

**RADYASYONUN YARI İLETKEN DEVRE ELEMANLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELEMESİ**

Daulet TUYAKBAYEV

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YÖNETİM BİLİŞİM SİSTEMLERİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2013

ANKARA

Daulet Tuyakbayev tarafından hazırlanan RADYASYONUN YARI İLETKEN DEVRE ELEMANLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELEMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Sabri KOÇER

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile.....

Anabilim Dalında Yüksek lisans/Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : _____

Üye : _____

Üye : _____

Üye : _____

Üye : _____

Tarih :/...../.....

Bu tez, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Daulet TUYAKBAYEV

**RADYASYONUN YARI İLETKEN DEVRE ELEMANLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELEMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Daulet Tuyakbayev

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

Haziran 2013

ÖZET

Uzay nesneleri radyasyona maruz kalmaktadır. Bu radyasyonların farklı çeşitleri vardır: galaktik ışınları, güneş patlamaları radyasyonu ve güneş radyasyonudur. Bu radyasyonlar yarı iletkenlerin kristal yapılarında bozulmalarına neden olmaktadır. Bu durumda iki kutuplu transistörlerin tüm parametrelerinin bozulmasına yol açar. Son yıllarda, bu alanda araştırma yeni yöntemler kullanılarak, yük parçacığının ömür süresi, öz direnç, yarı iletken radyasyon direnci artırmanın yolları gibi farklı çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu ilerlemelere rağmen yarı iletkenlerin radyasyon fiziği bölgesinde, daha tam olarak tüm radyasyonun etkilerini açıklayabilen bir transistör modeli yoktur.

Transistör modelinin hesaplamaları göz önünde alındığında giriş verileri elektriksel ve geometriksel olmalıdır. Aynı zamanda modelinin yapısı, p-n geçişlerinin akım hesaplaması otomatik olmalıdır. Ayrıca transistör modeli radyasyonun ve sıcaklığının değişiklikleri dikkate alınmalıdır, çünkü yük parçacığının ömür süresi radyasyonu azaltırken, sıcaklık arttığında yük parçacığının ömür süresini artırmaktadır.

Bilim Kodu : 905
Anahtar Kelime : radyasyon etkileri, iki kutuplu transistörler, yük parçacığının ömür süresi, özdirenç, elektron ısınlama, radyasyon merkezi.
Sayfa Adedi : 51
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Sabri KOÇER

**STUDY THE EFFECTS OF RADIATION ON THE SEMICONDUCTOR
CIRCUIT ELEMENTS
(M.Sc. Thesis)**

Daulet Tuyakbayev

**GAZİ UNIVERSITY
INFORMATICS INSTITUTE
June 2013**

ABSTRACT

At present, the problem of increasing performance and radiation resistance of transistors has been given much attention as electronic equipment of spacecraft, including satellites, is exposed to various radiation emissions, such as the Earth's radiation belts, cosmic and galactic rays. For research in this field it is necessary firstly to develop a transistor model that takes into account all the effects, including the effects of radiation. As it is known, the performance increase of silicon bipolar transistors is limited to the geometrical dimensions of p-n junctions, as well as to the part of the base, which is determined primarily by the parameters of electric strength. Thus, a large decrease in the base thickness leads to a sharp decrease of the clamping voltage of the transistor. But to prevent it, increasing the doping level of the base may lead to a significant reduction of the emitter junction breakdown voltage. The proposed technological methods of production and their influence on the parameters of the bipolar transistor can be simulated on a PC. The paper presents a single-level model to identify the constant of the radiation changes in the lifetime of minority carriers in the base of n-p-n transistors, DLTS spectra base of n-p-n transistors and describes the results.

Science Code : 905

Key Words : radiation effects, bipolar transistors, lifetime, recombination component, electron irradiation, radiation center.

Page Number: 51

Adviser : Assoc. Dr. Sabri KOÇER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla ben yönlendiren Hocam Doç. Dr. Sabri KOÇER'e ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ VE TEZİN AMACI.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Amacı.....	3
2. İKİ KUTUPLU TRANSİSTÖR MODELLERİNİN ANALİZİ.....	5
2.1. Elektronik Devre Elemanları.....	5
2.2. Yarı İletkenlerin Temel Denklemleri Teorisi.....	6
2.3. İşlevsel, Fiziksel ve Matematiksel Modelleri.....	8
3. TRANSİSTÖR MODELİNİN GELİŞMESİ.....	10
3.1. Süreklilik Denkleminin Çözümü Analizi ve Sınır Koşulları.....	12
3.2. Transistör Modelleri Katkılama Profilini Belirlemek İçin Araştırılması.....	13
3.3. Transistör Beyzin Elektrik Alanı Belirlemek İçin Analizi.....	17
3.4. Beyzde Yük Parçacıklarının Transfer Katsayıları Etkileyen Faktörlerin Analizi.....	17
3.5. Transistörünün p–n Geçişlerinin Ters Akımlarının Araştırma ve Analizi.....	19
4. RADYASYON DİRENCİ OLASI YÜKSELİŞİ ANALİZİ ETMEK İÇİN SİLİSYUM TRANSİSTÖRLERİN SİMÜLASYONU.....	29

Sayfa

4.1. Silisyum İki Kutuplu Transistör Parametrelerinin Hesaplanması İçin Başlangıç İlişkileri.....	29
5. SONUÇ.....	37
5.1. Transistör Yapısı ve Parametrelerin Hesaplanması.....	37
5.2. Elektron Işınlaması Altında Azınlık Yük Parçacıkların Ömür Boyu Radyasyonun Sürekli Değişim Hesaplanması.....	41
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Silisyum transistör yük parçacıklarının konsantrasyon profili.....	14
Şekil 3.2. Silisyum transistör yapıldığında katkılama yayılma profili.....	14
Şekil 3.3. Transistörün basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli.....	26
Şekil 4.1. İki kutuplu transistörün eşdeğer devre modeli.....	30
Şekil 5.1. Işınlama sırasında silisyumunun iki kutuplu transistörlerinin kazanç hesaplanan bağımlılığı.....	41
Şekil 5.2. Hızlı elektronların enerjisinden ve katkılama derecesinden arıza uygulama hızı bağımlılığı.....	43
Şekil 5.3. Hızlı elektronların enerjisinin ve katkılama derecesinin bağımlılığı yük parçacığının ömür süresini değiştirir.....	44
Şekil 5.4. Elektron ışınlaması ($E_e=5 \cdot 10^6$ eV) altında transistörlerin kazanç bağımlılığı.....	45
Şekil 5.5. Elektron ışınlaması ($E_e=5 \cdot 10^6$ eV) altında transistörlerin kazanç bağımlılığı.....	46

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Aktif beyz genişliği ile transistör kazanç değişimi.....	37
Çizelge 5.2. Simülasyon sonuçları.....	39
Çizelge 5.3. İnce bir beyz ile transistör yapıların simülasyon sonuçları.....	40

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

A	Amper
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
mA	Mili amper
cm	Santimetre
s	Saniye
V	Volt
eV	Elektron volt
μ	Micron

Kısaltmalar

Açıklama

MATLAB	MatrixLaboratory
MS	Microsoft
PC	Personel Computer (Bilgisayar)
RTD	Direnç Sıcaklık Dedektörleri
RTP	Radiation-Thermal Processes (Radyasyon-Isıl İşlemler)
DLTS	Deep-Level Transient Spectroscopy (Derin Düzeyinde Geçici Spektroskopisi)

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Giriş

İnsanlar tüm yaşamları boyunca bir şekilde radyasyonun etkilerine maruz kalmaktadır. Radyasyon kaynakları var olduğu müddetçe radyasyon varolacak ve bundan kaçınmak mümkün olmayacaktır. 19. yüzyılın sonlarına doğru x-ışınları ve radyoaktivitenin keşfiyle birlikte tıbbi ve endüstriyel alanlardaki kullanımının günümüze kadar giderek artan bir hızla yaygınlaşması radyasyonu yaşantımızın ayrılmaz bir parçası haline getirmiştir.

Radyasyonu, en temel anlamda “ortamda yol alan enerji” olarak tanımlamak mümkündür. Bu kapsamda doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin kararlı yapıya geçebilmesi için dışarı saldıkları hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalga şeklinde taşınan fazla enerjileri de “radyasyon” olarak adlandırılır.

İnsanlar radyasyonların varlığını gösterecek duyu organlarına sahip olmadıklarından, radyasyonların dedeksiyon ve ölçümleri bunlara duyarlı cihazlar yardımı ile yapılır [1].

Uydu araçlarındaki elektronik ekipmanlar radyasyonun etkilerine maruz kalırlar. Radyasyonların birçok çeşidi mevcuttur. Bunlar:

- Galaktik ışınlamalar,
- Güneş patlamalarından kaynaklanan radyasyon.

Bu radyasyonlar yarı iletkenlerin kristal yapılarında bozulmalarına neden olmaktadır. Bu durumda iki kutuplu transistörlerin tüm parametrelerinin bozulmasına yol açar. Son yıllarda, bu alanda araştırma yeni yöntemler kullanılarak, yük parçacığının ömür süresi, öz direnç, yarı iletken radyasyon direnci artırmanın yolları gibi farklı çalışmalar yapılmıştır.

Niels Bohr ve E.Vignera çalışmalarında yarı iletkenlerin radyasyon etkileri üzerine birçok araştırmalar yapmışlardır. Son yıllarda, bu alanda araştırma yeni yöntemler kullanılarak, azınlık taşıyıcısı ömrü, özgül direnç, yarı iletken radyasyon direnci artırmanın yolları gibi farklı çalışmalar yapılmıştır [1,2].

Ancak bu ilerlemelere rağmen yarı iletkenlerin radyasyon fiziki bölgesinde, daha tam olarak tüm radyasyonun etkilerini açıklayabilen bir transistör modeli yoktur.

Transistör modelinin hesaplamaları göz önünde alındığında için giriş verileri elektriksel ve geometriksel olmalıdır. Aynı zamanda modelinin yapısı, p-n geçişlerinin akım hesaplaması otomatik olmalıdır. Ayrıca transistör modeli radyasyonun ve sıcaklığının değişiklikleri dikkate alınmalıdır. Çünkü yük parçacığının ömür süresi radyasyonu azaltırken, sıcaklık arttığında yük parçacığının ömür süresini artırmaktadır.

Ebers- Moll ideal modeli, Byufoua- Sparks şarj kontrollü modeli, Linvill bir hücre modeli [3, 4] çalışmalarda gösterilmiştir. Bu modellerde aynı karakteristik denklemi kullanılmıştır, dolayısıyla aynı doğrululuğu gösterilmiştir. Tüm bu modellerin temel kuruluşu sadece düşük seviyeli enjeksiyon için geçerlidir. Böylece cihazdaki fiziksel süreçlerin basitleştirilmiş matematiksel modellerin dikkate alınarak transistör modeli temel sınırlamalar koymaktadır. Ayrıca, iki kutuplu transistörün mevcut tüm modelleri yarı iletkenler teorisine dayalı gerçeği ile bağlantılıdır. Temel hükümleri sadece düşük enjeksiyon seviyelerinde dejenere olmayan yarı iletkenler için geçerlidir.

Aşağıdaki ifadeler modellerin transistör özelliklerini etkilememektedir.

- 1) Emiter akımının değiştirme etkisini;
- 2) Yüzeyde ve geçişlerde rekombinasyonunu;
- 3) Beyizin ve kollektörün pasif alanını;
- 4) Kollektörün taşıyıcılarının birikimini;
- 5) Beyizin genişliğinin modülasyonunu etkilememektedir.

Fonksiyonel modellerinin daha da geliştirilmesi için yukarıda verileri etkilememektedir. İki kutuplu transistör modellerinin geliştirmesinin iki görevi vardır. Birincisi, gerçek

transistör yapılarda kendini gösterecektir farklı etkileri kompakt modellerinin oluşturulması gerekir. İkincisi, bu modellerin doğruluğunu değerlendirilmesi gerekir [5].

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin amacı radyasyonun yarı iletken devre elemanları üzerindeki etkilerinin incelemesidir.

İki kutuplu transistör modelinin gereksinimleri:

1. Elektronik devrelerindeki ac/dc devre modellerinin hesaplamalarının kolaylaştırılması:
 - a. Enjeksiyon düzeyine bağlı olarak taşıyıcı ömrü ve transistör direnç bölgeleri değişimleri
 - b. Modelde Earley etkisi
 - c. Emeter'e katkılama etkisi
 - d. Beyz ve kolektöre ait aktif /pasif bölgelerin özellikleri
 - e. Transistörün profil alanları doping etkisi
 - f. Sıcaklık model parametrelerinin bağımlılığı göz önüne alınmalıdır;
2. Modelin sürekliliği olmalıdır;
3. Her modele bir örnek olmalıdır;
4. Devre modeli basit ve ekonomik olmalıdır;
5. Model elektronik devre denklemleri simülasyon çalışmaları için uygun olmalıdır.

Bu tez çalışmalarında radyasyonun etkilerini simüle etmek için bir transistör modeli geliştirilecektir.

Amaç:

1. İki kutuplu transistörün model için gereksinimleri dikkate alınmalıdır.
2. Elektronik devre modelinin otomatik derlenmesi sağlanmalıdır.
3. Radyasyonun etkisini model yapılmalıdır.

Bu modelin geliştirilmesi iki aşamada gerçekleştirildi. İlk aşamada yukarıda bahsedilen etkiler dikkate alınarak, transistörün bir modeli geliştirmiştir. İkinci aşamada, çıkan model, radyasyon işlemlerini tamamlamak için gerekiyordu.

Uydu ekipmanlarının çalışma süresini arttırmak için, geliştirmiş transistörün bu modeli uydu ekipmanlarının yapımında kullanabiliriz.

2. İKİ KUTUPLU TRANSİSTÖR MODELLERİNİN ANALİZİ

Transistörler yarı iletken devrelerin basit ve zor unsurlardır. Bunun için transistör modelinin kalitesi yarı iletken devrelerinin hesaplama doğruluğu belirlenir. Mevcut modelleri üç sınıfa ayrılabilir [6-10]:

- Elektriksel
- Fiziksel
- Formel

Deneysel alınan elemanlarının eşdeğer devrelerinin, dış elektriksel karakteristikleri formel modeli olarak adlandırılır.

Eşdeğer devreleri ve doğrusal olmayan denklemleri elektriksel modelleri ile ilgilidir.

Fiziksel modelleri ise temel fiziksel süreçleri tanımlamak amacıyla yazılan matematiksel denklemlerdir.

2.1. Elektronik Devre Elemanları

Elektronik devrelerinde bilinen elektriksel devre elemanları olan direnç, kondansatör, bobin ve transformatörlerin yanısıra elektronik devre elemanları denilen farklı türde elemanlar da kullanılır. Temel çalışma ilkeleri, çeşitleri ve yapıları ilerde ana hatlarıyla incelenecek olan bu elemanlar üç grupta toplanabilirler:

Vakumlu Elektronik Devre Elemanları

Elektronların vakumda (boşlukta) hareketlerine ilişkin fiziksel özelliklere dayanan bu elemanların ilki diyot adı verilen iki elektrotlu düzendir. Bundan sonra ortaya çıkmış triyot, tetrot ve pentot tüpleriyle öteki çok elektrotlu tüpler yakın zamana kadar elektronik devrelerinin temel elemanları olarak hizmet görmüşlerdir.

Gazlı Elektronik Devre Elemanları

Elektrik akımının düşük basınçlı gazlar içindeki elektronların yanısıra gaz iyonlarının da katkısıyla akması sayesinde gerçekleştirilen elemanlara genel olarak gazlı tüpleri denir.

Yarı İletken Devre Elemanları

Elektrik akımının yarı iletkenler adını verdiğimiz bazı katı malzemeden akışına ilişkin fiziksel özellikleri sayesinde gerçekleştirilen elemanlara yarı iletken devre elemanları denir. 1945 de transistörün bulunmasından (W. Brattain, J. Bardeen, W. Shockley) sonra hızla gelişen ve birçok çeşitleri ortaya çıkmış olan yarı iletken devre elemanlarından yarı iletken diyotlar vakumlu diyotların ve gazlı diyotların yerini almıştır. Çeşitli tipten transistörler triyotların ve çoklu elektrot tüplerin, tiristor ve triyaklar ise gazlı triyot tipi tüplerin yerini almış bulunmaktadır.

Yarı iletken devre elemanlarının çok önemli bir yönü de bunların yapım tekniklerindeki gelişmelerin, tümdevrelerin doğmasına yol açmalarıdır. Çok sayıda transistör, diyot ve dirençten oluşan ve çok küçük bir yarı iletken parçacığı içinde, bir bütün olarak gerçekleştirilen yarı iletken tümdevrelerin kullanım alanları gün geçtikçe genişlemekte ve çeşitli elektronik devreler – hatta sistemler – artık tümdevre olarak gerçekleştirilmektedir. Yarı iletken tümdevreler içinde ilke olarak kapasiteler de elde edilebilir. Ancak kapasitelerin öteki elemanlara oranla çok fazla yer tutması yüzünden tümdevrelerde kapasite bulunmamasına, zorunlu hallerdeyse kapasite sayısının az ve değerlerinin küçük olmasına gayret edilir. Bugün yarı iletken tümdevreler iki ana grupta toplanabilir [10].

2.2. Yarı İletkenlerin Temel Teorisi

Yarı iletkenlerin fiziksel süreçlerini açıklama için kullanılacak denklemleri.

1. Yarı iletkenin difüzyonu ve yük parçacığını kayması işlemleri nedeniyle akımlarının yoğunluğu denklemleri [11, 12].

$$j_n = -q\mu_n n \nabla \psi + qD_n \nabla n \quad (2.1)$$

$$j_p = -q\mu_p p \nabla \psi - qD_p \nabla p \quad (2.2)$$

j_n, j_p – Elektronlarının ve deliklerinin akımlarının yoğunluğu,

D_n, D_p – Elektronlarının ve deliklerinin difüzyon katsayıları,

μ_n, μ_p – Elektronlarının ve deliklerinin hareketliliği,

q – Elektronun yükü,

ψ – Elektrostatiğin potansiyeli,

n, p – Elektronlarının ve deliklerinin konsantrasyonu.

Her yük parçacığının türü için difüzyon katsayısı ve hareketliliği, Einstein tarafından ilgili [14–16].

$$D = ((K \times T) / q) \times \mu = \phi_T \mu \quad (2.3)$$

K – Boltzmann sabiti,

T – Mutlak sıcaklığı,

ϕ_T – Sıcaklığının potansiyeli,

μ – Yük parçacığını hareketliliği,

j_Σ – Elektronlarının ve deliklerinin akımlarının yoğunluğu toplamı.

$$j_\Sigma = j_n + j_p \quad (2.4)$$

2. Poisson denklemi

$$\nabla^2 \psi = - \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} (N - n + p) \quad (2.5)$$

N – İyonize donör ve akseptör katışkılar konsantrasyonlarının cebirsel toplamı,

$\epsilon \epsilon_0$ – Dielektrik sabiti.

3. Elektronlar ve delikler için süreklilik denklemi.

$$\nabla n = -\frac{n - n_o}{\tau_n} + \frac{1}{q} \operatorname{div} j_n + g(x, y, z, t) \quad (2.6)$$

$$\nabla p = -\frac{p - p_o}{\tau_p} - \frac{1}{q} \operatorname{div} j_p + g(x, y, z, t) \quad (2.7)$$

n_o, p_o – Elektronlarının ve deliklerinin denge konsantrasyonları,

τ_n, τ_p – Elektronlarının ve deliklerinin ömür süresi,

$g(x, y, z, t)$ – Elektrik üretim hızı.

Bu diferansiyel denklemlerde üç bilinmeyen işlevleri vardır:

$\psi(x, y, z, t)$ – *Elektrostatik potansiyel,*

$n(x, y, z, t)$ – *Serbest elektronun yoğunluğu,*

$p(x, y, z, t)$ – *Deliklerin konsantrasyonu.*

Bu denklemlerin çözümü iç durumu ve dış elektriksel özellikleri belirler. Şu anda böyle bir modeli kullanımı mümkün değildir.

2.3. İşlevsel, Fiziksel ve Matematiksel Modelleri

Niels Bohr ve E.Vignera çalışmalarında yarı iletkenlerin radyasyon etkileri üzerine birçok araştırmalar yapmışlardır. Son yıllarda, bu alanda araştırma yeni yöntemler kullanılarak, azınlık taşıyıcısı ömrü, özgül direnç, yarı iletken radyasyon direnci artırmanın yolları gibi farklı çalışmalar yapılmıştır [1, 2].

Ancak bu ilerlemelere rağmen yarı iletkenlerin radyasyon fiziği bölgesinde, daha tam olarak tüm radyasyonun etkilerini açıklayabilen bir transistör modeli yoktur.

Shockley teorisine göre transistör güçlü ve zayıf olmak üzere alanlara bölünmüştür. Yarı iletken parametrelerin yük parçacıklarının ömrü, hareketliliği ve katkılama katsayısı gibi sabit olduğu varsayılır. Ama farklı alanlarda önemli ölçüde farklılık

gösterebilir. Güçlü alanlarda yarı iletkenlerin iletkenliği değişir. Ve zayıf alanlarda yarı iletkenlerin iletkenliği değişmez [3, 4, 15, 16].

3. TRANSİSTÖR MODELİNİN GELİŞMESİ

Transistör modellerinin en önemli eksiklikleri: düşük doğruluk ve radyasyonun etkilerini matematiksel analizinde yetersizlikler vardır. Çünkü iç elektriksel ve fiziksel parametreleri ile hiçbir bağlantısı yoktur (yük parçacığının ömür süresi, hareketlilik ve yük parçacığının konsantrasyonu).

Bu yüzden, transistör modelini ürettiğini zamanda, p–n geçişlerinin ters akımları değişiklikleri dikkate alınması gerekir. Sonraki her adımda öz direnci ve yük parçacığının ömür süresini yeniden hesaplamak için, algoritmik ifadeler ile transistör modeli eklenmesi gerekir. Bu değişiklikler ve tüm transistör parametreler ile (rekombinasyonun akımları, eylemsizlik özellikleri, dağıtım gerilim düşümü vb) bağlantısı vardır [17, 18].

Emiter çevresine katılananın etkisini hesaplamak için. Emiter ve beyz bölümlerine bölünür. Kolektör de bölümlere ayrılmalıdır [19–23].

Eğer yukarıdaki bahsedilen sorunları bir çözümü bulunursa, ideal bir transistör modeli elde edebilir.

3.1. Süreklilik Denkleminin Çözümü Analizi ve Sınır Koşulları

Süreklilik denkleminin çözümün incelendiğinde yarı iletkeninde sabit bir elektrik alanı vardır. Azınlık yük parçacıklarının sabit konsantrasyonu $x = 0$ sınırındadır [24].

Bu durumda, süreklilik denklemi böyle olacak:

$$D_n \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} + \mu_n E \frac{d\Delta n}{dx} - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0 \quad (3.1)$$

$E = -\frac{d\psi}{dx}$ – İç elektrik alanın voltajı (gerilimi).

Bu derlemi D_n 'a bölünürse

$$\frac{d^2 \Delta n}{dx^2} + \frac{q}{KT} E \frac{d\Delta n}{dx} - \frac{\Delta n}{L_n^2} = 0 \quad (3.2)$$

$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ – Azınlık yük parçacıklarının difüzyon uzunluğu.

Denkleminin çözümü bu fonksiyonudur.

$$\Delta n = A_1 \exp(-x \times \lambda_1) + A_2 \exp(x \times \lambda_2) \quad (3.3)$$

λ_1 ve λ_2 – Denkleminin bileşenleri.

$$\lambda^2 + \lambda \frac{q}{KT} E - \frac{1}{L_n^2} = 0 \quad (3.4)$$

Bu denkleminin çözüm

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2L_n} \left\{ -\frac{qL_n}{KT} E \pm \left[\left(\frac{qL_n}{KT} E \right)^2 + 4 \right]^{1/2} \right\} \quad (3.5)$$

Bazı özel durumları araştıralım.

1. Eger iç elektrik alanın voltajı

$$E \ll \frac{KT}{qL_n} \quad \lambda \text{ böyle oluyor} \quad \lambda_{1,2} = \pm \frac{1}{L_n} \quad (3.6)$$

Bu ifadeyi (3.3)’e ifadeye eklenirse.

Şu ifadeyi elde ederiz:

$$\Delta n = A_1 \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) + A_2 \exp\left(\frac{x}{L_n}\right) \quad (3.7)$$

$x=0$, elektronlarının konsantrasyonu Δn_0 eşit oluyor, ama sonsuz uzaklığında $\Delta n=0$, onun için $A_1=\Delta n_0$, $A_2=0$, şu ifade elde edilir.

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) \quad (3.8)$$

Bu fonksiyon, hemen hemen tüm mevcut modellerin temelini oluşturmaktadır.

Δn_o – Azınlık yük parçacıklarının fazla sayısı konsantrasyonu. Bu ifadeyi kullanarak hesaplanabilir.

$$\Delta n_o = n_{po} \left[\exp\left(\frac{u_n}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

$$n_p = n_{po} \exp\left(\frac{u_n}{\phi_T}\right) = n_n \exp\left(-\frac{\Delta\phi_o - u_n}{\phi_T}\right) - \text{Shockley sınır şartları.}$$

n_n – Elektronların konsantrasyonu n– alanda,

n_{po} – Elektronların denge konsantrasyonu p– alanda,

$\Delta\phi_o$ – Temas potansiyeli farkı,

U_n – Geçiş voltajı,

n_p – Azınlık yük parçacıklarının konsantrasyonu.

Shokley sınır şartlarında geçiş sınırlarda yük parçacıkların dikkate alınmamaktadır. Ve bunun için yüksek katkılama düzeyde büyük hatalar olabilirler. Ama geçiş sınırlarda yük parçacıkların elde edilen, bir daha doğru sınır şartını kabul edebiliriz [25–28].

$$n_p = \frac{N_p}{2Sh \frac{\Delta\phi_o - u_n}{\phi_T}} \left[\frac{N_n}{N_p} + \exp\left(-\frac{\Delta\phi_o - u_n}{\phi_T}\right) \right] \quad (3.10)$$

$$p_n = \frac{N_n}{2Sh \frac{\Delta\phi_o - u_n}{\phi_T}} \left[\frac{N_p}{N_n} + \exp\left(-\frac{\Delta\phi_o - u_n}{\phi_T}\right) \right] \quad (3.11)$$

N_p, N_n – Geçiş sınırlarda çıkan kirliliğinin konsantrasyonu (p ve n alanlarda).

p_n – Deliklerinin konsantrasyonu n– alanda.

Bu sınır şartları evrenselidir, çünkü düşük enjeksiyon düzeyde,

$\exp\left(-\frac{\Delta\varphi_o - u_n}{\varphi_T}\right) \ll 1$, şu şartları böyle yazdırabiliriz.

$$n_p = N_n \exp\left(-\frac{\Delta\varphi_o - u_n}{\varphi_T}\right) \quad (3.12)$$

$$p_n = N_p \exp\left(-\frac{\Delta\varphi_o - u_n}{\varphi_T}\right) \quad (3.13)$$

3.2. Transistör Modelleri Katkılama Profilini Belirlemek İçin Araştırılması

Transistörler katkılama profilini tanınmış modelleri kullanarak hesaplanmaktadır. Hesaplamalar işlem parametreleri kullanılarak gerçekleştirilir. Yaklaşık transistörün katkılama profili şekil 3.1.'de ve şekil 3.2.'de göstermektedir [29–35].

Transistör simülasyonu için p– n geçişleri ve beyz genişliği hesaplanması gerekir.

x'_e, x''_e – Emiterin p–n geçişin sınırları.

x'_k, x''_k – Kolektörün p–n geçişin sınırları.

Şu sınırları hesaplamak için, şu ifadeleri kullanabiliriz.

$$x_{e0} - x'_k = L_A \ln \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2\varepsilon\varepsilon_o(\Delta\varphi_{ok} - u_k)}{qN_{DK}L_A^2}} \right] \quad (3.14)$$

$\Delta\varphi_{ok}$ – Kolektör geçişinin temas potansiyelinin farkı.

$$\Delta\varphi_{ok} = \varphi_T \ln \frac{N_A(x'_k)N_{DK}}{n_i^2} \quad (3.15)$$

U_k – Kolektör geçiş voltajı.

L_A – Akseptörün dağıtım uzunluk.

$$L_A = \frac{\omega_{\phi o}}{\ln \left(\frac{N_A(x_{\phi o})}{N_{DK}} \right)} \quad (3.16)$$

ω_{b0} – Beyzin genişliği.

$$\omega_{b0} = x_{k0} - x_{e0} \quad (3.17)$$

ε – Silisyumunun dielektrik sabiti $\varepsilon = 12$.

ε_o – Vakum dielektrik sabiti.

$$\varepsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm.}$$

Kolektör geçişinin ters yönde kutuplama genişliği.

$$x''_k - x'_k = L_{kp-n} = L_A + \sqrt{L_A^2 + \frac{2\varepsilon\varepsilon_o(\Delta\varphi_{ok} - u_k)}{qN_{DK}}} \quad (3.18)$$

Emiter geçişinin ters yönde kutuplama genişliği.

$$x_e'' - x_e' = L_{ep-n} = \left[\frac{12\epsilon\epsilon_o (\Delta\varphi_{O\varnothing} - u_E)}{q \bullet grad[N_A(x) - N_D(x)]} \right]^{1/3} \quad (3.19)$$

$$x_e'' - x_{eo} = \frac{1}{2} L_{ep-n} ,$$

u_e – Emiter geçişinde voltajı

$\Delta\varphi_{OE}$ – Emiter geçişinin temas potansiyelinin farkı

$$\Delta\varphi_{OE} = \varphi_T \ln \frac{p_p(x_e'') \bullet n_n(x_e')}{n_i^2} \quad (3.20)$$

$$p_p(x_e'') = N_A(x_e'') - N_D(x_e'')$$

$$n_n(x_e') = N_D(x_e') - N_A(x_e')$$

Kolektör geçişi normal çalıştığında ve emiter geçişi ters çalıştığında şu ifadeleri kullanılabilir [36,37].

Kolektör geçişi için

$$x_k'' - x_k' = L_{kp-n} = \left[\frac{12\epsilon\epsilon_o (\Delta\varphi_{OK} - u_K)}{q \bullet grad[N_A(x) - N_D(x)]} \right]^{1/3} \quad (3.21)$$

ve emiter geçişi için

$$x_e'' - x_e' = L_{ep-n} = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_o (\Delta\varphi_{OE} - u_E)}{q} \bullet \frac{n_{noe} + p_{pob}}{n_{noe} \bullet p_{pob}} \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

$$x_e'' - x_{\varnothing o} = L_{ep-n} \bullet \frac{n_{noe}}{n_{noe} + p_{pob}} \quad (3.23)$$

n_{noe} – Emiterin yük parçacıklarının denge konsantrasyonun ortalama değeri.

p_{pob} – Beyzin yük parçacıklarının denge konsantrasyonun ortalama değeri.

Bu yüzden (3.14 – 3.23) ifadeleri kullanarak kolektörün ve emiterin geçişliği ve beyzin genişliği hesaplanabilir.

3.3. Transistör Beyzin Elektrik Alanı Belirlemek İçin Analizi

Difüzyon sonucunda, kirlilik konsantrasyonu Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

İki p–n geçişlerinin sınırlarda pozitif yükü olacak ve eğer ($x = x_m$) negatif yükü olacaktır. Bu durumda, beyzde iç elektrik alanı oluşur. Transistörünün normal aktif çalıştığı zaman, (x_m, x_{eo}) bu beyzin kısmında geciktirici alan oluşur ve bu (x_m, x_{ko}) kısmında – hızlandırılmalıdır.

Transistörün kazancını artırmak için geciktirici alanın değerinin azaltması gerekir.

Reddy çalışmalarında $(x_m - x_{eo})/\omega_{bo} = 0,08 - 0,15$ olarak belirlenmiştir. Transistörünün ters yönde çalıştığı zaman (x_m, x_{eo}) kısmı – hızlandırılması alanı oluşur ve (x_m, x_{ko}) – geciktirici alanı oluşur [38–41]. Bu yüzden, transistörünün normal aktif çalıştığı zaman, beyzin elektrik hızlandırılması alanı büyük bir arsa üzerinde oluşur.

3.4. Beyzde Yük Parçacıklarının Transfer Katsayılarını Etkileyen Faktörlerin Analizi

Beyzin alanı üzerinden yük parçacığının taşıma katsayıları için ifadeler verir.

$$\alpha_{TN} = 1 - \frac{\tau_{TN}}{\tau_{rN}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_{TN}^*}{\tau_{rN}}} \quad (3.25)$$

$$\alpha_{TI} = 1 - \frac{\tau_{TI}}{\tau_{rI}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_{TI}^*}{\tau_{rI}}} \quad (3.26)$$

α_{TN} – Akış normal yönü ile azınlık yük parçacığının katsayısı transferi,

α_{TI} – Ters akış yönüne katsayısı transferi,

τ_{rN}, τ_{rI} – Normal ve ters akış yönlerine için yük parçacığının ömür süresi,

τ_{TN}, τ_{TI} – Normal ve ters akış yönlerine.

Beyz alanı ile yük parçacığının geçiş süresi sabit yoğunluk akımları için normal ve ters akış yönlerin yük parçacığının ortalama geçiş süresidir.

Kayma, transistörlerin τ_{TN}^* ve τ_{TI}^* değerleri (3.27) ifadesini kullanarak tespit edilmektedir [42].

$$\tau_{TN}^* = \tau_{TI}^* = \frac{\omega_b^2}{2D} \quad (3.27)$$

ω_b – Beyzin genişliği.

Sürüklenme transistörlerde beyz bölgesi difüzyondan dolayı düzensiz katkılanmıştır. Bu durumda, yük parçacığının ömür süresi ve hareketliliği beyzde önemli ölçüde değişir.

τ_{rN} değeri emiter geçişinin yük parçacığının ömür süresi değerine eşit olmalıdır. Ve τ_{rI} – beyz bölgesi içinde yük parçacığının ömür süresi ortalama değerine eşittir. Transistörlerinin τ_{TN}^* ve τ_{TI}^* değerleri için şu ifadeleri kullanarak tespit edilebilir.

$$\tau_{TN}^* = \frac{\omega_b^2}{2D} f(\eta) \quad (3.28)$$

$$\tau_{TI}^* = \frac{\omega_b^2}{2D} \bullet \frac{1}{f(\eta)} \quad (3.29)$$

D– Beyz bölgesi içinde yük parçacığının yayılma katsayısı ortalama değeri.

$f(\eta)$ – Beyz bölgesi ile yük parçacığının geçiş süresi üzerinde yerleşik bir elektrik alanın etkisi karakterize etmektedir.

$f(\eta)$ İşlevi bu ifadeyi kullanarak, hesaplanabiliriz

$$f(\eta) = \frac{1}{\eta^2} [\eta - e^{-\eta} \bullet sh(\eta)] \quad (3.30)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \frac{N_A(x_{EO})}{N_{DK}} \quad (3.31)$$

(3.25 – 3.31) ifadelerin analize göre yük parçacığının transfer katsayılarına α_{TN} ve α_{TI} , yük parçacığının ömür süresi enjeksiyon seviyesine ve sıcaklığından değişime, yük parçacığının hareketliliği sıcaklığından değişime ve ω_b beyzinin genişliğinin değişimini etkileyecektir.

Bu nedenden dolayı yük parçacığının transfer katsayıları beyz bölgesinde sabit değildir.

3.5. Transistörünün p–n Geçişlerinin Ters Akımlarının Araştırma ve Analizi

Transistörün elektrik süreçleri modellemek için transistörünün p – n geçişlerinin ters akımlarının analizi önemlidir. Transistörün modelinde kullanılan temel parametrelerden biridir.

Genel olarak silisyumnun p–n geçişinin ters akımı I_{inv} oluşmaktadır [23]:

$$I_{inv} = I_d + I_j + I_c + I_k \quad (3.32)$$

I_d – Difüzyon akımı,

I_j – p– n geçişinin jenerasyon akımı,

I_c – Kanal akımı,

I_k – Kaçak akımı.

p–n yapıda sıcaklık değişime bağlı olarak azınlık yük taşıyıcıları artar ve buda ters bir difüzyon akımının (I_d) oluşmasına neden olur [12,20].

Azınlık yük parçacıklarının sayısı, mesela deliklerin n- bölgede, birim hacim başına birim zamanda üretilmektedir . Azınlık yük parçacıklarının sayısı denkleme $\frac{p_{no}}{\tau_p}$ eşittir.

Bu nedenle difüzyon akımının I_{dp} delik bileşeni geçiş sürecinde, aşağıdaki formül ile tespit edilebilir [32].

$$I_{dp}=q \frac{p_{no}}{\tau_p} S_n L_p \quad (3.33)$$

$S_n L_p$ – n- bölgenin difüzyon uzunluğu içinde yatan hacmi

S_n – p–n geçişinin alanı

Benzer bir ifadeyi azınlık yük parçacıklarının içinde yazılabilir.

$$I_{dn}=q \frac{n_{po}}{\tau_n} S_n L_n \quad (3.34)$$

$S_n L_n$ – p- bölgenin difüzyon uzunluğu içinde yatan hacmi,

L_n – Elektronlarının difüzyon uzunluğu.

Mevcut bir elektrik alanı etkisine girdiğinde, yük parçacığının difüzyon uzunluğu L_p ve L_n yerine etkili bir difüzyon uzunluğu L_{efp} ve L_{efn} kullanmak gerekir.

Emiter alanın gerilim düşümü hesaplamak için, emiter alanı merkez ve periferik parçalara bölünmesi gerekir. Kolektör geçişinin alanı da aktif ve pasif bölümlere ayıracağız.

Kolektör geçişin ters akımının difüzyon bileşeni için aşağıdaki ifadeler olacaktır:

aktif alanın elektronik bileşeni için;

$$I_{dkn1}=q \frac{n_{po1}}{\tau_{rl}} S_E (x'_K - x''_E) \quad (3.35)$$

ve pasif alanı için;

$$I_{dkn2} = q \frac{n_{po2}}{\tau_{rl}} (S_K - S_E) x'_K \quad (3.36)$$

n_{po1} – Aktif alanı için azınlık yük parçacıklarının ortalama konsantrasyonu.

$$n_{po1} \approx \frac{n_i^2}{N_A(x'_K) - N_{DK} + \frac{N_A(x''_E) - N_A(x'_K)}{2}} \quad (3.37)$$

n_{po2} – Pasif alanı için azınlık yük parçacıklarının ortalama konsantrasyonu.

$$n_{po2} \approx \frac{n_i^2}{N_A(x'_K) - N_{DK} + \frac{N_A(0) - N_A(x'_K)}{2}} \quad (3.38)$$

S_K, S_E – Kolektörünün ve emiterinin alanları,

n_i – Kendinin yük parçacığının konsantrasyonu.

(3.37) ve (3.38) ifadeleri beyz bölgesine için geçerli kabul edilebilir. Çünkü transistörlerde kolektör tekdüze katkılanmıştır. Eğer beyzin katkılama doğru hesaplanırsa (2.52) ve (2.53) şu şekilde yazılabilir.

$$I_{dkn1} = q \frac{S_{\varnothing} (x'_K - x''_E)}{\tau_{rl}} \bullet \frac{n_i^2}{\int_{x''_E}^{x'_K} [N_A(x) - N_D(x)] dx} \quad (3.39)$$

$$\text{ve} \quad I_{dkn2} = q \frac{(S_K - S_E) x_K'^2}{\tau_{rl}} \bullet \frac{n_i^2}{\int_0^{x'_K} [N_A(x) - N_D(x)] dx} \quad (3.40)$$

Emiter geçişine beyz iç elektrik alanı geciktirici edilir ve etkin bir difüzyon uzunluğu olacaktır:

$$L_{ef.se} = L_n \frac{E_s}{E} = \frac{\omega_{bo}}{\ln \frac{N_A(x_{eo})}{N_{DK}}} \quad (3.41)$$

Dolayısıyla, emiter geçişi difüzyon akımının elektronik bileşeni, aşağıdaki ifadeler ile tespit edilecektir:

merkez alanı için;

$$I_{den1} = q \frac{n_{po1}}{\tau_{rI}} S_{E1} \cdot \frac{\omega_{bo}}{\ln \frac{N_A(x_{eo})}{N_{DK}}} \quad (3.42)$$

ön alanı için;

$$I_{den2} = q \frac{n_{po1}}{\tau_{rI}} S_{E2} \cdot \frac{\omega_{bo}}{\ln \frac{N_A(x_{eo})}{N_{DK}}} \quad (3.43)$$

S_{E1} , S_{E2} – Emiterin merkez ve ön alanları.

Bu ifadeleri şu şekilde yazılabiliriz:

$$I_{den1} = q \frac{S_{E1} L_{EF,SE}^2}{\tau_{rN}} \cdot \frac{n_i^2}{\int_{X_E'} [N_A(x) - N_D(x)] dx} \quad (3.44)$$

$$I_{den2} = q \frac{S_{E2} L_{EF,SE}^2}{\tau_{rN}} \cdot \frac{n_i^2}{\int_{X_E''} [N_A(x) - N_D(x)] dx} \quad (3.45)$$

Emiter geçişi ters akımının delik difüzyon bileşeni

$$I_{dep1} = q \frac{S_{E1} X_E'^2}{\tau_{PE}} \cdot \frac{n_i^2}{\int_0^{X_E'} [N_D(x) - N_A(x)] dx} \quad (3.46)$$

$$I_{dep2} = q \frac{S_{E2} X_E''^2}{\tau_{PE}} \cdot \frac{n_i^2}{\int_0^{X_E''} [N_D(x) - N_A(x)] dx} \quad (3.47)$$

τ_{pe} – Emiter deliğin ömrü.

Kolektör geçişi difüzyon akım, kolektörün donör safsızlık konsantrasyonu ile belirlenir.

$$I_{dkp} = q \frac{S_K L_{PK}}{\tau_{PK}} \cdot \frac{n_i^2}{N_{DK}} \quad (3.48)$$

τ_{PK} – Kolektör deliğinin ömrü,

L_{PK} – Kolektör deliğinin difüzyon uzunluğu.

Azınlık yük parçacığının ömrü transistörün alanların her biri için farklıdır.

($L = \sqrt{D\tau}$), Shockley – Read rekombinasyonu istatistiklerine göre belirlenir.

$$\tau = \frac{n_o + n_t + \Delta n}{n_o + p_o + \Delta n} \cdot \frac{1}{R_n N_t} + \frac{p_o + p_t + \Delta n}{n_o + p_o + \Delta n} \cdot \frac{1}{R_p N_t} \quad (3.49)$$

$$n_t = N_c \exp\left(-\frac{\varphi_c - \varphi_t}{\varphi_T}\right) \quad (3.50)$$

$$p_t = N_v \exp\left(-\frac{\varphi_t - \varphi_v}{\varphi_T}\right) \quad (3.51)$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n q \varphi_T}{h^2} \right)^{3/2} \approx 6,5 \cdot 10^{16} \left(\frac{m_n}{m} \right)^{3/2} \cdot T^{3/2} \quad (3.52)$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p q \varphi_T}{h^2} \right)^{3/2} \approx 0,5 \cdot 10^{16} \left(\frac{m_p}{m} \right)^{3/2} \cdot T^{3/2} \quad (3.53)$$

$$R_p = \sigma_{ef.} \sqrt{\frac{3KT}{m_p}} \quad (3.54)$$

$$R_n = \sigma_{ef.} \sqrt{\frac{3KT}{m_n}} \quad (3.55)$$

m_n, m_p – Elektronun ve deliğinin etkili kütleleri.

m – Serbest elektronun kütlesi,

φ_F – Fermi seviye,

h – Planck sabiti,

N_t – Rekombinasyonun merkezlerinin konsantrasyonu,

σ_n, σ_p – Elektronun ve deliğin alan hesitleri.

Elektronik yarı iletken için [33-38]

$$\varphi_{Fn} = \varphi_E + \varphi_m \ln \frac{n_n}{n_i} \quad (3.56)$$

Delğin yarı iletken için

$$\varphi_{Fp} = \varphi_E - \varphi_m \ln \frac{p_p}{n_i} \quad (3.57)$$

$$\varphi_E = \frac{\varphi_C + \varphi_V}{2}$$

p – n geçişi ters akımının jenerasyon bileşeni böyle yazılabiliriz.

$$I_r = \frac{qn_i SL_{p-n}}{2\tau_{pn}} \quad (3.58)$$

L_{pn} – p - n genişliği,

τ_{pn} – Yük parçacıklarının ömrü.

Burada, τ_{pn} değeri bilinen formülden hesaplanır [2,14].

$$\tau_{pn} = \sqrt{\tau_{po} \tau_{no}} \quad (3.59)$$

τ_{po} ve τ_{no} – Ağır katkılı yarı iletkenlerin yük parçacığının ömrü.

p – n geçişi ters akımının kanal akımı bileşeni hesaplanması oldukça zordur.

Silisyum oksit içinde bir pozitif yük oluşumun ve yüzeyde rekombinasyon süreçlerinin yüksek oranda kanal akımlarının sonucudur. Simülasyon sürecinde orta ve yüksek enjeksiyon düzeyde kanal akımları ihmal edilebiliriz. Çünkü sadece düşük katkılama önemlidir [39].

İlgi bölgesinde, p–n geçişi ters akımın bileşenlerinin sıcaklık bağımlılığı, aşağıdaki tek parametrelerinin sıcaklık bağımlılık ile belirlenir [40].

$$n_i = 8,85 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \exp(-6450/T) \quad (3.60)$$

$$D_p = \frac{KT}{q} \mu_p \quad (3.61)$$

$$\mu_p = \mu_{po} \left(\frac{300}{T} \right)^{2,5} \quad (3.62)$$

$$\mu_{po} = \left\{ \begin{array}{l} 500, N < 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ \frac{180 \cdot (18,2 - \lg N), 10^{15} \text{ cm}^{-3} < N < 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}}{40, N > 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}} \end{array} \right\} \quad (3.63)$$

$$D_n = \frac{KT}{q} \mu_n \quad (3.64)$$

$$\mu_n = \mu_{no} \left(\frac{300}{T} \right)^{2,5} \quad (3.65)$$

$$\mu_{no} = \left\{ \begin{array}{l} 1300, N < 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \\ \frac{300 \cdot (19 - \lg N), 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} < N < 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}}{80, N > 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}} \end{array} \right\} \quad (3.66)$$

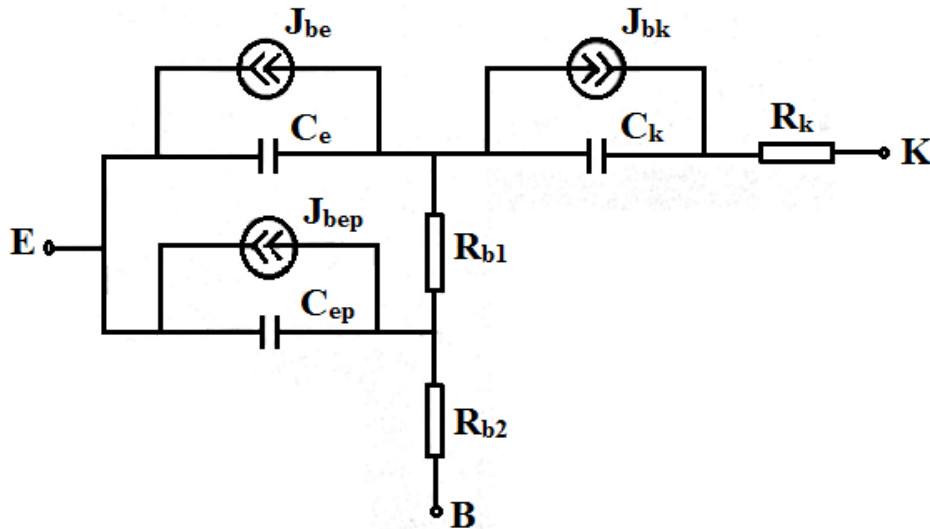
μ_p, μ_n – Elektronun ve deliğinin hareketliliği,

μ_{po}, μ_{no} – Elektronun ve deliğinin oda sıcaklığında hareketliliği.

Sonuç olarak, p–n geçişi ters akımın bileşenlerinin azınlık yük parçacıklarının konsantrasyona, hareketliliğine ve ömrüne bağlıdır. Bunlar da pek çok faktörlere bağlıdır ki transistör bölgelerin katkılama derecesine, üretim teknolojisine, enjeksiyon seviyesine, sıcaklığına ve radyasyona bağlıdır.

p–n geçişi ters akımın değerleri tespit edildikten sonra I_{be} , I_{ben} , I_{bk} akımları hesaplamaya devam edebiliriz.

Bu akımlar Şekil 3.3.'de transistörün basitleştirilmiş eşdeğer devre modelde gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Transistörün basitleştirilmiş eşdeğer devre modeli

$$I_{be} = I_{en1} + I_{ep1} + I_{rge1} - \alpha_{TI} \cdot I_{kn1} \quad (3.67)$$

$$I_{bep} = I_{en2} + I_{ep2} + I_{rge2} \quad (3.68)$$

$$I_{bk} = I_{kn1} + I_{kn2} + I_{kp} + I_{rgk} - \alpha_{TN} \cdot I_{en1} - \alpha_{TN} \cdot I_{en2} \quad (3.69)$$

I_{en1} , I_{en2} – Merkez ve ön parçadan oluşturulan akımlar,

I_{ep1} , I_{ep2} – Beyzden emitere delikleri oluşturulan akımlar,

I_{rge1}, I_{rge2} – Emiter geçişin merkez ve ön parçaların rekombinasyon ve jenerasyon akımları,

I_{kn1}, I_{kn2} – Kolektör geçişin aktif ve pasif parçalardan elektronları oluşturulan akımlar,

I_{kp} – Beyzden kolektöre delikleri oluşturulan akımlar,

I_{rgk} – Kolektör p – n geçişinin rekombinasyon ve jenerasyon akımları.

p–n geçişlerin enjeksiyon akımının bileşenleri tanımlamak denklemleri:

$$I_{en1}=I_{den1} \left[\exp\left(\frac{u_E}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.70)$$

$$I_{en2}=I_{den2} \left[\exp\left(\frac{u_{En}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.71)$$

$$I_{ep1}=I_{dep1} \left[\exp\left(\frac{u_E}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.72)$$

$$I_{ep2}=I_{dep2} \left[\exp\left(\frac{u_{EN}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.73)$$

$$I_{kn1}=I_{dkn1} \left[\exp\left(\frac{u_\kappa}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.74)$$

$$I_{kn2}=I_{dkn2} \left[\exp\left(\frac{u_\kappa}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.75)$$

$$I_{kp}=I_{dkp} \left[\exp\left(\frac{u_\kappa}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.76)$$

Rekombinasyon ve jenerasyon akımlarının değerleri aşağıdaki ifadeleri ile makul doğrulukla tespit edilebilir.

$$I_{rge1} = \frac{qn_i S_{E1} L_{E\ p-n1}}{2\tau_{pn}} \left[\exp\left(\frac{u_E}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.77)$$

$$I_{rge2} = \frac{qn_i S_{e2} L_{ep-n2}}{2\tau_{pn}} \left[\exp\left(\frac{u_{EN}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.78)$$

$$I_{rgk} = \frac{qn_i S_{\kappa} L_{\kappa p-n}}{2\tau_{pn}} \left[\exp\left(\frac{u_{\kappa}}{\phi_T}\right) - 1 \right] \quad (3.79)$$

Geliştirilen modelde emiterin verimliliği I_{en1} , I_{en2} , I_{ep1} , I_{ep2} , I_{rge1} , I_{rge2} akımları tanımlamaktır.

4. RADYASYON DİRENCİ OLASI YÜKSELİŞİ ANALİZİ ETMEK İÇİN SİLİSYUM TRANSİSTÖRLERİN SİMÜLASYONU

Bu bölümde silisyum transistörlerin parametrelerinin hesaplamak için başlangıç ilişkileri ve farklı geometrik boyutları ile transistör hesaplamaların sonuçları anlatılacaktır. Bu bölümde, aynı zamanda azınlık yük parçacıklarının radyasyonun ömür boyu sürekli değişim sabiti belirlemek için hesaplama yöntemi gösterilmiştir.

4.1. Silisyum İki Kutuplu Transistör Parametrelerinin Hesaplamak İçin Başlangıç İlişkileri

Radyasyonun ve sıcaklığının etkileri simüle etmek için Şekil 4.1’de iki kutuplu transistör modelinin eşdeğer evrensel devresi gösterilmektedir [41,42].

Beyz akımının bileşenleri aşağıdaki ifadelerden belirlenen:

$$I_a = I_{en} - \alpha_{TN} I_{en} \quad (4.1)$$

$$I_g = I_{denbok} (\exp(u_e/\phi_T) - 1) \quad (4.2)$$

$$I_{ebv} = I_{ge} (\exp(u_e/\phi_T) - 1) \quad (4.3)$$

$$I_i = (I_{dep} + I_{depbok}) (\exp(u_e/\phi_T) - 1) \quad (4.4)$$

α_{TN} – Aktif beyz bölgesi boyunca yük parçacıklarının transfer katsayısı.

$$\alpha_{TN} = 1 / (1 + \tau_{TN} / \tau_{rN}) \quad (4.5)$$

τ_{TN} – Transistörün beyz bölgesinden yük parçacığının ortalama geçiş zamanı.

τ_{rN} – Beyzin azınlık yük parçacığının ömrü.

I_{en} – Emiterden beyz aktif bölgesine elektronlarının enjeksiyon akımı.

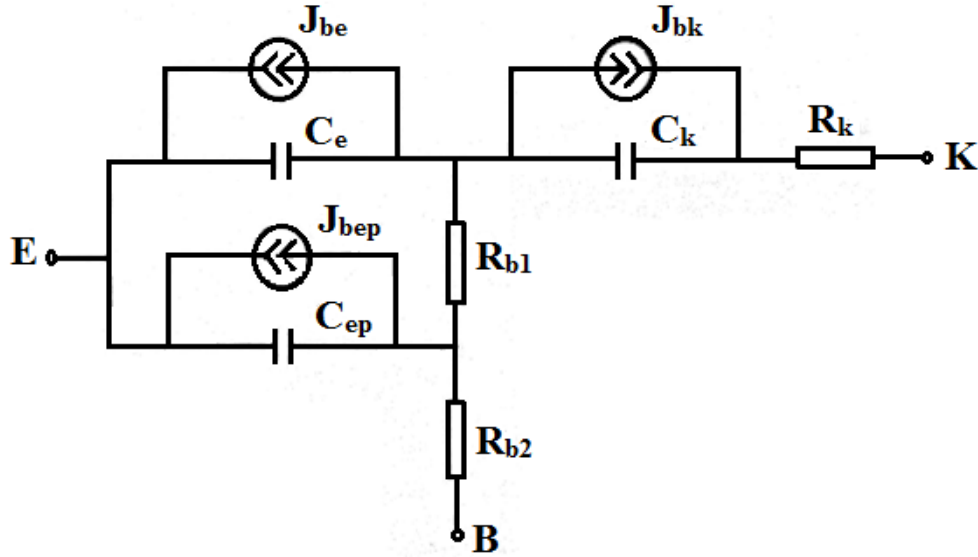
$$I_{en} = I_{den} (\exp(u_e/\phi_T) - 1) \quad (4.6)$$

I_{den} – Emiter geçişin aktif bölgesinin ters akımının difüzyon elektronik bilişini.

U_e – Emiter geçişinin voltajı.

$\phi_T = (KT)/q$ – Sıcaklığının potansiyeli.

I_{denbok} – Emiter geçişin pasif bölgesinin ters akımının difüzyon elektronik bileşeni.



Şekil 4.1. İki kutuplu transistörün eşdeğer devre modeli

I_{ge} – Emiter geçişin ters akımının jenerasyon bileşeni.

I_{dep} – Emiter geçişin aktif bölgesinin ters akımının difüzyon deliklik bileşeni.

I_{depbok} – Emiter geçişin pasif bölgesinin ters akımı.

(4.2), (4.4) ve (4.6) ifadelerde emiter geçişin ters akımının difüzyon bileşeni aşağıdaki ifadeleri kullanarak belirlenir:

$$I_{den} = q * \frac{\bar{n}_{p01}}{\tau_{rN}} * S_{ea} * W_{bo} / \ln(N_A(x_{eo})/N_{DK}) \quad (4.7)$$

$$I_{denbok} = q * (n_{p02} / \tau_{rN\delta OK}) * S_{ebok} * \bar{L}_{nbok} \quad (4.8)$$

$$I_{dep} = q * (S_{ea} * x_e'^2 / \tau_{pe}) * n_i^2 / \left(\int_0^{x_2'} [N_D(x) - N_A(x)] dx \right) \quad (4.9)$$

$$I_{depbok} = q * (S_{e\delta OK} / \tau_{pe}) * n_i^2 / N_{Decp} * L_{pe} \quad (4.10)$$

q – Elektron yükü.

$\bar{n}_{po1}$ – Beyz aktif bölgesi için azınlık yük parçacığının ortalama yoğunluğu.

$$\bar{n}_{po1} \approx \frac{n_i^2}{N_A(x'_\kappa) - N_{DK} + \frac{N_A(x''_e) - N_A(x'_\kappa)}{2}} \quad (4.11)$$

S_{ea}, S_{eboK} – Emiter geçişinin aktif ve pasif alanlar.

W_{bo} – Beyz aktif bölgesinin genişliği.

$N_A(x_{eo})$ – Beyz aktif bölgesinin emiter geçişinin yanında akseptör kirlilik konsantrasyonu.

N_{DK} – Kolektörün donör kirlilik konsantrasyonu.

n_{po2} – Beyz pasif bölgesinin azınlık yük parçacığının ortalama yoğunluğu.

L_{nbok} – Beyz bölgesinin elektronun difüzyon uzunluğu ortalama değeri.

τ_{pe} – Emiterin azınlık yük parçacıklarının (deliklerin) ömrü.

L_{pe} – Emiterin deliklerinin difüzyon uzunluğu.

N_{DeorT} – Emiterin donör kirliliği ortalama konsantrasyonu.

n_i – Silisyumunun yük parçacıklarının içsel konsantrasyonu.

(4.9) ifadede emiter derinliği x_e' emiter p – n geçişin aktif bölgesinin genişliği belirlendikten sonra L_{ep-na} hesaplanabilir.

$$X_e' = x_{eo} - \frac{1}{2} * L_{ep-na} \quad (4.12)$$

(4.3) ifadede emiter geçişin ters akımının jenerasyon bileşeni aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$I_{ge} = q(S_{ea} L_{ep-na} + S_{eboK} L_{ep-nbok}) * \frac{n_i}{\tau_i} \quad (4.13)$$

$L_{ep-nbok}$ – Emiter geçişin pasif bölgesinin genişliği.

τ_i – Yarı iletkenin kendi azınlık yük parçacığının ömrü.

(4.5) ifadede, τ_{TN} değeri aşağıdaki ifade kullanılarak belirlenir:

$$\tau_{TN} = \frac{W_b^2}{2D_n} * f(\eta) \quad (4.14)$$

beyzin genişliği W_b , aşağıdaki ifade kullanılarak belirlenir:

$$W_b = x_K' - x_e'' \quad (4.15)$$

$$x_K' = x_{K0} - L_{kp-n1} \quad (4.16)$$

$$x_e'' = x_{e0} + \frac{1}{2} * L_{ep-na} \quad (4.17)$$

D_n – Beyz bölgesinde yük parçacıklarının ortalama difüzyon katsayısı.

$$D_n = \phi_T \mu_n \quad (4.18)$$

$f(\eta)$ – Beyz bölgesin yük parçacığının transit zaman ile ilgili dahili elektrik alanın etkisi fonksiyonu.

Bu fonksiyonun değeri ($f(\eta)$) böyle tanımlanır.

$$f(\eta) = \frac{1}{\eta^2} [\eta - \exp(-\eta) * sh(\eta)] \quad (4.19)$$

$$\eta = \frac{1}{2} * \ln \left(\frac{N(x_{e0})}{N_{DK}} \right) \quad (4.20)$$

Transistörlerinin beyzin azınlık yük parçacıklarının (elektronlarının) hareketliliği Seeger ile [2, 4] $300 \text{ cm}^2/(\text{V} * \text{s})$ olarak alınabilir.

(4.16) ve (4.17) ifadelerde L_{kp-n1} ve L_{kp-na} değerleri böyle tanımlanır.

$$L_{kp-n1} = x_{K0} - x_K' = L_a \ln \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2\epsilon_o(\Delta\phi_{ok} - U_K)}{qN_{DK}L_A^2}} \right] \quad (4.21)$$

$$L_{\text{kp-na}} = x_{\text{e}}'' - x_{\text{e}}' = \left[\frac{12 \varepsilon_o (\Delta \varphi_{oe} - U_e)}{q \bullet \text{grad}[N_A(x) - N_D(x)]} \right]^{1/3} \quad (4.22)$$

$\Delta \varphi_{ok}$ – Kollektör geçişinin temas potansiyelinin farkı.

$$\Delta \varphi_{ok} = \varphi_T \ln \left(\frac{N_A(x'_{\kappa}) \bullet N_{DK}}{n_i^2} \right) \quad (4.23)$$

U_K – Kollektör geçişinin voltajı.

L_A – Akseptör dağıtımında karakteristik uzunluğu.

$$L_A = \frac{W_{bo}}{\ln \left(\frac{N_A(x_{eo})}{N_{DK}} \right)} \quad (4.24)$$

ε – Dielektrik sabite, silisyum için $\varepsilon = 12$,

ε_o – Vakuumnun dielektrik sabite $\varepsilon_o = 8,85 * 10^{-14} \text{ F/cm}$,

$\Delta \varphi_{oe}$ – Emiter geçişinin temas potansiyelinin farkı.

$$\Delta \varphi_{oe} = \varphi_T \ln \left(\frac{p_p(x''_e) \bullet n_n(x'_e)}{n_i^2} \right) \quad (4.25)$$

$$p_p(x_e'') = N_A(x_e'') - N_D(x_e'')$$

$$n_n(x_e') = N_D(x_e') - N_A(x_e')$$

(4.5) ifadesinde, beyzin azınlık yük parçacıklarının başlangıç ömür süresini τ_{rN} tanımlamak zordur. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar doğrultusunda Shockley – Read rekombinasyon modelinde τ_{po} ve τ_{no} değerlerini tanımlamak için yararlıdır. h_{21e} bilinen parametresinin başlangıç değeri geri – hesaplama ile oranları kullanılarak bilinmektedir.

$$h_{21ef} = \frac{1}{\frac{1}{h_{21e}} + \frac{1}{2\pi f_T} K_r F} \quad (4.26)$$

$$h_{21e} = \tau_{rN} / \tau_{TN} \quad (4.27)$$

$$\tau_{rN} = h_{21e} * \tau_{TN} \quad (4.28)$$

h_{21e} değerleri ile transistör yapısının performansını göstergeleri belirleyen.

$$K_1 = \tau_{TN} + t_p + (C_{be} + C_{de})R_b + C_{bk}R_k, \quad (4.29)$$

t_p – Yük parçacıklarının rezorpsiyon zamanı,

C_{be} – Emiter geçişinin bariyer kapasitans,

C_{de} – Emiter geçişinin difüzyon kapasitans,

R_b – Beyz hacim direnci,

C_{bk} – Kolektör geçişinin bariyer kapasitans,

R_k – Kolektörün hacim direnci.

Geçiş sürecinin bileşenlerini belirleyen önemli faktörler şunlardır:

1) Gecikme süresi

$$T_{gs} = \tau_i * \ln \left(1 + \frac{u_{bo}}{E_{b1}} \right) \quad (4.30)$$

E_{b1} – Gerilim değeri,

U_{bo} – Transistörün voltajı,

τ_i – Zamanın sabite.

$$\tau_i = R_b C_{in} \quad (4.31)$$

R_b – Beyz devresinin direnci,

C_{in} – Transistörün giriş kapasitansı.

$$C_{in} = C_{eb} + C_{kb} \quad (4.32)$$

2) Ön yükselme zamanı

$$t_f = \tau_{rN} * \ln \left(\frac{I_{b1} \bullet h_{21e}}{I_{b1} h_{21e} - I_{KH}} \right) \quad (4.33)$$

I_{b1} – Beyz akımı,

I_{KH} – Kolektörün akımı.

$$I_{KH} = \frac{E_K}{R_K} \quad (4.34)$$

3) Yük parçacıklarını resorbsiyon zamanı

$$t_r = \tau_n * \ln \left(\frac{I_{b1} - I_{b2}}{I_{KH} / h_{21e} - I_{b2}} \right) \quad (4.35)$$

I_{b2} – Beyz sızıntı akımı,

τ_n – Beyzin ve kolektörün yük parçacıklarının zaman sabiti.

$$\tau_n = \frac{\tau_{rN}}{1 + h_{21e}(1 - \gamma)} \quad (4.36)$$

γ – Emiter geçişinin azınlık yük parçacıklarının enjeksiyon katsayısı.

$$\gamma = I_{en} / (I_{en} + I_{ep}) \quad (4.37)$$

4) Sönme zamanı

$$t_{ns} = \tau_{rN} * \ln \left(\frac{I_{KH} / h_{21e} - I_{b2}}{-I_{b2}} \right) \quad (4.38)$$

Bu ifadelerde radyasyon zararları etkisi dikkate alınmıştır. Aşağıdaki ifadeler yapının farklı bölgelerinde yük parçacıklarının konsantrasyonları azaltmak için, kullanılmıştır.

$$n_{nf} = n_{no} - \frac{\Delta n}{\Delta F} * F \quad (4.39)$$

$$p_{pf} = p_{po} - \frac{\Delta n}{\Delta F} * F \quad (4.40)$$

$\frac{\Delta n}{\Delta F}$ – Işınlama sırasında yük parçacıklarının kaldırma oranı.

Tüm dinamik parametrelerinden yük parçacıklarının resorbsiyon zamanı en yüksek değeri t_r azaltmasının büyük rolü vardır.

5. SONUÇ

5.1. Transistör Yapısı ve Parametrelerin Hesaplaması

Transistörlerin kazanç katsayıları h_{21e} ışınlama öncesinde ve farklı nötron ışınlamada 10^{14} n/cm^2 ve 10^{15} n/cm^2 hesaplanmıştır. Bu hesaplamayla beyzin genişliğinin W_{bo} değerleri değişir. Yük parçacıklarının resorbsiyon zamanı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçları Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Sonuçlar MatLab’ ta hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1. Aktif beyz genişliği ile transistör kazanç değişimi

W_{bo} , μ	1,4	1,0	0,7	0,4	0,3	0,2	0,1
h_{21e}	100	208	429	2010	3400	4500	5600
h_{21Ef} / h_{21e} eğer $F=10^{14} \text{ n/cm}^2$	0,3	0,31	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31
h_{21Ef} / h_{21e} eğer $F=10^{15} \text{ n/cm}^2$	0,06	0,06	0,059	0,058	0,058	0,058	0,058
$t_r, \text{ ns}$	140	152	171	194	208	230	260

Çizelge 5.1.’de beyz aktif bölgesinin genişliğinde bir azalma transistörün kazancın artırmasına neden olur. Ancak, transistörün ışınlama direnci değişmez.

Beyzin ve emiterin sınırdaki en yüksek katkılama seviyesi $8 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ dır. Emiter geçişinin uygulanan gerilimi $u_{ug} \approx 3 \text{ V}$, modern transistör devreleri için beyzin gerilimi yüksek değeride kabul edilebiliriz.

$$u_{cmb} = 3 \text{ V} : W_{bo} = 0,1 \mu,$$

$$u_{cmb} = 12 \text{ V} : W_{bo} = 0,2 \mu,$$

$$u_{cmb} = 26 \text{ V} : W_{bo} = 0,3 \mu,$$

$$u_{cmb} = 48 \text{ V} : W_{bo} = 0,4 \text{ }\mu.$$

Bunun için, modern transistörlerin beyz genişliği 0,2 – 0,4 μ aralığındadır. Bu durumda, transistörlerinin kazanç değerleri 2000 – 5600 aralığındadır.

Transistörlerin kazancı ışınlamadan sonra azalır. İlk aşamada, transistörün kazanç değerini 20 – 50 getirilmelidir. Sonuç elemanların ışınlamaya maruz kaldığında ortaya çıkacaktır.

Bu durumda, transistörün kazanç değerini 10 – 20 arasına getirilmelidir. Sonra bu transistörleri tavlama gerekir ve transistörlerin kazanç değerini 20 – 50 arasına getirilmelidir. Bu çalışmada modelleme yapılan transistörün kazanç değeri 30 – 40 arasına getirilmiştir.

Modelleme ikinci aşamasında, RTP elde transistörün yapılarına nötron ışınlaması simüle edilmesi gerekir. Ve onların radyasyon direncisini tahmin edilmesi gerekir. Tekrarlanan ışınlamadığından simülasyon sonuçları Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Modelleme tekrarlanan maruz kalma sonuçları Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Simülasyon sonuçları

W_{bo}, μ	0,4	0,3	0,2	0,1
h_{21e}	40	40	40	40
h_{21Ef}/h_{21e} eğer $F=10^{14}n/cm^2$	0,85	0,86	0,87	0,88
h_{21Ef}/h_{21e} eğer $F=10^{15}n/cm^2$	0,32	0,34	0,35	0,36
t_r, ns	7	5	3	1

Çizelge 5.1. ve 5.2. verilerin karşılaştırılması gösteriyor ki, transistörlerinin beyz akımının transfer hızı katsayıları büyük ölçüde azalmıştır.

Böylece, silisyum iki kutuplu transistörlerinin radyasyon direncisi ve performansları önemli ölçüde geliştirilebilir (10 kata kadar). Bu sonuç, deneysel olarak tespit edilmiştir. İki kutuplu transistörlerin radyasyon direncini ve performansını artırmak için beyzin aktif bölgenin genişliği 0.03μ kadar azaltması gerekir.

Beyzin uygulanan gerilimi $u_{cmb} = 10 V$ eğer $W_{bo} = 0,05 \mu$ ve $u_{cmb} = 40 V$ eğer $W_{bo} = 0,1 \mu$ olduğunda. Beyzin katkılama konsantrasyonu $5 * 10^{18} cm^{-3}$ olarak elde edilir.

Emiter'e uygulanan gerilim $1V$ kadar azaldığında [2]. Emiter bağlantı noktasına uygulanan gerilimi artırmak için, emiterin katkılama seviyesi azaltılması gerekir. Bu durumda, emiterin yüksek verimliliği sağlamak için, emiter bölgesi hidrojene veya florlu amorf silisyumdan yapılabilir ve yasak bant genişliği $1,4 - 1,7 eV$ arasında ayarlanabilir.

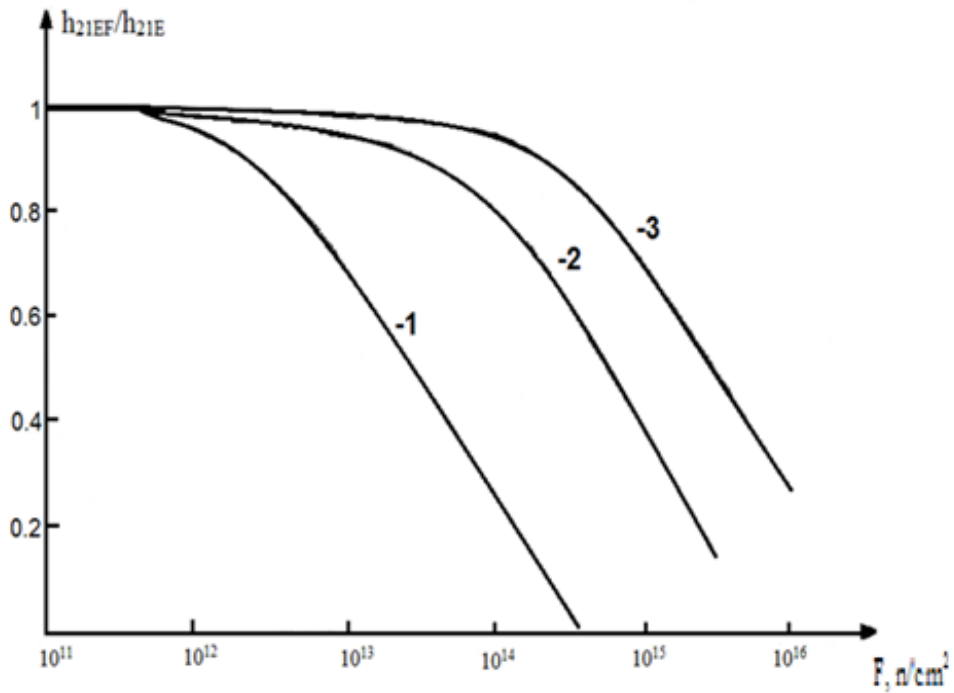
Böylece, transistör yapısının çalışmasını modelleme için beyzin aktif bölgesinin genişliği $0,05 - 0,03 \mu$ olarak alınabilir ve tüm denklemleri değişmeden kullanılabilir.

Transistörlerin radyasyon direncisin tahminleri Çizelge 5.3 göstermektedir.

Çizelge 5.3. İnce bir beyz ile transistör yapıların simülasyon sonuçları

W_{bo}, μ	0,1	0,05	0,03
h_{21e}	40	40	40
h_{21Ef}/h_{21e} eğer $F=10^{14} \text{ n/cm}^2$	0,93	0,96	0,97
h_{21Ef}/h_{21e} eğer $\Phi=10^{15} \text{ n/cm}^2$	0,7	0,72	0,73
$t_r, \text{ ns}$	1	0,8	0,7

5.1. ve 5.3. Çizelgelerden verilerin analize göre (şekil 5.1) iki kutuplu transistörlerin radyasyon direncisi önemli ölçüde arttırılabilir. (Hesaplamalara göre 100 kata arttırılabilir).



Şekil 5.1. Işınlama sırasında silisyumunun iki kutuplu transistörlerinin kazanç hesaplanan bağımlılığı

- 1- 1. çizelgenin verileri.
- 2- 2. çizelgenin verileri.
- 3- 3. çizelgenin verileri

Analizlere dayanarak, iki kutuplu transistörlerin radyasyon direnci ve performansı önemli ölçüde artırılabilir.

5.2. Elektron Işınlaması Altında Azınlık Yük Parçacıkların Ömür Boyu Radyasyonun Sürekli Değişim Hesaplanması

Azınlık yük parçacıkların ömür boyu radyasyonun sürekli değişimi belirlemek için ‘Tek düzeyli’ modelini kullanabiliriz:

$$K_{\tau} = \frac{1}{\frac{1}{C R_p} \left(\frac{n_0 + n_e + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n} \right) + \frac{1}{C R_n} \left(\frac{p_0 + p_e + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n} \right)}, \quad (5.1)$$

$$n_e = N_c * \exp \left(- \frac{\varphi_c - \varphi_e}{\varphi_T} \right) \quad (5.2)$$

$$p_e = N_v * \exp \left(- \frac{\varphi_e - \varphi_v}{\varphi_T} \right) \quad (5.3)$$

$$R_p = \sigma_p * \sqrt{3 * K * T / m_p} \quad (5.4)$$

$$R_n = \sigma_n * \sqrt{3 * K * T / m_n} \quad (5.5)$$

N_c, N_v – Kuantum yoğunluğu.

φ_c – Yarı iletkenlerin yasak bant genişliği.

m_n, m_p – Elektronun ve deliğinin kutlesi.

K – Boltzmann sabiti.

σ_n, σ_p – Elektronun ve deliği alan kesitleri.

C – Uygulama hızı.

$\phi_e = 0,45 \text{ eV}$

(5.1) ifadede uygulama hızını hesaplamak zordur, onun için bu ifadeleri kullanırız.

$$C = K_1 * C_0 * \lg(N_A/N_{A0}) \quad (5.6)$$

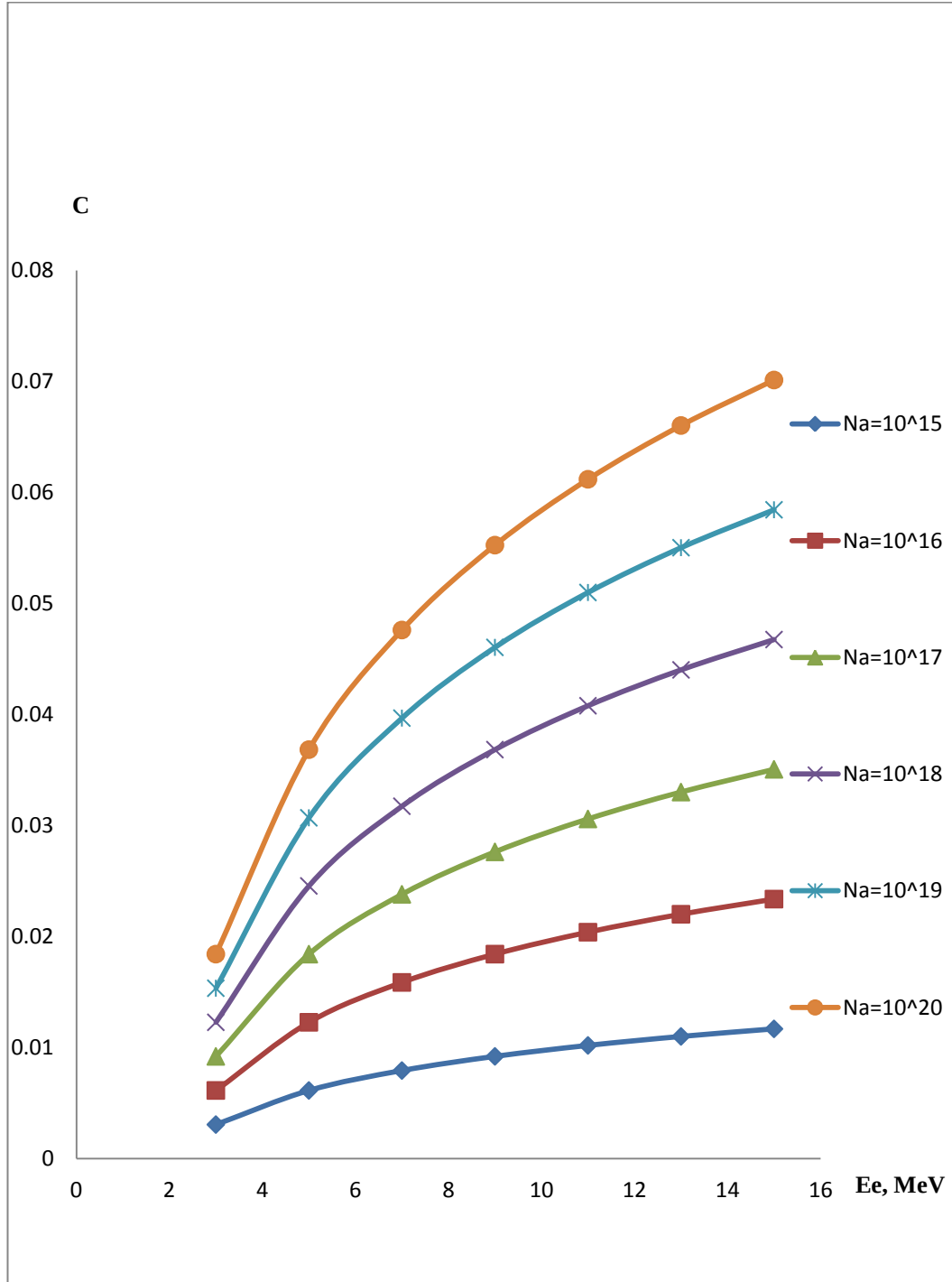
$$C_0 = K_2 * \ln(E_e - 1) \quad (5.7)$$

$N_{A0} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ – Bor’un silisyumda standart konsantrasyonu.

$K_1 = 3, K_2 = 3,4 * 10^{-3}$ – Deneysel olarak alınan katsayıları.

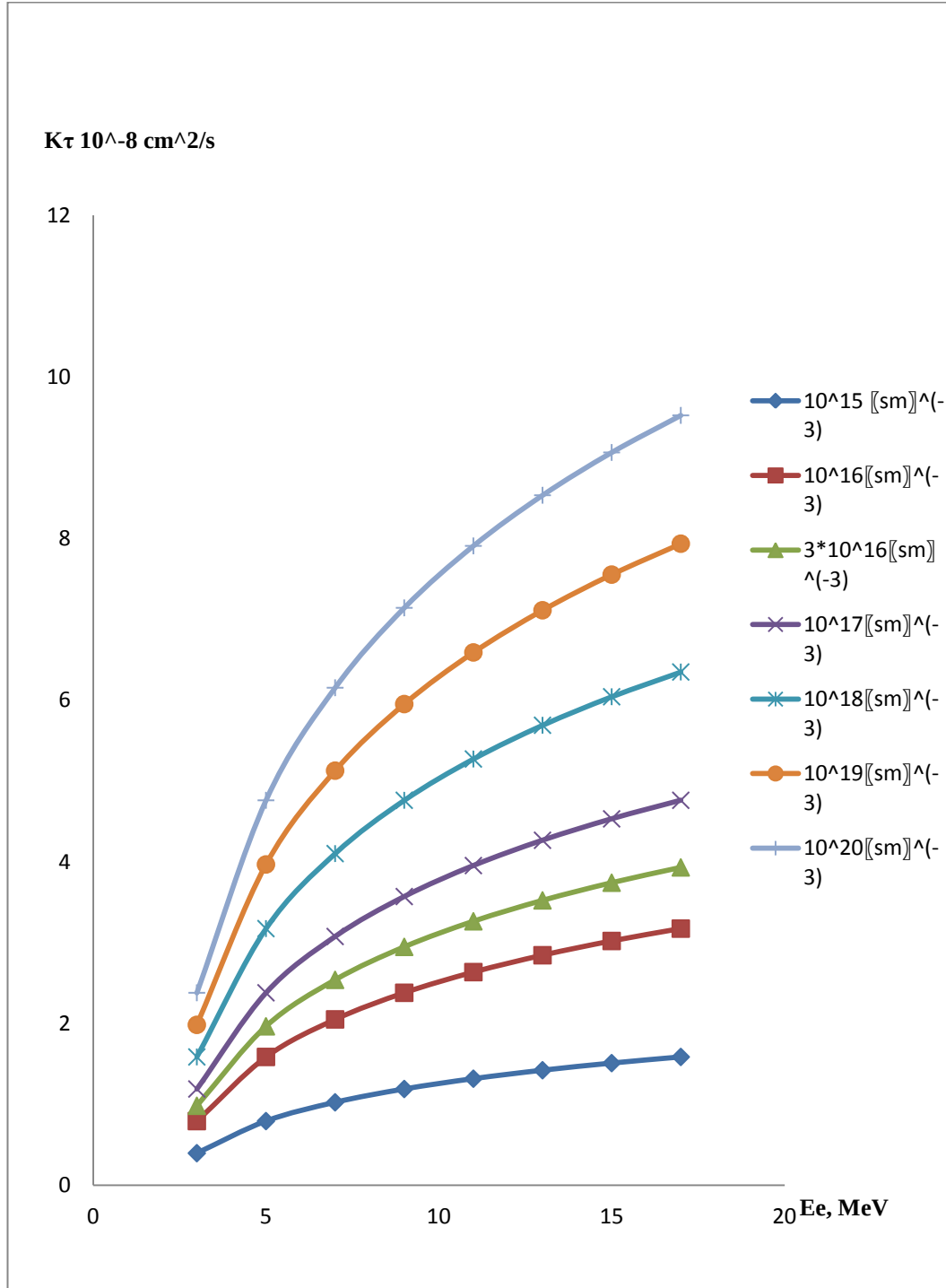
N_A – Bor’un silisyumda konsantrasyonu.

5.2. Şekilde (5.6) ve (5.7) ifadeleri kullanarak hesaplanan ve deneysel verileri arasında uyumluluk vardır.



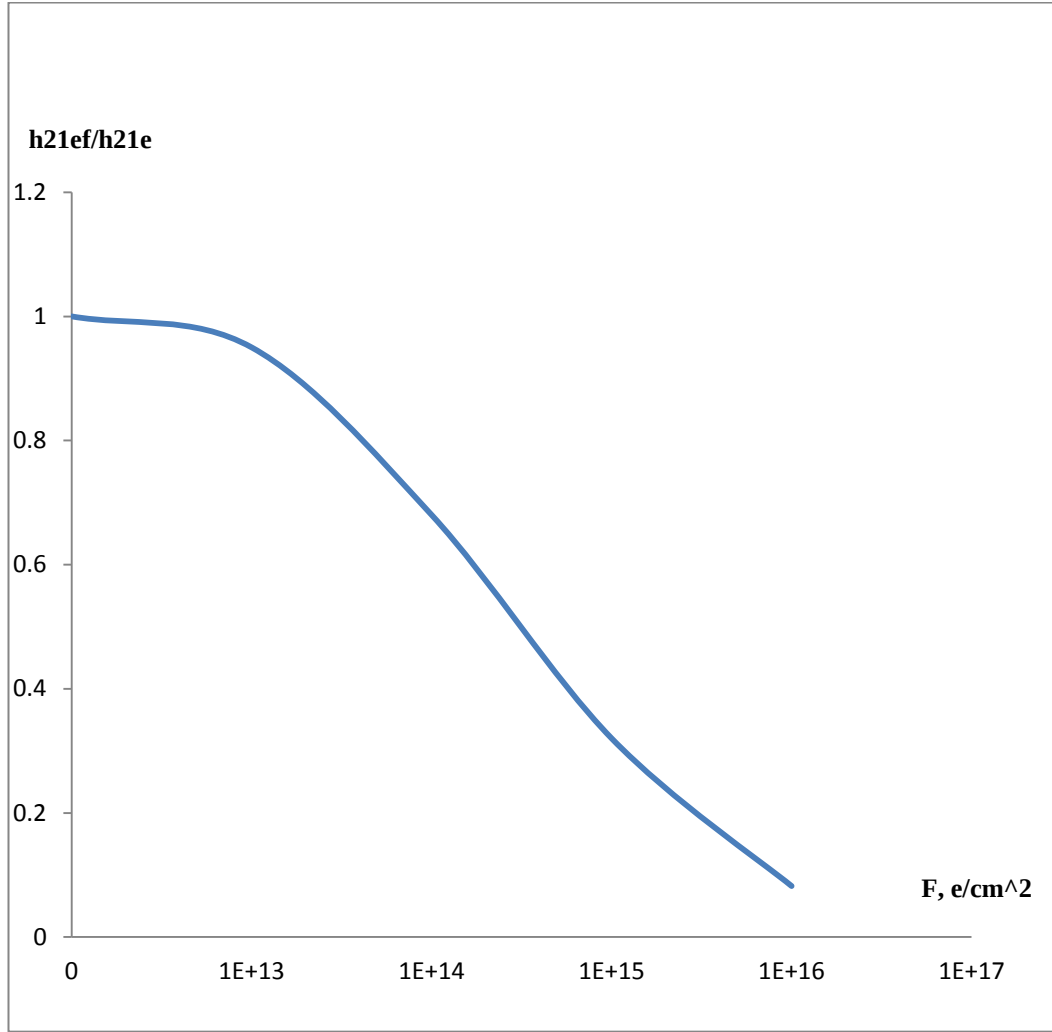
Şekil 5.2. Hızlı elektronların enerjisinden ve katkılama derecesinden arıza uygulama hızı bağımlılığı

(5.1) ifadeyi kullanarak yük parçacığının ömür süresi hesaplanmaktadır. Elde edilen bu verileri şekil 5.3. de görebiliriz.



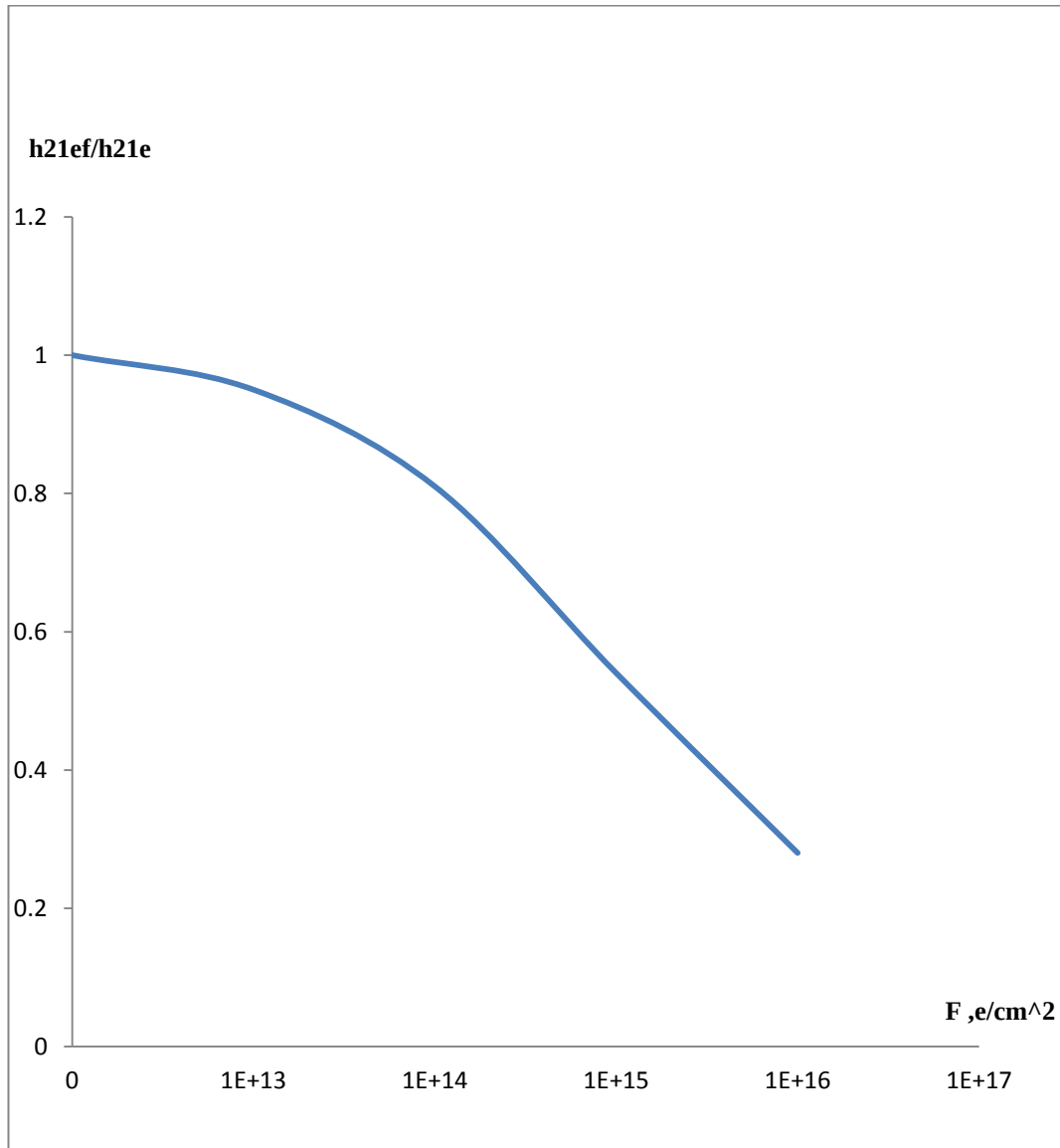
Şekil 5.3. Hızlı elektronların enerjisinin ve katkılama derecesinin bağımlılığı yük parçacığının ömür süresini değiştirir

Bölüm 4.1.'de verilmiş olan yöntemle göre, transistörlerin h_{21Ef} beyz akımının kazancı hesaplandı (Şekil 5.4.).



Şekil 5.4. Elektron ışınlaması ($E_e=5 \cdot 10^6$ eV) altında transistörlerin kazanç bağımlılığı

Elde edilen transistörlerin radyasyon direnç hesaplaması sonuçları şekil 5.5. de görülmektedir.



Şekil 5.5. Elektron ışınlaması ($E_e=5 \cdot 10^6$ eV) altında transistörlerin kazanç bağımlılığı (radyasyon termal süreçlerini kullanarak)

Bu hesaplama yöntemi, transistörlerin radyasyon direncileri hesaplamasında kullanılabilir.

Sonuç:

1. Modelleme sonuçlarının analizi, iki kutuplu transistörler üretiminde radyasyon ışınlama ve termal tavlama teknolojisini kullanarak iki kutuplu transistörlerin radyasyon direncinin artırılabilceğini göstermektedir.

2. Radyasyon-termal süreçlerini kullanarak iki kutuplu transistörlerin yük parçacıklarının resorpsiyon süresini 200 ns'den 1 ns'ye azaltılır.
3. Sonuçlar, tek seviyesi modelinin (yük taşıyıcıların radyasyon ömür boyu sürekli değişim hesaplanması için geliştirilmiştir) yüksek doğruluk gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Olçay, İ., “Radyasyon dedeksiyonunda kullanılan yarı-iletken dedektör tipleri, özellikleri ve kullanılan alanları”, Yüksek Lisans Tezi, **Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Niğde, 10-15 (2007).
2. Vavilov, V. S., Ukhin, N. A., “Radiation Effects in Semiconductors and Semiconductor Instruments”, **Atomizdat**, Moscow, 1969.
3. Linvill, J. G., “Models of Transistors and Diodes”, **Mc. Graw - Hill**, (1963).
4. Sparkes, J. S., “Junction Transistors”, **Pergamon press**, (1966).
5. Ghosh, H. M., “A distributed model of the junction transistor and its application in the prediction of the emitter – base diode characteristic, base impedance and pulse response of the device”, **IEEE Transactions on Electron Devices**, ED-1e (10): 513-531, (1965).
6. Sedore, S. R., “A program for automatic network analysis”, **IBM Journal of Research and Development**, 11 (6): 627-637, (1967).
7. Rey, G., Lemaire, K., Bailbe, J. P., “Identification et caracterisation du compartement d'un transistor bipolaice en regime statique Le modele IBIS”, **“L'ande Electrique”**, 50 (6): 503-516, (1970).
8. Gummel, H. K., “A self – consistent iterative scheme for one – dimensional steady state transistor calculations”, **IEEE Transactions on Election Devices**, 11 (10): 455-465, (1964).
9. Andy, H., “A Guide to MATLAB Object-Oriented Programming”, **SciTech Publishing Inc.**, (2007).
10. Leblebici, D., “Elektronik Elemanları”, **İstanbul**, (2001).
11. Aldamzharov, K. B., Tuyakbayev, A. A., Tuyakbayev, D. A., “Modeling of radiating effects in transistors”, **2011 Microwaves, Radar and Remote sensing Symposium**, Kiev, Ukraine, 371–373, (2011).
12. Franklin, H. , Branin, J. R. , “D-C and transient analysis of networks using a digital computer”, **IRE International Convention Record**, (2): 236-256, (1962).
13. Sedore, S. R., “A program for automatic network analysis”, **IBM Journal of Research and Development**, 11 (6): 627-637, (1967).
14. Moll, J. Z., “Physics of Semiconductors”, **Mc. Graw – Hill**, (1963).

15. Gorjunov, N. N., Ladygin, E.A., Tuyakbayev, A.A., “Research of kinetics of accumulation and annealing of radiation defects in bipolar transistor structures”, *News of an KazSSR, A series physical and mathematical*, Alma-Ata, (2): 123-130, (1987).
16. Tuyakbayev, A. A., Baizhumanov, M. K., Tuyakbayev, D. A., “Single-level model for simulation of the effect of electron irradiation on transistors”, *The Fifth World Congress “Aviation in the XXI-st Century”, “Safety in Aviation and Space Technologies.”*, Kiev, Ukraine, (2): 76-79, (2012).
17. Rey, G., “Effects de la defocalisation sur le comportement des transistors a jonctions”, *Solid State Electronics*, 12 (8): 645-659, (1969).
18. Linvill, J. G., Gibbons, J. F., “Transistors and Active Circuits”, *Mc. Graw – Hill Inc.*, N.Y., (1961).
19. Gummel, H. K., “A self– consistent iterative scheme for one – Dimensional steady state transistor calculations”, *IEEE Transactions on Tlection Devices*, 11 (10): 455-465, (1964).
20. De Mari, A., “Au Accurate numerical steady-state One-Dimensional solution of the p-n junction”, *Solid State Electronics*, 11 (11): 33-58, (1969).
21. Messendger, G. C., “Displacement damage in silicon and germanium transistors”, *IEEE Transactions on Nuclear science*, 12 (2): 53-74, (1965).
22. Larin, F., “Radiat Effects in Semiconductor Device”, *New York*, (1968).
23. Stein, H. J., “Comparison of neutron and gamma-ray damage in n-type silicon”, *Journal of Applied Physics*, 37 (9): 3382-3384, (1966).
24. Reiss, H., Fuller, C. S., Morin, F. J., “Chemical interactions among defects in germanium and silicon”, *The Bell System Technical Journal*, 35 (3): 535-636, (1956).
25. Nisenoff, M., Fan, H. Y., “Electron spin resonance in neutron-irradiated silicon”, *The Physical Review*, 128 (4): 1605–1613, (1962).
26. Tanaka, T., Inuishi, J., “Hall effect measurement of radiation damage and annealing in silicon”, *Journal of the Physical Society of Japon*, (19): 167-174, (1964).
27. Curtis, O. L., “Statistics of carrier recombination at disordered in semiconductors”, *Journal of Applied Physics*, 39 (7): 3109–3113, (1968).
28. Bass, R. F., “Influence of impurities on carrier removal and annealing in neutron – irradiated silicon”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 14 (6): 78–81, (1967).
29. Messenger, G. C., Spratt, J. P., “The effects of neutron irradiation on germanium and silicon”, *Proceedings of the IRE*, 46 (6): 1038–1044, (1958).

30. Crawford, J. H., Cleland, J. W., "Nature of bombardment damage and energy levels in demiconductors", *Journal of Applied Physics*, 30 (8): 1204–1213, (1959).
31. Brown, W. L., Augustyniak, W. M., Waite, T. R., "Annealing of radiation defects in semiconductors", *Journal of Applied Physics*, 30 (8): 1258 – 1268, (1959).
32. Klein, C. A., "Radiation – induced energy levels in silicon", *Journal of Applied Physics*, 30 (8): 1222–1231, (1959).
33. Dobkin, R. C., "New developments in monolithic Op Amps", *Electronics World*, 84 (1): 45-48, (1970).
34. Pritchord, R. L., "Electrical Characteristics of Transistors", *Mc. Graw – Hill Book Company.*, New york, (1967).
35. Fuller, C. S., Ditzenberger, J. A., "Diffusion of donor and acceptor elements in silicon", *Journal of Applied Physics*, 27 (5): 544-553, (1956).
36. Fuller, C. S., Ditzenberger, J. A., "Diffusion of boron and phosphorus into silicon", *Journal of applied physics*, 25 (11): 1439-1440, (1954).
37. Cave, K. I. S., "The base diffusion prodile arising from boron redistribution in the oxide – a useful approximation", *Solid state Electronics*, 8 (12): 991-993, (1965).
38. Chang, J. J., "Consentration – dependent diffusion of boron and phosphorus in silicon" *IEEE Transactions on Electron Devices*, 10 (6): 357-359, (1963).
39. Kato, T., Nishi, Y., "Redistribution of diffused boron in silicon by thermal oxidation", *Japanese Journal of Applied Physics*, 3 (7): 377-383, (1967).
40. Chen, W. H., Chen, W. S., "Impurity redistribution in a semiconductor during thermal oxidation", *Journal of Electrochemical Society*, 114 (12): 1297-1303, (1967).
41. Reddy, V. G. K., "Influence of surface conditions on silicon planar transistor current gain", *Solid state Electronics*, 10 (4): 305-334, (1967).
42. Shockley, W., Read, W., "Statistics of the recombinations of holes and electrons", *The Physical Review*, 37 (5): 835-842, (1952).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Tuyakbayev, Daulet
Uyruğu : Kazakistan.
Doğum tarihi ve yeri : 28.05.1989 Kazakistan
Medeni hali : Evli
Telefon : 0507 795 2150
e-mail : tuyakb@gmail.com

Eğitim

Derece

Lisans

Eğitim Birimi

Sivil Havacılık Akademisi/
Uçak Mühendisliği Bölümü

Mezuniyet tarihi

2010

Lise

Fizik ve Matematik Lisesi

2006

Yabancı Dil

İngilizce, Rusça

Hobiler

Tenis, Bilgisayar teknolojileri.