.13)$$

$$n_{B0} = \frac{n_{iB}^2}{N_B} \text{ kullanılarak,} \quad (3.14)$$

$$\frac{n_{iB}^2}{n_{iE}^2} = \left(\frac{m_{nB}^* m_{pB}^*}{m_{nE}^* m_{pE}^*} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \text{ yazılabilir.} \quad (3.15)$$

m_{nB}^* , m_{pB}^* ve m_{nE}^* , m_{pE}^* sırasıyla baz bölgesindeki has azınlık elektron ve deliklerin etkin kütlesi ve emetör bölgesindeki has azınlık elektron ve deliklerin etkin kütlesidir. Emetör katkılanması artarken ΔE_g artmaya devam eder. Böylece, p_{E0} değeri, enerji band aralığı farkı nedeniyle, artan emetör katkılanmasıyla artmaya devam etmez. Eğer p_{E0} , band aralığı farkı nedeniyle artmaya başlarsa, emetör verimliliği artmak yerine düşmeye başlar.

3.2.2. Baz İçindeki Taşınım Faktörü

Baz içindeki taşınım faktörü, baz bölgesine emetör tarafından giren artık azınlık taşıyıcı elektronlarının ne ölçüde kollektör tarafına eriştiğini belirtir. Daha önce (2.6) nolu denklemde $\alpha_T = \frac{J_{nC}}{J_{nE}}$ şeklinde genel olarak verilmişti. Bu ifadeyi daha açık bir şekilde inceleyebiliriz.

$$J_{nE} = (-)qD_B \frac{d(\delta n_B(x))}{dx} \Big|_{x=0} \quad (3.16)$$

ve

$$J_{nC} = (-)qD_B \frac{d(\delta n_B(x))}{dx} \Big|_{x=x_B} \quad (3.17)$$

tanımlamalarından J_{nC} ,

$$J_{nC} = \frac{qD_B n_{B0}}{L_B} \left\{ \frac{[\exp(qV_{BE}/kT) - 1]}{\sinh(x_B/L_B)} + \frac{1}{\tanh(x_B/L_B)} \right\} \quad (3.18)$$

ve daha önceki kısımda tanımlanan J_{nE} , taşıyım faktörü ifadesinde yerine konursa,

$$\alpha_T = \left\{ \frac{[\exp(qV_{BE}/kT) - 1] + \cosh(x_B/L_B)}{1 + \cosh(x_B/L_B) \cdot (\exp(qV_{BE}/kT) - 1)} \right\} \quad (3.19)$$

olarak yazılacaktır. Emetör verimliliğinde olduğu gibi B-E eklemının yeterince ileri yönde beslendiğini, $qV_{BE} \gg kT$ varsayarak; $\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \gg 1$ kabul edilerek, baz içindeki taşıyım faktörü,

$$\alpha_T \approx \left\{ \frac{[\exp(qV_{BE}/kT)] + \cosh(x_B/L_B)}{1 + \cosh(x_B/L_B) \cdot \exp(qV_{BE}/kT)} \right\} \text{ şeklinde daha kısa ifade edilebilecektir.}$$

Transistöre ait akım ifadelerinde ve parametrelerde yer alan x_E , x_B , x_C değerlerinin bilinebilmesi için, emetör, baz ve kollektörün birbirleriyle yaptıkları eklemelerdeki fakirleşme bölgelerinin genişliklerinin bilinmesi gerekir. Fakirleşme bölgesi genişliğinin hesaplanmasında,

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{q} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \text{ ifadesi kullanılabilir.} \quad (3.20)$$

$$W = x_n + x_p \quad (3.21)$$

N_a ve N_d sırasıyla, p-tipi ve n-tipi bölgenin katkı yoğunluğudur. Fakirleşme bölgesi genişliğinin ne kadarlık bir kısmının p-tipi ve n-tipi bölgeye genişlediğini de yine benzer bir ifadeyle şu şekilde gösterebiliriz.

$$x_n = \left\{ \frac{2\varepsilon_s(V_{bi} - V)}{q} \left[\frac{N_a}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.22)$$

$$x_p = \left\{ \frac{2\varepsilon_s(V_{bi} - V)}{q} \left[\frac{N_d}{N_a} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.23)$$

$$x_p = \frac{N_d}{N_a} x_n \quad (3.24)$$

3.3. Farklı Eklem Bipolar Transistörler

Bu çalışmada resonant tünelleme transistörünün modellenmesinde AlGaAs/GaAs Farklı eklem Bipolar Transistör (HBT) kullanılmıştır. Bu nedenle, bu yapının kısaca avantajlarının ve çalışma prensiplerinin incelenmesinde fayda olacaktır.

AlGaAs/GaAs HBTler Ku bandı kadar yüksek frekanslardaki dijital ve analog mikrodalga uygulamaları için kullanılmaktadırlar. HBTler silikon bipolar transistörlere göre daha hızlı anahtarlama hızına sahiptirler. Bunun nedeni, azaltılmış baz bölgesi direnci ve kollektör-taban kapasitesidir. HBT üretimi GaAs FET lere göre daha az işlem gerektiren bir litografiye ihtiyaç duyar. Bu nedenle, üretimleri daha az masraflıdır. Bu teknoloji ayrıca daha yüksek kırılma gerilimleri sağlar.

Si BJTler ile karşılaştırsak, HBTler emetör injeksiyon verimliliği, baz direnci, baz-emetör kapasitesi ve kesim frekansı kavramlarında daha iyi performans gösterirler. Aşağıdaki Tablo 3.1 de AlGaAs/GaAs HBT ve Si BJTlere ait bir karşılaştırma verilmiştir.

Tablo 3.1. AlGaAs/GaAs HBT ve Si BJT transistörlerinin karşılaştırılması.
(Chou and Ferro, 2005)

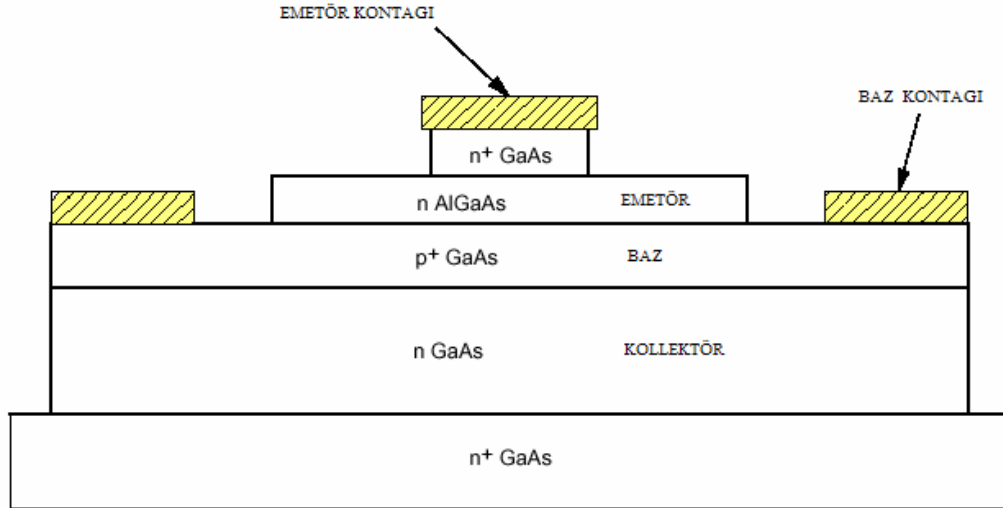
<i>Parametre</i>	<i>AlGaAs/GaAs HBT</i>	<i>Si BJT</i>
İleri transit zamanı, τ_F	4 ps	12 ps
Early gerilim, V_a	800 V	25 V
Kollektör-taban kapasitesi, C_{cs}	~0	~15 fF
Baz direnci, R_b	70 Ω	200 Ω

AlGaAs/GaAs HBT yapısının şu avantajları bulunmaktadır.

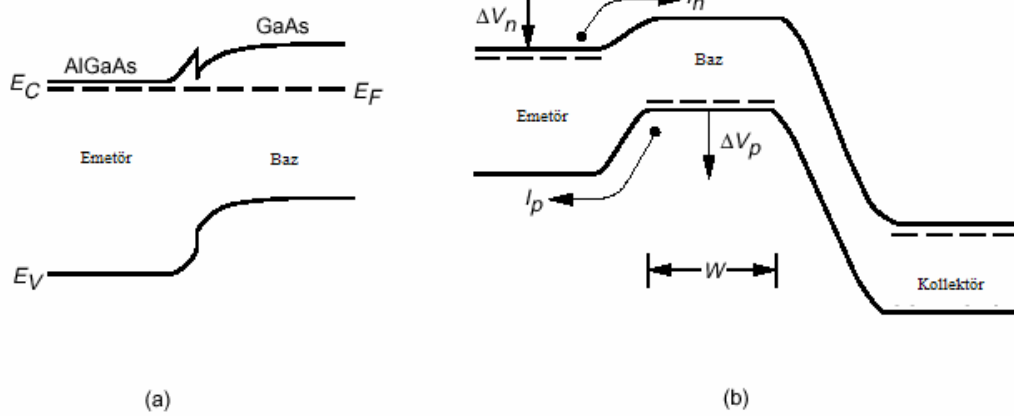
- Daha düşük baz direnci ile birlikte daha düşük ileri transit zamanı, yüksek kesim frekansı verir.
- Yüksek kazanç nedeniyle, daha iyi has cihaz lineerliği verir.
- Yarı yalıtkan GaAs taban kullanılması nedeniyle çok düşük kollektör-taban kapasitesine sahiptir.
- Yüksek verimliliğe sahiptir.
- İyi geniş-band empedans uyumuna sahiptir.
- Üretimleri daha az masraflıdır.

Önemli bir parametre olan akım kazancı, npn tipi BJT için, emetör bölgesinden baz bölgesine geçen elektron akımının baz bölgesinden emetör bölgesine geçen delik akımına oranı olarak hesaplanır. Bir HBT için, yüksek enjeksiyon verimliliği baz bölgesinde kullanılan daha büyük bir enerji bandı aralığına sahip bir malzeme kullanılarak elde edilebilir. Büyük enerji band aralıklı emetör bazdan gelen deliklerin enjeksiyonunu önler. Böylece, baz ve emetör bölgelerindeki katkılama konsantrasyonu enjeksiyon verimliliğini fazla etkilemeden geniş bir aralıkta ayarlanabilir. Bazen kollektör-baz kırılma gerilimini geliştirmek için geniş band aralıklı malzeme kullanılmasına rağmen, çoğu HBTlerde kollektör ve baz bölgesi malzemeleri aynıdır. Şekil 3.6'da AlGaAs/GaAs HBTnin kesitten görünüşü verilmiştir. HBT ler için sert geçişli ve yumuşak geçişli emetör-baz eklemlerinden her ikisi de kullanılabilir. Şekil 3.7'de bunlara ait enerji band diyagramları verilmiştir. AlGaAs emetör bölgesi, GaAs baz bölgesine göre gaha geniş bir band aralığına sahiptir. Sert geçişli E-B eklemi

potansiyel bir kertiğe sahiptir. Bu kertiğ, AlGaAs emetör bölgesininin her iki kenarından yaklaşık 300 Å mesafesinde linear olarak derecelendirilmesiyle yumuşatılabilir. Böylece elektronların geçmek zorunda oldukları bariyer yüksekliği azaltılmış olur.



Şekil 3.6 AlGaAs/GaAs HBT ye ait kesit görünüşü.



Şekil 3.7 AlGaAs/GaAs HBT için; (a) sert geçişli E-B eklemi. (b) yumuşak geçişli E-B eklemi.

Yumuşak geçişli E-B eklemünde, ΔV_p , delik enjeksiyonu ve ΔV_n , elektron enjeksiyonu için potansiyel bariyerler GaAs baz ve AlGaAs emetör arasında ΔE_g band aralığı kadar fark vardır.

$$q(\Delta V_p - \Delta V_n) = \Delta E_g \quad (3.25)$$

$$(\Delta E_g = E_g(\text{AlGaAs}) - E_g(\text{GaAs}))$$

Bu küçük band aralığı farkı I_n / I_p oranını önemli derecede etkiler. I_n , emetörden baz bölgesine olan elektron enjeksiyon akımı, I_p , bazdan emetöre olan ve istenmeyen delik enjeksiyon akımını temsil etmektedir. I_n ve I_p Boltzman yaklaşımı kullanılarak şu şekilde tanımlanabilir.

$$I_n = qAN_E(D_n / W)e^{(-q\Delta V_n / kT)} \quad (3.26)$$

$$I_p = qAN_B(D_p / L_p)e^{(-q\Delta V_p / kT)} \quad (3.27)$$

Yukarıdaki denklemlerdeki parametreler, q , elektronik yük; k , Boltzman sabiti; A , emetör-baz eklem alanı; D_n , baz bölgesindeki elektron difüzyon sabiti; D_p , emetördeki delik difüzyon sabiti ve L_p , emetördeki delik difüzyon uzunluğudur.

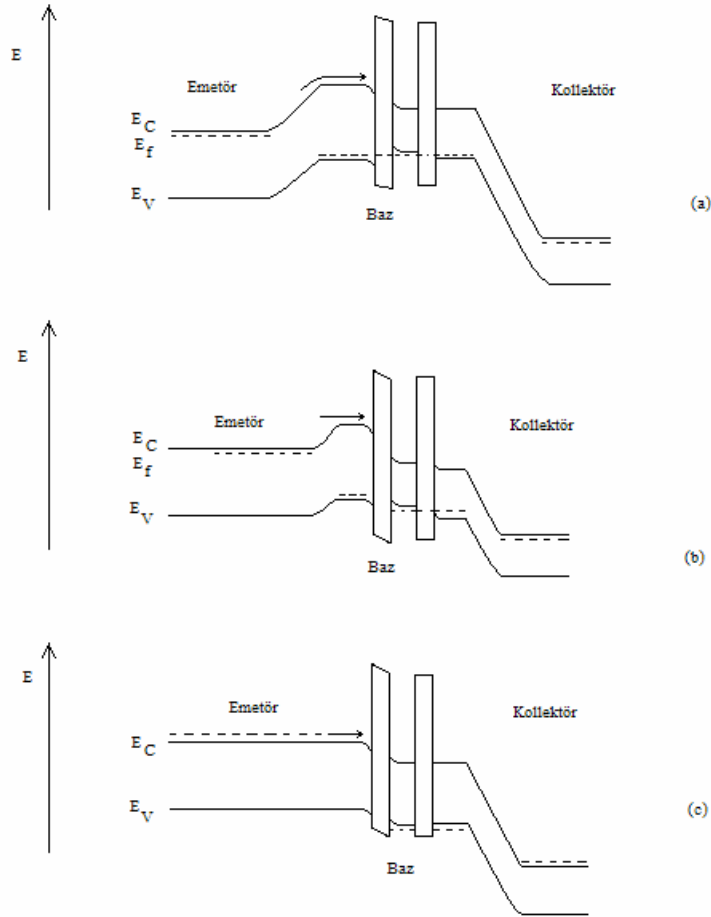
$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} / \text{GaAs}$ HBT ler için, $\Delta E_g \approx 14.6$ kT ve $\exp(\Delta E_g / kT) \approx 2 \times 10^6$ dir.

Böylece, ΔE_g farkı I_n / I_p oranını iyileştirmede önemli bir gelişme sağlamaktadır. HBTlerin bu özelliği, akım kazancını fazla etkilemeden, baz bölgesinin ağır katkılanmasına, emetör bölgesinde hafif katkılanmasına müsaade eder. Düşük emetör katkılama konsantrasyonu E-B eklem kapasitesini azaltır. Bu da akım kazancı kesim frekansı ve maksimum osilasyon frekansını etkiler. Baz bölgesindeki yüksek katkılama, baz tabaka direncini ve baz kontak direncini azaltır. Maksimum osilasyon frekansını artırır (Ren, 1994; Liou et al 1994; Nozu et al, 1992; Yamada et al, 1995; Sugara et al, 1993).

3.4. Resonant Tünelleme Transistörleri:

Resonant Tünelleme Bipolar Transistörleri (RTBT) kavramı ilk olarak 1985 yılında Capasso ve Kiehl tarafından ortaya atıldı (Hong and Song, 1994). RTBTler mikrodalga sistemleri için iyi bir güç kaynağı potansiyeli olduğu için, yüksek frekans osilatörleri ve yüksek hızlı anahtarlama sistemleri için umut verici olarak düşünüldüler.

Şekil 3.8 (a,b)'de çalışma koşulları altında RTBT ün enerji band diyagramı verilmiştir. Başlangıç olarak kollektör-emetör gerilimi V_{CE} ve baz akımı I_B değerleri, baz-emetör eklemi ileri ve baz-kollektör eklemi ters besleme olacak şekilde seçilmiştir. Eğer V_{CE} sabit iken I_B arttırılırsa, emetör-baz p-n eklem bölgesi içinde düz bir iletim bandına ulaşılan kadar, baz-emetör potansiyelide artar. Bu ana kadar cihaz geleneksel bir transistör olarak davranır. Kollektör akımı artan baz akımıyla artar. Baz akımının eşik değerinden sonra, emetördeki elektronlar termionik emisyon nedeniyle iki katlı engel (DB) boyunca tünellerler. Şekil 3.8(c)'de ise RTBT için alternatif bir tasarım sunulmuştur. Emetör ve DB arasındaki p-bölgesi ihmal edilmiştir. Kuyu tabakası ağır olarak katkılanmıştır.



Şekil 3.8 (a) Sabit emetör-kollektör geriliminde farklı baz akımları için RTBT enerji band diyagramları.

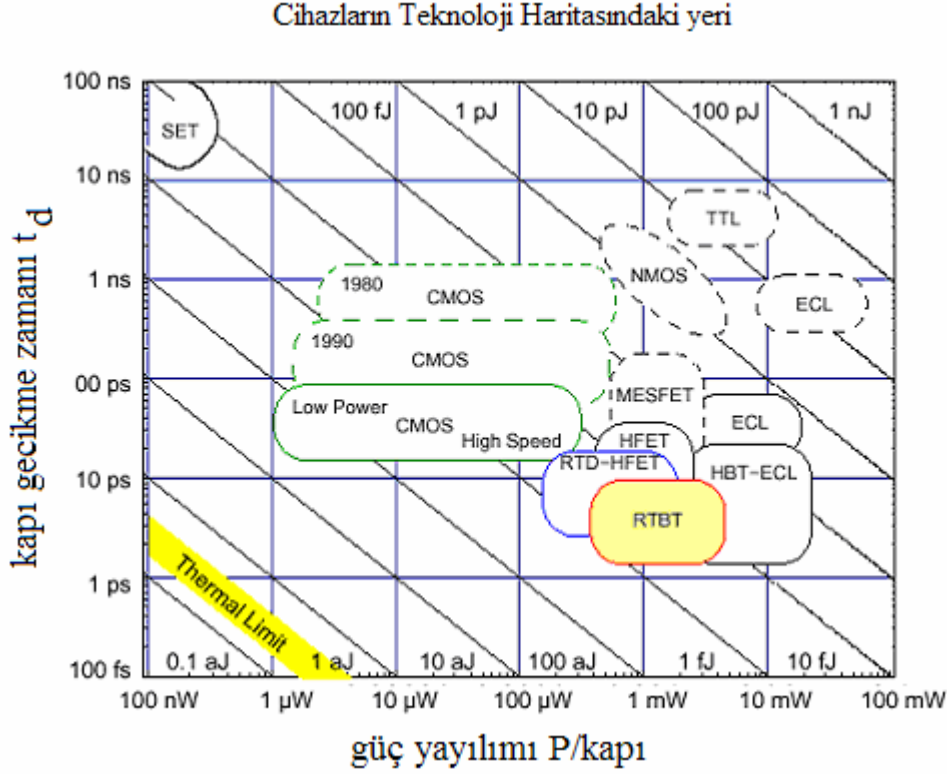
Baz akımı arttırıldıkça, cihaz geleneksel BJT olarak davranır. Şekil 3.8(b)'de baz akımı eşik değerinin üstüne çıktıktan sonra, baz bölgeleri boyunca potansiyel farkı meydana gelir. Bu durum emetördeki iletim bandını kuyunun ilk rezonans seviyesinin üstüne çıkarır. Böylece resonant tünelleme oluşarak kollektör akımı akar. Şekil 3.8(c)'de ise alternatif bir RTBT dizaynı verilmiştir.

Resonant tünelleme transistörleri (RTT) negatif diferansiyel direnç karakteristikleri ve çoklu-durum lojik imkanları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. RTTler, RTBT ve diğer birkaç konfigürasyon üzerinde incelenmiştir. RTBTler diğer RTT yapılarına göre daha yüksek akım kazançları ve negatif diferansiyel direnç bölgesi göstermiştir (Capasso and Sen, 1988-Sen and Capasso, 1987). Tipik olarak, RT cihazlarında iki-katlı bariyer veya kuantum kuyusu (QW) yapısı kullanılmaktadır (Tsu and Esaki, 1973; Chang and Esaki, 1974).

Bir RTBT cihazı, bir RT diyodunun seri kombinasyonuna eşdeğer değildir. Bunun nedeni, QW bölgesine elektrik kontak bağlanmasıdır. Böylece, baz-emetör gerilimi kuyu ve emetör sözde-Fermi seviyesi arasındaki enerji farkını kontrol eder (Buther and March, 1993).

Bir resonant tünelleme transistörü (RTT)'nin akım-gerilim karakteristiği resonant tünelleme diyodunun akım-gerilim karakteristiği ile aynıdır. Bu karakteristik implementasyon değerine bağlı olarak bir veya daha fazla tepe değerine sahip olabilir. RTT nin bir örneği resonant tünelleme hot-elektron transistörüdür (RHET) (Futatsugi and Yamaguchi, 1987; Yokoyama and Imamura, 1985). RHET emetör ve baz arasında bir RTD içeren geleneksel bir hot-elektron transistörüdür. RTT de resonant enerji seviyesinin pozisyonu baz gerilimi tarafından kontrol edilir. Baz gerilimi sıfır iken emetördeki elektronlar resonant enerji seviyesinin altında olduğundan akım akmaz. Baz gerilimi arttırılırsa, resonant enerji seviyesi emetördeki elektronlara doğru aşağıya çekilir ve sadece elektronlar ile resonant enerji seviyesi aynı hizaya geldiklerinde akım cihaz boyunca akabilir. Akım çıkışındaki tepe değeri burada üretilir. Baz gerilimi arttırılmaya devam edilirse, resonant enerji seviyesi emetördeki elektronları geçerek daha aşağıya çekilir. Bunun sonucunda tünelleme durur. Akım çıkışındaki vadi burada

oluşturulmuş olur. Aşağıdaki Şekil 3.9’da RTBT lerin teknoloji alanında diğer cihazlara göre bulunduğu yer gösterilmiştir.



Şekil 3.9 RTBT lerin teknoloji alanında diğer cihazlara göre bulunduğu yer (ESSDERC, 2002).

Farklı eklem Bipolar Transistörler (HBT) silikon BJT lere göre daha iyi yüksek-frekans performansı göstermektedirler (Levi et al, 1990; Asbeck, 1990). HBT’lerde kullanılan malzemelerden bir tanesi cihaz içerisindeki enerji band aralığını değiştirebilir ve yüksek mobiliteye sahip malzemelerle birleşimi mümkün kılar. Genellikle RT yapıları p-tipi katkılanmış baz bölgesi ile n-tipi katkılanmış emetör ve kollektör bölgesinden oluşan npn tipi transistörler üzerinde oluşturulmaktadır. Emetör ve kollektörde çoğunluk taşıyıcılar elektronlar, baz bölgesinde ise deliklerdir. Npn tipi cihazların avantajı; emetörden kollektöre baz bölgesi boyunca akan akımın büyük bir kısmı yüksek mobiliteye sahip elektronlar tarafından taşınır. Cihaz içerisindeki akım kazancı, emetör topraklanarak, $V_{BE} > 0$ olduğu durumda I_B baz akımı uygulanarak elde edilen I_C kollektör akımına göre hesaplanabilir. BJT’lerde, yeniden birleşmenin büyük bir kısmı,

bazdan emetöre akan delikler tarafından oluşturulur. HBT'lerde ise, geniş enerji band aralığına sahip emetör bölgesi bu akışı engeller. Bu durumda da, yeterli akım kazancını koruyarak p-tipi baz bölgesi daha yüksek katkılanabilir. Baz bölgesindeki yüksek katkılama sonucunda, baz direnci ve parazitik RC zaman sabitleri azalır. Emetör/baz çok eklem yapıları aynı zamanda emetörden baz bölgesine sıcak elektron injeksiyonuna müsade eder (Clark, 1997).

3.5. Resonant Tünelleme Bipolar Transistörün Modellenmesi

Resonant tünelleme bipolar transistörleri üzerinde şu ana kadar bir çok deneysel çalışmalar yapılmasına rağmen, bu konudaki analitik modelleme çalışmaları kısıtlıdır. Bu kısımda, 1990 yılında Wu ve arkadaşları tarafından laboratuvar ortamında üretilmiş olan RTBT için analitik bir model sunulmuştur. Resonant tünelleme yapısı emetör bölgesinde yaratılmıştır. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, RTT nin emetör bölgesi geleneksel farklı eklem bipolar transistör (HBT) yapısı ve RT yapısı içermektedir. Baz bölgesi p-tipi, kollektör bölgesi n-tipi katkılanmış HBT yapısıdır.

RTD ye ait akım-gerilim denklemi (2.23) nolu denklemde verildiği gibidir.

$$I_{RTD} = \frac{|e|m^*k_B T}{2\pi^2\hbar^3} \int_{T_U^*}^{T_U} \ln \left[\frac{1 + \exp[(E_F - E_Z)/k_B T]}{1 + \exp[(E_F - |e|V_{RTD} - E_Z)/k_B T]} \right] dE_Z \quad (3.28)$$

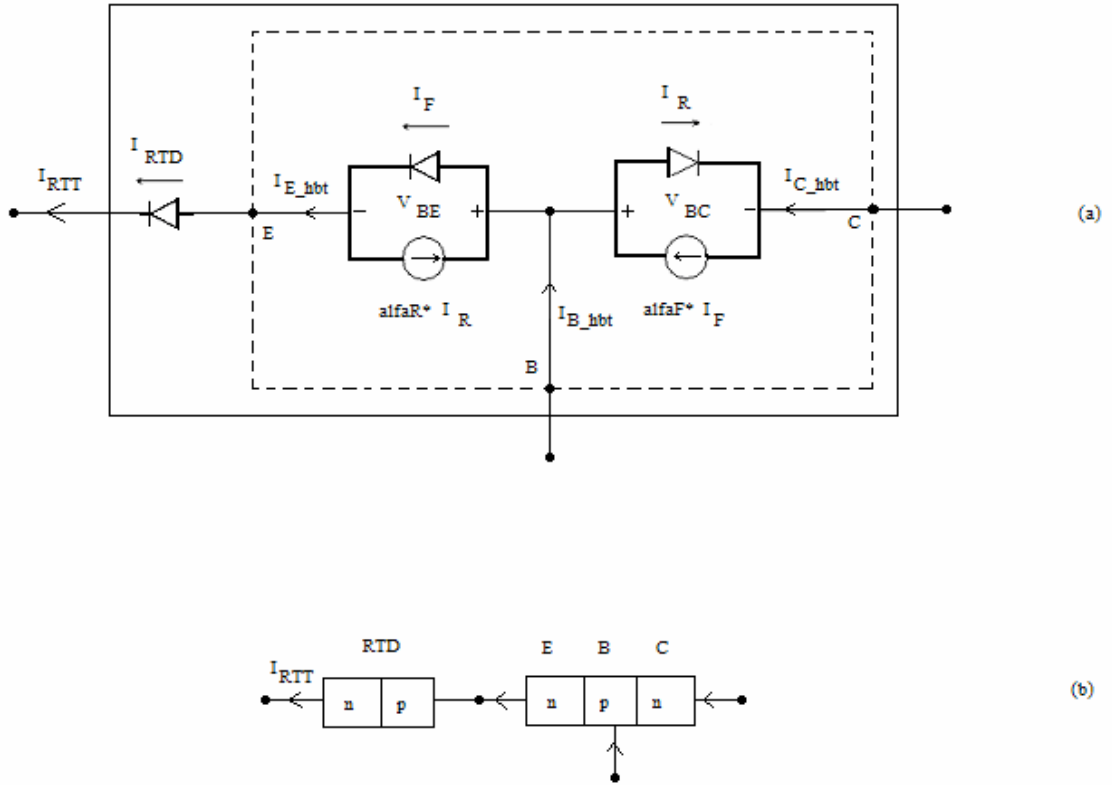
RTD ye ait akım ifadesi aynı zamanda RTBT yapısından geçen akıma eşittir. RTBT yapısına ait baz-emetör gerilimi ($V_{BE_{RTT}}$), RTD yapısındaki gerilim düşümü (V_{RTD}) ile HBT yapısındaki baz-emetör geriliminin ($V_{BE_{HBT}}$) toplamıdır.

$$I_{E_{RTT}} = I_{E_{RTD}} = I_{E_{HBT}} \quad (3.29)$$

$$V_{BE_{RTT}} = V_{RTD} + V_{BE_{HBT}} \quad (3.30)$$

$$I_{C_{RTT}} = I_{C_{HBT}} \quad (3.31)$$

$$I_{B_{RTT}} = I_{B_{HBT}} \quad (3.32)$$



Şekil 3.10 RTBT için kullanılan Ebers-Moll modeli temelli modellemenin ayrıntılı ve basit gösterimi.

RTBT yapısına ait baz ve kollektör akımları HBT yapısındaki baz ve kollektör akımlarına eşittir. RTBT yapısına ait akım-gerilim karakteristiğinin bulunmasında ilk adım verilen bir gerilim, V_{RTD} , için akım, I_{RTD} , değerinin hesaplanmasıdır. I_{RTD} değeri aynı zamanda RTBT ye ait emetör akımına eşit olduğu için, Ebers-Moll modeli yardımıyla bu akım değerine karşılık gelen HBT baz-emetör gerilimi bulunabilir. Bu değer aşağıdaki (3.33) nolu denklemle hesaplanabilir.

$$V_{BE_{HBT}} = V_T \ln \left[\frac{\left[\frac{\text{alfa}F \cdot I_{E_{RTD}}}{I_{S_{HBT}}} + \text{alfa}F + 1 \right]}{\left[1 - \text{alfa}F \cdot e^{-V_{CE_{HBT}} / V_T} \right]} \right] \quad (3.33)$$

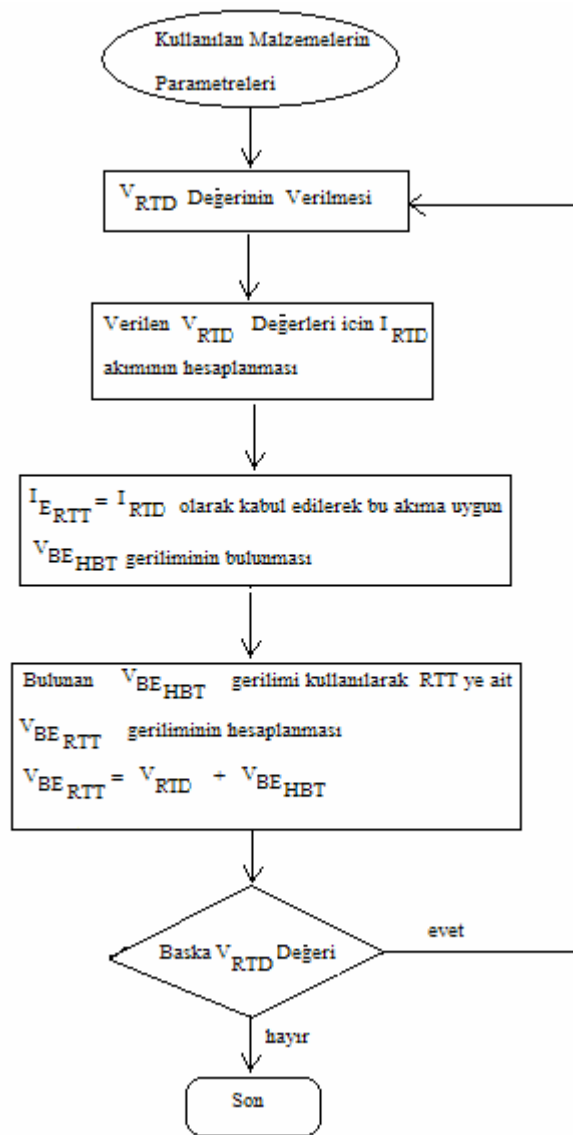
$$V_{BC_{HBT}} = V_{BE_{HBT}} - V_{CE_{HBT}} \quad (3.34)$$

Hesaplanan $V_{BE_{HBT}}$ gerilimi yardımıyla kollektör ve baz akımları aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$I_{C_{HBT}} = I_{S_{HBT}} \left[\left(e^{V_{BE_{HBT}} / V_T} - 1 \right) - \frac{\left(e^{V_{BC_{HBT}} / V_T} - 1 \right)}{\alpha R} \right] \quad (3.35)$$

$$I_{B_{HBT}} = I_{E_{RTD}} - I_{C_{HBT}} \quad (3.36)$$

Bu hesaplamaları bir akış diyagramıyla Şekil 3.11’de gösterebiliriz.



Şekil 3.11 RTBT yapısının akım-gerilim karakteristiğinin bulunmasında uygulanacak akış diyagramı.

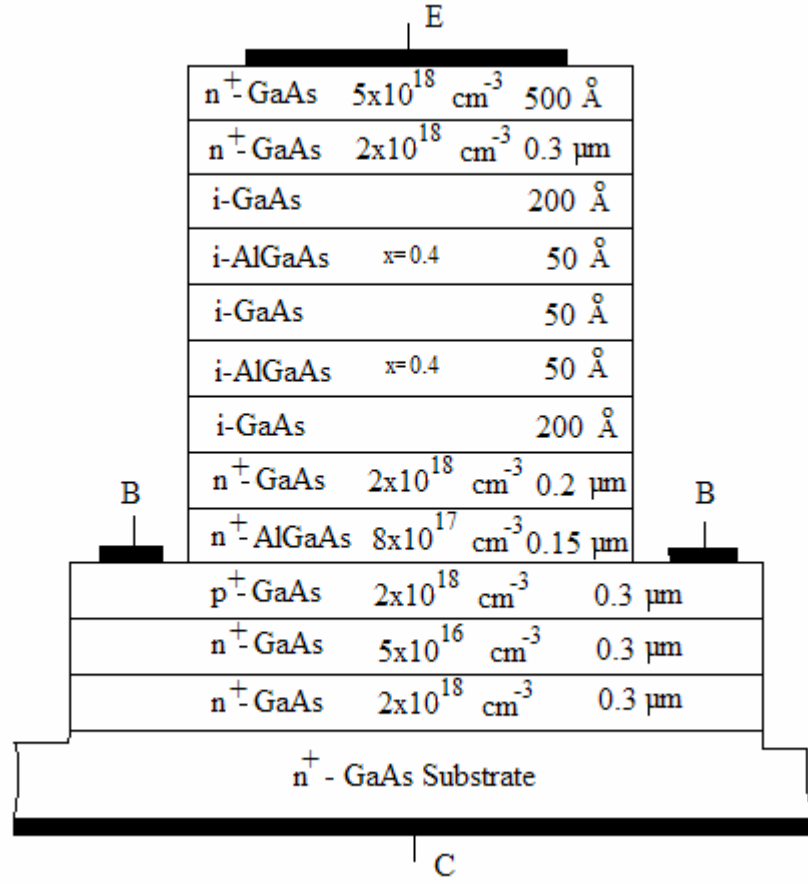
Çalışmada sunulan RTBT modelinin simülasyonu için, malzeme parametrelerinin bilinmesi yeterlidir. Bu çalışmada kullanılan parametreler, RTBT üzerinde daha önceki çalışmaların bazısında kullanılan parametrelerdir. Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ için bu parametreler sunulmuştur.

Tablo 3.2. GaAs için malzeme parametreleri.

<i>GaAs için Malzeme Parametresi</i>	<i>Sembol</i>	<i>Değeri</i>	<i>Referans</i>
Kristal Yapısı	Zincblende		14
Elektron affinity	χ	4.070 eV	14
Enerji Band Aralığı	E_g	1.424 eV	14
Elektron etkin kütlesi	m_n^*	$0.067 m_o$	14
Mobility	μ_p	$100 \text{ cm}^2V^{-1}s^{-1}$	14
Mobility	μ_n	$5000 \text{ cm}^2V^{-1}s^{-1}$	14
Delik (Hole) ömrü (n-GaAs)	τ_p	1 ns	14
Elektron ömrü	τ_n	5.63 ns	14
Delik difüzyon sabiti	D_p	9.0 cm^2s^{-1}	14
Elektron difüzyon sabiti	D_n	63.96 cm^2s^{-1}	14

Tablo 3.3 $Al_xGa_{1-x}As$ için Malzeme Parametreleri.

$Al_xGa_{1-x}As$ için Malzeme Parametresi	Sembol	Değeri	Referans
Kristal Yapısı	Zincblende		19
Elektron affinity	χ	4.07-1.1x $0 \leq x \leq 0.45$ 3.64-0.14x $0.45 < x \leq 1$	16
Enerji Band Aralığı	E_g	1.424+1.247x $0 \leq x \leq 0.45$ 1.9+0.125x+0.143 x^2 $0.45 < x \leq 1$	16
Elektron etkin kütlesi	m_n^* m_p^*	$(0.067 + 0.083x)m_o$ $(0.62 + 0.14x)m_o$	16
İletim Bandı Etkin Yoğunluğu	N_C	$2((2\pi m_n kT)h^2)^{3/2}$	17- 18
Valans Bandı Etkin Yoğunluğu	N_V	$2((2\pi m_p kT)h^2)^{3/2}$	17- 18
Dielektrik Sabiti	ϵ_s	$(13.18 - 3.12x)\epsilon_o$	16

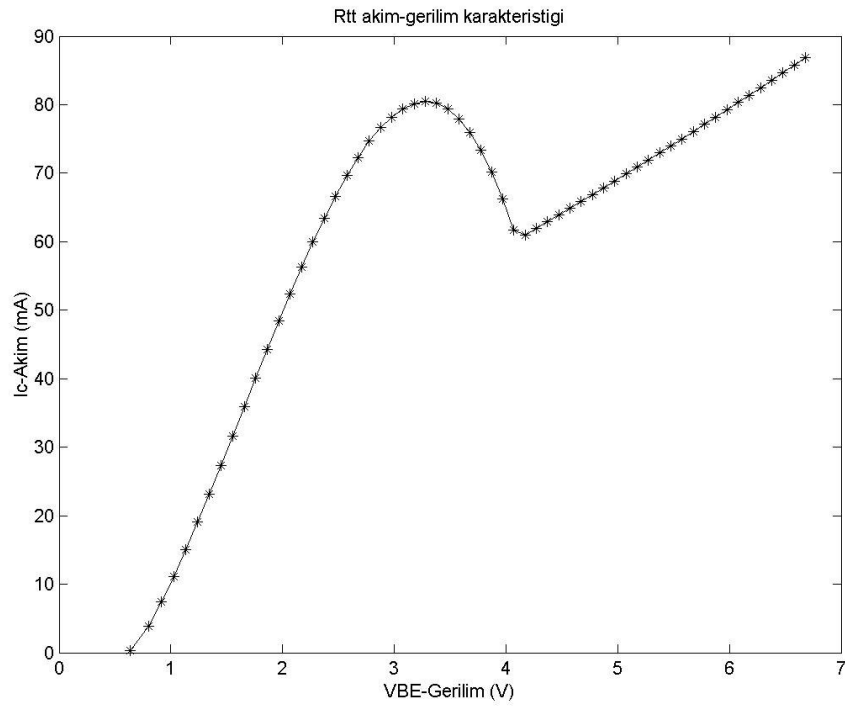


Şekil 3.12: Resonant tünelleme bipolar transistörünün kesitten görünüşü (Wu, 1990).

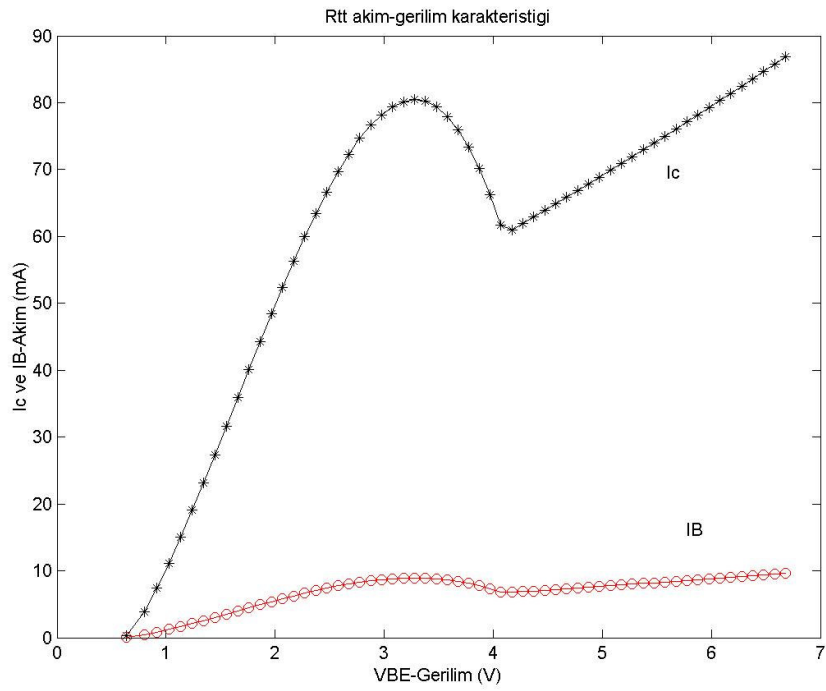
Verilen RTBT yapısı, n-GaAs (sol kontak), i- $Al_xGa_{1-x}As$ (bariyer), i-GaAs (kuyu), i- $Al_xGa_{1-x}As$ (bariyer), n-GaAs (sağ kontak)' tan oluşan tünelleme yapısını ve n- $Al_xGa_{1-x}As$ (emetör), p-GaAs (baz), ve n- $Al_xGa_{1-x}As$ (kollektör) HBT yapısından oluşur. Emetör-baz eklemesinin alanı $4900 \mu\text{m}^2$, $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ Si katkılanmış emetör genişliği $0.15 \mu\text{m}$, $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Zn katkılanmış baz genişliği $0.3 \mu\text{m}$, ve $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ Si katkılanmış kollektör genişliği $0.3 \mu\text{m}$ dir. İletim bandı süreksizliği, ΔE_C , ΔE_g nin %60 ı kadardır (Lacomb and Jain, 1996). Bu çalışmada, RTBT nin modellenmesinde Lacomb ve Jain' in geliştirdiği bir HBT yapısına seri olarak bağlanmış RTD yapısı temel alınmıştır. Farklı olarak, RTBT ye ait akım ve gerilim değerlerinin hesaplanmasında Ebers-Moll modeli kullanılmıştır.

3.6. Resonant Tünelleme Bipolar Transistörü Modellemeye ait Akım-Gerilim Karakteristikleri

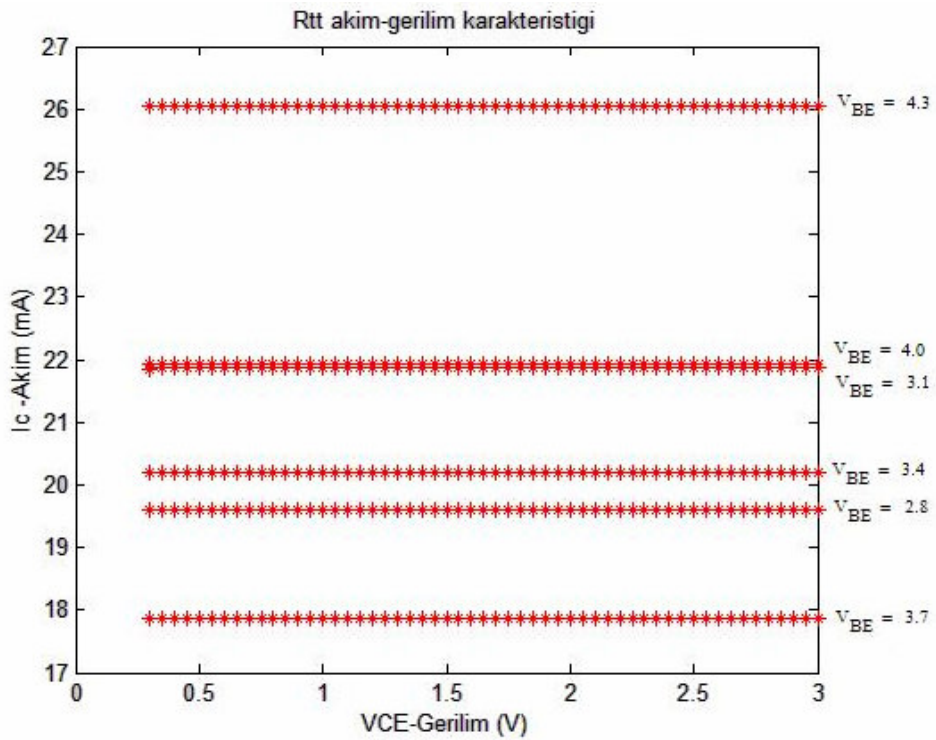
Önceki kısımlarda fiziksel olarak tanımlanan ve modellenen Resonant Tünelleme Transistörüne ait akım-gerilim karakteristikleri Şekil 3.13, 3.14 ve 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.13 RTBT için $V_{CE} = 1.5$ Volt iken $I_C - V_{BE}$ karakteristiği.



Şekil 3.14 RTBT için $V_{CE} = 1.5$ Volt iken $I_C - I_B - V_{BE}$ karakteristiği.



Şekil 3.15 RTBT için değişik V_{BE} gerilimleri için $I_C - V_{CE}$ karakteristiği.

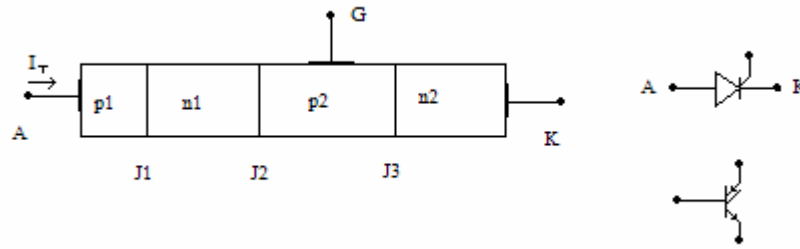
4. RESONANT TÜNELLEME YARIİLETKEN KONTROLLÜ DOĞRULTUCU

Güç yarıiletken anahtarları güç elektroniği sistemlerinde önemli bir yer tutarlar. Güç elektroniği teknolojisinde sürekli devam eden gelişmeler, güç yarıiletken cihazlarında da farklı arayışlara neden olmuştur. Yarıiletken cihazların kontrolü ve performansı tüm güç elektroniği sisteminin verimliliğini, büyüklüğünü, fiyatını ve ağırlığını önemli ölçüde etkiler. Genel olarak konuşursak, güç yarıiletken anahtarları üç-üçlü cihazlardır. Kontrol ucuna uygulanan sinyal diğer iki uç arasında ya ilettime ya da kesime neden olur. 1950 yıllarının başında, ilk kontrol edilebilir güç yarıiletken anahtarı olarak güç BJT'leri geliştirilmiştir (Bardeen and Brattain, 1948). O zamandan beri, güç BJT'leri güç elektroniğinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. 1950lerde aynı zamanda, ilk SCR'ler de geliştirilmiştir (Li, 2000). SCR sadece iki kararlı duruma sahiptir: İLETİM veya KESİM. Küçük bir kapı akımıyla kesimden iletim durumuna geçebilmektedir. SCR'ler ileri kutuplama gerilim düşümü ve bloklama gerilimi arasında, hem elektronların hem de deliklerin enjeksiyonuyla sağlanan güçlü iletim modülasyonu nedeniyle, iyi bir ilişkiye sahiptir. Cihazın akım kapasitesini arttırmak amacıyla, bir SCR'nin fiziksel boyutu ciddi üretim problemleri çıkarmadan kolayca büyütülebilir. Buna rağmen, SCR'ler kapı akımını kontrol ederek kesime sokulamazlar. BJT'lerin gelişimini, geleneksel tristörlerden farklı olarak kontrol ucuyla iletimden kesime sokulabilme yeteneğine sahip Gate Turn-off tristörlerinin (GTO) gelişimi izlemiştir.

Yarıiletken kontrollü doğrultucu aynı zamanda tristör olarak da bilinir. Tristör uluslararası elektroteknik komisyonunun (IEC) üç veya daha fazla ekleme sahip yarıiletken cihazlar için kullandığı isimdir. Güç devreleri uygulamalarındaki 4-tabakalı en önemli cihazlardan biridir. SCR, tabakalarından birine bağlanmış bir kapı içeren dört tabakalı bir diyottur. Anahtarlama uygulamaları için önemli bir cihazdır. Bir SCR'nin çalışması bipolar transistörler ile yakından ilgilidir. Her ikisinde de iletim işlemleri hem elektronlar hem de delikler yardımıyla gerçekleşir. Ancak, SCR'deki anahtarlama mekanizmaları bipolar transistörlerinkinden epey farklıdır. Ayrıca, cihazın yapısı nedeniyle, SCR'ler çok daha geniş bir akım-gerilim aralığında çalışabilirler. Bir kaç miliamperden 5000 ampere ve 10000 voltun üstüne kadarki gerilim aralığında çalışabilirler.

4.1. Yarıiletken Kontrollü Doğrultucuların Temel Karakteristikleri

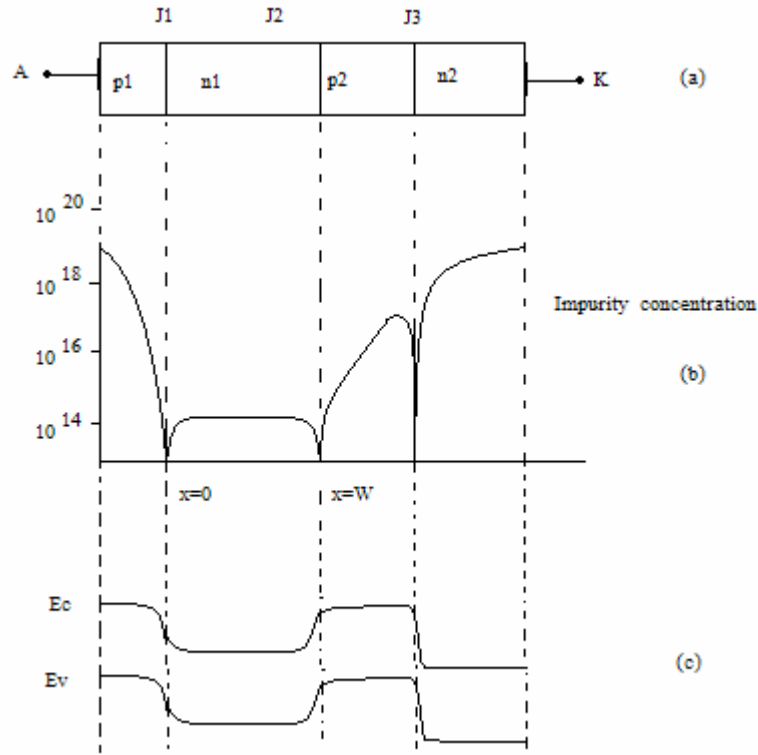
Temel bir üç-üçlü SCR yapısı dört tabakadan oluşan bir pnp-n yapısından oluşur. J1, J2, ve J3 olarak adlandırılan üç p-n eklemine sahiptir. Şekil 4.1’de bir SCR’nin geometrisi ve devre sembolleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Anot, katot ve bir gate elektrodundan oluşan üç-üçlü bir SCR nin geometrisi ve devre sembolleri.

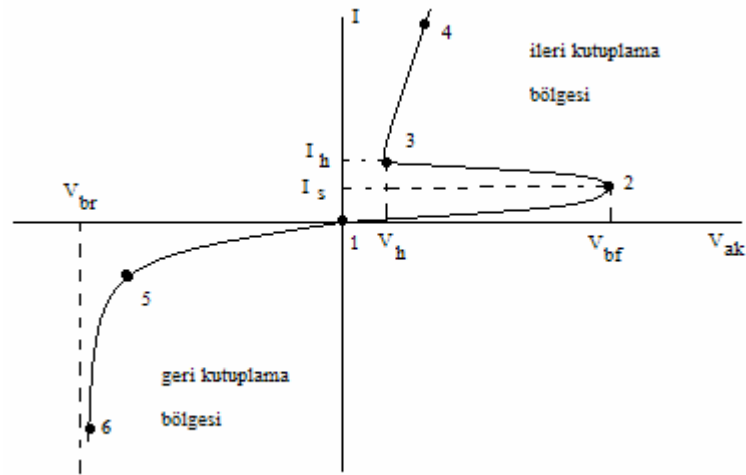
Dış taraftaki p1-tabakasına eklenen kontak elektrotu anot, diğer uçtaki n2-tabakasına eklenen elektrot ise katot olarak adlandırılır. Herhangi başka bir elektrot eklenmediği durumda bu yapı pnp-n diyodu olarak bilinir. İç taraftaki p bölgesine bir elektrot eklenirse, bu bölge kapı olarak adlandırılır. Şekil 4.2’de tipik bir SCR’nin katkılama profili verilmiştir.

SCR, tabakalarından birine kapı bağlanan bir pnpn diyodudur. Dört tabakalı diyodun çalışma prensiplerini anlamak SCR’nin çalışma prensibini anlamakta yardımcı olacaktır. Şekil 4.3’te bir pnp-n diyodunun ters ve ileri yönde beslenmesi durumundaki I-V karakteristikleri verilmiştir. Şekil 4.2(a)’da 1. ve 3. eklemeler ters beslenmiş, 2. eklem ileri yönde beslenmiştir. Akan tek akım iki ters-beslenmiş eklem boyunca oluşan kaçak akım nedeniyledir. Uygulanan ters besleme geriliminin V_{REV} in artırılması kaçak akımını çığ olayına kadar ciddi şekilde arttıracaktır. Çığ olayının meydana geldiği andaki ters besleme gerilimi ters tepe gerilimi (piv) olarak bilinir. Çığ olayı olduğunda, yapı boyunca akan akım yüksek bir ısı üretecek ve bunun sonucunda yanma olacaktır.



Şekil.4.2 (a) Dört tabakalı pnp-n diyodu. (b) Bir SCR'nin katkılama profili (c) Isıl dengede enerji band profili.

1. ve 3. eklemler ileri yönde, 2. eklem ters yönde beslendiğinde, ters beslenmiş eklem kaçak dışında herhangi önemli bir akımın akmasını önler. Eğer ileri besleme gerilimi arttırılırsa, kaçak akımı artar. Bu akım Şekil 4.3 te 1-2 noktaları arasındadır. V_{ileri} yeterince arttırılırsa, $\frac{dV}{dI} = 0$ noktasında ileri yönde kırılma noktası oluşur. Bu noktadaki gerilime ileri kırılma gerilimi V_{BF} , akımda anahtarlama akımı I_S denir. 2-3 noktaları arası negatif direnç bölgesidir. 3-4 noktaları arası ise iletimin gerçekleştiği bölgedir. SCR "on" durumundadır. $\frac{dV}{dI} = 0$ durumunun gerçekleştiği 3 noktasında, tutma akımı, I_h , ve tutma gerilimi, V_h tanımlanmaktadır. 1-5 arasındaki bölge, ters kutuplama durumunda oluşur ve 5-6 arasındaki bölgede ise ters kutuplama durumunda kırılma oluşur.

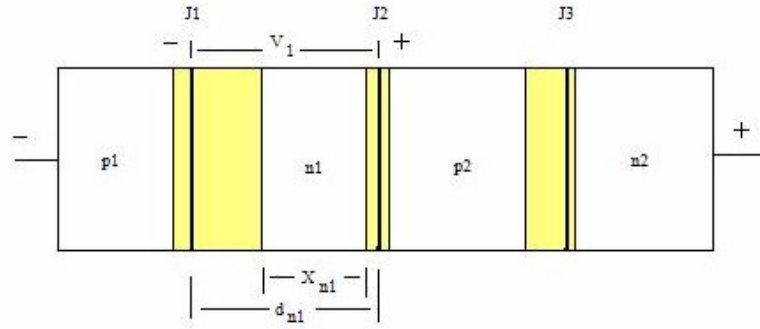


Şekil 4.3 Bir pnp-n diyodun akım-gerilim karakteristiği.

İleri kutuplama bölgesinde çalıştırılan bir SCR kararlı olmayan bir yapı sergiler. Yüksek empedans, düşük akım durumundan çok ani bir şekilde düşük empedans, yüksek akım durumuna geçer. Bir SCR'nin akım gerilim karakteristiği için, ters kutuplama durumu ve ileri kutuplama durumu incelenir.

4.1.1. Ters Kutuplama Durumu

Geri besleme kırılma gerilimini ve ileri besleme kırılma gerilimini iki temel faktör kontrol eder. Bunlar çığ olayı ve delinme olayıdır. SCR'nin ters beslenmesi demek, anoda uygulanan gerilimin katoda göre negatif olmasıdır. J1 ve J3 eklemeleri ters beslenmiş, J2 eklemi ise ileri yönde beslenmiş olur. Bu durum Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Bir SCR nin ters besleme durumu.

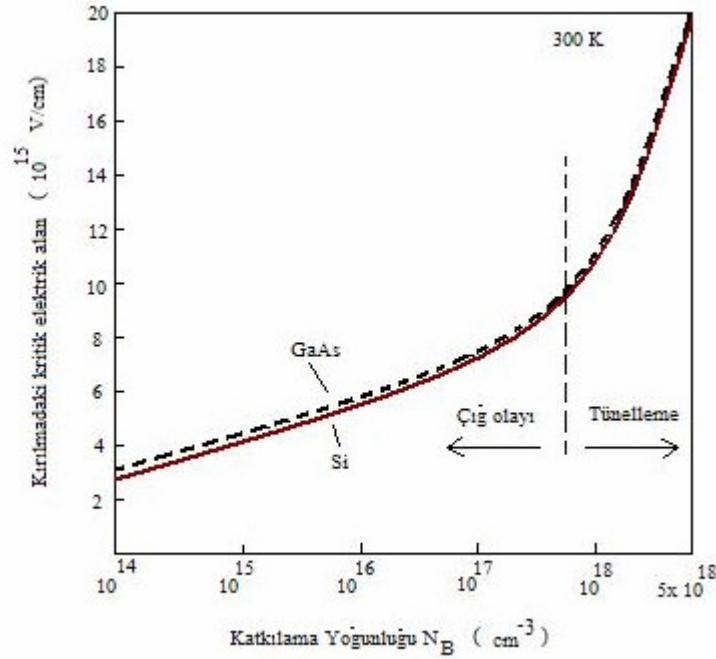
Kırılma olayı, n1 tabakasının kalınlığına, d_{n1} , bağlı olarak, fakirleşme tabakasının genişliği d_{n1} 'den küçük olduğu durumda veya delinme olayı nedeniyle gerçekleşecektir. Kırılma geriliminin hesabında tek-tarafli bir p-n eklemine düşünürsek; maksimum elektrik alanı $E_{\max} = \frac{qN_d x_n}{\epsilon_s}$ olarak verilir. İfadede yer alan N_d n-tipi katkılama yoğunluğu, x_n ise fakirleşme bölgesi genişliğidir. Daha önceki bölümde sunulan x_n fakirleşme bölgesi genişliğinin

$$x_n \approx \left\{ \frac{2\epsilon_s V_1}{q} \cdot \frac{1}{N_d} \right\}^{1/2} \text{ olduğu hatırlanır ise, uygulanan ters kutuplama gerilimi } V_1 \text{ i, } V_B$$

kırılma gerilimi olarak ve maksimum elektrik alanı E_{\max} da kırılmadaki kritik elektrik alan E_{crit} olarak tanımlanarak, çığ kırılma gerilimi ifadesi bulunabilir.

$$V_B = \frac{\epsilon_s E_{crit}^2}{2qN_{n1}} \quad (4.1)$$

Oda sıcaklığında, kırılmada kritik elektrik alanının tek tarafı çok katkılı asimetrik (one-sided) GaAs ve Si için değerleri Sze tarafından aşağıdaki Şekil 4.5'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Kırılmadaki kritik elektrik alanın bir taraflı eklem için, katkılama yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak gösterilmesi (Sze, 1981).

Bir taraflı basamak katkılı eklemler için delinme gerilimi,

$$V_{PT} \cong \frac{qN_{n1}d_{n1}^2}{2\epsilon_s} \text{ olarak verilir.} \quad (4.2)$$

Gerçek ters besleme gerilimi yukarıda açıkladığımız delinme gerilimi ve çığ kırılma gerilimi ifadeleriyle sınırlıdır. Çünkü, J1 eklemi bitişiğindeki J2 eklemi ile açık-baz ortak-emetör pnp transistörü gibi birleştirilmiştir. Bu durum kırılma gerilimini düşürecektir. Ters yöndeki kırılma durumu ortak-emetör konfigürasyonu ile bağlantılı olacaktır. Kırılma gerilimi Sze tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$V_{BR} = V_B(1 - \alpha_1)^{1/n} \quad (4.3)$$

İfade de yer alan α_1 ortak baz akım kazancı, n ise $p^+ - n$ diyotlar için yaklaşık olarak 6 ve $n^+ - p$ diyotlar için ise 4 olarak alınan bir sabittir. $(1 - \alpha_1)^{1/n}$ birden küçük olacağı

için tristör için ters yöndeki kırılma gerilimi çıkış kırılma geriliminden küçük olacaktır. Ortak baz akım kazancı daha önceki bölümde emetör verimliliği ve baz taşıyım faktörü cinsinden $\alpha = \gamma\alpha_T$, olarak tanımlanmıştı. Eğer p2 bölgesi ağır olarak katkılanmış ise, emetör verimliliği bire yaklaşacaktır ve ortak baz akım kazancı baz taşıyım faktörüne eşit olacaktır.

$$\alpha \approx \alpha_T = \sec h(x_{n1}/L_{n1}) \quad (4.4)$$

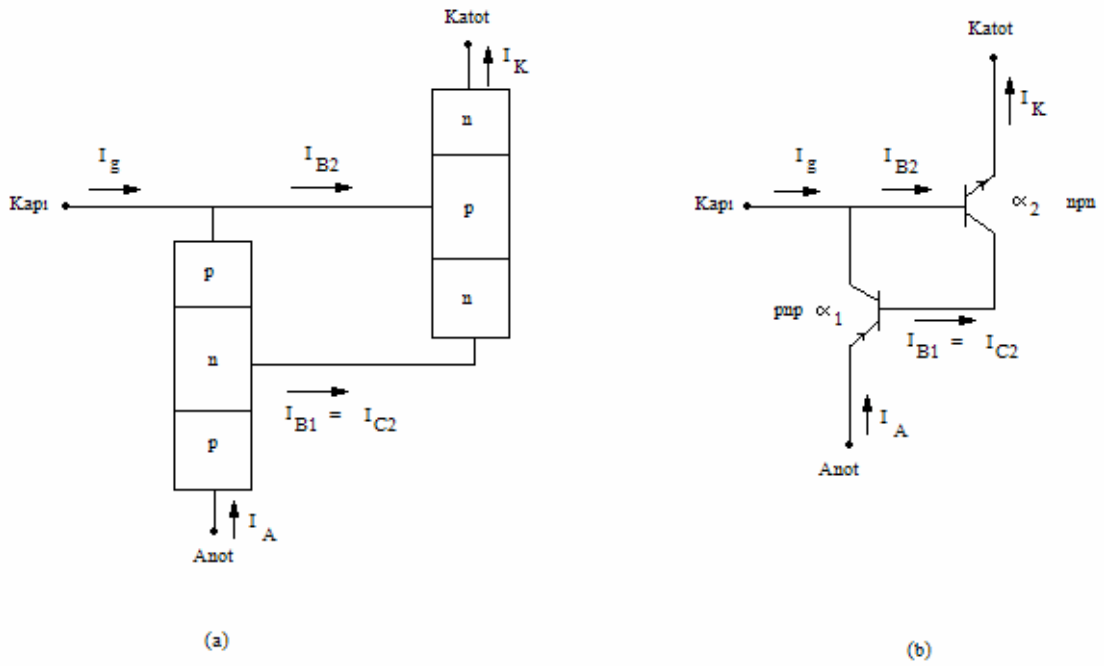
L_{n1} , n1 bölgesindeki delik difüzyon uzunluğudur. x_{n1} mesafesi de delinme gerilimi cinsinden şu şekilde ifade edilebilir.

$$x_{n1} = d_{n1} \left[1 - (V/V_{PT})^{1/2} \right] \quad (4.5)$$

Verilen L_{n1} ve d_{n1} için, (x_{n1}/L_{n1}) oranı gerilim arttıkça azalacaktır ve baz taşıyım faktörü ters besleme gerilimi delinme sınırına yaklaştıkça daha da önemli olacaktır.

4.1.2. İleri Yönde Kutuplama

İleri yönde kutuplamada, anot gerilimi katot gerilimine göre pozitifdir, J1 ve J2 eklemi ileri yönde J2 eklemi ters yönde beslenmiştir. Uygulanan gerilimin çoğu J2 eklemi üzerindedir. Üç uçlu bir SCR'nin akım-gerilim karakteristiği iki-transistör modeli kullanılarak açıklanabilir. İki transistör modeli bir pnp ve bir npn transistör yapısının bir araya getirilmesiyle oluşur. pnp transistörünün baz bölgesi ve kollektör bölgesi sırasıyla npn transistörünün kollektörüne ve baz bölgesine bağlanır. Bu durum Şekil 4.6'da açıkça gösterilmiştir.



Şekil 4.6 (a) Üç uçlu tristör için iki transistör yaklaşımının gösterimi. (b) Transistör sembolleri kullanılarak gösterimi. (Sze, 1981)

Pnp transistörünün baz akımı npn transistörünün kollektör akımına eşittir. Npn transistörünün baz akımı ise, kapı akımı ile pnp transistörünün kollektör akımının toplamına eşittir.

4.2. Akım Denklemleri

Herhangi bir pnp transistörü için akım denklemleri;

$$I_C = \alpha I_E + I_{CO} \quad (4.6)$$

$$I_B = (1 - \alpha) I_E - I_{CO} \quad (4.7)$$

olarak verilir. Npn transistörü içinde yukarıdaki akım denklemleri geçerlidir. Fakat akımların yönleri terstir. I_{CO} akımı kollektör-baz ters doyma (kaçak) akımıdır.

Şekil 4.6'da gösterilen pnp transistörü için baz akımı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I_{B1} = (1 - \alpha_1) I_A - I_{CO1} \quad (4.8)$$

npn transistörü için kollektör akımı ise

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CO2} \quad (4.9)$$

gibidir. I_{B1} ve I_{C2} birbirine eşittir. Bu akımlar birbirine eşitlenerek anot akımı bulunabilir.

$$I_K = I_A + I_g \quad (4.10)$$

$$(1 - \alpha_1)I_A - I_{CO1} = \alpha_2 I_K + I_{CO2} \quad (4.11)$$

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_g + I_{CO2} + I_{CO1}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (4.12)$$

α_1 ve α_2 ortak baz akım kazançlarıdır ve ikinci bölümde açıklandığı gibi akımın bir fonksiyonudurlar. $\alpha_1 + \alpha_2$ değeri bire yaklaştıkça tristörden geçen akım artacaktır ve bire eşit olduğu durumda tristör “iletim” durumuna geçecektir.

4.3. Gerilim Denklemleri

SCR yapısında her bir eklem üzerinde oluşan gerilim düşümünü enerji band diyagramı üzerinde inceleyebiliriz. Şekil 4.7’de bir SCR’nin denge durumunda, ileri yönde “kesim” ve “iletim” durumundaki enerji band diyagramı verilmiştir. Denge durumunda, her bir eklemdaki fakirleşme bölgesinde katkılama yoğunlukları yardımıyla hesaplanan temas (*built-in*) gerilimi oluşur. Anota pozitif bir gerilim uygulandığında, J1 ve J3 eklemleri ileri yönde, J2 eklemi ise ters yönde beslenir. Anot-katot gerilim düşümü yaklaşık olarak eklemlerdeki gerilim düşümlerinin toplamı olarak verilir (Sze, 1981).

$$V_{AK} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (4.13)$$

Gerilim arttırılırken, akım da artacak ve α_1 ve α_2 de artışa neden olacaktır. Bu akım kazançlarının toplamlarının bire yaklaşmasıyla cihaz Şekil 4.7(b)’de gösterildiği gibi “iletim” duruma geçecektir. Bu geçiş esnasında, cihaz boyunca akacak akım dış bir direnç yardımıyla sınırlanmalıdır. Aksi halde, gerilim kaynağı yeterince yüksek ise cihaz kendisini imha edecektir. Cihaz “iletim” duruma geçtikten sonra, J2 eklemi de

ileri yönde beslenmiş olacaktır. Bu durum Şekil 4.7(c)'de açıkça gösterilmiştir. Anot-katot gerilimi,

$$V_{AK} = V_1 - |V_2| + V_3 \quad (4.14)$$

olarak verilmektedir. SCR'nin "iletim" duruma geçtiği noktada, $\frac{dV_{AK}}{dI_A} = 0$ durumu sağlanır. Bu duruma $(\alpha_1 + \alpha_2)$ bire eşit olmadan ulaşılır. İki-transistör modeli kullanılarak modellenen bir SCR için akım kazançları ve SCR akımı arasındaki bağıntıyı incelemek için, kapı akımının, I_g , ΔI_g kadar arttırıldığını düşünelim. Anot akımı da ΔI_A kadar artacaktır. Katot akımı, $\Delta I_K = \Delta I_A + \Delta I_g$ olacaktır.

Küçük işaret akım kazançları:

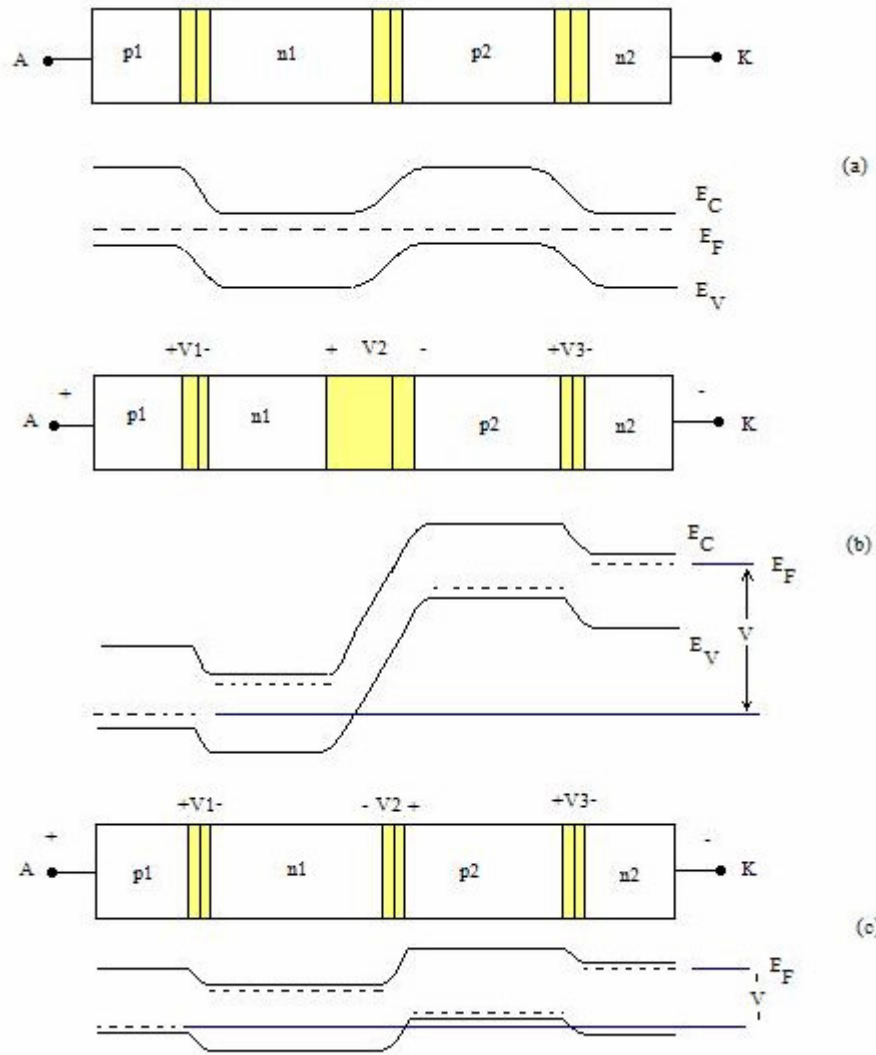
$$\tilde{\alpha}_1 \equiv \frac{dI_C}{dI_A} = \lim_{\Delta I_A \rightarrow 0} \frac{\Delta I_C}{\Delta I_A} \quad (4.15)$$

$$\tilde{\alpha}_2 \equiv \frac{dI_C}{dI_K} = \lim_{\Delta I_K \rightarrow 0} \frac{\Delta I_C}{\Delta I_K} \quad (4.16)$$

J2 eklemünde toplanan deliklerin oluşturduğu akım $\tilde{\alpha}_1 \Delta I_A$, elektronların oluşturduğu akım ise $\tilde{\alpha}_2 \Delta I_K$ olacaktır. J2 ekleminden geçen akımdaki değişimle anot akımındaki değişmeyi eşitleyebiliriz.

$$\Delta I_A = \tilde{\alpha}_1 \Delta I_A + \tilde{\alpha}_2 \Delta I_K \quad (4.17)$$

$$\frac{\Delta I_A}{\Delta I_g} = \frac{\tilde{\alpha}_2}{1 - (\tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2)} \quad (4.18)$$



Şekil 4.7 İleri kutuplama bölgesi için enerji band diyagramı. (a) Denge durumu. (b) İleri yönde “kesim” durumu. (c) İleri yönde “iletim” durumu (Sze, 1981).

$(\alpha_1 + \alpha_2)$ değeri bir olduktan sonra, kapı akımındaki en küçük artış cihazın kararsız davranmasına, anot akımının çok büyük miktarlarda artmasına neden olacaktır. Bunu yukarıdaki denklemden de görebiliriz. Kapı akımının anot akımı üzerindeki etkisini, sıcaklıktaki veya gerilimdeki küçük artışlarda yapabilir.

4.4. İleri Yöndeki Kırılma Gerilimi

İleri yönde kırılma gerilimini, V_{BF} , bulmak için, SCR yapısındaki J2 eklemi boyunca akan asıl delik ve elektron akımlarını incelemek gerekir (Şekil 4.8). J2 eklemi ters

beslenmiş olarak düşünülmektedir. Ayrıca, J2 eklemi boyunca oluşan V_2 gerilimi, taşıyıcılar fakirleşme bölgesi boyunca geçerken çığ çoğalması (*avalanche multiplication*) oluşturacak kadar büyük kabul edilmektedir. V_2 nin bir fonksiyonu olan çığ çoğalması faktörü elektronlar ve delikler için sırasıyla M_n ve M_p olarak gösterilmiştir. Çoğalma nedeniyle fakirleşme bölgesine giren $I_p(x_1)$ akımı $x = x_2$ noktasından $M_p I_p(x_1)$ olarak çıkar. Aynı şekilde x_2 noktasından $I_n(x_2)$ olarak giren elektron akımı $x = x_1$ noktasından $M_n I_n(x_2)$ olarak çıkar. Fakirleşme bölgesi geçen toplam akım,

$$I = M_p I_p(x_1) + M_n I_n(x_2) \quad (4.19)$$

olarak yazılabilir. $I_p(x_1)$ akımı pnp transistörün kollektör akımına, $I_n(x_2)$ ise npn transistörün kollektör akımına eşittir.

$$I_p(x_1) = \alpha_1(I_A)I_A + I_{CO1} \quad (4.20)$$

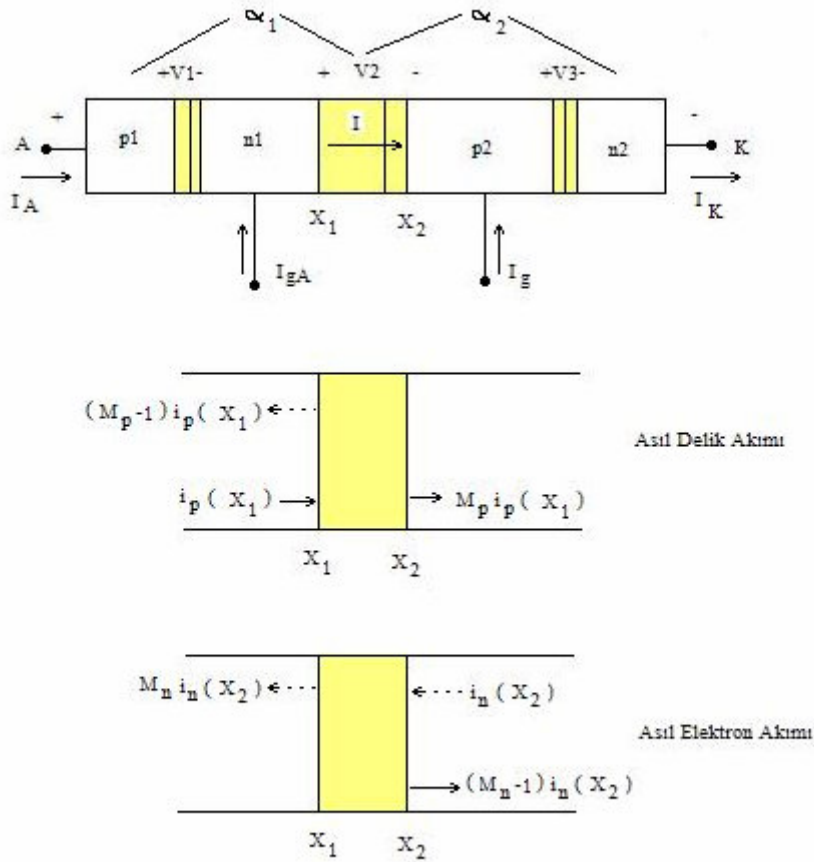
$$I_n(x_2) = \alpha_2(I_K)I_K + I_{CO2} \quad (4.21)$$

$I_p(x_1)$ ve $I_n(x_2)$ akım ifadeleri toplam akım ifadesinde yerine konursa,

$$I = M_p [\alpha_1(I_A)I_A + I_{CO1}] + M_n [\alpha_2(I_K)I_K + I_{CO2}] \quad (4.22)$$

Delik ve elektron çoğalma faktörleri birbirine eşit olarak kabul edildiğinde, $M_p = M_n = M$, toplam akım ifadesi şu şekilde yazılabilir.

$$\frac{1}{M(V_2)} = \frac{\alpha_1(I_A)I_A}{I} + \frac{\alpha_2(I_K)I_K}{I} + \frac{I_{CO1} + I_{CO2}}{I} \quad (4.23)$$



Şekil 4.8 SCR yapısında J2 eklemesinde oluşan asıl delik ve elektron akımları (Sze, 1981).

Cihaza uygulanan kapı akımının sıfır olduğu durumda anot ve katot akımı birbirine eşittir. Bu durumda çoğalma faktörü M 'nin değeri,

$$I_o = I_{CO1} + I_{CO2} \quad (4.24)$$

$$\frac{1}{M(V_2)} = \alpha_1(I) + \alpha_2(I) + I_o / I \quad (4.25)$$

olacaktır. V_B kırılma gerilimine bağlı olarak da,

$$M(V_2) = \frac{1}{1 - (V_2 / V_B)^n} \quad (4.26)$$

şeklinde yazılabilir. İleri yöndeki kırılma gerilimi yukarıdaki iki denklem kullanılarak, $I \gg I_o$ şartı altında,

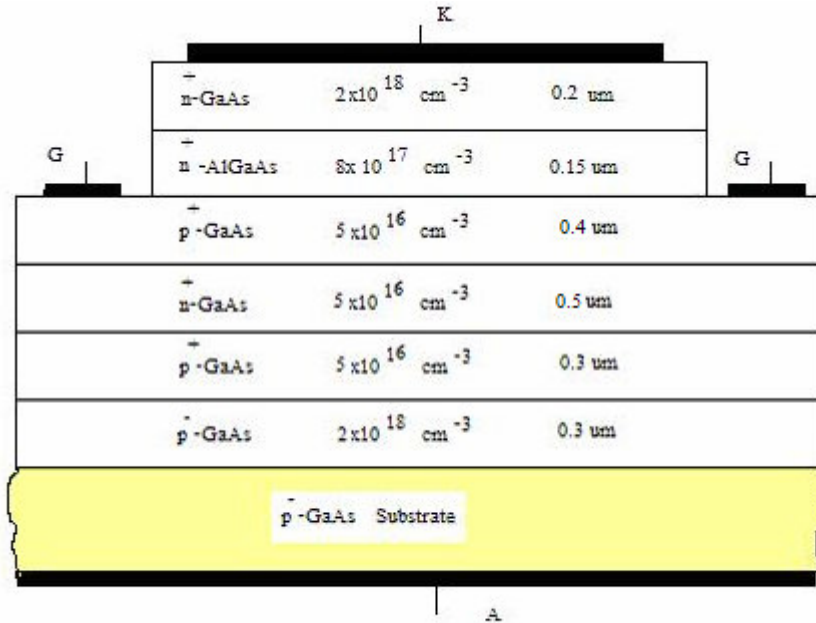
$$M(V_2) = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2} = \frac{1}{1 - (V_{BF} / V_B)^n} \quad (4.27)$$

veya

$$V_{BF} = V_B (1 - \alpha_1 - \alpha_2)^{1/n} \quad (4.28)$$

olarak tanımlanabilir. İleri yöndeki kırılma gerilimi ters yöndeki kırılma gerilimine göre her zaman küçüktür. Fakat, $(\alpha_1 + \alpha_2)$ nın küçük değerleri için yaklaşık olarak eşit olabileceklerdir.

Çalışmada üzerinde çalışılan yapı (şekil 4.9) üzerinde, öncelikle npn transistöründe tünelleme olmadığı durumda cihazın akım-gerilim karakteristiklerinin çıkartılması daha sonraki kısımlarda sunulacak RT-SCR yapısının akım-gerilim karakteristiklerini yorumlamak açısından faydalı olacaktır.



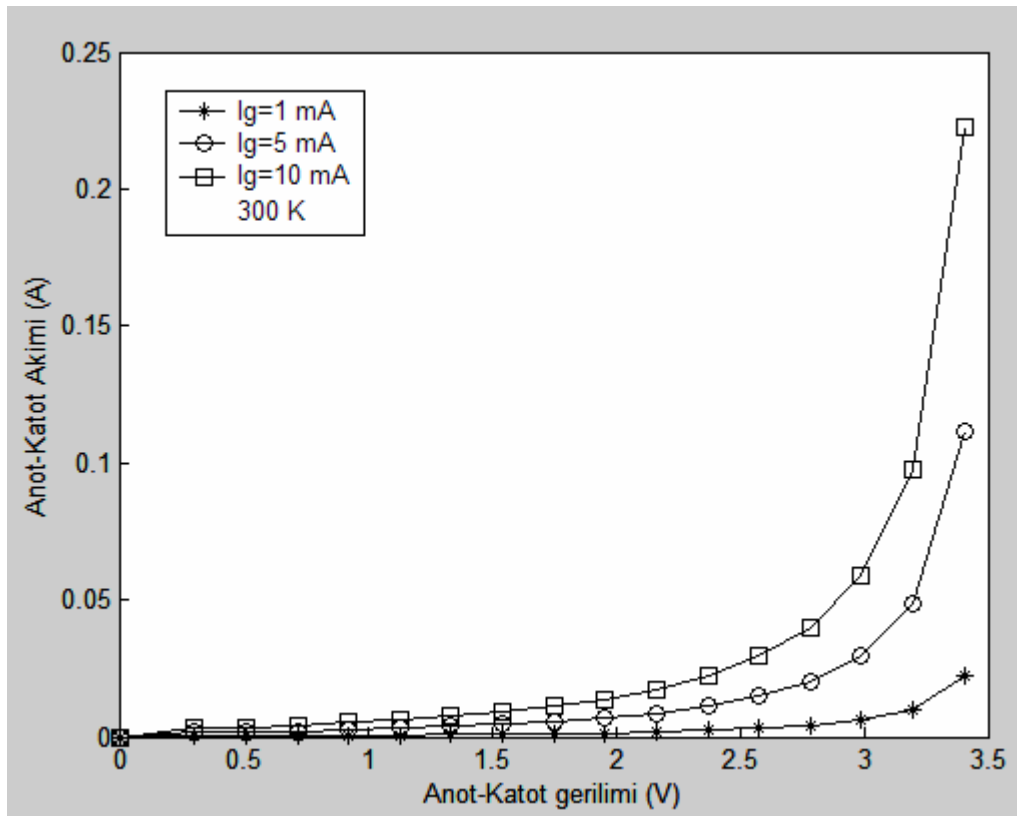
Şekil 4.9 Tünelleme olmadığı durumdaki SCR kesiti.

Kullanılan yapıda, n2 bölgesinin katkı yoğunluğu $8 \times 10^{17} cm^{-3}$, genişliği ise $0.15 \mu m$ alınmıştır. P2 bölgesinin katkı yoğunluğu ve genişliği sırasıyla $5 \times 10^{16} cm^{-3}$ ve 0.4

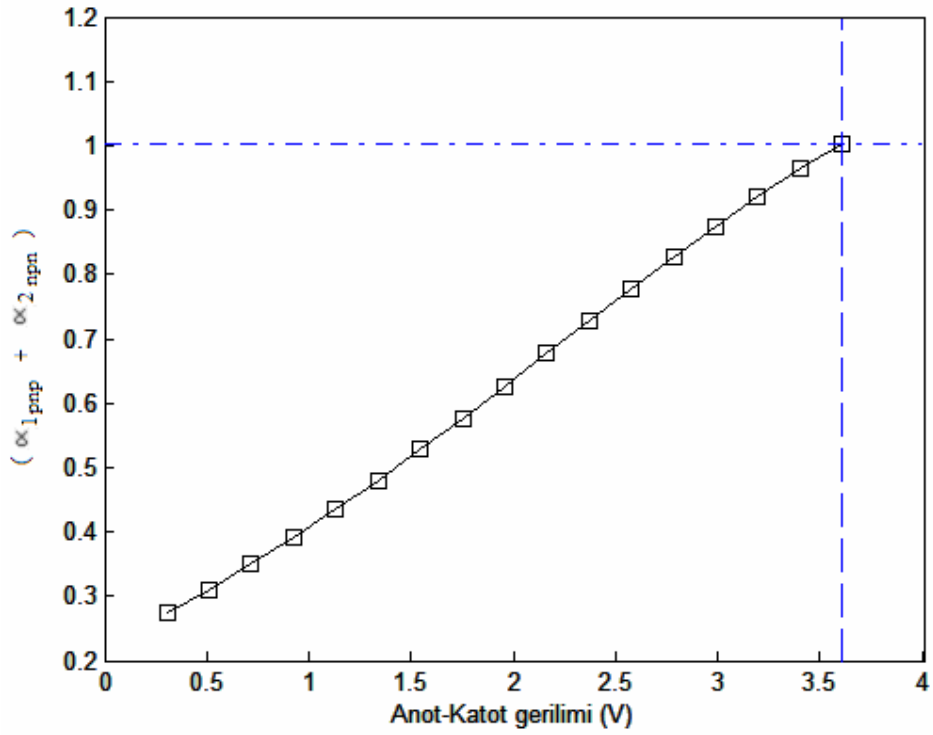
μm , n1 bölgesinin katkı yoğunluğu ve genişliği $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $0.5 \mu m$, p1 bölgesinin katkı yoğunluğu ve genişliği $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ve $0.3 \mu m$ dir.

4.5. Kullanılan Yarıiletken Kontrollü Doğrultucu Yapısına Ait Sonuçlar

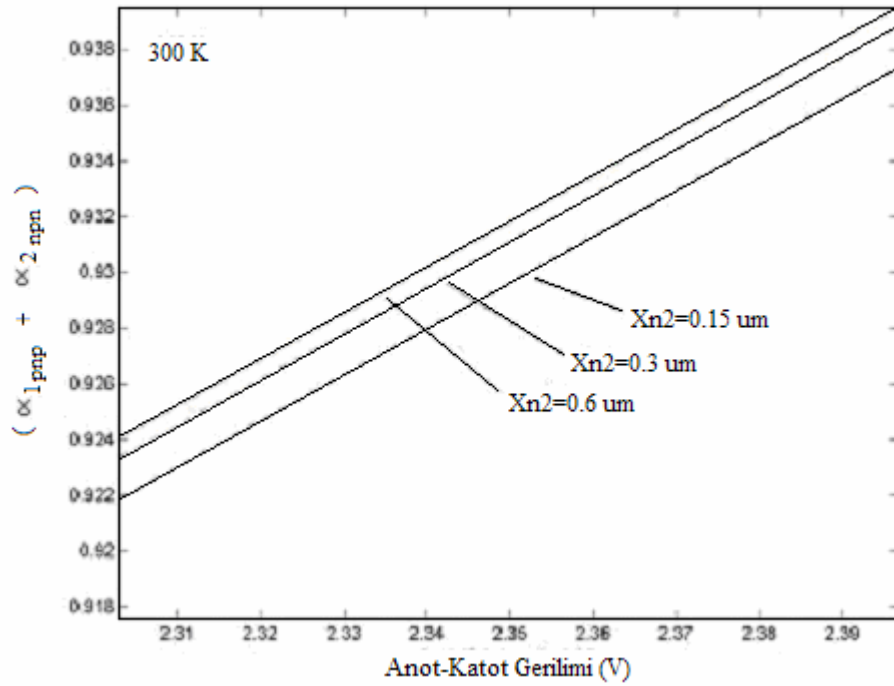
Şekil 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15'te normal bir SCR yapısına ait, farklı parametreler için akım-gerilim karakteristikleri verilmiştir. Sonuçların tamamı 300 K sıcaklıkta hesaplanmıştır. Kapı akımı arttırıldıkça, tristörün iletme geçme gerilimi azalmıştır.



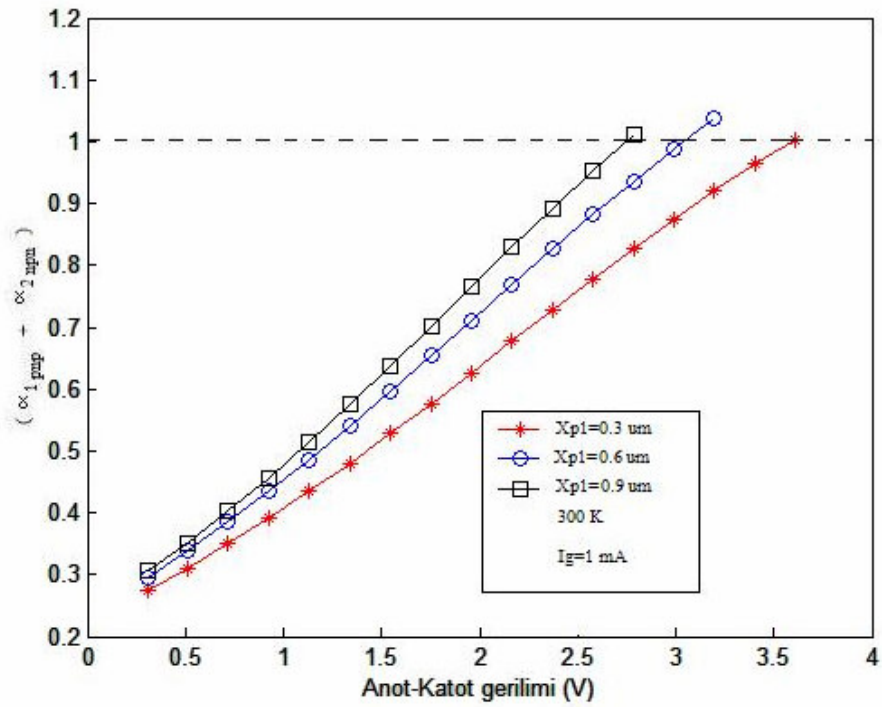
Şekil 4.10 Farklı kapı akımları için SCR yapısının 300 K deki akım-gerilim karakteristikleri.



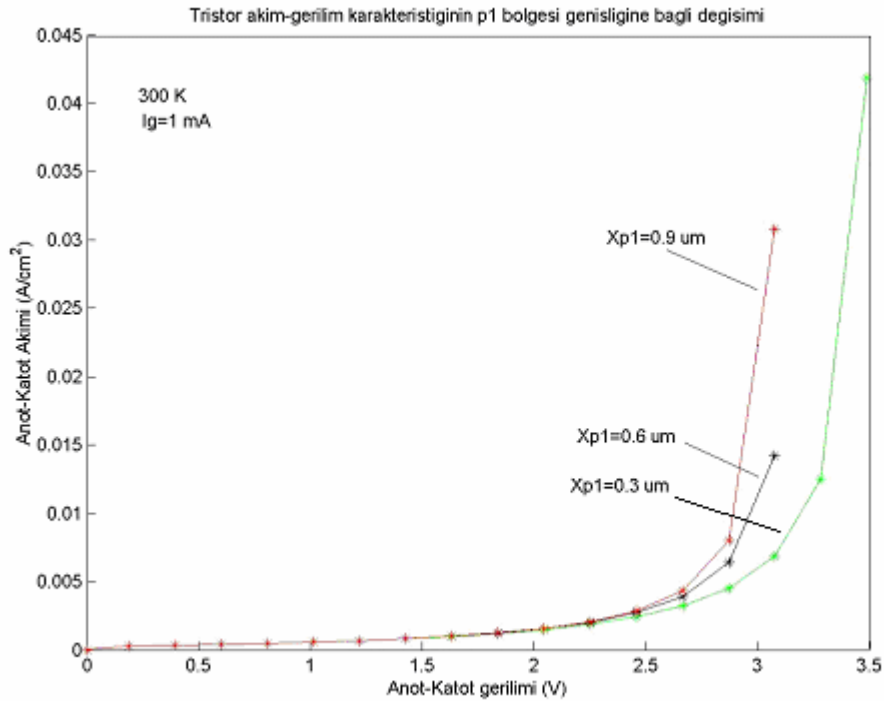
Şekil 4.11 Kullanılan SCR yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin gerilimle değişimi.



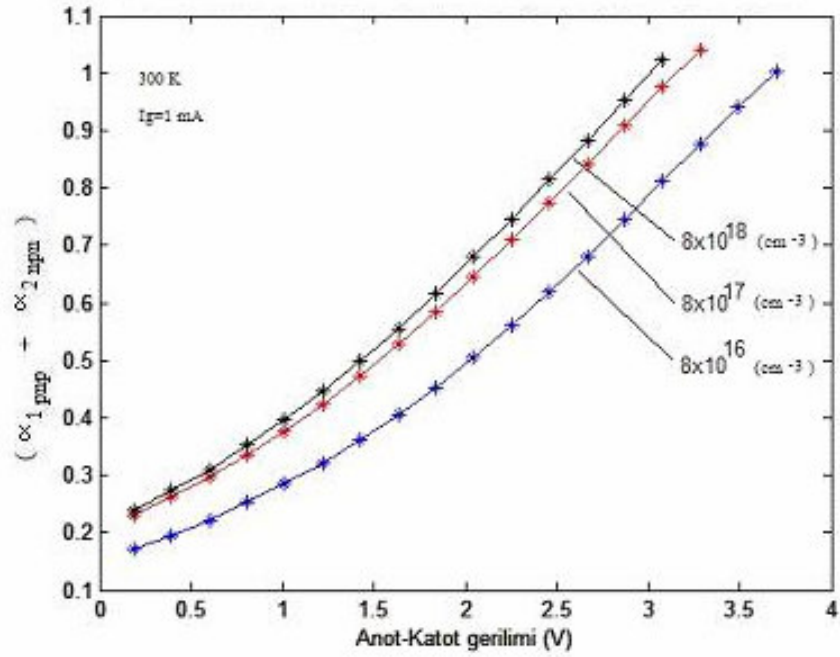
Şekil 4.12 Kullanılan SCR yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin, farklı n2 bölgesi genişliklerinde, gerilimle değişimi.



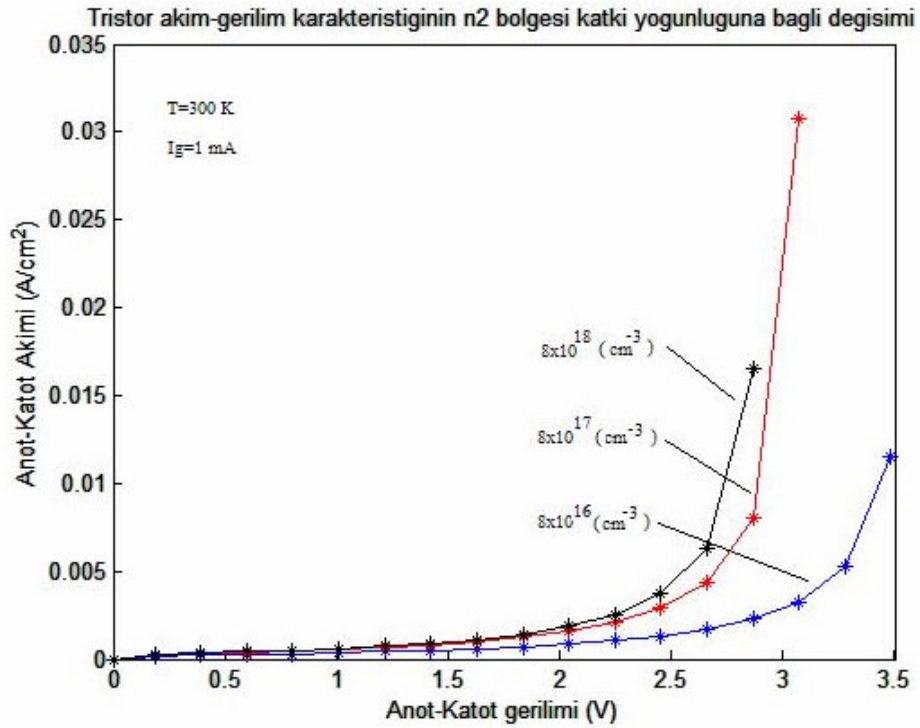
Şekil 4.13 Kullanılan SCR yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin, farklı p1 bölgesi genişliklerinde, gerilimle değişimi.



Şekil 4.14 Kullanılan SCR yapısının, 300 K ve 1 mA kapı akımı uygulandığı durumdaki, farklı p1 bölgesi genişlikleri için akım-gerilim karakteristikleri.



Şekil 4.15 300 K ve 1 mA kapı akımı ve farklı n₂ bölgesi katkı yoğunlukları için, ($\alpha_1 + \alpha_2$) değerinin gerilime bağlı değişimi.



Şekil 4.16 300 K ve 1 mA kapı akımı ve farklı n₂ bölgesi katkı yoğunlukları için, SCR nin akım gerilim karakteristikleri.

Şekil 4.12 ve 4.13'te görüldüğü üzere, n2 ve p1 bölgesi genişliklerinin artırılması tristörün iletme geçme gerilimini düşürmektedir. Yine aynı şekilde n2 bölgesinin katkı yoğunluğunun artırılması da tristörü daha düşük gerilimlerde iletme sokmaktadır.

Resonant tünelleme (RT) olayı cihazların performansları üzerinde 10^{-9} saniye mertebesinde anahtarlama hızları ve çok fonksiyonluluk gibi dramatik gelişmeler sağlamaktadır (Chuang and et al, 2002). Bu çalışmada, resonant tünelleme olayının SCR üzerindeki etkisi araştırılacaktır. Resonant tünelleme SCR (RT-SCR) yapısının modellenmesinde iki transistör modeli kullanılmıştır. Modelde kullanılan transistörlerden birincisi RTBT yapısı, ikincisi geleneksel BJT olarak düşünülmüştür. Bölüm 3'te sunulan RTBT yapısında kullanılan AlGaAs ve GaAs malzemeleri kullanılmıştır. Çalışmada tünelleme olayının SCR yapısına çeşitli uygulamalar için nasıl bir avantaj sağlayacağı araştırılmıştır.

4.6. Resonant Tünelleme Yarıiletken Kontrollü Doğrultucunun Modellenmesi

RT-SCR yapısının modellenmesinde iki-transistör modeli kullanılmıştır. T1 transistörü, resonant tünellemenin olduğu RT transistörüdür. T2 transistörü, geleneksel bir bipolar junction transistörüdür.

4.6.1. Akım Denklemleri

Modellemenin gösterildiği Şekil 4.17'den görüldüğü üzere $I_{E1} = I_{ERT}$ olup tristörden geçen akımdır. Taralı alan olarak gösterilen ve RTBT yapısına ait olan bölge için akım denklemlerini şu şekilde yazabiliriz.

$$I_{CRTT} = I_{C2} \quad (4.29)$$

$$I_{BRTT} = I_{B2} \quad (4.30)$$

$$I_{ERTT} = I_{RTD} \quad (4.31)$$

İki transistör modelinin kullanılması nedeniyle,

$$I_{B1} = I_{CRTT} \quad (4.32)$$

$$I_{C1} = I_{BRTT} + I_g \quad (4.33)$$

olarak yazılabilecektir. Pnp transistörü için baz akımı ifadesi ve npn transistörü için kollektör akımı ifadesi;

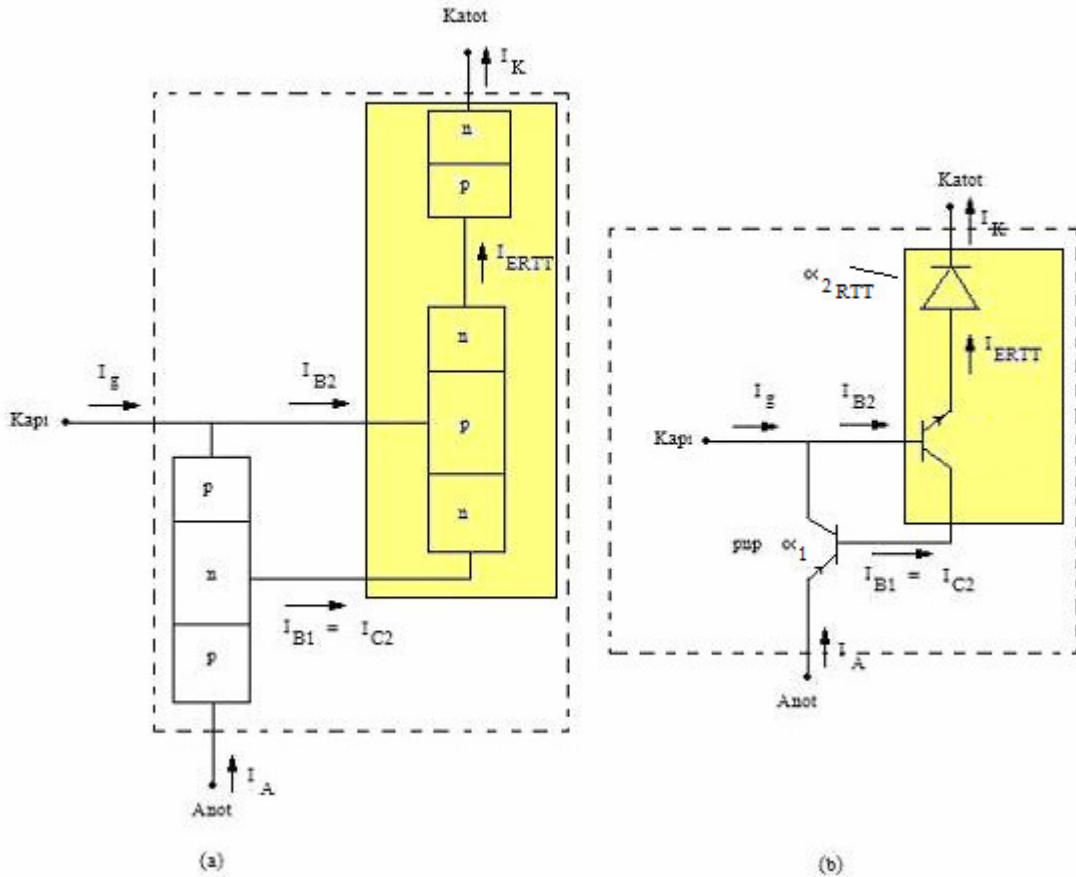
$$I_{B1} = (1 - \alpha_1) I_{ART} - I_{CO1} \quad (4.34)$$

$$I_{CRTT} = \alpha_{2RTT} I_{KRT} + I_{CORTT} \quad (4.35)$$

$$I_{KRT} = I_{ART} + I_g \quad (4.36)$$

(4.34) ve (4.35) nolu denklemler (4.32) nolu denklemde yerine konursa RT-SCR'ye ait anot akımı şu şekilde yazılır.

$$I_{ART} = \frac{\alpha_{2RTT} I_g + I_{CORTT} + I_{CO1}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_{2RTT})} \quad (4.37)$$



Şekil 4.17 Resonant tünelleme tristörüne ait yapılan modellemede akımların gösterimi.

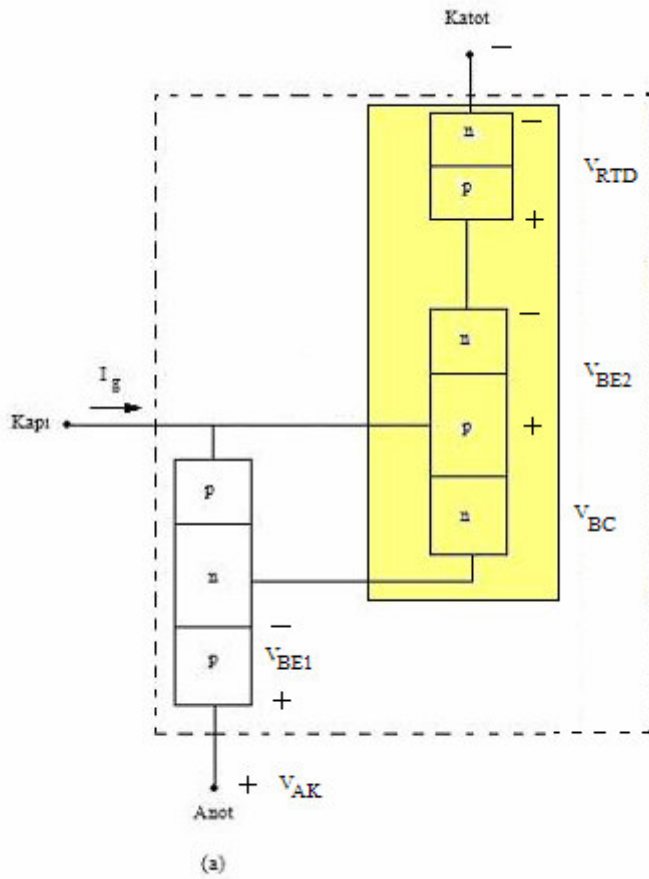
α_{2RTT} ortak baz akım kazancı, rezonant tünelleme yapısı için,

$$\alpha_{2RTT} = \frac{I_{CRTT}}{I_{ERTT}} \quad (4.38)$$

ifadesiyle verilmiştir.

4.6.2. Gerilim Denklemleri

Çalışmada kullanılan RT-SCR modeline ait gerilim düşümlerinin model içerisindeki dağılımları Şekil 4.18’de verildiği gibidir.



Şekil 4.18 Resonant tünelleme tristörüne ait yapılan modellemede gerilimlerin gösterimi.

RTBT için baz emetör arası gerilim düşümü,

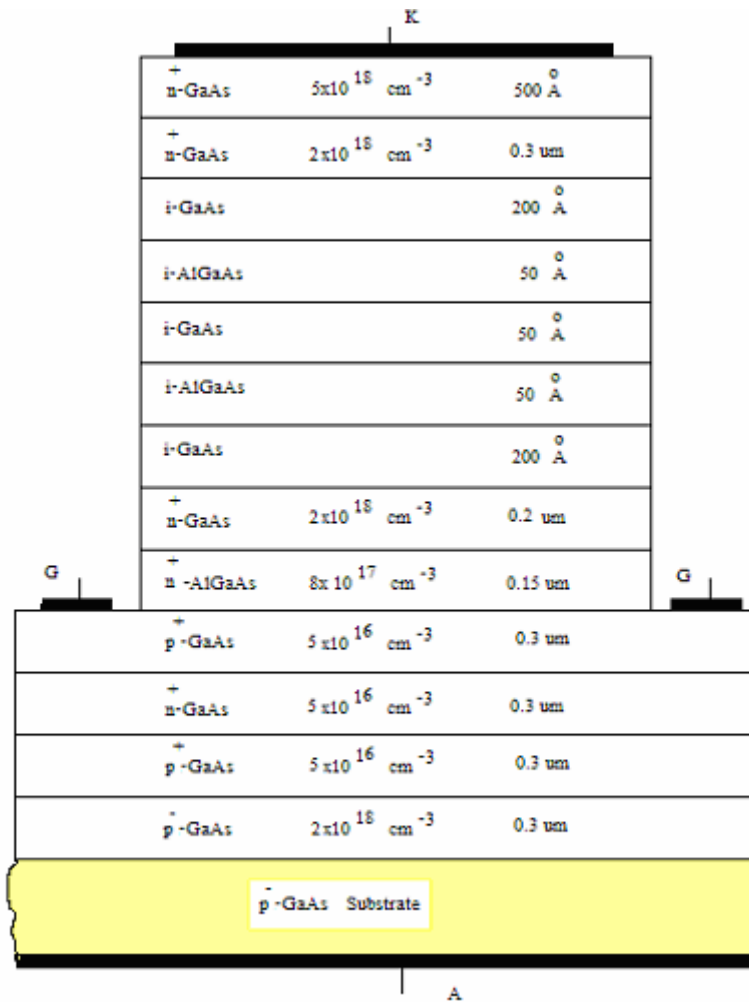
$$V_{BE_{RTT}} = V_{BE1} + V_{RTD} \quad (4.39)$$

olarak alınır. Anot-katot gerilimi ise (4.40) nolu denklemde verildiği gibidir.

$$V_{AK} = V_{BE1} + V_{BC} + V_{BE_{RTT}} \quad (4.40)$$

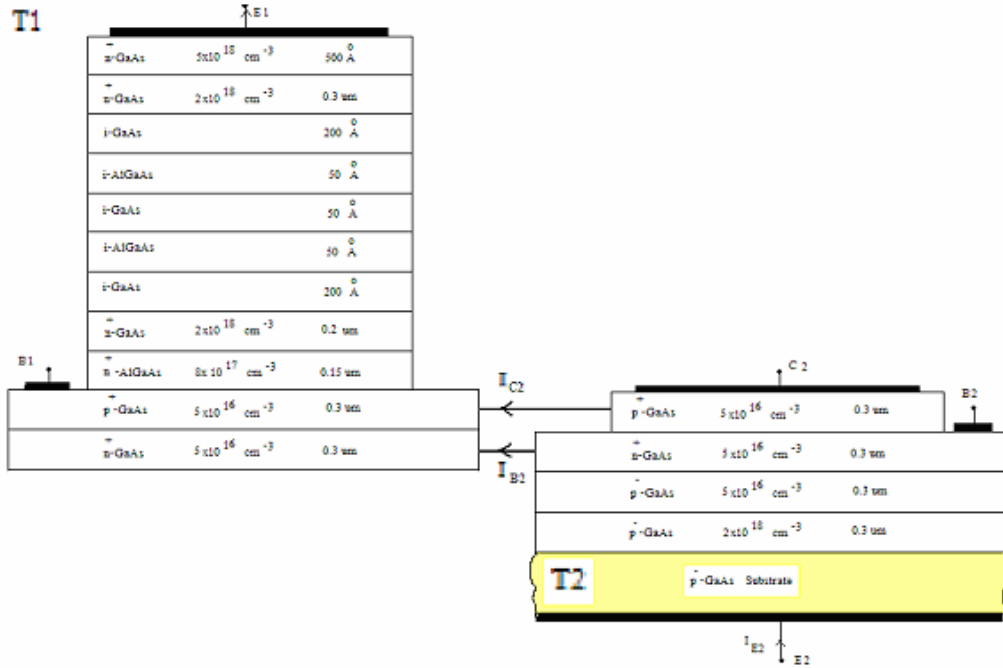
4.7. Modelin Fiziksel Yapısı

RT-SCR'nin fiziksel yapısı tasarlanırken, Wu ve arkadaşları tarafından laboratuvar ortamında üretilmiş olan RTBT yapısı örnek alınmıştır. RT-SCR'nin kesitten görünüşü Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19 Resonant Tünelleme Tristörünün Kesitten Görünüşü.

Çalışmada, katot ve gate arasında tünelleme oluşturulmuştur. Resonant tünelleme SCR yapısı Şekil 4.20’de kesitten görünüşü verilen iki transistör modelini kullanılarak I-V karakteristikleri incelenmeye çalışılacaktır.

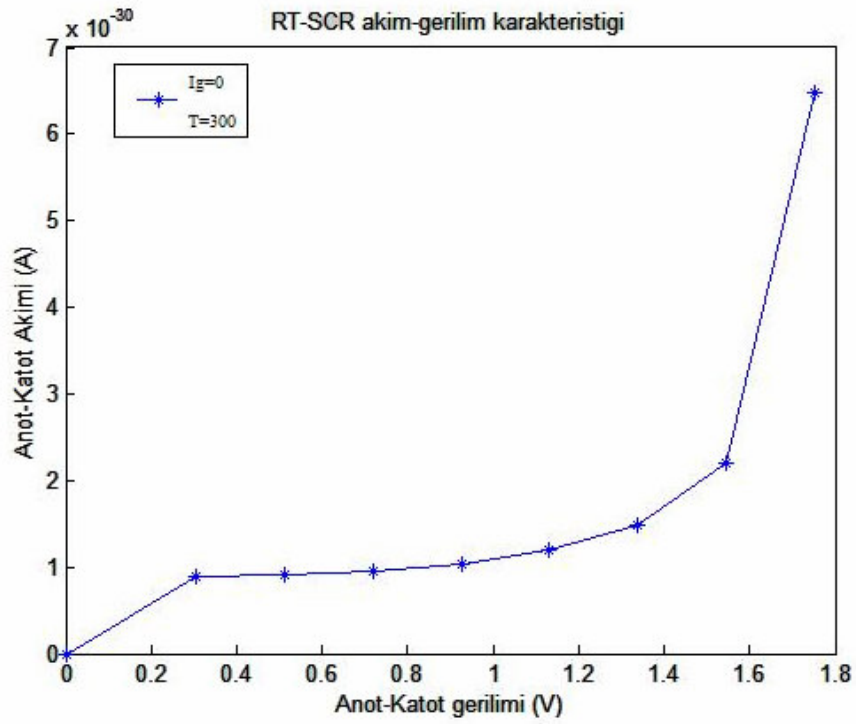


Şekil 4.20 İki-transistör modeli kullanılarak oluşturulmuş RT-SCR nin kesitten görünüşü.

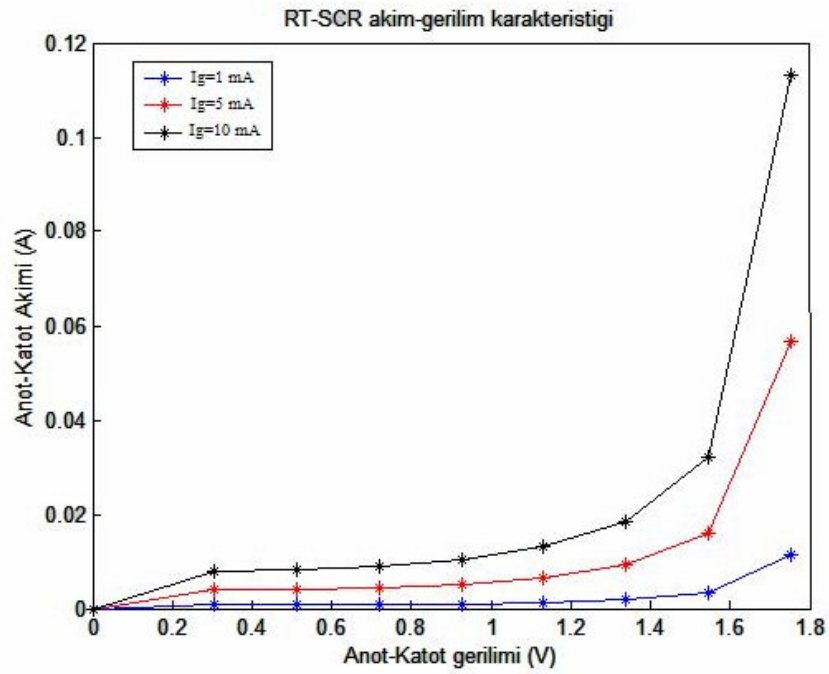
P1 bölgesi $5 \times 10^{16} (cm^{-3})$ GaAs, n1 bölgesi $5 \times 10^{16} (cm^{-3})$ GaAs, p2 bölgesi $5 \times 10^{16} (cm^{-3})$ GaAs ve n2 bölgesi $8 \times 10^{17} (cm^{-3})$ AlGaAs olarak katkılanmıştır. P1, n1, p2 ve n2 bölgelerinin genişlikleri sırasıyla, $0.5 \mu m$, $0.5 \mu m$, $0.4 \mu m$, ve $0.15 \mu m$ seçilmiştir.

4.8. Modele Ait Sonuçlar

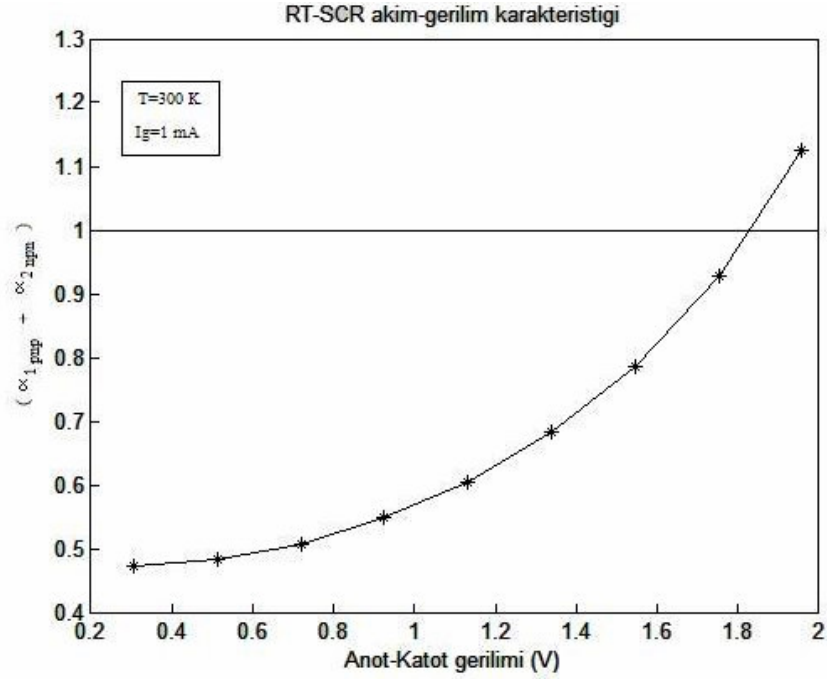
Gerçekleştirilen RT-SCR modeline ait sonuçlar Şekil 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25’te verilmiştir.



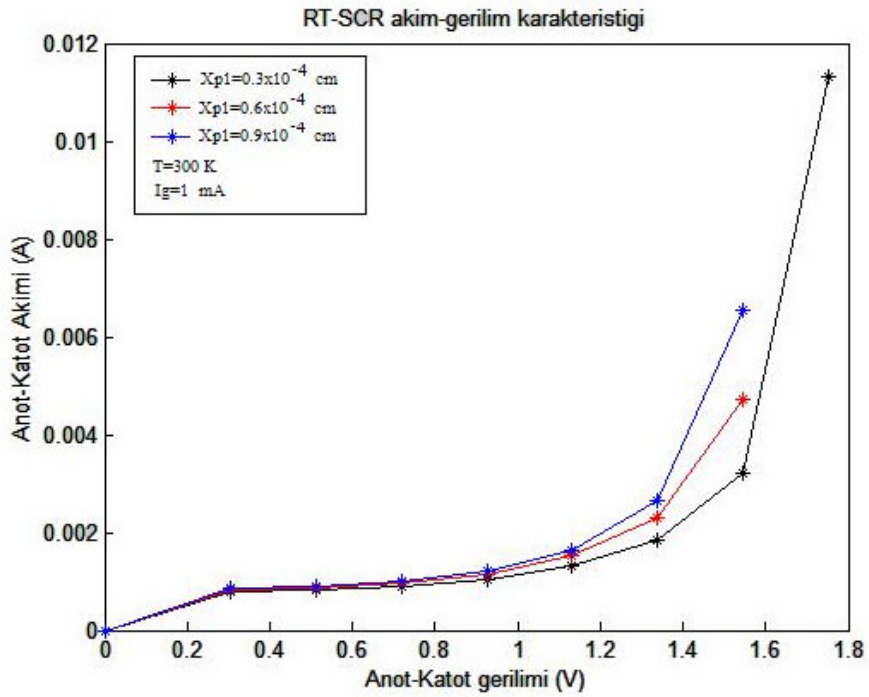
Şekil 4.21 $I_g=0$ için RT-SCR yapısının 300 K deki akım-gerilim karakteristikleri.



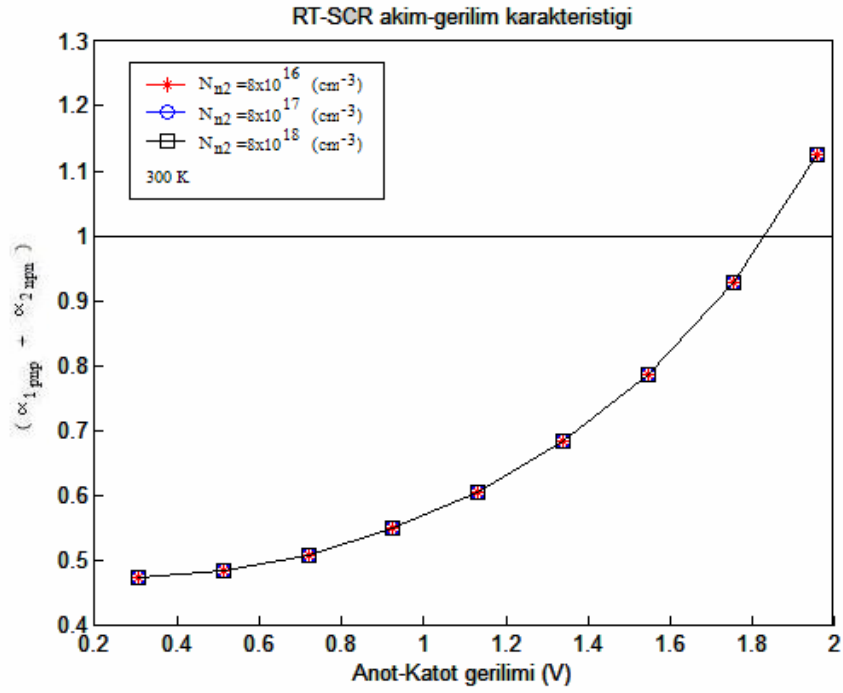
Şekil 4.22 Farklı kapı akımları için RT-SCR yapısının 300 K deki akım-gerilim karakteristikleri.



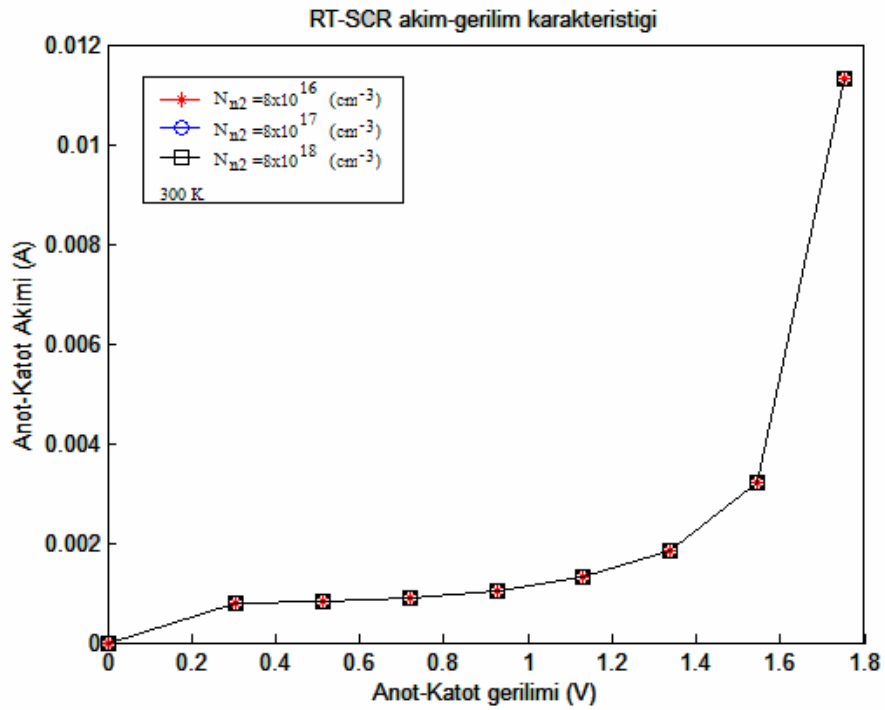
Şekil 4.23 Kullanılan RT-SCR yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin gerilimle değişimi.



Şekil 4.24 Kullanılan RT-SCR yapısındaki akım değerinin, farklı p1 bölgesi genişliklerinde, gerilimle değişimi.



Şekil 4.25 Kullanılan RT-SCR yapısındaki $(\alpha_1 + \alpha_2)$ değerinin, farklı n_2 bölgesi yoğunluklarında, gerilimle değişimi.

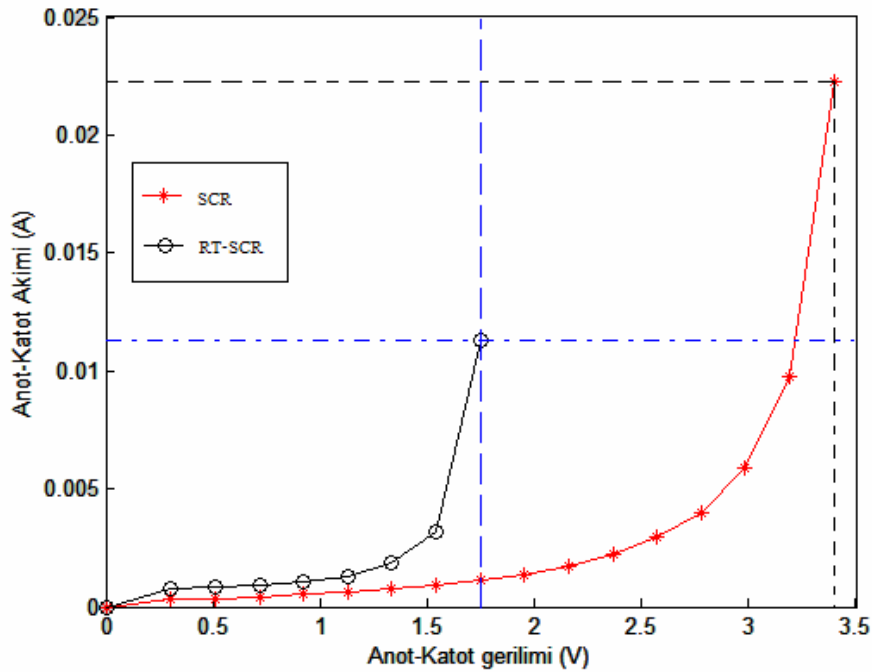


Şekil 4.26 Kullanılan RT-SCR yapısındaki akım değerinin, farklı n_2 bölgesi yoğunluklarında, gerilimle değişimi.

Sonuçlardan, RT-SCR yapısının normal SCR yapısına göre, aynı kapı akımı için daha küçük gerilim değerlerinde ilettime geçtiği görülmektedir. Şekil 4.23'te, $(\alpha_1 + \alpha_2)$ transistörlerin akım kazançları toplamı daha düşük gerilimlerde birin üstüne çıkmakta ve tristörün ilettime geçmesini sağlamaktadır. Normal SCR yapısının tersine, n2 bölgesinin katkı yoğunluğunun değiştirilmesi RT-SCR yapısının ilettime geçme gerilimini Şekil 4.25 ve 4.26'dan da görüldüğü üzere değiştirmemektedir.

4.9. Sonuçların Karşılaştırılması

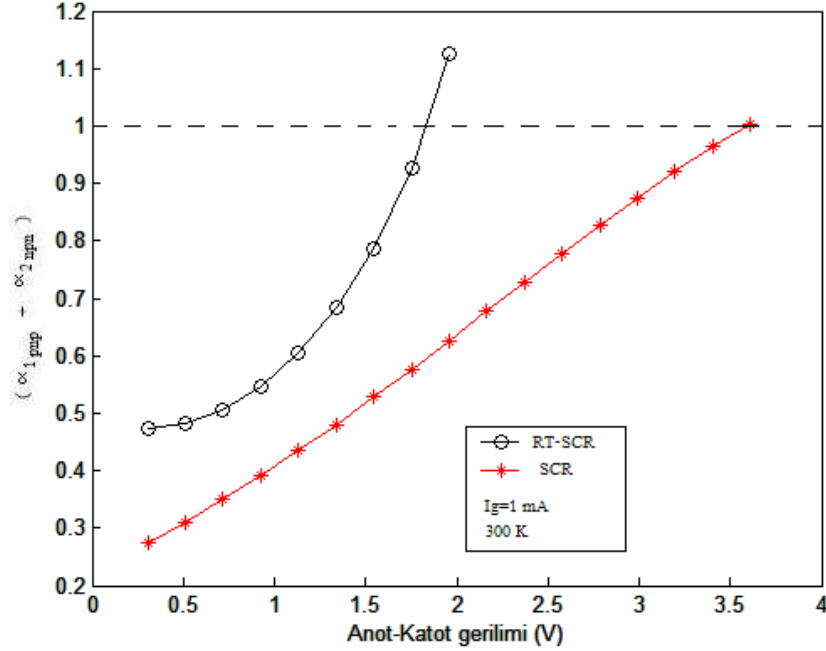
Bu kısımda, çalışmada modellenen normal SCR ve RT-SCR yapılarının sonuçları karşılaştırılacaktır.



Şekil 4.27 Normal SCR ve RT-SCR yapısına ait akım-gerilim karakteristiği.

Şekil 4.27'de görüldüğü üzere, normal SCR yapısı 3.404 Volt değerinde ilettime geçmektedir. Oysa ki, RT-SCR yapısı 1.751 Volt değerinde ilettime geçmektedir. Hesaplamalar her iki yapı içinde 300 K ve 1 mA'lık kapı akımı olduğu durumda yapılmıştır. RT-SCR yapısı normal SCR yapısına göre daha düşük gerilimde ilettime geçmektedir. Şekil 4.28'te verilen iki transistör modelindeki T1 ve T2 transistörlerinin

akım kazançları toplamının, $(\alpha_1 + \alpha_2)$, gerilime bağlı grafiği de Şekil 4.27'deki sonucu doğrulamaktadır.



Şekil 4.28 Normal SCR ve RT-SCR yapısına ait $(\alpha_1 + \alpha_2)$ -gerilim karakteristiği

Resonant tünelleme tristörüne ait $(\alpha_1 + \alpha_2)$ akım kazançları toplamı exponansiyel bir artış göstermektedir. Normal tristöre ait $(\alpha_1 + \alpha_2)$ akım kazançları toplamı ise yaklaşık doğrusal bir artış sergilemektedir. RT-SCR yapısındaki iletme geçme gerilimi normal SCR yapısına göre daha küçüktür.

Bu çalışmada RT-SCR yapısının iletme geçme hızı ile normal SCR yapısının iletme geçme hızı karşılaştırılmamıştır. Ancak tünelleme olayının doğasında olan zaman sabitleri, difüzyon olayından çok daha kısa olduğu için, RT-SCR yapısının normal SCR yapısına göre daha küçük sürelerde iletme geçmesi beklenmektedir.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Resonant Tünelleme cihazlarının kullanımıyla yüksek anahtarlama hızlarına ulaşıldığı daha önceki bölümlerde vurgulanmıştı. Çalışmamızda, henüz üzerinde ayrıntılı olarak çalışılmamış olan RT-SCR yapısının tünelleme olayından nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar MATLAB paket programında yazılan ve ekler bölümünde sunulan yazılımlar yardımıyla yapılmıştır. RTT ve RT-SCR yapısında kullanılan malzemeler, üçüncü bölümde açıklanan avantajlarından dolayı AlGaAs/GaAs olarak seçilmiştir.

İki katlı bariyer ve bir kuyu tabakasından oluşan RTT yapısı için tasarlanan modelin akım-gerilim karakteristikleri, daha önce Wu ve arkadaşları tarafından deneysel olarak çalışılmış olan RTT karakteristikleriyle uyumludur.

RTT yapısına benzer şekilde, iki bariyer ve bir kuyu tabakasından oluşturulmuş RT-SCR yapısı iki-transistör modeli yardımıyla modellenerek çıkış karakteristikleri incelenmiştir. Daha önceden bu konuda benzer veya ilgili bir çalışma olmadığı için sonuçları karşılaştırmak mümkün olmamıştır. Fakat elde edilen sonuçlar, “tünelleme cihazlarıyla yüksek anahtarlama hızlarına ulaşılabilmesi” mantığı ile uyumludur.

p1-n1-p2-n2 yapısına sahip RT-SCR, p1 ve n2 bölgesi genişlikleri arttırıldığında daha küçük gerilimlerde ilettime geçmektedir. Aynı şekilde, n2 bölgesi katkılama yoğunluğu arttırıldığında da tristörün ilettime geçme gerilimi azalmaktadır.

Gerçekleştirilen dizayn, 2-3 volt mertebelerinde çalışmaktadır. Bu gerilim değerleri özellikle yüksek gerilim devrelerinde kullanılan tristörler için küçük değerler olabilir. Şu haliyle dizayn, endüstride geniş bir kullanım alanı bulamayabilir. Fakat çalışmada ulaşılan sonuçlar ışığında dizayn daha elverişli hale getirilebilir.

Çalışmamızda, labaratuvar imkanımızın olmaması nedeniyle, dizayn deneysel olarak çalışılmamıştır. İleriki çalışmalarda, gerçekleştirilen dizaynın deneysel olarak

gerçekleştirilerek sonuçlarının çalışmada sunulan sonuçlar ile karşılaştırılması, modelin güvenilirliği ve üretilebilir olması açısından çok önemlidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Adachi, S. (ed.), 1993, *Properties of Aluminum Gallium Arsenide*, INSPEC, London.
- Adachi, S., 1985, “GaAs, AlAs, and $Al_xGa_{1-x}As$:material parameters for use in research and device applications”, *J.Appl.Phys.*, 58(3), 1-29.
- Asbeck, P.M., 1990, *In High-Speed Semiconductor Devices*, S.M. Sze (ed.), Wiley, New York.
- Bardeen, J. and Brattain, W.H., 1948, “The transistor, a semiconductor triode”, *Phys. Rev.*, No.74, pp.230-231.
- Butcher, P., March, N.H. and Tosi, M.P.(eds.), 1993 “Physics of low-dimensional semiconductor structures”, Plenum Press, New York.
- Capasso, F., Sen, S., Cho, A.Y. and Sivco, D.L., 1988, “Multiple Negative Transconductance and Differential Conductance in a Bipolar-Transistor by Sequential Quenching of Resonant Tunneling”, *Appl. Phys. Lett.*, No.53, pp.1056-1058.
- Chang, L. L., Esaki, L. and Tsu, R., 1974, “Resonant Tunneling in Semiconductor Double Barriers”, *Appl. Phys. Lett.*, No.24, pp.593.
- Chen, T.R., Chen, P.C, Gee, C. and Chaim N.B., 1993, “A high-speed InGaAsP/InP DBF laser with an air-bridge contact configuration”, *IEEE Photon Technology Letters*, No.5, pp 1-3.
- Chuang, H.M., Lin, K.W., Pan H.J., Lee K.M., Liao X.D. and Liu W.C., 2002, “An InGaAs/GaAs resonant tunneling bipolar transistor (RTBT) with multiple negative-differential-resistance (MNDR) phenomena”, *ESSDERC*, pp.219-222.

Clark, K.P., 1997, "Characterization and modeling of the bipolar quantum-well resonant-tunneling transistor", PhD Dissertation, Graduate Studies of Texas A&M University, USA.

Deshpande, M.R., 1997, "Single electron tunneling through discrete semiconductor impurity states", *PhD Dissertation, Graduate School of Yale University, USA.*

Futatsugi, T., Yamaguchi, Y., Ishii, K., Imamura, K., Muto, S., Yokoyama, N. and Shibatomi, A., 1987, "A Resonant-Tunneling Bipolar Transistor (RBT) -A New Functional Device with High Current Gain", *Jpn. J. Appl. Phys.*, No.26, pp.L131-L133.

Hong, W.P., Song, J.I., Palmstrom, C.J., Gaag, B.V.D., Chough, K.B., Hayes, J.R., 1994, "DC, RF, and noise characteristics of carbon-doped base In/InGaAs heterojunction bipolar transistors", *IEEE Trans. Electron Dev.*, No.41, pp.19-25

Lacomb, R., Jain, F., 1996, "A self-consistent model to simulate large-signal electrical characteristics of resonant tunneling bipolar transistors", *Solid State Electronics*, Vol.39, No. 11, pp 1621-1627.

Levi, A.F.J., Nottenburg, R.N., Chen, Y.K. and Panish, M.B., 1990, "Nonequilibrium electron transport in bipolar devices" *Physics Today*, Vol. 43, pp. 58-64 (1990).

Li, Y., 2000, "Innovative GTO thyristor based switches through unity gain turn-off", PhD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Liou, J., Parab, K., Huang, C., Bayraktaroğlu, B. and Williamson, D., 1994, "Base and collector leakage currents and their relevance to the reliability of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors," Proc. of 32nd Annual International Reliability Physics Symposium, San Jose, CA.

Nag, B.R., 2000, *Physics of Quantum Well Devices*, Boston Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Nozu, T., Tsuda, K., Asaka, M., Obara, M., 1992, "Reliability characteristics of mesa-etched isolated emitter structure AlGaAs/GaAs HBTs with be-doped base", 14th Annual GaAs IC Symposium, Miami Beach, FL, pp.157-60.

Neamen, D.A., 2003, *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles Third Edition*, International Edition, McGraw-Hill.

Pan, H-J., Feng, S.C., Wang, W.C., Lin, K.W., Yu, K.H., Wu, C.Z., Laih, L.W., Liu, W.C., 2001, "Investigation of an InGaP/GaAs resonant tunnelling heterojunction bipolar transistor", *Solid State Electronics*, No.45, pp.489-494.

Pierret, R. F., 1996, *Semiconductor Device Fundamentals*, Reading MA, Addison-Wesley.

Prakash D., Jalali, B., Xie, Y.M., Fetterman, H.R., Humphrey, D.A., Kapre, R.R., Tsang, W.T., 1994, "Integrated waveguide/HBT technology for mm-wave optoelectronic applications", Device Research Conference, University of Colorado, pp.20-22.

Ren, F., 1994, "Fabrication Techniques for Self-Aligned GaAs-Based HBTs and Submicron Gate Length FETs," *International Journal of Modern Physics B*, Vol.8, No. 16, pp.2211-2243.

Streetman, B.G., 1995, *Solid State Electronic Devices*, N.J. Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Sugahara, H., Nagano, J., Nittono, T., Ogawa, K., 1993, "Improved Reliability of AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors With a Strain-Related Base," *IEEE GaAs IC Symposium Digest*, San Jose, CA, pp. 115-118.

Sze, S.M., 1981, *Physics of Semiconductor Devices*, Second Edition, Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill, New Jersey.

Tsu, R. and Esaki, L.,1973, "Tunneling in a finite superlattice", *Appl. Phys. Lett.* , No.22, pp.562.

Weusbuch, C., and Vinter B., 1991, *Quantum Semiconductor Structures*,. Academic Press. San Diago.

Wu, J.S., Chang, C.Y., Lee, C.P., Chanh, K.H., Liu, D.G., Liou, D.C.,1991, "Characterization of Improved AlGaAs/GaAs Resonant Tunneling Heterostructure Bipolar Transistors", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 30, No.2A, pp. L160-L162.

Yamada, F.M., Oki, A.K., Streit, D.C., Umemoto, D.K., Tran, L.T., Najita, K., Kessler, J.R., Lopez, G., Saito, Y. and Rezek, E.A., 1995, "Reliability Performance of Components and ICs From a Production GaAs HBT Process", GaAs Reliability Workshop, sponsored by JEDED JC-14.7 Committe on GaAs, October 29, 1995, San Diego, CA.

Yokoyama, N., Imamura, K., Muto, S., Hiyamizu, S., and Nishi, H., 1985, "A new functional resonant tunneling hot electron transistor (RHET)", *Jpn. J. Appl. Phys.*, No.24, pp.853.

ESSDERC, 2002, "Pseudo Dynamic Gate Design based on the Resonant Tunneling-Bipolar Transistor (RTBT)", ESSDERC.

Bigelow, J.M., Leburton, J.P.,1994, "Self-Consistent Modelling of Resonant Interband Tunneling in bipolar Tunneling Field-Effect Transistors", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.41, No.2, pp.125-131.

Cheng, S.Y., Tsai, J.H., Chang, W.L., Pan, H.J., Shie, Y.H., Liu W.C., 1999, "Investigation of an InGaP/GaAs resonant-tunneling transistor (RTT)", *Solid-State Electronics*, Vol.43, pp.755-760.

Tsai, J.H., 2001, "Quantized Resonant-Tunneling Phenomena of AlGaAs/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.40, pp.5865-5870.

Chou, Y.C., Ferro R. "V. Heterojunction Bipolar Transistors", 2005, Web Site: parts.jpl.nasa.gov/mmic/3-V.PDF.

EKLER

- EK-1** Tünelleme fonksiyonunu hesaplayan Matlab Programı
- EK-2** Resonant tünelleme diyodunun (RTD) I-V karakteristiğini hesaplayan Matlab programı
- EK-3** Resonant tünelleme transistörünün (RTT) I-V karakteristiğini hesaplayan Matlab programı
- EK-4** Silikon kontrollü doğrultucunun (SCR) I-V karakteristiğini hesaplayan Matlab programı
- EK-5** Resonant tünelleme silikon kontrollü doğrultucunun (RT-SCR) I-V karakteristiğini hesaplayan Matlab programı.

EK-1 Tünelleme fonksiyonunu hesaplayan Matlab Programı

```
%-----tunelleme.m-----%
% Bu program tunelleme fonksiyonunu hesaplayarak enerjiye bagli olarak grafigini cizer.
%-----%

clear all
h=1.05458*10^-34;
Uo=0.01;
a=0;
m0=9.1*10^(-31);
d=[0 0.5*10^(-9) 0.5*10^(-9) 0.5*10^(-9)];
m=[0.042*m0 0.08*m0 0.042*m0 0.08*m0];
alfa_p=[0 0.571 1.167 0.571] ;
p=3;
max=[0 0];
berra=0;
EE=Uo:0.01:0.6;
matrix=zeros(length(EE),2);
for E=EE,
    V_p(1)=Uo-E/2; V_p(2)=-E; V_p(3)=Uo-3*E/2; V_p(4)=-2*E;
    matris=[1 0; 0 1];
    berra=berra+1;
    k=[0 0 0 0];
    r=[0 0 0];
    k(1)=((2*m(1)/(h^2))*(E-V_p(1))*(1+alfa_p(1)*(E-V_p(1)))-
    (a*1.3*10^19)^2)^(1/2);
    k(2)=((2*m(2)/(h^2))*(E-V_p(2))*(1+alfa_p(2)*(E-V_p(2)))-
    (a*1.3*10^19)^2)^(1/2);
    k(3)=((2*m(3)/(h^2))*(E-V_p(3))*(1+alfa_p(3)*(E-V_p(3)))-
    (a*1.3*10^19)^2)^(1/2);
    k(4)=((2*m(4)/(h^2))*(E-V_p(4))*(1+alfa_p(4)*(E-V_p(4)))-
```

```

(a*1.3*10^19)^2)^(1/2);
r(1)=(m(1)/m(1+1))*(1+2*alfa_p(1)*(E-V_p(1)))/(1+2*alfa_p(1+1)*(E-
V_p(2)))^(1/2);
r(2)=(m(2)/m(2+1))*(1+2*alfa_p(2)*(E-V_p(2)))/(1+2*alfa_p(2+1)*(E-
V_p(3)))^(1/2);
r(3)=(m(3)/m(3+1))*(1+2*alfa_p(3)*(E-V_p(3)))/(1+2*alfa_p(3+1)*(E-
V_p(4)))^(1/2);
for j=1:1:p;
    mat=[exp(i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
    M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))]; (1-(r(j)*k(j+1)/k(j)))
    (1+(r(j)*k(j+1)/k(j))]);
    matris=matris*mat*M;
end
Tu=1/matris(1,1);
son=(conj(Tu)*Tu) ;
disp([ berra E son]);
matrix(berra,1)=E;
matrix(berra,2)=son;
if son>max(1)    max=[son E];
end
max;
plot(matrix(:,1),matrix(:,2),'b*')
hold on
xlabel('E(eV)')
ylabel('conj(Tu)*Tu = T(E)')
title('Tunelleme olasiligi-E grafigi')
end

```


EK-2 Resonant tünelleme diyodunun (RTD) I-V karakteristiğini hesaplayan Matlab programı

```
%-----rtd.m-----%
%-----Resonant tunelleme diyodunun akim-gerilim karakteristigi-----%

clear all
h=1.05458*10^-34;
k_boltzman=1.38066*10^-23;
m0=9.1*10^(-31); q=1.602*10^-19;
x=0.3;
NA=2*10^17; ND=2*10^17;
Nv=7*10^18; Nc=4.7*10^17;
T=300; p=3; a=0;
adim=2.33*10^-3;
Eg_GaAs=1.425;
Eg_AlGaAs=1.424+1.247*x;
m_GaAs=0.067;
m_AlGaAs=(0.067+0.083*x);
Ef_Ev=(k_boltzman*T/q)*log(Nv/NA);
Ec_Ef=(k_boltzman*T/q)*log(Nc/ND);
Ef_1=Eg_GaAs
Ef_2=Eg_AlGaAs-((Eg_AlGaAs-Eg_GaAs)/2)-Ec_Ef;
Ef=((Ef_2+Ef_1)/2)
alfa_pGaAs=((1-m_GaAs)^2)/Eg_GaAs;
alfa_pAlGaAs=((1-m_AlGaAs)^2)/Eg_AlGaAs;
d=[0 150*10^(-9) 10*10^(-9) 150*10^(-9)];
m=m0.*[m_GaAs m_AlGaAs m_GaAs m_AlGaAs];
alfa_p=[alfa_pGaAs alfa_pAlGaAs alfa_pGaAs alfa_pAlGaAs] ;
Uo=0.01;
baslangic=0;
bitis=7;
```

```

arttirim=70*10^-3;
berra=0
vv=baslangic:arttirim:bitis;
matrix=zeros(length(vv),2);
for V=vv,
    berra=berra+1;
    V_p(1)=Uo-V/2; V_p(2)=-V; V_p(3)=Uo-3*V/2; V_p(4)=-2*V;
    %Ef=Ef_1+((Ef_2-Ef_1)/((bitis-baslangic)/arttirim))*(berra-1);
    Ef=exp(log(Ef_1))+((exp(log(Ef_2))-exp(log(Ef_1)))/((bitis-
    baslangic)/arttirim))*(berra-1);
    if V>= Ef
        %'***** 1 *****'
        durum12=0;
        for E=0:adim:Ef,
            matris=[1 0; 0 1];
            for j=1:1:p
                k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2) ;
                r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
                V_p(j+1)));
                k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-V_p(j+1))))^(1/2);
                mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
                M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))]; (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))
                (1+(r(j)*k(j+1)/k(j))]);
                matris=matris*mat*M;
            end
            S=(Ef-E);
            disp([1 v E]);
            Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
            durum12=durum12+son*S*adim;
        end
    end
    akim1=durum12;

```

```

matrix(berra,1)=V;
matrix(berra,2)=akim1;
disp([berra v akim1]);
%'***** 1 *****'
else
%'***** 2 *****'
durum22=0;
for E=0:adim:Ef-V,
matris=[1 0; 0 1];
for j=1:1:p;
k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2);
r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
V_p(j+1)));
k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-
V_p(j+1))))^(1/2);
mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))); (1-(r(j)*k(j+1)/k(j)))
(1+(r(j)*k(j+1)/k(j)))]);
matris=matris*mat*M;
end
disp([2 v E]);
S=(Ef-E);
Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
durum22=durum22+son*S*adim;
end
akim21=V*durum22;
%'***** 2 *****'
%'***** 3 *****'
durum32=0;
for E=Ef-V:adim:Ef,
matris=[1 0; 0 1];

```

```

for j=1:1:p
    k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2);
    r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
    V_p(j+1)));
    k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-
    V_p(j+1))))^(1/2);
    mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
    M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j)) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))); (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))
    (1+(r(j)*k(j+1)/k(j))]);
    matris=matris*mat*M;
end
disp([3 v E]);
S=(Ef-E);
Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
durum1_sondegeri=son;
durum32=durum32+son*S*adim;
end
akim22=durum32;
%'*****' 3 '*****'
akim2=akim21+akim22;
matrix(berra,1)=V;
matrix(berra,2)=akim2;
disp([berra V akim2]);
end %if sonu%
end %for sonu%
alan=0.7505*(10^-6)*0.15*(10^-6);%m^2%
katsayi=(q)*m0*(k_boltzman^2)*(T^2)/(2*pi^2*h^3)
plot(matrix(:,1),alan*katsayi*matrix(:,2),'-g*')
title('Resonant tunelleme diyodunun akim-gerilim karakteristigi')
xlabel('Gerilim (V)');ylabel('Akim (A)');hold on

```

EK-3 Resonant tünelleme transistörünün (RTT) I-V karakteristiğini hesaplayan Matlab programı

```
%-----rttyeni.m-----%  
%-----Rtt akim-gerilim karakteristigi-----  
clear all  
h=1.05458*10^-34;  
k_boltzman=1.38066*10^-23;  
m0=9.1*10^(-31);  
q=1.602*10^-19;  
x=0.3;  
NA=2*10^18;  
ND=2*10^18;  
Nv=7*10^18;  
Nc=4.7*10^17;  
T=300;  
p=3;  
a=13*10^-3;  
adim=2.33*10^-3;  
ni=1.79*10^6;  
Dn=110;  
Dp=6;  
lifetime_p=5*10^-9;  
lifetime_n=10*10^-9;  
Lp=(Dp*lifetime_p)^(1/2);  
Ln=(Dn*lifetime_n)^(1/2);  
pno=ni^2/ND;  
npo=ni^2/NA;  
Js=10^-15  
Eg_GaAs=1.425;  
Eg_AlGaAs=1.424+1.247*x;
```

```

m_GaAs=0.067;
m_AlGaAs=(0.067+0.083*x);
Ef_Ev=(k_boltzman*T/q)*log(Nv/NA);
Ec_Ef=(k_boltzman*T/q)*log(Nc/ND);
%Ef_1=((Eg_AlGaAs-Eg_GaAs)/2)+Ef_Ev;
%Ef_2=Eg_AlGaAs-((Eg_AlGaAs-Eg_GaAs)/2)-Ec_Ef;
Ef_1=Eg_GaAs
Ef_2=Eg_AlGaAs
alfa_pGaAs=((1-m_GaAs)^2)/Eg_GaAs;
alfa_pAlGaAs=((1-m_AlGaAs)^2)/Eg_AlGaAs;
d=[0.5*10^(-9) 10*10^(-9) 15*10^(-9)];
m=m0.*[m_GaAs m_AlGaAs m_GaAs m_AlGaAs];
alfa_p=[alfa_pGaAs alfa_pAlGaAs alfa_pGaAs alfa_pAlGaAs] ;
ust_sinir=6;
alt_sinir=0.01;
artirim=0.1;
katsayi=(q)*m0*(k_boltzman^2)*(T^2)/(2*pi^2*h^3);
alan=0.7505*(10^-6)*0.15*(10^-6);%m^2%
Is=q*alan*((Dn*np0/Ln)+(Dp*pno/Lp))
berra=0
Uo=0.01;
%-----%
%-----RTT kisminin baslangici-----%
NE=8*10^17;      %n-AlGaAs 0.15um%
NB=2*10^18;      %p-GaAs 0.3um%
NC=5*10^16;      %n-GaAs 0.3um%
WE=0.15*10^-4;  %cm-emiter width%
WB=0.3*10^-4;   %cm-base width%
WC=0.3*10^-4;   %cm-collector width%
nE=NE;           %minority carrier density in the emiter%
pB=NB;           %minority carrier density in the base%

```

```

lifetimeB=5.63*10^-9;%s-minorty carrier lifetime in the base%
lifetimeE=5*10^-9; %s-minorty carrier lifetime in the emiter%
DB=63.96; %cm^2s^-1--minorty carrier diffusion coefficient in the base%
DE=6; %cm^2s^-1--minorty carrier diffusion coefficient in the emiter%
LB=(lifetimeB*DB)^(1/2); %cm-diffusion lenght of electrons in the base%
LE=(lifetimeE*DE)^(1/2); %cm-diffusion lenght of electrons in the emiter%
W=0.3*10^-4;
emiter_efficiency=1/(1+(((nE*DE*LB)/(pB*DB*LE))*tanh(W/LB)));
hFE=emiter_efficiency/(1-emiter_efficiency);
Vt=k_boltzman*T/q;
alfaF=0.9;
alfaR=0.2;
betaF=alfaF/(1-alfaF);
betaR=alfaR/(1-alfaR);
Rc=5;
Rb=16;
IShbt=10^-14;
Vce=1.5;
%-----%
V_rtd=alt_sinir:artirim:ust_sinir;
matrix=zeros(length(V_rtd),2);
for V=V_rtd,
    berra=berra+1;
    V_p(1)=Uo-V/2; V_p(2)=-V; V_p(3)=Uo-3*V/2; V_p(4)=-2*V;
    Ef=Ef_1+((Ef_2-Ef_1)/((ust_sinir-alt_sinir)/artirim))*(berra-1);
    if V>= Ef
        %'***** 1 *****'
        durum12=0;
        for E=0:adim:Ef,
            matris=[1 0; 0 1];
            for j=1:1:p

```

```

k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2) ;
r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
V_p(j+1)));
k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-V_p(j+1))))^(1/2);
mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))); (1-(r(j)*k(j+1)/k(j)))
(1+(r(j)*k(j+1)/k(j)))]];
matris=matris*mat*M;

end

S=(Ef-E);
disp([1 v E]);
Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
durum12=durum12+son*S*adim;

end

akim1=durum12*katsayi*alan;
matrix(berra,1)=V;
matrix(berra,2)=akim1;
I_ERTT=akim1;
matrix(berra,3)=I_ERTT;
V_behbt=Vt*log((((alfaF*I_ERTT)/ISHbt)+alfaF+1)/(1-alfaF*exp(-Vce/Vt)));
V_BERTT=V+V_behbt;
matrix(berra,4)=V_BERTT;
V_bchbt=V_behbt-Vce;
I_Bhbt=ISHbt*(((exp(V_behbt/Vt)-1)/betaF)+((exp(V_bchbt/Vt)-1)/betaR));
I_BRTT=I_Bhbt;
matrix(berra,5)=I_BRTT;
I_Chbt=ISHbt*((exp(V_behbt/Vt)-1)-(exp(V_bchbt/Vt)-1)/alfaR);
I_CRTT=I_Chbt;
matrix(berra,6)=I_CRTT;
I_Econtrol=I_CRTT+I_BRTT;
matrix(berra,7)=I_Econtrol;

```



```

disp([berra V akim1 I_ERTT V_BERTT I_BRRTT I_CRTT I_Econtrol]);
%'***** 1 *****'
else
%'***** 2 *****'

durum22=0;
for E=0:adim:Ef-V,
matris=[1 0; 0 1];
for j=1:1:p;
k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2);
r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
V_p(j+1)));
k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-
V_p(j+1))))^(1/2);
mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))]; (1-(r(j)*k(j+1)/k(j)))
(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))];
matris=matris*mat*M;
end
disp([2 v E]);
S=(Ef-E);
Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
durum22=durum22+son*S*adim;
end
akim21=V*durum22;
%'***** 2 *****'
%'***** 3 *****'

durum32=0;
for E=Ef-V:adim:Ef,
matris=[1 0; 0 1];
for j=1:1:p
k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2);

```

```

r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
V_p(j+1)));
k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-
V_p(j+1))))^(1/2);
mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))); (1-(r(j)*k(j+1)/k(j)))
(1+(r(j)*k(j+1)/k(j)))]);
matris=matris*mat*M;

end

disp([3 v E]);
S=(Ef-E);
Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
durum1_sondegeri=son;
durum32=durum32+son*S*adim;

end

akim22=durum32;

%'***** 3 *****'

akim2=(akim21+akim22)*katsayi*alan;
matrix(berra,1)=V;
matrix(berra,2)=akim2;
I_ERTT=akim2;
matrix(berra,3)=I_ERTT;
V_behbt=Vt*log((((alfaF*I_ERTT)/IShbt)+alfaF+1)/(1-alfaF*exp(-Vce/Vt)));
V_BERTT=V+V_behbt;
matrix(berra,4)=V_BERTT;
V_bchbt=V_behbt-Vce;
I_Bhbt=IShbt*(((exp(V_behbt/Vt)-1)/betaF)+((exp(V_bchbt/Vt)-1)/betaR));
I_BRTT=I_Bhbt;
matrix(berra,5)=I_BRTT;
I_Chbt=IShbt*((exp(V_behbt/Vt)-1)-(exp(V_bchbt/Vt)-1)/alfaR);
I_CRTT=I_Chbt;

```

```
matrix(berra,6)=I_CRTT;  
I_Econtrol=I_CRTT+I_BRTT;  
matrix(berra,7)=I_Econtrol;  
disp([berra V akim2 I_ERTT V_BERTT I_BRTT I_CRTT I_Econtrol]);  
end  
end  
title('Rtt akim-gerilim karakteristigi')  
xlabel('Gerilim (V)')  
ylabel('Akim (mA)')  
plot(matrix(:,4), 1000*matrix(:,6),'-k*')  
hold on  
plot(matrix(:,4), 1000*matrix(:,5),'-r*')
```

EK-4 Silikon kontrollü doğrultucunun (SCR) I-V karakteristiğini hesaplayan
Matlab programı

```
%===== Uc-uclu SCR I-V Karakteristigi =====%
clear all
%----- Genel Sabitler ve Bilgiler -----%
h=6.62617*10^-34;           %J-s   %
h_reduced=1.05458*10^-34;  %J-s   %
k_boltzman=1.38066*10^-23; %J/K   %
m0=9.1*10^(-31);          %kg    %
q=1.602*10^-19;          %C     %
dielektrik_0=8.85418*10^-14; %F/cm  %
T=300                      %K     %
x=0.3;
Vt=k_boltzman*T/q;
%===== npn Transistor için Bilgiler =====%
NE2=8*10^17;               %(cm^-3) n-AlxGa(1-x)As %
NB2=5*10^16;               %(cm^-3) p-GaAs      %
NC2=5*10^16 ;             %(cm^-3) n-GaAs      %
ni=1.79*10^6;
Vbi12=Vt*log(NE2*NB2/(ni^2));
Vbi22=Vt*log(NC2*NB2/(ni^2));
Eg_E2=1.424+1.247*x;      %eV    %
Eg_B2=1.425;              %eV    %
Delta_Eg=Eg_E2-Eg_B2;    %ev    %
%dielektrik_E1=(13.18-3.12*x)*dielektrik_0;
dielektrik_E2=13.1*dielektrik_0;
dielektrik_B2=13.1*dielektrik_0;
dielektrik_C2=13.1*dielektrik_0;
WE2=0.15*10^-4;          %cm    %
WB2=0.5*10^-4;          %cm    %
```



```

DC1=63.96; %cm^2s^-1 p %
lifetimeE1=5.63*10^-9;
lifetimeB1=1*10^-9;
lifetimeC1=5.63*10^-9;
LE1=(DE1*lifetimeE1)^(1/2);
LB1=(DB1*lifetimeB1)^(1/2);
LC1=(DC1*lifetimeC1)^(1/2);
npoE1=(ni^2)/NE1;
pnoB1=(ni^2)/NB1;
npoC1=(ni^2)/NC1;
%=====
sabit1=q*DB1*pnoB1/LB1;
sabit2=q*DE1*npoE1/LE1;
sabit3=q*DB2*npoB2/LB2;
sabit4=q*DE2*pnoE2/LE2;
%=====
VBC=0; VBE1=0.869; VBE2=0.77; VAK=0;
IA=0;
Ig=0.01*10^(-3);
a=1;
alfa_npn=0;
alfa_pnp=0;
matris=zeros(size(a),3)
kazanc=zeros(size(a),3)
while alfa_npn+alfa_pnp < 1,
    matris(a,1)=a;
    matris(a,2)=VAK;
    matris(a,3)=IA;
    VBC=VBC+0.2;
    %VBE1=VBE1+0.011;
    %VBE2=VBE2+0.00445;

```

```

VAK=VBE1-VBE2+VBC;
xE11=((2*dielektrik_E1*dielektrik_B1*(Vbi11-
VBE1)/q)*(NB1/NE1)*(1/(dielektrik_B1*NB1+dielektrik_E1*NE1)))^(1/2);
xB11=((2*dielektrik_E1*dielektrik_B1*(Vbi11-
VBE1)/q)*(NE1/NB1)*(1/(dielektrik_B1*NB1+dielektrik_E1*NE1)))^(1/2);
xB21=((2*dielektrik_B1*(Vbi21+VBC)/q)*(NC1/NB1)*(1/(NB1+NC1)))^(1/2);
xE1=WE1-xE11;
xB1=WB1-xB11-xB21;
xE12=((2*dielektrik_E2*dielektrik_B2*(Vbi12-
VBE2)/q)*(NB2/NE2)*(1/(dielektrik_B2*NB2+dielektrik_E2*NE2)))^(1/2);
xB12=((2*dielektrik_E2*dielektrik_B2*(Vbi12-
VBE2)/q)*(NE2/NB2)*(1/(dielektrik_B2*NB2+dielektrik_E2*NE2)))^(1/2);
xB22=((2*dielektrik_B2*(Vbi22+VBC)/q)*(NC2/NB2)*(1/(NB2+NC2)))^(1/2);
xE2=WE2-xE12;
xB2=WB2-xB12-xB22;

```

%===== bagil hata hesabi =====

```

VCB=-VBC;
VEB1=VBE1;
VEB2=VBE2;
IE1=((sabit1*coth(xB1/LB1))+sabit2)*(exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))-1)-
(sabit1*(exp((q*VCB)/(k_boltzman*T))-1)/sinh(xB1/LB1));
IE2=(sabit3*(coth(xB2/LB2))+sabit4)*(exp((q*VEB2)/(k_boltzman*T))-1)-
(sabit3*(exp((q*VCB)/(k_boltzman*T))-1)/sinh(xB2/LB2));
bagilhata=abs((IE1-IE2)/((IE1+IE2)/2))*100

```

%===== alfa_npn hesabi =====

```

baz_transport2=((exp((q*VEB2)/(k_boltzman*T))+cosh(xB2/LB2))/
(1+exp((q*VEB2)/(k_boltzman*T))*cosh(xB2/LB2)));
JnE2=(q*DB2*np0B2/LB2)*((1/sinh(xB2/LB2))+((exp((q*VEB2)/
(k_boltzman*T))-1)/tanh(xB2/LB2)));
JpE2=(q*DE2*pnoE2/LE2)*(exp((q*VEB2)/(k_boltzman*T))-1)*(1/tanh(xE2/LE2));
JR2=((q*(xE12+xB12)*ni)/(2*((lifetimeE2+lifetimeB2)/2)))*exp((q*VEB2)/

```

```

(2*(k_boltzman*T));
JnC2=(q*DB2*np0B2/LB2)*(((exp((q*VEB2)/(k_boltzman*T))-
1)/sinh(xB2/LB2))+(1/tanh(xB2/LB2)));
emiter_efficiency2=JnE2/(JnE2+JpE2);
ICo2=(0.7505*(10^-6)*0.15*(10^-6))*q*((DC2*pnoC2/LC2)+(DB2*np0B2/LB2));
alfa_npn=JnC2/(JnE2+JpE2+JR2);
%===== alfa_pnp hesabi =====
baz_transport1=((exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T)))+cosh(xB1/LB1))/
(1+exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))*cosh(xB1/LB1));
JnE1=(q*DB1*pnoB1/LB1)*((1/sinh(xB1/LB1))+((exp((q*VEB1)/
(k_boltzman*T))-1)/tanh(xB1/LB1)));
JpE1=(q*DE1*np0E1/LE1)*(exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))-1)*(1/tanh(xE1/LE1));
JR1=((q*(xE11+xB11)*ni)/(2*((lifetimeE1+lifetimeB1)/2))*exp((q*VEB1)/
(2*(k_boltzman*T)));
JnC1=(q*DB1*pnoB1/LB1)*(((exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))-1)/
sinh(xB1/LB1))+(1/tanh(xB1/LB1)));
emiter_efficiency1=JpE1/(JnE1+JpE1);
ICo1=(0.7505*(10^-6)*0.3*(10^-6))*q*((DB1*pnoB1/LB1)+(DC1*np0C1/LC1));
alfa_pnp=JnC1/(JnE1+JpE1+JR1);
%=====
IA=(alfa_npn*Ig+ICo1+ICo2)/(1-(alfa_npn+alfa_pnp));
kazanc(a,1)=a;
kazanc(a,2)=VAK;
kazanc(a,3)=alfa_npn+alfa_pnp;
a=a+1
end
figure(1)
plot(matris(:,2),matris(:,3),'-b*')
ylabel('Anot-Katot Akimi (A)')
xlabel('Anot-Katot gerilimi (V)')
title('Tristor akim-gerilim karakteristiginin n2 bolgesi katki yogunluguna bagli degisimi')

```


EK-5 Resonant tünelleme silikon kontrollü doğrultucunun (RT-SCR) I-V karakteristiğini hesaplayan Matlab programı

```
%===== Uc-uclu RT-SCR I-V Karakteristigi =====%
clear all
%----- Genel Sabitler ve Bilgiler -----%
h=6.62617*10^-34;          %J-s  %
h_reduced=1.05458*10^-34;    %J-s  %
k_boltzman=1.38066*10^-23;   %J/K  %
m0=9.1*10^(-31);           %kg  %
q=1.602*10^-19;            %C  %
dielektrik_0=8.85418*10^-14;  %F/cm  %
T=320                       %K  %
x=0.3;
Vt=k_boltzman*T/q;
%=====
%===== npn Transistor için Bilgiler =====%
NE2=8*10^17;  %(cm^-3) n-AlxGa(1-x)As %
NB2=5*10^16;  %(cm^-3) p-GaAs  %
NC2=5*10^16 ; %(cm^-3) n-GaAs  %
ni=1.79*10^6;
Vbi12=Vt*log(NE2*NB2/(ni^2));
Vbi22=Vt*log(NC2*NB2/(ni^2));
Eg_E2=1.424+1.247*x;    %eV  %
Eg_B2=1.425;           %eV  %
Delta_Eg=Eg_E2-Eg_B2;  %eV  %
%dielektrik_E1=(13.18-3.12*x)*dielektrik_0;
dielektrik_E2=13.1*dielektrik_0;
dielektrik_B2=13.1*dielektrik_0;
dielektrik_C2=13.1*dielektrik_0;
WE2=0.15*10^-4;        %cm  %
```

```

WB2=0.5*10^-4;      %cm   %
WC2=0.5*10^-4;      %cm   %
DE2=9;              %cm^2s^-1  n %
DB2=63.96;          %cm^2s^-1  p %
DC2=9;              %cm^2s^-1  n %
lifetimeE2=1*10^-9;
lifetimeB2=5.63*10^-9;
lifetimeC2=1*10^-9;
LE2=(DE2*lifetimeE2)^(1/2);
LB2=(DB2*lifetimeB2)^(1/2);
LC2=(DC2*lifetimeC2)^(1/2);
pnoE2=(ni^2)/NE2;
npoB2=(ni^2)/NB2;
pnoC2=(ni^2)/NC2;
%=====
===== pnp Transistor için Bilgiler =====
NE1=5*10^16;  %(cm^-3) p-GaAs   %
NB1=5*10^16;  %(cm^-3) n-GaAs   %
NC1=5*10^16;  %(cm^-3) p-GaAs   %
ni=1.79*10^6;
Vbi11=Vt*log(NE1*NB1/(ni^2));
Vbi21=Vt*log(NC1*NB1/(ni^2));
Eg_E1=1.424+1.247*x;  %eV   %
Eg_B1=1.425;          %eV   %
dielektrik_E1=13.1*dielektrik_0;
dielektrik_B1=13.1*dielektrik_0;
dielektrik_C1=13.1*dielektrik_0;
WE1=0.3*10^-4;      %cm   %
WB1=0.5*10^-4;      %cm   %
WC1=0.5*10^-4;      %cm   %
DE1=63.96;          %cm^2s^-1  p %

```

```

DB1=9; %cm^2s^-1 n %
DC1=63.96; %cm^2s^-1 p %
lifetimeE1=5.63*10^-9;
lifetimeB1=1*10^-9;
lifetimeC1=5.63*10^-9;
LE1=(DE1*lifetimeE1)^(1/2);
LB1=(DB1*lifetimeB1)^(1/2);
LC1=(DC1*lifetimeC1)^(1/2);
npoE1=(ni^2)/NE1;
pnoB1=(ni^2)/NB1;
npoC1=(ni^2)/NC1;
%=====
sabit1=q*DB1*pnoB1/LB1;
sabit2=q*DE1*npoE1/LE1;
sabit3=q*DB2*npoB2/LB2;
sabit4=q*DE2*pnoE2/LE2;
%=====
VBC=0;
VBE1=0.869;
VBE2=0.77;
VAK=0;
IA=0;
Ig=0.01*10^(-3);
a=1;
alfa_npn=0;
alfa_pnp=0;
sonuc=zeros(size(a),3)
kazanc=zeros(size(a),3)
while alfa_npn+alfa_pnp < 1,
    sonuc(a,1)=a;
    sonuc(a,2)=VAK;

```

```

sonuc(a,3)=IA;
VBC=VBC+0.2;
VBE1=VBE1+0.011;
VBE2=VBE2+0.00445;
VAK=VBE1-VBE2+VBC;
xE11=((2*dielektrik_E1*dielektrik_B1*(Vbi11-
VBE1)/q)*(NB1/NE1)*(1/(dielektrik_B1*NB1+dielektrik_E1*NE1)))^(1/2);
xB11=((2*dielektrik_E1*dielektrik_B1*(Vbi11-
VBE1)/q)*(NE1/NB1)*(1/(dielektrik_B1*NB1+dielektrik_E1*NE1)))^(1/2);
xB21=((2*dielektrik_B1*(Vbi21+VBC)/q)*(NC1/NB1)*(1/(NB1+NC1)))^(1/2);
xE1=WE1-xE11;
xB1=WB1-xB11-xB21;
xE12=((2*dielektrik_E2*dielektrik_B2*(Vbi12-
VBE2)/q)*(NB2/NE2)*(1/(dielektrik_B2*NB2+dielektrik_E2*NE2)))^(1/2);
xB12=((2*dielektrik_E2*dielektrik_B2*(Vbi12-
VBE2)/q)*(NE2/NB2)*(1/(dielektrik_B2*NB2+dielektrik_E2*NE2)))^(1/2);
xB22=((2*dielektrik_B2*(Vbi22+VBC)/q)*(NC2/NB2)*(1/(NB2+NC2)))^(1/2);
xE2=WE2-xE12;
xB2=WB2-xB12-xB22;
%===== bagil hata hesabi =====
VCB=-VBC;
VEB1=VBE1;
VEB2=VBE2;
IE1=((sabit1*coth(xB1/LB1))+sabit2)*(exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))-1)-
(sabit1*(exp((q*VCB)/(k_boltzman*T))-1)/sinh(xB1/LB1));
IE2=(sabit3*(coth(xB2/LB2))+sabit4)*(exp((q*VEB2)/(k_boltzman*T))-1)-
(sabit3*(exp((q*VCB)/(k_boltzman*T))-1)/sinh(xB2/LB2));
bagilhata=abs((IE1-IE2)/((IE1+IE2)/2))*100;
%===== alfa_npn hesabi =====
%-----rtt2.m-----%
%-----%

```

```

x=0.3;
NA=2*10^18;
ND=2*10^18;
Nv=7*10^18;
Nc=4.7*10^17;
p=3;
Dn=110;
Dp=6;
lifetime_p=5*10^-9;
lifetime_n=10*10^-9;
Lp=(Dp*lifetime_p)^(1/2);
Ln=(Dn*lifetime_n)^(1/2);
pno=ni^2/ND;
npo=ni^2/NA;
Js=10^-15;
Eg_GaAs=1.425;
Eg_AlGaAs=1.424+1.247*x;
m_GaAs=0.067;
m_AlGaAs=(0.067+0.083*x);
Ef_Ev=(k_boltzman*T/q)*log(Nv/NA);
Ec_Ef=(k_boltzman*T/q)*log(Nc/ND);
%Ef_1=((Eg_AlGaAs-Eg_GaAs)/2)+Ef_Ev;
%Ef_2=Eg_AlGaAs-((Eg_AlGaAs-Eg_GaAs)/2)-Ec_Ef;
Ef_1=Eg_GaAs;
Ef_2=Eg_AlGaAs;
alfa_pGaAs=((1-m_GaAs)^2)/Eg_GaAs;
alfa_pAlGaAs=((1-m_AlGaAs)^2)/Eg_AlGaAs;
d=[0 5*10^(-9) 10*10^(-9) 15*10^(-9)];
m=m0.*[m_GaAs m_AlGaAs m_GaAs m_AlGaAs];
alfa_p=[alfa_pGaAs alfa_pAlGaAs alfa_pGaAs alfa_pAlGaAs] ;

```

```

%-----%
%-----RTT kisminin baslangici-----%
NE=8*10^17;      %n-AlGaAs 0.15um%
NB=5*10^16;      %p-GaAs 0.3um%
NC=5*10^16;      %n-GaAs 0.3um%
WE=0.15*10^-4;   %cm-emiter width%
WB=0.5*10^-4;    %cm-base width%
WC=0.5*10^-4;    %cm-collector width%
nE=NE;           %minority carrier density in the emiter%
pB=NB;           %minority carrier density in the base%
lifetimeB=5.63*10^-9; %s-minority carrier lifetime in the base%
lifetimeE=5*10^-9; %s-minority carrier lifetime in the emiter%
DB=63.96;        %cm^2s^-1--minority carrier diffusion coefficient in the base%
DE=6;            %cm^2s^-1--minority carrier diffusion coefficient in the emiter%
LB=(lifetimeB*DB)^(1/2); %cm-diffusion lenght of electrons in the base%
LE=(lifetimeE*DE)^(1/2); %cm-diffusion lenght of electrons in the emiter%
W=0.3*10^-4;
emiter_efficiency=1/(1+(((nE*DE*LB)/(pB*DB*LE))*tanh(W/LB)));
hFE=emiter_efficiency/(1-emiter_efficiency);
Vt=k_boltzman*T/q;
alfaF=0.9;
alfaR=0.2;
betaF=alfaF/(1-alfaF);
betaR=alfaR/(1-alfaR);
Rc=5;
Rb=16;
IShbt=10^-14;
Vce=1.5;
adim=2.33*10^-3;
%-----%
%-----%

```

```

katsayi=(q)*m0*(k_boltzman^2)*(T^2)/(2*pi^2*h^3);
alan=0.7505*(10^-6)*0.15*(10^-6);    %m^2%
Is=q*alan*((Dn*np0/Ln)+(Dp*pno/Lp));
Uo=0.01;
V=VBE2+VBC;
V_p(1)=Uo-V/2; V_p(2)=-V; V_p(3)=Uo-3*V/2; V_p(4)=-2*V;
Ef=(Ef_1+Ef_2)/2;
if V>= Ef
    %'*****1*****'
    durum12=0;
    for E=0:adim:Ef,
        matris=[1 0; 0 1];
        for j=1:1:p
            k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2) ;
            r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
            V_p(j+1)));
            k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-V_p(j+1))))^(1/2);
            mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
            M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))); (1-(r(j)*k(j+1)/k(j)))
            (1+(r(j)*k(j+1)/k(j)))]];
            matris=matris*mat*M;
        end
        S=(Ef-E);
        Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
        durum12=durum12+son*S*adim;
    end
    akim1=durum12*katsayi*alan;
    matrix(a,1)=V;
    matrix(a,2)=akim1;
    I_ERTT=akim1;
    matrix(a,3)=I_ERTT;

```

```

V_BERTT=V;
matrix(a,4)=V_BERTT;
V_behbt=VBE2;
V_bchbt=Vce-V_BERTT;
I_Chbt=IShbt*10^-3*((exp(V_behbt/Vt)-1)-(exp(V_bchbt/Vt)-1)/alfaR);
I_CRIT=I_Chbt;
matrix(a,5)=I_CRIT;
disp([a V akim1 I_ERIT V_BERTT I_CRIT]);
%'*****I*****'
else
%'*****2*****'
durum22=0;
for E=0:adim:Ef-V,
    matris=[1 0; 0 1];
    for j=1:1:p;
        k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2);
        r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
        V_p(j+1)));
        k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-
        V_p(j+1))))^(1/2);
        mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
        M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j)))(1-(r(j)*k(j+1)/k(j))); (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))
        (1+(r(j)*k(j+1)/k(j)))]];
        matris=matris*mat*M;
    end
    S=(Ef-E);
    Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
    durum22=durum22+son*S*adim;
end
akim21=V*durum22;
%'***** 2 *****'

```



```

%'*****' 3 '*****'
durum32=0;
for E=Ef-V:adim:Ef,
    matris=[1 0; 0 1];
    for j=1:1:p
        k(j)=((2*m(j)/(h^2))*(E-V_p(j))*(1+alfa_p(j)*(E-V_p(j))))^(1/2) ;
        r(j)=(m(j)/m(j+1))*(1+2*alfa_p(j)*(E-V_p(j)))/(1+2*alfa_p(j+1)*(E-
        V_p(j+1)));
        k(j+1)=((2*m(j+1)/h^2)*(E-V_p(j+1))*(1+alfa_p(j+1)*(E-
        V_p(j+1))))^(1/2);
        mat=[exp(-i*k(j)*d(j)) 0; 0 exp(i*k(j)*d(j))];
        M=(1/2)*[(1+(r(j)*k(j+1)/k(j))) (1-(r(j)*k(j+1)/k(j))); (1-(r(j)*k(j+1)/k(j)))
        (1+(r(j)*k(j+1)/k(j)))]];
        matris=matris*mat*M;
    end
    S=(Ef-E);
    Tu=1/matris(1,1); son=(conj(Tu)*Tu);
    durum1_sondegeri=son;
    durum32=durum32+son*S*adim;
end
akim22=durum32;
%'*****' 3 '*****'
akim2=(akim21+akim22)*katsayi*alan;
matrix(a,1)=V;
matrix(a,2)=akim2;
I_ERTT=akim2;
matrix(a,3)=I_ERTT;
%V_behbt=Vt*log((((alfaF*I_ERTT)/IShbt)+alfaF+1)/(1-alfaF*exp(-Vce/Vt)));
V_BERTT=V;
matrix(a,4)=V_BERTT;
V_behbt=VBE2;

```

```

V_bchbt=Vce-V_BERTT;
I_Chbt=IShbt*10^-3*((exp(V_behbt/Vt)-1)-(exp(V_bchbt/Vt)-1)/alfaR);
I_CRTT=I_Chbt;
matrix(a,5)=I_CRTT;
%disp([a V akim2 I_ERTT V_BERTT I_CRTT]);
end
alfa_npn=I_CRTT/I_ERTT
ICo2=q*alan*((Dn*npo/Ln)+(Dp*pno/Lp));
%===== alfa_pnp hesabi =====
baz_transport1=((exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))+cosh(xB1/LB1))/(1+exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))*cosh(xB1/LB1)));
JnE1=(q*DB1*pnoB1/LB1)*((1/sinh(xB1/LB1))+((exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))-1)/tanh(xB1/LB1)));
JpE1=(q*DE1*npoE1/LE1)*(exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))-1)*(1/tanh(xE1/LE1));
JR1=((q*(xE11+xB11)*ni)/(2*((lifetimeE1+lifetimeB1)/2))*exp((q*VEB1)/(2*(k_boltzman*T)));
JnC1=(q*DB1*pnoB1/LB1)*(((exp((q*VEB1)/(k_boltzman*T))-1)/sinh(xB1/LB1))+1/tanh(xB1/LB1));
emiter_efficiency1=JpE1/(JnE1+JpE1);
ICo1=(0.7505*(10^-6)*0.3*(10^-6))*q*((DB1*pnoB1/LB1)+(DC1*npoC1/LC1));
alfa_pnp=JnC1/(JnE1+JpE1+JR1);
%=====
IA=(alfa_npn*Ig+ICo1+ICo2)/(1-(alfa_npn+alfa_pnp));
hold on
kazanc(a,1)=a;
kazanc(a,2)=VAK;
kazanc(a,3)=alfa_npn+alfa_pnp;
a=a+1
VAK;
alfa_npn+alfa_pnp
end

```

```
hold on
plot(sonuc(:,2),sonuc(:,3),'-k*')
ylabel('Anot-Katot Akimi (A)')
xlabel('Anot-Katot gerilimi (V)')
title('Tristor akim-gerilim karakteristiginin n2 bolgesi katkı yoğunluğuna bağlı değişimi')
```