

85125

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**γ -IŞINLARININ Cu-GaAs EKLEMLERİN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ**

S.Serkis YEŞİLKAYA

F.B.E.Fizik Anabilim Dalında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

E. Çiğ

Tayyar Caferov

İmza

Tez Danışmanı : Prof.Dr.Tayyar CAFEROVLU
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL, 1999

85125

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Katkılı Yarıiletkenler	2
1.3 Schottky Engelleri	4
1.4 p-n Eklemler	12
1.4.1 p-n Eklemlerin Elektrostatiği	12
1.4.2 Arınma Bölgesi ve Eklem Kapasitansı	13
1.5 Schottky Engeli ve p-n Eklem Yapma Yöntemleri	19
1.6 γ -ışınlarının Özellikleri	21
1.7 Katılarda γ -ışınları ile Oluşan Kusurlar	22
1.8 γ -ışınlarının GaAs Eklemlerin Özelliklerine Etkisi	23
1.9 Difüzyon Kuralları ve Difüzyon Mekanizmaları	24
1.10 Elektrodifüzyon Kuralları	29
1.11 GaAs'ın Kristal Yapısı ve Fiziksel Özellikleri	32
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	34
2.1 GaAs Örneklerin İletkenlik Tipi Ölçümleri	34
2.2 GaAs Örneklerin Yük Taşıyıcı Konsantrasyonu ve Mobilite Ölçümleri	35
2.3 Cu-GaAs Yapıların Hazırlanması ve γ -ışınlanması	38
2.4 Bakırın GaAs Altlıktaki Konsantrasyon Dağılımı Ölçümleri	39
2.6 Akım-Gerilim Karakteristikleri	40
2.7 Fotoduyarlılığın Spektral Dağılımı	40
2.8 Kapasitans-Gerilim Ölçümleri	41
2.9 Optik Geçirgenlik Ölçümleri	42
3. BULGULAR	43
3.1 Temiz GaAs Örneklerin Elektriksel Özellikleri	43
3.2 Cu-GaAs Yapılarda Bakır Konsantrasyonunun GaAs Altlıktaki Difüzyon Dağılımı	43
3.3 γ -ışınlarının GaAs Örneklerin Elektriksel ve Optik Karakteristiklerine Etkisi ...	44
3.4 γ -ışınlarının Cu-GaAs Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristiklerine Etkisi	48

3.5	γ -ışınlarının Cu-GaAs Eklemlerin Fotoduyarlılık Spektrumlarına Etkisi	52
3.6	γ -ışınlarının Cu-GaAs Eklemlerin Kapasitans-Gerilim Karakteristiklerine Etkisi	52
3.7	Bakır Elektrodifüzyonunun, γ -ışınlama Yöntemiyle Hazırlanmış Cu-GaAs Eklemlerin Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerine Etkisi	53
3.7.1	“- Cu” Şartlarında Elektrodifüzyon	55
3.7.2	“+ Cu” Şartlarında Elektrodifüzyon	57
3.8	Bakır Elektrodifüzyonunun, Fotouyarma Yöntemiyle Hazırlanmış Eklemlerin Karakteristiklerine Etkisi	59
4.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA	63
	KAYNAKLAR	67
	ÖZGEÇMİŞ	68



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Özden yarıiletkenlerde kovalent bağlanma2
Şekil 1.2	n-tipi yarıiletkende serbest elektronun oluşması3
Şekil 1.3	n-tipi yarıiletkende enerji seviyeleri3
Şekil 1.4	p-tipi yarıiletkende boşluğun (deliğin) oluşması4
Şekil 1.5	p-tipi yarıiletkende enerji seviyeleri4
Şekil 1.6	Yarıiletken yüzeyindeki potansiyel dağılımı. E_c , iletkenlik bandı dibi; E_v , valans bandı tavanı; E_F , Fermi seviyesi; X_s , iş fonksiyonu; X_{so} , elektron afinitesi5
Şekil 1.7	Metal - n-tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı ($X_s < X_m$).....6
Şekil 1.8	Schottky engelinin bant diyagramı. (a) iletim yönünde, (b) ters yönde gerilim uygulamaları9
Şekil 1.9	Denge durumundaki p-n eklemnin enerji bant diyagramı12
Şekil 1.10	Termal dengedeki keskin p-n eklem. a) Uzay yükü dağılımı, b) Elektrik alan dağılımı13
Şekil 1.11	Termal dengedeki keskin olmayan eklem. a) Uzay yükü dağılımı, b) Elektrik alan dağılımı17
Şekil 1.12	(a) Difüzyon yöntemiyle oluşmuş p-n eklemi, (b) akseptör (N_a) ve donör (N_d) iyonlarının konsantrasyon dağılımları20
Şekil 1.13	Ergime yöntemiyle p-n eklem elde etme teknolojisinin (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü aşamaları: (1) donörle katkılanmış malzeme, (2) yarıiletken, (3) eritilmiş malzeme yarıiletken sistemi, (4) malzemenin kristalleşmesinden sonraki kalıntısı, (5) kristalleşmede oluşan n-tipi yarıiletken21
Şekil 1.14	Hacimsel örgü kusurları (a) Schottky kusuru, (b) Frenkel kusuru22
Şekil 1.15	(1) Boşluk, (2) arayer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılığı26
Şekil 1.16	Atomların difüzyon mekanizmaları : (a) çift yerdeğiştirme, (b) halka yerdeğiştirme, (c) arayer, (d) vakansiyon ve (e) çinkonun GaAs'de dissosiyatif mekanizması28
Şekil 1.17	Kristaldeki atom için potansiyel engelin gösterimi. G, potansiyel engelin yüksekliği29
Şekil 1.18	Dış elektrik alan uygulanan kristaldeki atom için potansiyel engelin gösterimi. q, elektron yükü E, dış elektrik alan a, örgü parametresi30
Şekil 1.19	Sabit konsantrasyonlu kaynaktan elektrodifüzyonda oluşan iyonların konsantrasyon dağılımları. 1 kaynak, 2 ve 3 örnekler, J_D ve J_E iyonların difüzyon ve elektrodifüzyon akıları32
Şekil 1.20	GaAs'in kristal yapısı32
Şekil 1.21	GaAs'in band yapısı33
Şekil 2.1	Termal EMK yöntemiyle (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi34
Şekil 2.2	Hall Olayı ölçümlerinde dörtgen şekilli örnekte kontakların yerleşimi35
Şekil 2.3	Van der Pauw metodu ile öz direnç ölçümlerinde dörtgen şekilli örnekte kontakların yerleşimi.....37

Şekil 2.4	Van der Pauw metodu için düzeltme fonksiyonunun R_1/R_2 'ye karşı grafiği	37
Şekil 2.5	Cu-GaAs yapılar	38
Şekil 2.6	Cu-GaAs örnekten kontakların alınması	40
Şekil 2.7	Cu-GaAs eklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm devresinin şeması	40
Şekil 2.8	Cu-GaAs eklemlerin fotoduyarlılık spektrumlarının ölçüm düzeneği	41
Şekil 3.1	Bakır atomlarının GaAs altlıktaki konsantrasyon dağılımı (γ -ışınlamadan sonra A-tipi eklem)	44
Şekil 3.2	γ -ışınlanmış GaAs altlıktaki yük taşıyıcılarının konsantrasyonu-sıcaklık eğrisi	45
Şekil 3.3	γ -ışınlanmış GaAs altlığın iletkenlik-sıcaklık eğrisi	47
Şekil 3.4	GaAs altlığın optik geçirgenlik eğrileri. (1) ve (2) sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra (3) $T=50$ °C tavlama sonrası	47
Şekil 3.5	Cu-GaAs eklemnin iletim yönünde akım-gerilim karakteristikleri (karanlıkta):(1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem	49
Şekil 3.6	Cu-GaAs eklemnin iletim yönünde akım-gerilim karakteristikleri (aydınlıkta): (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem	49
Şekil 3.7	Cu-GaAs eklemnin ters yönde akım-gerilim karakteristikleri (karanlıkta): (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem	50
Şekil 3.8	Cu-GaAs eklemnin ters yönde akım-gerilim karakteristikleri (aydınlıkta): (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem	50
Şekil 3.9	Cu-GaAs eklemnin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri. (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem	51
Şekil 3.10	Cu-GaAs eklemnin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri (B-tipi eklem) (Şekil 3.9'da gösterilen (3) numaralı grafiğin büyütülmüş gösterimi)	51
Şekil 3.11	Cu-GaAs eklemlerin fotoduyarlılıklarının spektral dağılımları (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem	52
Şekil 3.12	Cu-GaAs eklemlerin kapasitans-gerilim karakteristikleri. (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem	53
Şekil 3.13	Cu-GaAs eklemnin akım-gerilim karakteristikleri (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta	54
Şekil 3.14	Cu-GaAs eklemnin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği	54
Şekil 3.15	"- Cu" şartlarında elektrodifüzyon. J_D difüzyon akısı, J_E elektrodifüzyon akısı	55
Şekil 3.16	Cu-GaAs eklemnin akım-gerilim karakteristikleri. "- Cu şartlarında ED'den sonra. (1) karanlıkta. (2) aydınlıkta	55
Şekil 3.17	Cu-GaAs eklemnin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği. "- Cu" şartlarında ED'den sonra	56

Şekil 3.18	Cu-GaAs eklemnin fotoduyarlılık spektral dağılımları (1) ED'den önce, (2) “- Cu” şartlarında ED'den sonra56
Şekil 3.19	“+ Cu” şartlarında elektrodifüzyon. J_D difüzyon akısı, J_E elektrodifüzyon akısı57
Şekil 3.20	Cu-GaAs eklemnin akım-gerilim karakteristikleri “+ Cu” şartlarında ED'den sonra. (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta58
Şekil 3.21	Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklemnin akım-gerilim Karakteristiği (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta (ED'den önce)59
Şekil 3.22	Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklemnin akım-gerilim karakteristiği “+ Cu” şartlarında Ed'den sonra (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta60
Şekil 3.23	Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklemnin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri. “+ Cu” şartlarında ED'den (1) önce, (2) sonra ..60.
Şekil 3.24	Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklemnin fotoduyarlılık spektral dağılımları “+ Cu” şartlarında ED'den (1) önce, (2) sonra61
Şekil 3.25	Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklemnin kapasitans-gerilim karakteristikleri “+ Cu” şartlarında ED'den (1) önce, (2) sonra61



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1	Oda sıcaklığındaki (300 K) GaAs'in bazı özellikleri33
Çizelge 3.1	Temiz, γ -ışınlanmış ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış GaAs örneklerin elektriksel özellikleri46
Çizelge 3.2	γ -ışınlanmış GaAs altlığın farklı sıcaklıklardaki öz dirençleri46
Çizelge 3.3	Cu-GaAs eklemlerin parametreleri48
Çizelge 3.4	γ -ışınlama yöntemiyle oluşturulan Cu-GaAs eklem parametreleri58
Çizelge 3.5	Fotouyarılma yöntemiyle oluşturulan Cu-GaAs eklem parametreleri ...62



ÖNSÖZ

Tezimin konusunu belirleyip çalışmamı yönlendiren ve bilgisinden her aşamada faydalandığım danışmanım Sayın Prof.Dr. Tayyar CAFEROV'a, uygun bir çalışma ortamı sağlayan dekanımız Sayın Prof.Dr. Durul ÖREN'e ve bölüm başkanımız Sayın Prof.Dr. Emel ÇINGI'ya, ÇNAEM'deki çalışmalarda her türlü imkanı sağlayan Fizik Bölümü Başkanı Sayın Prof.Dr. Metin SUBAŞI'ya, örneklerin γ -ışınlanmasını gerçekleştiren ÇNAEM Endüstriyel Uygulamalar Merkezi görevlilerine çok teşekkür ederim.

Bu tezin tamamlanmasında benim için çok değerli katkıları bulunan, çalışma arkadaşlarımdan ÇNAEM'deki ölçümlerimdeki ve örneklerin γ -ışınlanması ile ilgili yardımlarından dolayı Arş.Gör. Ayşe DURUSOY'a, tezin yazımı ile ilgili yardımlarından dolayı Arş.Gör. Dr. Birsal CAN ÖMÜR'e, deneysel çalışmalarımdaki yardımlarından dolayı Arş.Gör. Murat ÇALIŞKAN'a, hem deneysel çalışmalarımdaki hem de tezin yazımı ile ilgili yardımlarından dolayı Arş.Gör. Banu SÜNGÜ'ye en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ve aileme teşekkürler, sürekli artan sabırları, destekleri ve güvenleri için.

S.Serkis YEŞİLKAYA

Haziran,1999

ÖZET

γ -ışınları ile ışınlanmış monokristal n-tipi GaAs'in ve Cu-GaAs yapıların elektrik, optik, fotovoltajik ve kapasitans karakteristikleri incelendi.

Cu-GaAs Schottky diyotları, Cu ince filminin n-tipi GaAs altlık üzerine vakum ortamında buharlaştırılması ile hazırlandı. Cu-GaAs diyotlar ve GaAs altlıklar ^{60}Co kaynağından yayımlanan γ -ışınlarına ($E=1,17$ ve $1,33$ MeV, $D=1,6 \times 10^6$ Rad) maruz bırakıldılar. γ -ışınlamadan önce ve sonra GaAs'in ve Cu-GaAs diyotların elektrik, optik, fotovoltajik ve kapasitans özellikleri incelendi. $50-300$ °C aralığındaki tavlamanın GaAs'in özelliklerine etkisi araştırıldı.

Cu-GaAs diyotların doğrultucu ve fotovoltajik parametrelerine γ -ışınlamanın belirgin etkisi gösterildi. Doğrultucu katsayısı (k) ve açık devre geriliminin (V_{oc}) (önce = $6,03 \times 10^4$, $V_{oc}=230$ mV) γ -ışınlamadan sonra ($k = 1,4 \times 10^5$, $V_{oc}=386$ mV) iyileştiği görüldü.

GaAs ve Cu-GaAs diyot yapıların elektrik, optik ve fotovoltajik karakteristiklerindeki γ -uyarılmış değişimlerin deneysel sonuçları, rekombinasyon merkezleri gibi davranan noktasal kusurların oluşumu ile ilgili model temelinde tartışıldı.

Ayrıca dış dc elektrik alanın GaAs p-n eklemlerin elektrik, kapasitans ve fotovoltajik özelliklerine etkisi araştırıldı. Ters yönlü elektrik alan uygulamasının, p-n eklemlerin fotovoltajik parametrelerini doğru yönlü elektrik alana göre iyileştirdiği gösterildi. Bu sonuçlar yüklü bakır iyonlarının GaAs'da elektroyarılmış difüzyonuna bağlıdır.

ABSTRACT

Electrical, optical, photovoltaic and capacitance characteristics of n-type monocrystalline GaAs and Cu-GaAs structures exposed to γ -irradiation are investigated.

Cu-GaAs Schottky diodes are prepared by vacuum evaporation of Cu thin film on the n-type GaAs substrates. Cu-GaAs diodes and GaAs substrates are exposed to γ -rays emitted from ^{60}Co source ($E=1.17$ and 1.33 MeV). Electrical, optical, photovoltaic and capacitance properties of GaAs and Cu-GaAs diodes are examined before and after γ -irradiation. Effect of annealing, in the range of 50 - 300 °C, on the properties of GaAs is investigated. Effect of γ -irradiation on the rectifying and photovoltaic parameters of Cu-GaAs junctions is shown clearly. Improvements of rectifying coefficient (k) and open circuit voltage (V_{oc}) (before $k = 6,03 \times 10^4$, $V_{oc}=230$ mV) after ($k = 1,4 \times 10^5$, $V_{oc}=386$ mV) γ -irradiation are discovered.

Experimental results on γ -stimulated changes of electrical, optical and photovoltaic characteristics of GaAs and Cu-GaAs diode structures are discussed on the basis of model related with formation of the point defects presenting the recombination centers.

Effect of external dc electric field on electrical, capacitance and photovoltaic characteristics of GaAs p-n junctions are also investigated. It is shown that application of reverse electric field results in improvement of the photovoltaic parameters of p-n junctions in compared with action of the forward electric field. These data are interpreted by electrostimulated diffusion of charged copper ions in GaAs.

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

Yarıiletken malzemelerin γ -ışınları, elektron, nötron ve proton ile ışınlanmasının veya iyon implantasyonuna maruz bırakılmasının, yarıiletkende atomik yerdeğiştirmelere ve/veya iyonizasyona yol aarak malzemeye zarar verdiği bilinmektedir. Atomik yerdeğiştirmelerin veya iyonizasyonun yarıiletken aygıtlar üzerindeki en buyuk etkisi, rekombinasyon merkezleri yaratarak azınlık taşıyıcı ömrünü azaltmaları ve elektron-delik çifti yaratmalarıdır. Verilen hasar veya oluşturulan kusurların büyüklüğü ve tipi, ışınlamada kullanılan radyasyonun enerjisine, atomik kütlesine, yüküne ve akısına, malzemenin ise atomik yoğunluğuna ve ışınlama sürecindeki sıcaklığa bağlıdır.

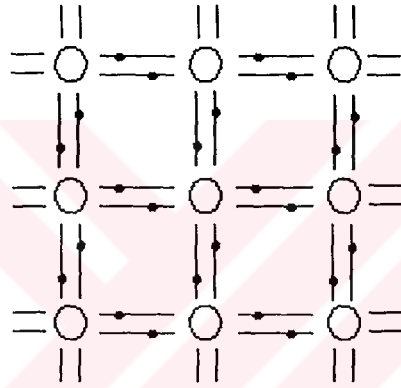
γ -ışınları, elektronik aygıtlarda çeşitli kusurlar ve hasarlar oluşturduğu için, özellikle yarıiletken teknolojisinin önemli bir malzemesi olan GaAs'de radyasyon etkisiyle oluşan kusurların analizinde ve derin seviyeli elektron tuzaklarının incelenmesinde tercih edilmektedir (Hashizume ve Hasegawa, 1990).

Yarıiletken teknolojisinin karşılaştığı bir diğer sorun, Schottky engelleri, p-n eklemler ve heteroeiklemler kullanılarak hazırlanan aygıtların genellikle yüksek sıcaklık gerektiren işlemlerle elde edilmesidir. Bunun sonucunda sıcaklık etkisi ile yapılarda kusurlar ve istenmeyen katkıların difüzyonu oluşur.

Bu çalışmada γ -ışınlarına maruz bırakılmış n-tipi GaAs'in, elektriksel ve optik özelliklerindeki değişimler incelendi. γ -ışınlanmış Cu-GaAs yapıların ve γ -ışınlanmış GaAs altlık üzerinde oluşturulan Cu-GaAs yapıların elektrik ve fotovoltaik parametrelerindeki değişimler araştırıldı. Cu-GaAs yapıların oda sıcaklığında γ -ışınlanması ile bakır atomlarının uyarılmış difüzyonu sonucunda p-n eklem oluştuğu gösterildi. Bakır GaAs'de akseptör özelliği gösteren ve yüksek difüzyon katsayılı katkı olarak geniş p-n eklemlerin hazırlanması için uygundur. GaAs p-n eklemlere yaklaşık oda sıcaklığında uygulanan dış elektik alanın yönüne bağlı olarak bakır iyonlarının elektrodifzyonu sonucu p-n eklem genişliğindeki ve eklemin elektrik ve fotovoltaik özelliklerindeki değişim incelendi

1.2 Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, özden yarıiletkenler ve katkılı yarıiletkenler olmak üzere iki temel grupta incelenebilirler. Periyodik cetvelin dördüncü grubunda bulunan silisyum ve germanyum gibi elementler, özden yarıiletkenlerden bazılarıdır. Bu yarıiletkenlerde atomlar birbirlerine kovalent bağ ile bağlıdır (Şekil 1.1). Mutlak sıfır sıcaklığında bu elementlerin valans bantları elektronlarla tamamen dolu, iletkenlik bantları ise tamamen boştur. Yarıiletkenlerin yalıtkanlardan kabaca farkı, valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki yasak enerji aralığının daha küçük olması ($\approx 1-2,5$ eV) ve bu sayede düşük sıcaklıklarda bile termal uyarımlar sonucu iletkenliğin oluşabilmesidir.

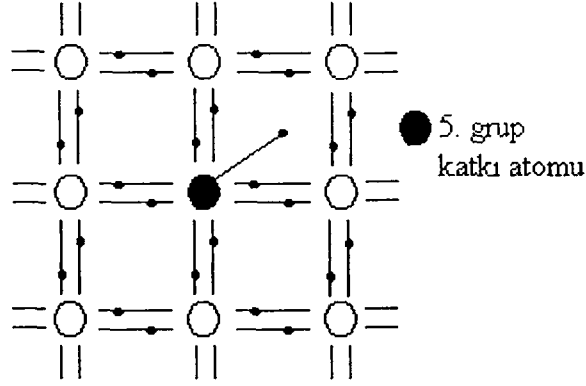


Şekil 1.1 Özden yarıiletkenlerde kovalent bağlanma (Krane, 1983)

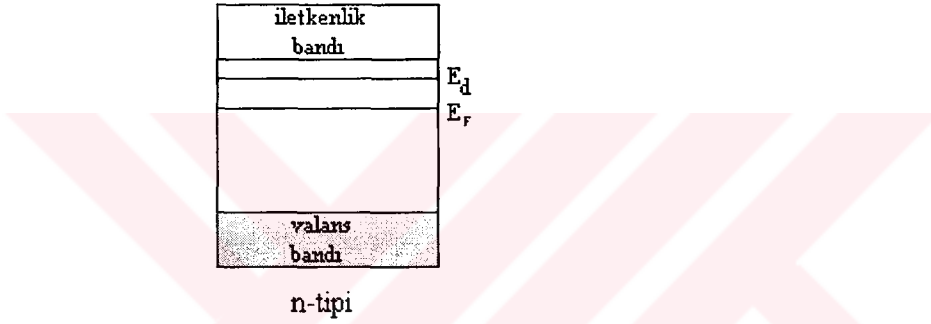
Katkılı yarıiletkenler ise özden yarıiletkenlerin iletkenliğini arttırmak için, kristali oluşturan atomların bir kısmı yerine uygun farklı atomlar yerleştirilmesiyle elde edilirler.

a) n-tipi katkılı yarıiletkenler

Donör katkılı yarıiletkenler de denilen n-tipi yarıiletkenlerde (Si için) katkı elementi 5. grup elementlerinden seçilir. Bu elementlerin 5 valans elektronundan 4'ü özden yarıiletkenin atomlarıyla kovalent bağ yapar (Şekil 1.2). Geri kalan elektrondan dolayı donör enerji seviyesi oluşur (Şekil 1.3). Bu elektron kolayca atomdan koparak serbest duruma geçer ve iletkenlik bandına çıkar. Her serbest elektrona karşı valans bandında bir delik oluşmadığı için bu tipte iletkenliğe elektronlardan gelen katkı daha fazladır.



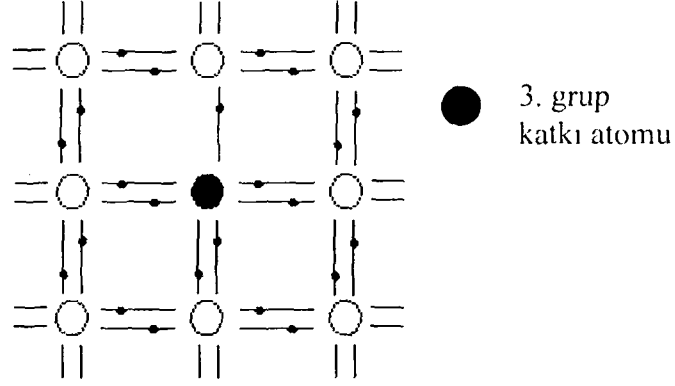
Şekil 1.2 n-tipi yarıiletkende serbest elektronun oluşması (Krane, 1983)



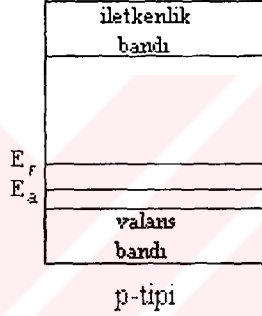
Şekil 1.3 n-tipi yarıiletkende enerji seviyeleri (Krane, 1983)

b) p-tipi katkılı yarıiletkenler

Akseptör katkılı p-tipi yarıiletkenlerin (Si için) katkı malzemesi 3. grup elementleridir. 3 valans elektronuna sahip bu elementler özden yarıiletken ile kovalent bağ yaparken bir elektrona ihtiyaç duyarlar (Şekil 1.4). Başka bir bağdan kopan elektron bu eksikliği giderir. Böylece valans bandında bir delik oluşur ve iletkenliğe bu deliklerden gelen katkı daha fazla olur. p-tipi yarıiletkende deliklerden dolayı akseptör enerji seviyeleri oluşur (Şekil 1.5).



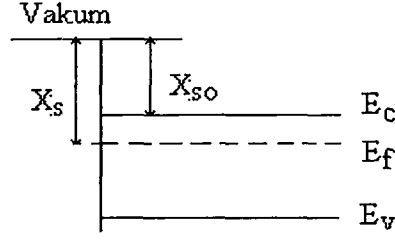
Şekil 1.4 p-tipi yarıiletkende boşluğun (deliğin) oluşması (Krane, 1983)



Şekil 1.5 p-tipi yarıiletkende enerji seviyeleri (Krane, 1983)

1.3 Schottky Engelleri

Temas halindeki metal ile yarıiletkenin sınır yüzeyinde bir elektrostatik potansiyel engeli (Schottky engeli) vardır. Bu etkiyi anlamak için önce n-tipi yarıiletken sınırını ele alalım. (Şekil 1.6). Elektronların kristal içindeki potansiyel enerjileri daha küçüktür, çünkü elektronlar kristal örgünün pozitif iyonları tarafından çekilirler. Ancak termal hareketlerden dolayı bazı elektronlar $E_c + X_{so}$ (X_{so} , yarıiletkenin elektron afinitesidir) enerjisinden daha büyük enerjiye sahiptirler ve kristali terk edebilirler.



Şekil 1.6 Yarıiletken yüzeyindeki potansiyel dağılımı. E_c , iletkenlik bandı dibi; E_v , valans bandı tavanı; E_f , Fermi seviyesi; X_s , iş fonksiyonu; X_{s0} , elektron afinitesi (Shur, 1987)

Yüzeye dik olan elektron akısı I Maxwell-Boltzmann dağılımından hesaplanabilir.

$$I_s = \frac{m_n (k_B T)^2}{2\pi^2 \hbar^3} e^{-x_s/k_B T} \quad (1.1)$$

burada m_n elektronun etkin kütlesi ve T örgü sıcaklığıdır. Bu etki termoyonik emisyon olarak adlandırılır. Çıkan elektronlar, kristal içinde dengelenmemiş pozitif yük bırakırlar. Oluşan elektrik alan yüze yakın bölgede bant bükülmesine neden olur. Bu pozitif yük aynı zamanda elektronları geri çeker ve böylece termodinamik denge oluşur. Şekil 1.6'da gösterilen basit potansiyel dağılımı bant bükülmesini gözönüne almadığından doğru değildir.

Bir metal ve bir yarıiletken ani olarak temas haline getirildiğinde yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene doğru birbirine zıt iki elektron akısı vardır

$$I_m = \frac{m_n (k_B T)^2}{2\pi^2 \hbar^3} e^{-x_m/k_B T} \quad (1.2)$$

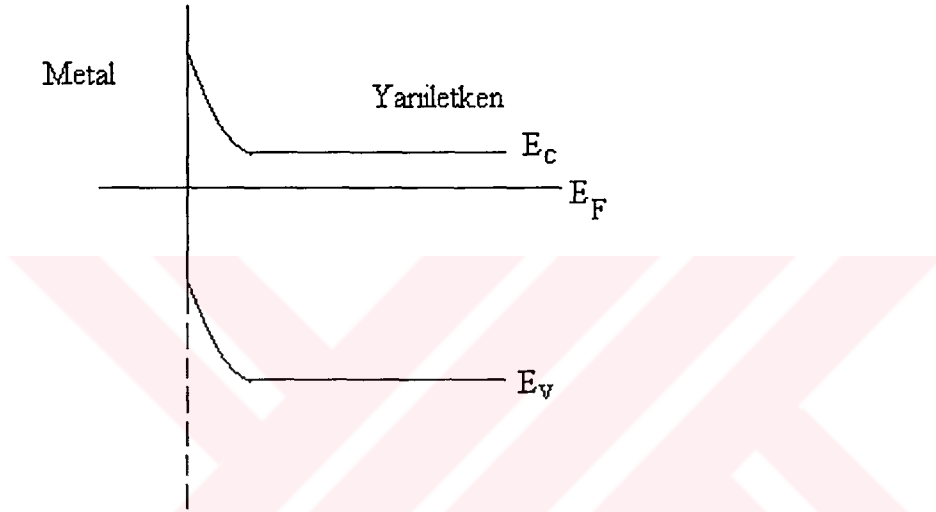
Burada X_m metalin iş fonksiyonudur. Eğer $X_m > X_s$ ise $I_m < I_s$ olacağından metal negatif yüklenirken yarıiletken pozitif yüklenir ve sonuçtaki potansiyel farkı

$$eV_{bi} = X_m - X_s \quad (1.3)$$

için bariyer yüksekliği

$$\phi_b = eV_{bi} + E_c - E_F \quad (1.4)$$

olur. Metalin negatif yükü pratik olarak yüzeydeki atomik tabakada yerleşmiştir (çok büyük serbest elektron yoğunluğundan dolayı). Yarıiletkendeki pozitif yük yoğunluğu iyonize donörlerin konsantrasyonuyla sınırlıdır ve uzay yükü bölgesi yarıiletkenin içine doğru genişler. Oluşan potansiyel dağılımı Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Metal - n-tipi yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı (Shur, 1987)
($X_s < X_m$)

Yarıiletkenin uzay yükü bölgesindeki uzay yükü, elektrik alan ve potansiyelin değişimi arınma (depletion) yaklaşımı ile bulunabilir.

$$\rho = eN_d \quad (1.5)$$

$$F = -\frac{eN_d(A_o - x)}{\epsilon_s} \quad (1.6)$$

$$V = -\frac{eN_d(A_o - x)^2}{2\epsilon} \quad (1.7)$$

Burada A_o uzay yükü bölgesinin genişliği ve ϵ_s yarıiletkenin permitivitesidir.

Eşitlik (1.4)'ün geçerli olduğu durumda iç potansiyel (built-in voltage)

$$eV_{bi} = X_m - X_{so} - E_c + E_F \quad (1.8)$$

ile verilir.

Gerçekte Schottky engel yükseklikleri eşitlik (1.4) ile verilen enerjilerden oldukça farklıdır. Bu farklılığın nedeni yarıiletken ile yüzeyde her zaman mevcut olan ince oksit tabaka arasındaki sınır yüzey durumlarıdır. Oksit çok ince olduğundan elektronlar kolayca tünellerebilir ve yüzey durumları engel yüksekliğini değiştirirler. Yüzeydeki kopuk bağlar (dangling bond) olarak düşünebileceğimiz bu durumlar, yasak enerji aralığında sürekli enerjilerle dağılmışlardır. Bunlar nötral ϕ_o seviyesiyle karakterize edilirler ki ϕ_o 'ın altındaki bu seviyeler elektronlarla dolu olduğunda nötral ve ϕ_o 'ın üstündeki seviyeler boş olduğunda nötraldir.

Engel yüksekliği deneysel olarak akım-gerilim karakteristiklerinden, fotoelektrik ölçümlerden ve kapasitans ölçümlerinden belirlenebilir.

n-tipi GaAs için engel yüksekliği kristal yönelimine bağlıdır. (111) kristal yüzeyi için deneysel veriye en uygun sonuç (Shur, 1987)

$$N_s \approx 4 \times 10^{17} \text{ eV}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$$\phi_o - E_v \approx 0.52 \text{ eV}$$

ve (110) GaAs yüzeyi için en uygun sonuç (Shur, 1987)

$$N_s \approx 3 \times 10^{17} \text{ eV}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$$\phi_o - E_v \approx 0.45 \text{ eV}$$

olarak verilmiştir.

Schottky engelinde akım-gerilim karakteristikleri için iki önemli teori vardır.

a) Termoyonik emisyon modeli

Schottky engelinin akımı, taşıyıcıların uzay yükü bölgesindeki sürüklenmesi ve difüzyonu (düşük mobiliteli örnekler) veya engeldaki termoyonik emisyon (yüksek mobiliteli yarıiletkenler) ile sınırlıdır. Termoyonik model, elektronların ortalama serbest yolunun (λ), engelin $k_B T/q$ kadar alçaldığı mesafeden fazla olduğu durumda geçerlidir

$$\lambda > \frac{k_B T}{q F_{\max}} \quad (1.9)$$

burada F_{\max} metal-yarıiletken arayüzeyindeki maksimum elektrik alanıdır.

$$F_{\max} = \left(\frac{2qN_D V_{bi}}{\epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (1.10)$$

ve ortalama serbest yol

$$\lambda \approx \frac{\mu}{q} (1.5k_B T m)^{1/2} \quad (1.11)$$

ile verilir (1.9) eşitsizliği oda sıcaklığındaki GaAs'de $N_D > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $V_{bi} = 0.7$ ve $\mu = 0.5 \text{ m}^2/\text{V.s}$ değerleri için gerçekleşir.

İletim yönünde ve ters yöndeki gerilim uygulamaları için Schottky engelinin bant diyagramları Şekil 1.8'de verilmiştir. Elektronların arınma bölgelerindeki quasi-Fermi seviyeleri, arayüze yakın dar bir bölge dışında pratik olarak düzdür.

Termoyonik model tarafından verilen akım-gerilim karakteristikleri

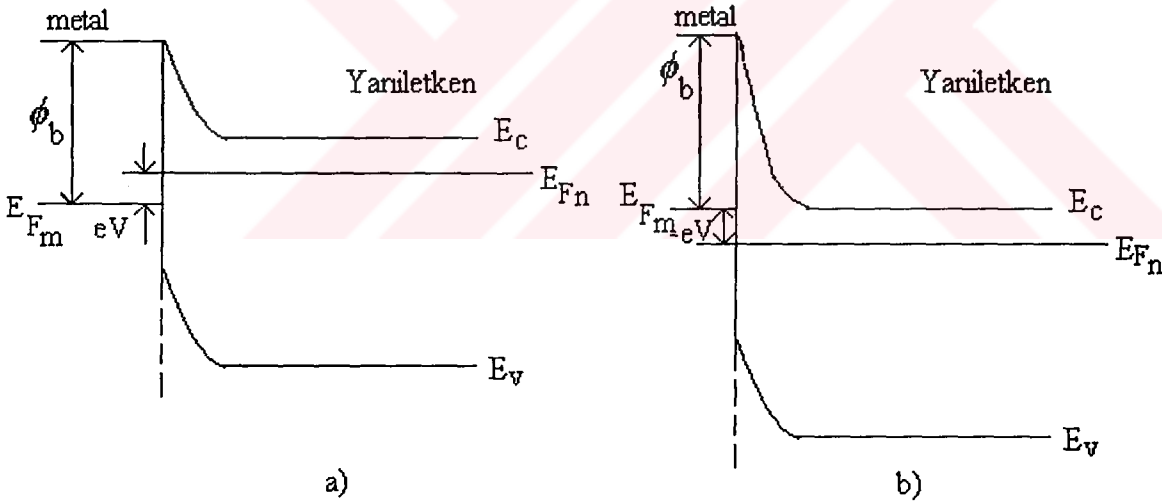
$$j = j_o \exp\left(\frac{qV}{\beta k_B T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{k_B T}\right) \right] \quad (1.12)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada

$$j_o = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right) \quad (1.13)$$

ve A^* Richardson sabitidir:

$$A^* = f_p f_Q \frac{4\pi m q k_B^2}{h^3} \quad (1.14)$$



Şekil 1.8 Schottky engelini bant diyagramı. (a) iletim yönünde, (b) ters yönde gerilim uygulamaları (Shur, 1987)

Burada f_p bir elektronun engel üzerinden aşarak bir optik fonon tarafından saçılmadan metale ulaşma olasılığı, f_Q transmisyon katsayısı ($f_p f_Q \approx 0.5$) ve m elektronun etkin kütlesidir. N iletkenlik minimumlu bir nonparabolik yarıiletken için

$$m = N(m_D)^{3/2}/(m_C)^{1/2} \quad (1.15)$$

burada m_D durum yoğunluğu etkin kütlesi $m_D = (m_i^2 m_l)^{1/3}$ ve m_C iletkenlik etkin kütlesidir. Si ve GaAs 'in (111) yüzeyleri için A^* sırasıyla $9.6 \times 10^5 \text{ A/m}^2\text{K}^2$ ve $4.4 \times 10^4 \text{ A/m}^2\text{K}^2$ dir.

Eşitlik 1.12'deki β , ideallik faktörüdür. Bu faktör engel yüksekliğinin gerilim bağılılığı ile ilgilidir.

b) Termioyonik-alan emisyonu ve alan emisyonu

Yüksek katkılı yarıiletkenlerde Schottky engeli çok incedir ve engelin üstüne yakın elektronlar engelden tünelleyebilirler. Bu süreç termioyonik-alan emisyonu olarak adlandırılır. Dejenere yarıiletkenlerde, özellikle GaAs gibi küçük elektron etkin kütleli yarıiletkenlerde elektronlar, Fermi seviyesine doğru engeli tünelleyebilirler (alan emisyonu). Termioyonik alan emisyonunda veya alan emisyonunda akım-gerilim karakteristikleri, zıt yönlerdeki termal aktivasyon ve tünelleme ile belirlenir

$$J = J_{sf} \exp\left(\frac{qV}{E_o}\right) \quad (1.16)$$

burada

$$E_o = E_{oo} \coth(E_{oo}/k_B T) \quad (1.17)$$

ve

$$E_{oo(ev)} = \frac{h}{4\pi} \left(\frac{N_D}{m\epsilon_s} \right)^{1/2} = 1.85 \times 10^{-14} \left[\frac{N_D}{(m/m_e)(\epsilon_s/\epsilon_o)} \right]^{1/2} \quad (1.18)$$

Eşitliklerde SI birimleri kullanılmıştır. Preekspansiyel terim Crowwel ve Rideout tarafından hesaplanmıştır (Shur, 1987).

$$J_{sf} = \frac{A^* T [\pi E_{oo} q (\phi_b - V - \xi)]^{1/2}}{k_B \cosh(E_{oo} / k_B T)} \exp \left[-\frac{q \xi}{k_B T} - \frac{q}{E_o} (\phi_b - \xi) \right] \quad (1.19)$$

Burada $\xi = (E_c - E_{Fn})/q$ ve dejenere yarıiletken için negatif, ϕ_b engel yüksekliği ve A^* Richardson sabitidir.

GaAs'de, $N_D > 10^{23} \text{m}^{-3}$ için 300 K'de ve $N_D > 10^{22} \text{m}^{-3}$ için 77 K'de termoyonik alan emisyonu oluşur. Silisyum için N_D değerleri kabaca dört kat büyüktür.

Çok büyük katkılama seviyelerinde arınma bölgesi çok incilir ve yarıiletkenden metale direkt tünelleme olabilir. Bu olay E_{oo} , $k_B T$ 'den çok büyük olunca gerçekleşir. Bu durumdaki akım-gerilim karakteristikleri,

$$J \approx J_{sf} \exp(qV / E_{oo}) \quad (1.20)$$

denklemine uyarlar. Burada

$$J_{sf} = \frac{\pi A^* T}{k_B C_1 \sin(\pi k_B T C_1)} \exp \left(-\frac{q \phi_b}{E_{oo}} \right) \quad (1.21)$$

ve

$$C_1 = (2E_{oo})^{-1} \ln \left[-4(\phi_b - V) / \xi \right] \quad (1.22)$$

ile verilir.

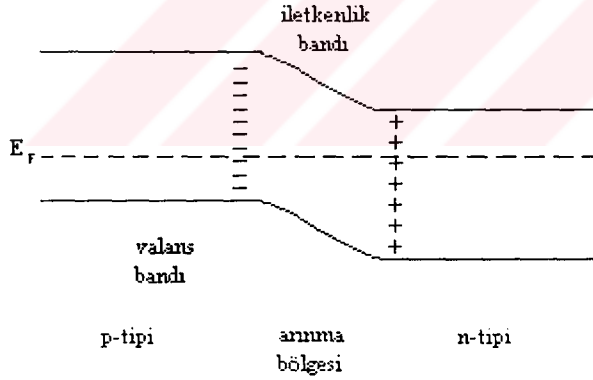
Schottky engelinin alan emisyonundaki etkin direnci oldukça düşüktür. Bu nedenle metal- n^+ Schottky engeli omik kontakt oluşturur.

1.4 p-n Eklemler

Birbirleriyle teknolojik olarak temas halinde bulunan bir p-tipi yarıiletken ile bir n-tipi yarıiletkenden oluşan sistemin temas bölgesi, p-n eklemi adını alır.

1.4.1 p-n eklemlerin elektrostatığı

Şekil 1.3 ve şekil 1.5’de ayrı ayrı gösterilen n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin temas haline getirildiğini düşünelim. Bu durumda elektronlar yüksek konsantrasyonlu oldukları n-tipi bölgeden düşük konsantrasyonlu oldukları p-tipi bölgeye geçerken, delikler ise ters konsantrasyondan dolayı p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye geçerler. n-tipi bölgeyi terk eden elektronlar, burada iyonize donör atomları bırakırken pozitif yük oluşmasına neden olacak. benzer şekilde p-tipi bölgeyi terk eden delikler ise burada negatif yük oluşturacaktır. Bu yükler nedeniyle bir elektrik alan oluşacak ve bu alanın elektron ve deliklerin difüzyonuna direnç göstermesiyle denge durumu oluşacaktır (Şekil 1.9). Denge durumunda sistemin tek bir Fermi seviyesi olur ve bu seviye sistemi temsil eder.



Şekil 1.9 Denge durumundaki p-n eklemi enerji bant diyagramı (Krane, 1983)

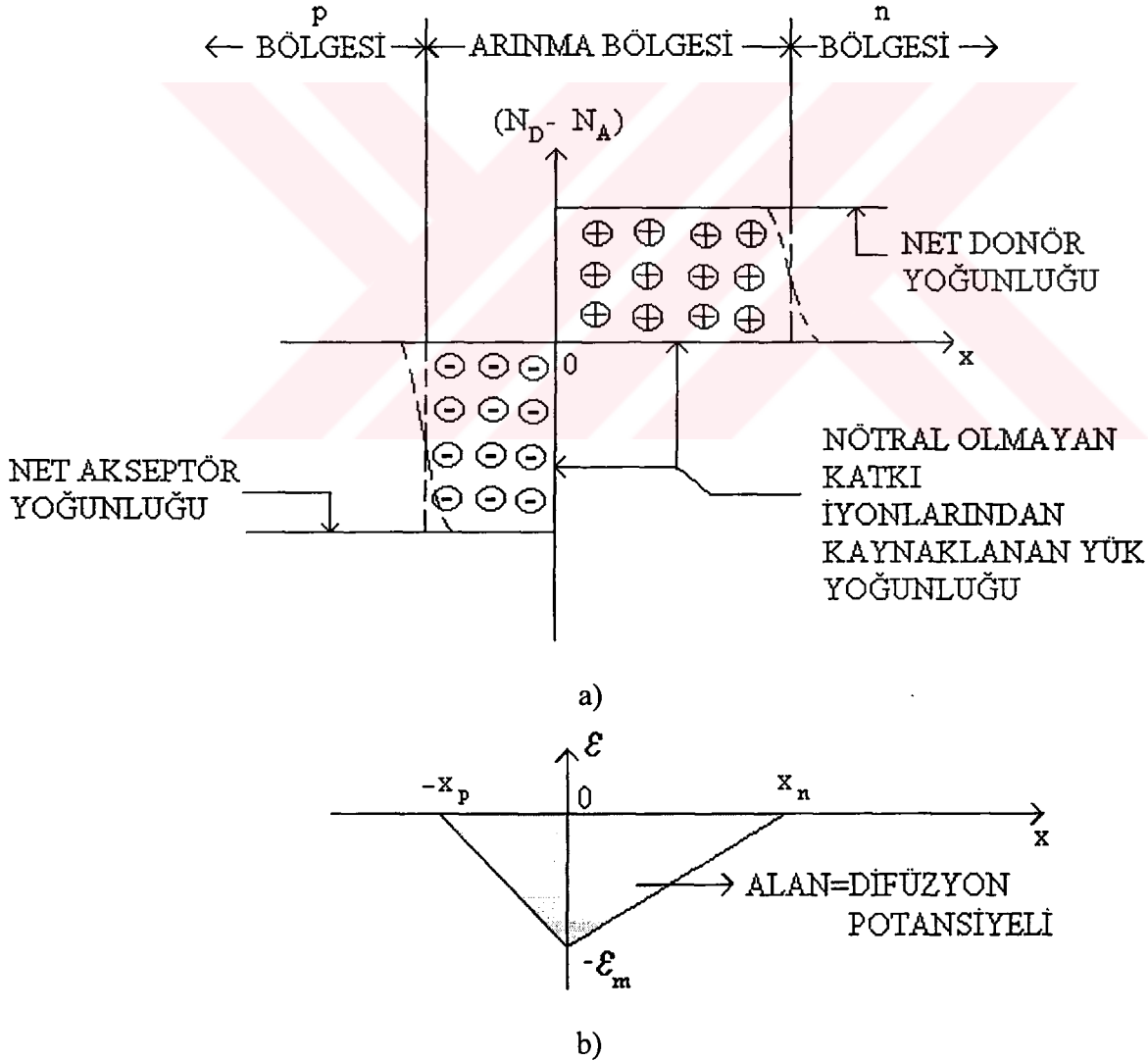
Dışarıdan uygulanan bir V_{ds} gerilimi, uygulama yönüne bağlı olarak p-tipi ve n-tipi bölgeler arasındaki potansiyel farkını V_{ds} kadar azaltacak veya arttıracaktır.

1.4.2 Arınma bölgesi ve eklem kapasitansı

a) Keskin eklem

Bir yarıiletkende katkı konsantrasyonu akseptör katkıları N_A 'dan donör katkıları N_D 'ye keskin olarak değişiyorsa bu tür eklemelere *keskin eklem*ler denir. Özel olarak $N_A \gg N_D$ ise tek taraflı keskin eklem elde edilir.

p-n eklemde, p-tipi ve n-tipi bölgeler arasında, serbest yüklerden yoksun bölge arınma bölgesi olarak adlandırılır (Şekil 1.9). Eklemdeki elektrik alan nedeniyle burada serbest yükler bulunamaz. p-n eklem her iki sınırında da eşit miktarda negatif ve pozitif yükler bulunduğundan p-n eklem elektrik kondansatör gibi davranır.



Şekil 1.10 Termal dengedeki keskin p-n eklem. a) Uzay yükü dağılımı, b) Elektrik alan dağılımı (Sze, 1981)

Şekil 1.10b'de gösterilen difüzyon potansiyeli V_{bi}

$$eV_{bi} = E_g - (qV_n + qV_p) \quad (1.23)$$

$$= kT \ln\left(\frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2}\right) \approx kT \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (1.24)$$

ile verilirken, denge durumunda n ve p tarafındaki elektron ve delik konsantrasyonları için $n_{no} p_{no} = n_{po} p_{po} = n_i^2$ olduğundan,

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{p_{po}}{p_{no}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_{no}}{n_{po}}\right) \quad (1.25)$$

şeklini alır. Ayrıca $x = 0$ ' daki maksimum elektrik alan

$$|E_m| = \frac{qN_D x_n}{\epsilon_s} = \frac{qN_A x_p}{\epsilon_s} \quad (1.26)$$

olduğundan potansiyel dağılımı $V(x)$ ve difüzyon potansiyeli V_{bi} ;

$$V(x) = E_m \left(x - \frac{x^2}{2W} \right) \quad (1.27)$$

$$V_{bi} = \frac{1}{2} E_m W \equiv \frac{1}{2} E_m (x_n + x_p) \quad (1.28)$$

ile verilir. W toplam arınma bölgesi genişliği olmak üzere E_m (1.26) ve (1.28) denklemlerinden elenerek iki taraflı keskin eklem için

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} V_{bi} \quad (1.29)$$

ve tek taraflı keskin eklem için

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q N_B}} V_{bi} \quad (1.30)$$

olarak bulunur. Denklemdaki N_B terimi N_A 'nın veya N_D 'nin çok büyük olmasına bağlı olarak ikisinden birine eşit olarak alınır.

Arınma bölgesi genişliği için daha doğru bir sonuç, katkı konsantrasyonuna ilave olarak çoğunluk taşıyıcılarının katkıların da göz önüne alınmasıyla elde edilebilir. Yeni sonuçta V_{bi} yerine $(V_{bi} - 2kT/q)$ alınır. Düzeltme faktörü $2kT/q$ 'nin geliş sebebi iki çoğunluk taşıyıcı dağılım kuyruklarıdır (Şekil 1.10a 'da kesik çizgilerle gösterilen n tarafındaki elektronlar ve p tarafındaki delikler). Böylece termal dengedeki tek taraflı bir keskin eklem arınma bölgesi genişliği

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q N_B}} (V_{bi} - 2kT/q) \quad (1.31)$$

$$= L_D \sqrt{2(\beta V_{bi} - 2)} \quad (1.32)$$

eşitlikleri ile belirlenir. Burada $\beta = q/kT$ ve L_D yarıiletkenler için karakteristik bir uzunluk olan Debye uzunluğudur. Debye uzunluğu

$$L_D \equiv \sqrt{\frac{\varepsilon_s kT}{q^2 N_B}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_s}{q N_B \beta}} \quad (1.33)$$

eşitliği ile verilir. Termal dengede GaAs için arınma bölgesi genişliği yaklaşık $10 L_D$ 'dir.

Arınma bölgesi kapasitansı

Birim alan başına arınma bölgesi kapasitansı $C \equiv dQ_c/dV$ olarak tanımlanır. Burada dQ_c , yükteki birim alan başına sonsuz küçük artışı gösterirken, dV uygulanan gerilimdeki sonsuz küçük değişimdir.

Tek taraflı keskin eklem için birim alan başına kapasitans

$$C \equiv \frac{dQ_c}{dV} = \frac{d(qN_B W)}{d[(qN_B/2\varepsilon_s)W^2]} = \frac{\varepsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_B}{2}} (V_{bi} \pm V - 2kT/q)^{-1/2} \quad (1.34)$$

$$= \frac{\varepsilon_s}{\sqrt{2}L_D} (\beta V_{bi} \pm \beta V - 2)^{-1/2} \text{ F/cm}^2 \quad (1.35)$$

eşitliklerine uyar. Kapasitansın gerilime bağlılığı ile ilgili bir diğer ifade

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2L_D^2}{\varepsilon_s^2} (\beta V_{bi} \pm \beta V - 2) \quad (1.36)$$

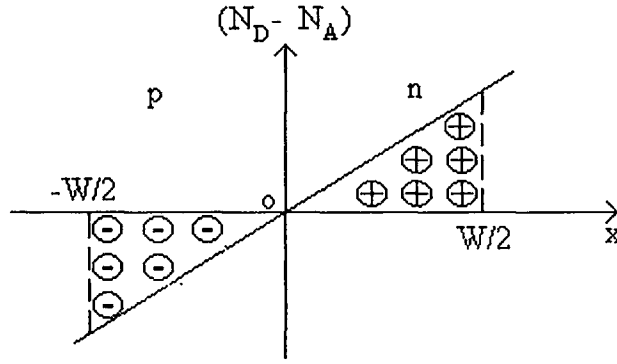
ve buradan matematiksel işlemlerle,

$$\frac{d(1/C^2)}{dV} \cong \frac{2L_D^2 \beta}{\varepsilon_s^2} = \frac{2}{q\varepsilon_s N_B} \quad (1.37)$$

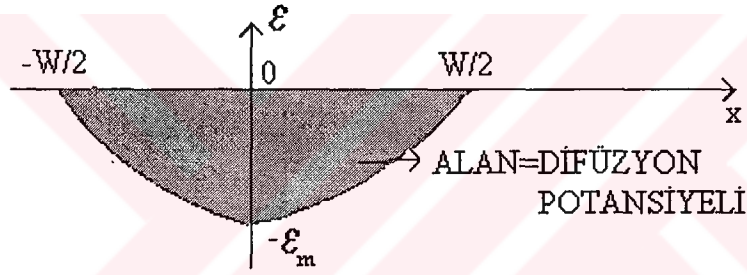
şeklindedir. \pm işaretleri sırasıyla ters ve iletim yönündeki gerilim uygulamaları içindir. Eşitlik (1.37)'den görülebileceği gibi tek taraflı bir keskin eklem için $1/C^2$ 'nin V 'ye karşı çizimi düz bir çizgi olmalıdır. Doğrunun eğimi malzemenin konsantrasyonunu (N_B) ve $1/C^2=0$ daki kesim noktası, $(V_{bi} - 2kT/q)$ değerini verir. İletim yönündeki gerilim uygulamasında arınma kapasitansına ilave olarak bir difüzyon kapasitansı vardır.

b) Keskin olmayan eklem

Termal denge durumunu gözönüne aldığımızda keskin olmayan eklem için katkı dağılımı şekil 1.11a'daki gibidir.



a)



b)

Şekil 1.11 Termal dengedeki keskin olmayan eklem. a) Uzay yükü dağılımı, b) Elektrik alan dağılımı (Sze, 1981)

Şekil 1.11b'deki elektrik alan dağılımı için a , katkı gradyenti (cm^{-4}) olmak üzere

$$E(x) = -\frac{qa(W/2)^2 - x^2}{\epsilon_s} \quad (1.38)$$

eşitliğinden $x = 0$ noktasındaki maksimum elektrik alan E_m ,

$$|E_m| = \frac{qaW^2}{8\epsilon_s} \quad (1.39)$$

ve iç potansiyel

$$V_{bi} = \frac{qaW^3}{12\varepsilon_s} \quad (1.40)$$

olarak yazılırsa arınma bölgesinin genişliği,

$$W = \left(\frac{12\varepsilon_s V_{bi}}{qa} \right)^{1/3} \quad (1.41)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Arınma bölgesinin uçlarında ($-W/2$ ve $W/2$) katkı konsantrasyonları $aW/2$ 'ye eşit olduğundan iç potansiyel

$$V_{bi} \approx \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(aW/2)(aW/2)}{n_i^2} \right] = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{aW}{2n_i} \right)^2 \quad (1.42)$$

ve arınma bölgesi kapasitansı

$$C \equiv \frac{dQ_C}{dV} = \frac{d(qaW^2/8)}{d\left[\frac{qaW^3}{12\varepsilon_s}\right]} = \frac{\varepsilon_s}{W} = \left[\frac{qa\varepsilon_s^2}{12(V_{bi} \pm V)} \right]^{1/3} \quad \text{F/cm}^2 \quad (1.43)$$

eşitlikleri ile ifade edilirler. + ve - işaretleri sırasıyla ters ve iletim yönündeki gerilim uygulamalarını göstermektedir.

Nümerik bir yolla arınma bölgesi kapasitansı, V_{bi} 'nin yerine V_g "gradient gerilimi" kullanılarak verilebilir.

$$V_g = \frac{2}{3} \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{a^2 \varepsilon_s kT / q}{8qn_i^3} \right] \quad (1.44)$$

1.5 Schottky Engeli ve p-n Eklem Yapma Yöntemleri

Elektriksel olarak tek taraflı keskin p-n eklemeye benzer özelliklere sahip olan Schottky engellerini elde etmek için kullanılan bir kaç önemli yöntem vardır.

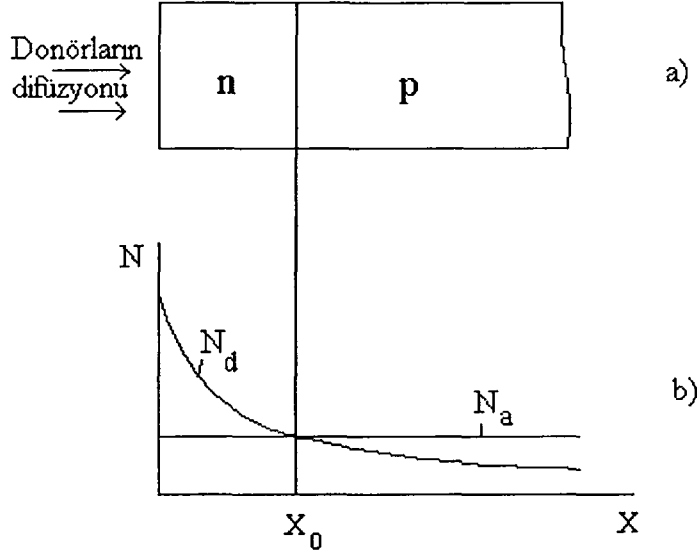
Schottky engeli elde etmek için kullanılan en eski yöntem nokta-kontakt doğrultuculardır. Bu tür yapılarda, küçük metal bir telin bir ucu yarıiletken ile temas haline getirilir. Kontakt sadece basit mekanik bir kontakt olabileceği gibi, alaşımolu p-n eklem oluşturabilecek şekilde elektriksel deşarj işlemiyle de oluşturulabilir.

Daha gelişmiş metal-yarıiletken eklemeler düzlemsel süreçle yapılırlar ve metal-yarıiletken kontaktları çeşitli yöntemlerle elde edilirler. Bunların arasında termal buharlaştırma, kimyasal ayrışma (decomposition), elektron bombardımanı ve püskürtme (sputtering) sayılabilir. Metal-yarıiletken kontaktların bir çoğu vakum ortamında elde edilirler.

p-n eklem yapımında kullanılan yöntemlerden bazıları; difüzyon yöntemi, ergime yöntemi, epitaksiyel yöntem ve implantasyon yöntemidir. Bunlardan en çok kullanılanı difüzyon yöntemidir.

Difüzyon yöntemiyle yarıiletkende p-n eklem oluşturmak için esas olarak alınan bir tipteki yarıiletkene diğer tipten katkı yapılır (n-tipi yarıiletkene p-tipi katkı veya p-tipi yarıiletkene n-tipi katkı).

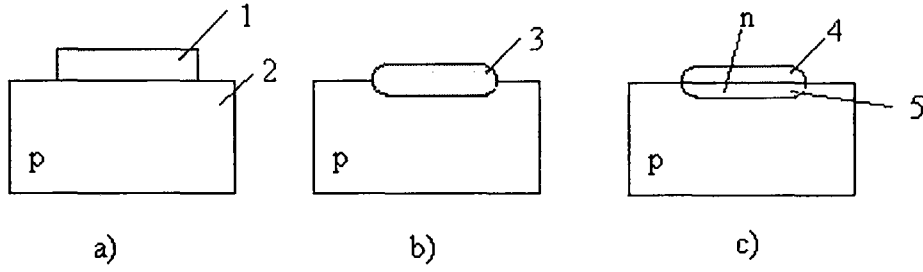
Şekil 1.12 akseptör tipli yarıiletkende, donör tipli katkının difüzyonu neticesindeki donör (N_d) ve akseptörlerin (N_a) konsantrasyon dağılımlarını göstermektedir. Şekil 1.12b'den görüldüğü gibi, donörlerin konsantrasyonu akseptör konsantrasyonuna eşit olduğu noktada ($x=x_0$, $N_d=N_a$) p-n eklemi meydana gelmektedir. p-n eklemün örneğün yüzeyinden uzaklığı (x_0), p-n eklemün yerleşme derinliği olarak tanımlanır.



Şekil 1.12 (a) Difüzyon yöntemiyle oluşmuş p-n eklemi, (b) akseptör (N_a) ve donör (N_d) iyonlarının konsantrasyon dağılımları (Caferov,1998)

Ergime yöntemiyle p-n eklem oluşturulmasını üç aşamaya ayırabiliriz (Şekil 1.13). Birinci aşamada, bileşiminde donör tipi (veya akseptör tipi) katkıları olan malzeme p-tipi (veya n-tipi) yarıiletken üzerine yerleştirilir. Bu malzemenin ergime sıcaklığı yarıiletkenin ergime sıcaklığından daha düşük olmalıdır.

İkinci aşamada, katkılı malzeme-yarıiletken sisteminin sıcaklığı katkı malzemesinin ergime sıcaklığına kadar artırılmaktadır. Bu aşamada eritilmiş malzemenin ve katı haldeki yarıiletkenin etkileşmesi nedeniyle, yarıiletkenin üst tabakası eritilmiş malzemede kısmen çözülmektedir. Üçüncü aşamada, malzeme-yarıiletken sistemi yavaş yavaş soğutulmaktadır. Son aşamada, yarıiletkenin üst kenarında katkı malzemesi yarıiletken sisteminde yeniden kristalleşme işlemi neticesinde, n-tipi (p-tipi) alaşım, p-tipi (n-tipi) yarıiletkenin üstünde oluşmaktadır. Ergime yöntemiyle yapılmış p-n eklem *alaşimsal eklem* denir.



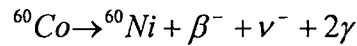
Şekil 1.13 Ergime yöntemiyle p-n eklem elde etme teknolojisinin (a) birinci, (b) ikinci ve (c) üçüncü aşamaları: (1) donörle katkılanmış malzeme, (2) yarıiletken, (3) eritilmiş malzeme yarıiletken sistemi, (4) malzemenin kristalleşmesinden sonraki kalıntısı, (5) kristalleşmede oluşan n-tipi yarıiletken (Caferov, 1998)

1.6 γ -ışınlarının Özellikleri

γ -ışınları, atom çekirdeğindeki nükleer tepkimeler sonucunda açığa çıkan yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Yüksek girginlikleri nedeniyle katı malzemelerin içine kadar nüfuz ederek çeşitli kusurlara neden olabilirler.

γ -ışınlarının spektrumları bir çizgi serisinden ibarettir. γ -ışını çizgilerinin enerjileri, atom çekirdeğinin enerji seviyelerindeki farklılara bağlıdır. Birçok gamma yayıcısı çekirdeklerin bir tek gamma çizgisi olduğu halde diğerleri iki veya daha fazla gamma çizgisine ve az bir kısmı da kompleks bir spektruma sahiptir. Gamma enerjilerinin çoğunluğu 0,1 MeV ile 3 MeV arasındadır. Bunun altındaki ve üstündeki enerjilerde nisbeten az sayıda γ -ışını yayınlanır.

En çok kullanılan γ -ışını kaynaklarından ^{60}Co 'nun yaydığı iki farklı γ -ışınının enerjileri 1.17 MeV ve 1.33 MeV dir. Bu reaksiyonun denklemi,



şeklindedir ve beta elektron bozunumu enerjisi 1.49 MeV dir.

γ -ışınlarının madde içine girginlikleri fazla olduğu için alfa ve beta parçacıkları gibi belirli bir madde kalınlığı tarafından durdurulamazlar. Bunun yerine içinden geçtikleri ortamın eşit kalınlıkları bu ışınları belirli bir oranda soğuracağından şiddet azalması eksponansiyeldir. Belirli bir madde kalınlığı bir γ -ışını demetini yarıya indiriyorsa, aynı

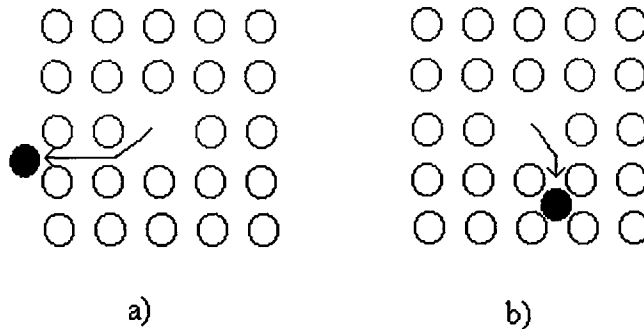
maddenin aynı kalınlıktaki ikinci bir katı da kalan demeti yarıya indirecek ancak hiç bir zaman şiddet sıfır olmayacaktır. Bu şekilde γ -ışını demetinin şiddetini yarıya indiren madde kalınlığına *yarılanma kalınlığı* denir. γ -ışınlarını soğurmada en çok kullanılan zırh malzemelerinden kurşun için yarılanma kalınlığı 1 MeV enerjili γ -ışını için 0,9 cm'dir

1.7 Katılarda γ -ışınları ile Oluşan Kusurlar

Yarıiletkenleri x-ışınları ve γ -ışınlarıyla veya elektron, nötron, proton ve ağır iyonlarla ışınlamanın hem yarıiletkenin kendisinde, hemde yarıiletken aygıtta kusurlar oluşturduğu bilinmektedir.

Bu kusurlar hacimsel veya yüzeysel olabilir ancak aygıtların performansı bu etkilerle birlikte, x-ışınları veya γ -ışınlarıyla ışınlama sürecinde oluşan fazlalık taşıyıcılardan da etkilenir. Yaratılan kusurların tipi, büyüklüğü ve hasarın derecesi, ışınlamada kullanılan radyasyonun enerjisine, atomik kütlesine, yüküne ve akısına, ışınlanan malzeme atomlarının ise atomik kütlesine, yüküne ve malzemenin yoğunluğu ile ışınlama süresindeki sıcaklığına bağlıdır.

Hacimsel kusurlar, genellikle gelen parçacıklarla çarpışmalar sonucunda oluşan atomik yerdeğiştirmeler ve az sayıda oluşan boşluk-arayer çiftleridir. Bu kusurlar yarıiletkende derin elektriksel seviyeler oluşturarak özdirencin artmasına ve taşıyıcı ömrünün azalmasına neden olurlar. Yüzeysel etkileri ise genellikle yük yaratılmasıdır.



Şekil 1.14 Hacimsel örgü kusurları (a) Schottky kusuru, (b) Frenkel kusuru (Hutchison ve Baird 1963)

Hacimsel kusurlardan basit iki tanesi *Schottky kusuru* (Şekil 1.14a) ve *Frenkel kusurudur* (Şekil 1.14b). Schottky kusurunda örgüdeki yerinden çıkan bir atom burada bir boşluk bırakarak kristalin yüzeyine veya bir dislokasyona veya örgünün düzensiz bir yerine gider. Diğer bir durum ise örgüdeki yerinden çıkan atomun bir arayere yerleşmesidir ki bu durumda oluşan kusur Frenkel kusuru olarak adlandırılır.

1.8 γ -ışınlarının GaAs Eklemlerin Özelliklerine Etkisi

Lai vd. (1995) yaptıkları bir çalışmada n-GaAs Schottky aygıtları oda sıcaklığında ^{60}Co kaynağından çıkan γ -ışınlarına maruz bırakmışlardır. C-V sonuçlarından elde edilen $1/C^2$ -V eğrileri yardımı ile serbest taşıyıcı konsantrasyonlarını hesaplamışlar ve artan γ dozu ile birlikte serbest taşıyıcı konsantrasyonunun azaldığını görmüşlerdir. Konsantrasyondaki azalmaya sebep olarak radyasyonun ilave akseptör tuzaklar oluşturmasını ve bu tuzakların rekombinasyon merkezleri gibi davranarak malzemedeki donörleri kompanse etmesini göstermişlerdir.

Işınlanmamış GaAs örneklerde bulunan EL2 ($E_c-0.820$ eV) ve EL3 ($E_c-0.408$ eV) kusurların, 1 Mrad'lık ışınlama sonucunda değişmediğini ve yeni kusur oluşmadığını bulmuşlardır. γ -dozunun 5 Mrad'a çıkmasıyla iki yeni elektron tuzağı EL6 ($E_c-0.336$ eV) ve E2 ($E_c-0.128$ eV) oluşmuştur. 2 Mrad dozu için ışınlama yapmamışlar, ancak Barry vd.'nin yaptıkları bir çalışmaya dayanarak 2 Mrad'lık γ dozunun GaAs aygıtlar üzerinde çok büyük bir etkisi olmadığını düşündüklerini söylemektedirler. Daha önce yaptıkları bir çalışmada ^{60}Co kaynağından çıkan γ -ışınlarının ve 1 MeV elektronların özdeş kusurlar oluşturduğunu görmüşlerdir.

Lai vd. (1993) yaptıkları bir başka çalışmada GaAs eklemleri 1 MeV elektronlarla ve farklı akılarda ışınlamışlardır. C-V ölçümlerinden, elektron akısının artmasıyla serbest taşıyıcı konsantrasyonunun azaldığını bulmuşlardır. Yüksek akılarda ($I > 5.7 \times 10^{14}$ e cm^{-2}) $1/C^2$ -V eğrisinin lineerlikten uzaklaştığını görmüşler ve bunun sebebini GaAs Schottky aygıtın aktif tabakasındaki arınmanın çok fazla olmasına bağlamışlardır. Yaptıkları I-V ölçümlerinden, GaAs Schottky diyodun direncinin, artan akıyla birlikte arttığını bulmuşlardır.

1.9 Difüzyon Kuralları ve Difüzyon Mekanizmaları

Katılarda atomlar ısının etkisiyle denge konumları etrafında küçük genlikli titreşimler yaparlar. Sıcaklık arttıkça titreşimlerin genliği artar ve bazı atomlar komşu atomlarla bağlarını koparıp yeni bir denge konumuna geçebilirler. Bu süreç birçok atom için çok sayıda tekrarlanabilir. Bu şekilde atomların ısı etkisiyle bir denge konumundan diğerine atlamalarına *difüzyon* denir. Dolayısı ile atomların malzeme içinde taşınması difüzyon olayı olarak tanımlanır. Eğer taşınan atomlar, saf malzemenin kendi atomları ise olay *özdifüzyon*, katkı atomları yarıiletkenlerde hareket ederse *difüzyon* olarak adlandırılır.

a) Difüzyon kuralları

Difüzyonun kuralları 1855’de Fick tarafından verilmiştir. 1. ve 2. Fick kuralı denilen iki temel kural vardır.

1.Fick kuralı : Homojen katılarda atomların serbest difüzyon akışı, konsantrasyon gradyenti ile orantılıdır.

$$J = -D \frac{dN}{dx} \quad (1.45)$$

Bu eşitlikte J atom akışı, N atomların konsantrasyonu, D difüzyon katsayısıdır. (-) işareti atomların akış yönünün, konsantrasyon gradyentinin küçüldüğü yönde gerçekleştiğini göstermektedir. Difüzyon katsayısı D ,

$$D = \alpha a^2 \nu \quad (1.46)$$

şeklinde ifade edilir. a örgü parametresi, ν atomların kristaldeki titreşim frekansı ve α bir sabittir. α ’nın değeri basit örgüde 1/3, hacim merkezli kübik örgüde 1/8 ve yüzey merkezli kübik örgüde 1/12’ dir. Difüzyon katsayısı atomların kristaldeki hareket hızını ifade eder

ve birimi cm^2/s dir. Atomların yarıiletkendeki difüzyon katsayısı yüksek sıcaklıklarda ($500\text{ }^\circ\text{C}$ - $1000\text{ }^\circ\text{C}$) yaklaşık 10^{-6} - 10^{-14} cm^2/s aralığında değişmektedir.

2. Fick kuralı :

Eşitlik (1.47)'deki süreklilik denklemi 1. Fick Kuralına (Eşitlik 1.45) uygulanırsa, 2. Fick kuralını ifade eden (1.48) eşitliği elde edilir.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (1.47)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (1.48)$$

Bu kurala göre konsantrasyonun zamanla değişim hızı, konsantrasyonun ikinci türevine bağlıdır.

2. Fick kuralının çözümleri başlangıç ve sınır şartlarına bağlıdır. Yarı sonsuz örneğe sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyon

$$N(0, t) = N_0 \quad (1.49)$$

$$N(x, t) = 0 \quad (1.50)$$

bağıntıları ile verilir. 2. Fick denkleminin çözümü

$$N(x, t) = \left(1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (1.51)$$

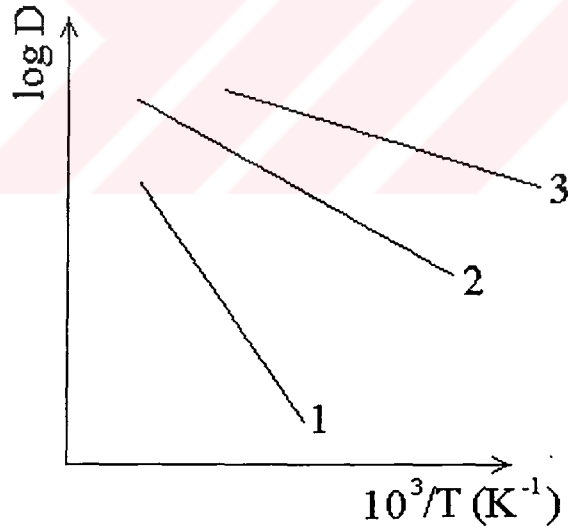
şeklindedir (Caferov, 1998). Burada N_o , örnek yüzeyindeki ($x=0$) sabit konsantrasyon, $\text{erf}(z)$ Gauss hata fonksiyonudur

$$\text{erf } z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (1.52)$$

Katılarda difüzyon katsayısı, Arrhenius kuralına uygun olarak sıcaklıkla eksponansiyel değişim gösterir. Eşitlik (1.53) Arrhenius bağıntısıdır

$$D = D_o \exp\left(-\frac{G}{kT}\right) \quad (1.53)$$

Eşitlikteki G difüzyonun aktivasyon enerjisi, D_o üstel fonksiyon çarpanıdır. Şekil 1.15 atomların difüzyon katsayısının sıcaklığa bağlılığını göstermektedir.



Şekil 1.15 (1) Boşluk, (2) arayer ve (3) tane sınırları mekanizmaları ile hareket eden atomların difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağlılığı (Caferov, 1988)

b) Difüzyon mekanizmaları

Genellikle düzenli kristallerde atomların taşınması beş farklı yolla veya mekanizmayla olur.

- 1) Çift yerdeğiştirmesi
- 2) Halka yerdeğiştirmesi
- 3) Vakansiyon veya boşluklarla difüzyon
- 4) Arayerle difüzyon
- 5) Karmaşık veya dissosiyatif mekanizma

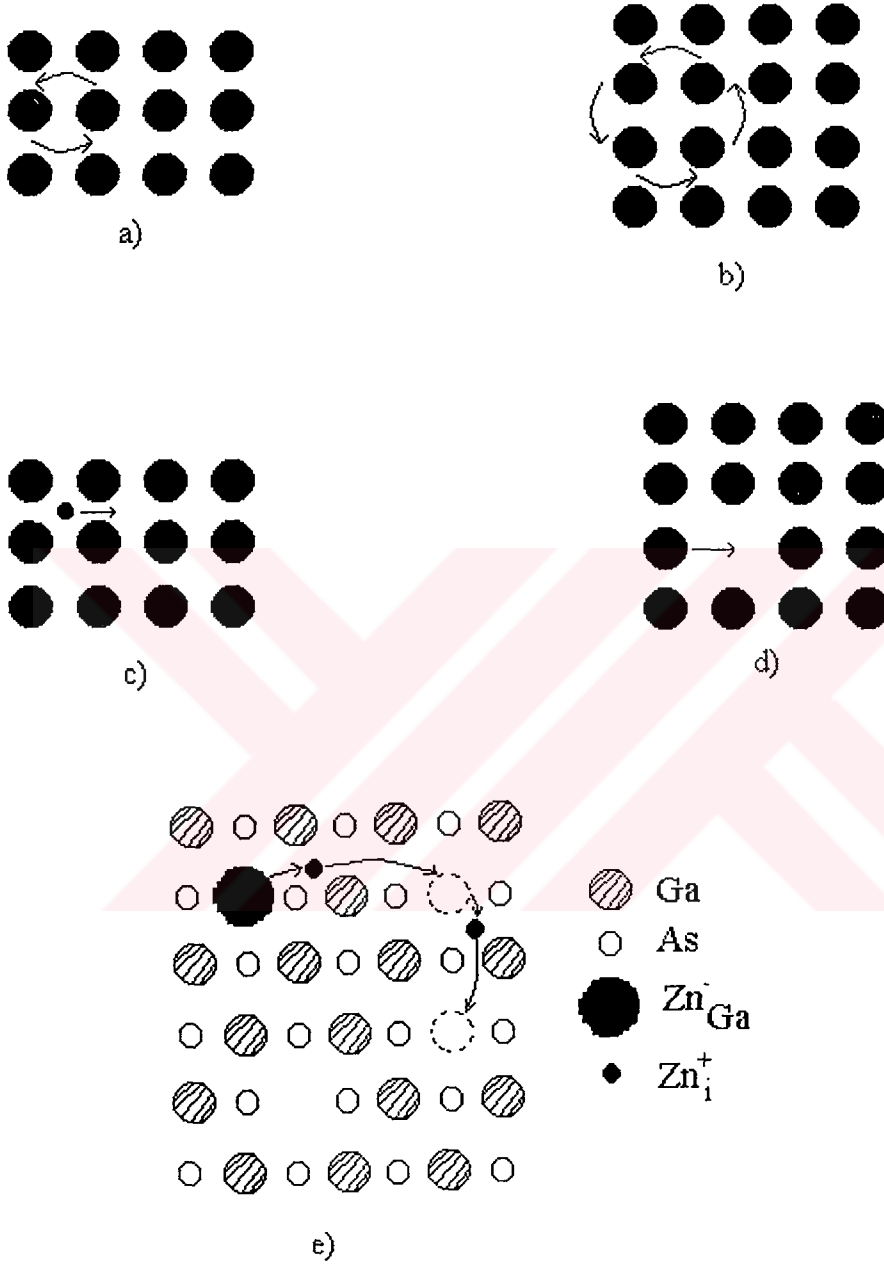
1) İki komşu atom aynı anda yer değiştirir. Bu mekanizmanın (çift yerdeğiştirmesi) oluşma olasılığı oldukça küçüktür ve genellikle metallerde görülür (Şekil 1.16a).

2) Dört komşu atom aynı anda dairesel olarak yer değiştirir (halka yerdeğiştirmesi). Her atom bir örgü parametresi uzaklığa atlamaktadır. Bu mekanizmanın da olasılığı küçüktür (Şekil 1.16b).

3) Vakansiyonda atom düğümünden komşu boşluğa geçer (vakansiyon mekanizması). Bu mekanizma en çok kristallerde, metallerde olur (Şekil 1.16d).

4) Kristalde atomun bir arayer pozisyonundan diğerine atlaması ara yer mekanizmasının temelidir (arayerle difüzyon). Bu mekanizma iyon yarıçapı küçük atomlar için mümkündür (Şekil 1.16c).

5) Bu mekanizma 3 ve 4 numaralı mekanizmaların bileşimidir (Şekil 3.16e).



Şekil 1.16 Atomların difüzyon mekanizmaları : (a) çift yerdeğiştirme, (b) halka yerdeğiştirme, (c) arayer, (d) vakansiyon ve (e) çinkonun GaAs'de dissosiyatif mekanizması (Caferov, 1988)

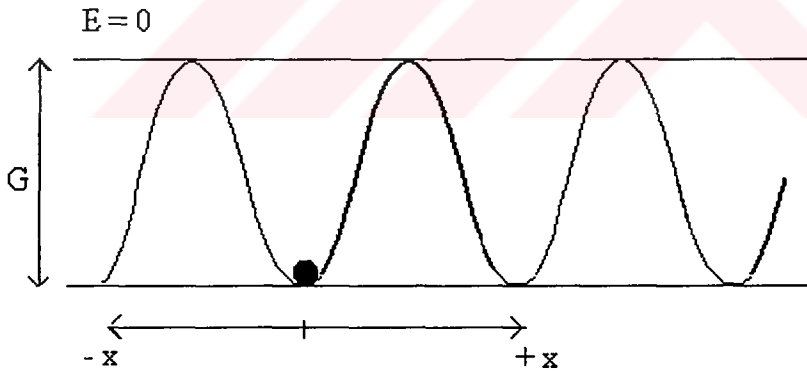
1.10 Elektrodifüzyon Kuralları

Katılarda iyonların dış elektrik alanda taşınması olayı *elektrodifüzyon* olarak tanımlanır.

Serbest difüzyon için kristalde potansiyel engel içindeki atomun (Şekil 1.17) denge durumundan sağa veya sola geçme olasılığı aynıdır ve

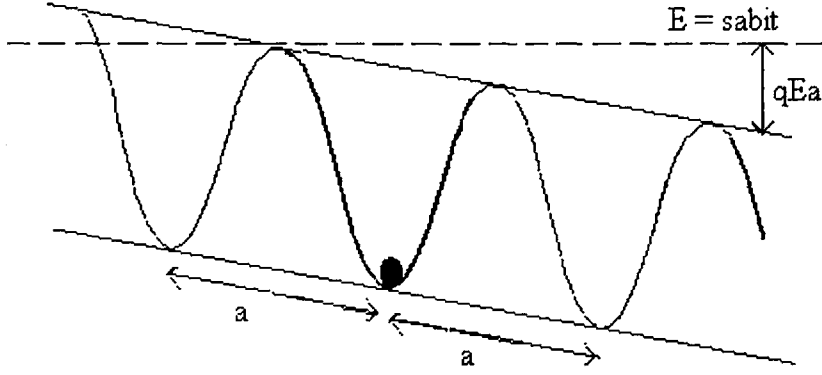
$$P_o = \frac{P_o}{2} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{G}{kT}\right) \quad (1.54)$$

şeklinde yazılabilir. Burada P_o parçacıkların sağa veya sola atlamalarının tam olasılığı, G potansiyel engelin yüksekliğidir.



Şekil 1.17 Kristaldeki atom için potansiyel engelin gösterimi. G , potansiyel engelin yüksekliği (Caferov, 1998)

Dış elektrik alan uygulandığında potansiyel engeller eğilirler (Şekil 1.18).



Şekil 1.18 Dış elektrik alan uygulanan kristaldeki atom için potansiyel engelin gösterimi. q , elektron yükü E , dış elektrik alan a , örgü parametresi (Caferov, 1998)

Bu durumda iyonların $+x$ ve $-x$ yönlerine geçme olasılıkları farklıdır

$$P^+ = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{G - qEa}{kT}\right) \quad (1.55)$$

$$P^- = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{G + qEa}{kT}\right) \quad (1.56)$$

Pozitif yüklü iyonların $+x$ yönünde akma ihtimali $-x$ yönündekinden daha büyüktür. Bu nedenle elektrik alan yönünde, iyonların difüzyon akısına (J_D) ilave olarak, elektrik alanla uyarılmış elektrik akısı (J_E) meydana gelir.

$$J_E = N\mathcal{G} \quad (1.57)$$

İyonların sürüklenme hızı \mathcal{G} , şu şekilde verilir.

$$\mathcal{G} = \frac{va^2}{2} \frac{qE}{kT} \exp\left(-\frac{G}{kT}\right) \quad (1.58)$$

Burada ν , iyonların veya atomların kristal örgüdeki titreşim frekansıdır. Böylece kristale elektrik alan uygulandığında iyonların toplam akısı

$$J = J_D + J_E \quad (1.59)$$

veya

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} + N \mathcal{G} \quad (1.60)$$

eşitlikleriyle verilir. İyonların sürüklenme hızı \mathcal{G} ve hareketliliği (mobilitesi) μ arasındaki bağıntı şu şekildedir.

$$\mathcal{G} = \mu E \quad (1.61)$$

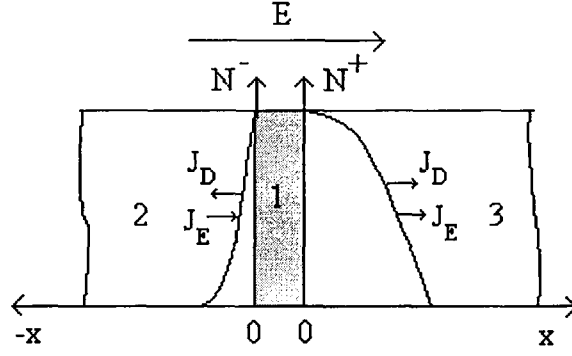
Bu bağıntının (1.61) denkleminde yerine konulmasıyla iyonların toplam akısı

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} + N \mu E \quad (1.62)$$

şekline dönüşür. (1.62) eşitliğini süreklilik denkleminde (Eşitlik 1.47) uygularsak *elektrodifüzyon denklemi* şu şekli alır

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - \mu E \frac{dN}{dx} \quad (1.63)$$

Şekil 1.19, sabit konsantrasyonlu katkı tabakasından iki katı örnekte (2,3) elektrik alanının (E) etkisiyle oluşan konsantrasyon dağılımlarını göstermektedir. Katkı tabakasının (1) sol kenarındaki örnekte (2) elektrodifüzyon (J_E) ve difüzyon (J_D) akılarının yönleri zıttır, oysa sağdaki örnekte (3) J_E ve J_D akılarının yönleri aynıdır.

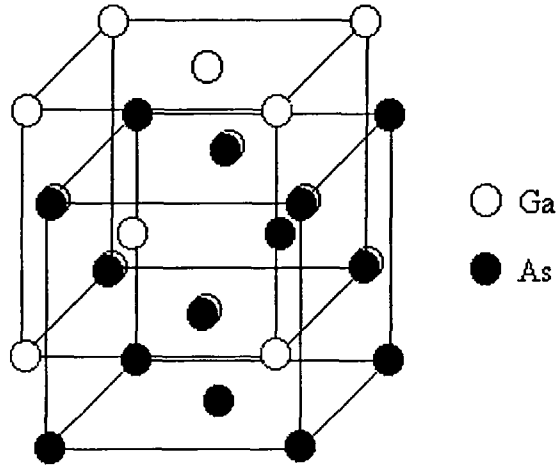


Şekil 1.19 Sabit konsantrasyonlu kaynaktan elektrodifüzyonda oluşan iyonların konsantrasyon dağılımları. 1 kaynak, 2 ve 3 örnekler, J_D ve J_E iyonların difüzyon ve elektrodifüzyon akıları (Caferov, 1998)

Bu nedenle sağ örnekteki (3) iyonların konsantrasyon dağılımının uzunluğu sol örnektekinden (2) daha büyüktür. Elektrodifüzyon deneylerinden iyonların sürüklenme hızını \mathcal{G} veya iyonların hareketliliğini μ ($\mathcal{G} = \mu E$) bulabiliriz.

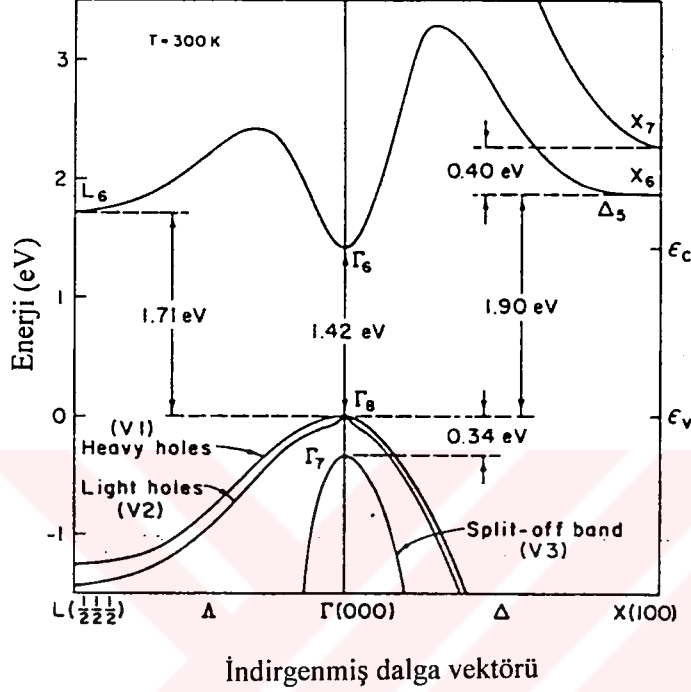
1.11 GaAs'in Kristal Yapısı ve Fiziksel Özellikleri

Birçok A_3B_5 bileşiği gibi GaAs'de çinko blendi (zinc blend) yapısında kristalleşir. Yapının primitif hücresinde A ve B olmak üzere iki atom vardır. Her atom grubu bir yüzey merkezli kübik örgü (fcc) oluşturur. Ga ve As'in fcc yapıları hacim köşegeninin dörtte biri kadar birbirinin içine girmişlerdir. (Şekil 1.20)



Şekil 1.20 GaAs'in kristal yapısı (Shur,1987)

GaAs direkt geçişli bir yarıiletkendir, yani valans bandı maksimumu ile iletim bandı minimumu aynı momentum değeriinde bulunurlar (Şekil 1.21).



Şekil 1.21 GaAs'in band yapısı

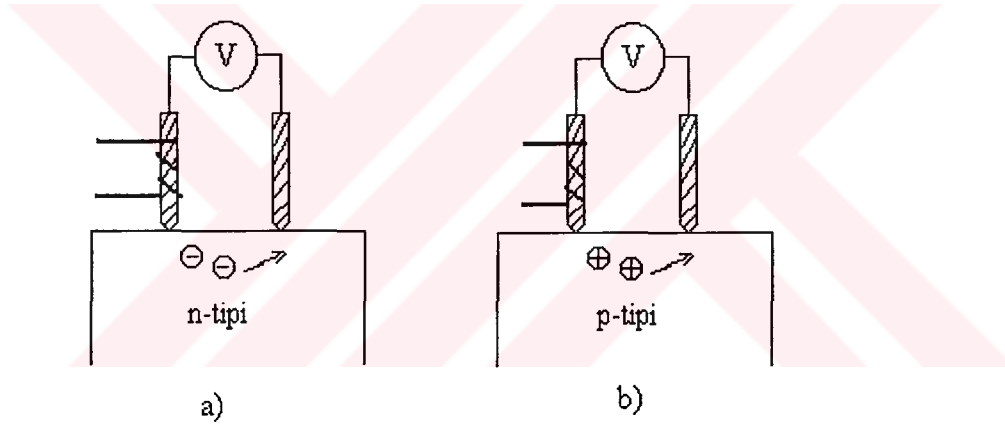
Çizelge 1.1 Oda sıcaklığındaki (300 K) GaAs'in bazı özellikleri :

Atom konsantrasyonu	$N = 4.42 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
Kristal yoğunluğu	$\rho = 5.317 \text{ g/cm}^3$
Yasak enerji aralığı	$E_g = 1.423 \text{ eV}$
Özden elektriksel iletkenliği	$\sigma_i = 3.0 \times 10^{-9} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$
En alçak iletkenlik bandı kenarı etkin kütlesi	$m_\infty = 0.0632m_0$
L_6 iletkenlik bandı etkin kütlesi	$m_L = 0.55m_0$
Valans bandı etkin kütlesi	$m_h = 0.50m_0$
Özden taşıyıcı konsantrasyonu	$n_i = 1.79 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
Örgü sabiti	$a = 5.6533 \text{ Å}$

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 GaAs Örneklerin İletkenlik Tipi Ölçümleri

GaAs örneklerin iletkenlik tipi ölçümlerinde *termal elektro-motor kuvvet (TEMK)* yöntemi kullanıldı. n-tipi yarıiletken malzemeye temas eden bir sıcak prob, aynı malzemede oda sıcaklığında bulunan bir diğer kontakta göre pozitif olacaktır. Yarıiletkenin p-tipi olması durumunda ise sıcak kontak negatif olacaktır. Bunun sebebi n-tipi için sıcak bölgede ısınan elektronların soğuk bölgeye difüzyonu ve p-tipi için pozitif yüklü deliklerin sıcak bölgeden soğuk bölgeye difüzyonudur. Böylece iki kontak arasında termal elektromotor kuvvet oluşur. Eğer yarıiletkenin bu noktaları kapalı devre haline getirilirse devreden termoelektrik akımı geçer. Uygun bir milivoltmetre yardımı ile örneklerin iletkenlik tipi belirlenir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Termal EMK yöntemiyle (a) n-tipi ve (b) p-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik tiplerinin ölçüm devresi (Caferov, 1998)

Deneysel ölçümlerde yarıiletken örneklerin iletkenlik tipini bulmak için önce tipi bilinen bir yarıiletkenin TEMK ölçümü ile devredeki voltmetrenin kalibrasyonu yapılır ve sonra incelenen örneğin tipi belirlenir.

TEMK yönteminin kullanım alanı, düşük öz dirençli yarıiletkenlerle sınırlıdır. Öz direnç artarsa sıcak prob nedeniyle malzeme özden yarıiletken gibi davranabilir ve elektron mobilitesi delik mobilitesinden yüksek bir malzeme her zaman n-tipi olarak ölçülür.

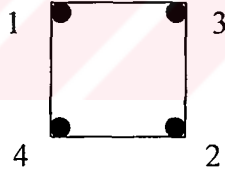
2.2 GaAs Örneklerin Yük Taşıyıcıları Konsantrasyonu ve Mobilite Ölçümleri

Hall olayından faydalanarak bir yarıiletkenin yük taşıyıcıları konsantrasyonunu ve mobilitelerini belirlemek mümkündür. Hall sabiti (R_H) yük taşıyıcılarının konsantrasyonunu ve taşıyıcıların yük işaretini de belirlemektedir. Hall sabitinin, Hall gerilimi (V_H) ile ilişkisi şu şekildedir.

$$R_H = \frac{V_H d}{IB} \quad (2.1)$$

Şu halde Hall sabitini belirlemek için örnekten geçen akım (I), Hall gerilimi (V_H), magnetik indüksiyon (B) ve örneğin kalınlığı (d) bilinmelidir.

Dörtgen şekilli bir örnek için Hall Olayı ölçümlerinde kontakların yerleşimi şekil 2.2'deki gibi olabilir. 1 ve 2 kontaklarından akım geçerken 3 ve 4 kontakları arasında Hall gerilimi ölçülür.



Şekil 2.2 Hall Olayı ölçümlerinde dörtgen şekilli örnekte kontakların yerleşimi

Hall gerilimini hatasız ölçmek için 3 ve 4 kontakları arasında oluşan parazit gerilimleri ortadan kaldırmak gerekir. Bu parazit gerilimler farklı sebeplerden oluşabilirler. 3 ve 4 kontakları birbirlerinin tam karşılarında yerleşmediğinde (yani bu kontaklar eşit potansiyel düzeyinde yerleşmediğinde) parazit gerilim oluşmaktadır. Tam homojen olmayan örneklerde de ilave gerilim meydana gelebilir. Yük taşıyıcıların hareketine bağlı parazit gerilimler de Hall Olayı ölçümlerini etkileyebilirler. Parazit gerilimlerin çoğu elektrik akımının ve manyetik alanın yönüne bağlıdır. Bu nedenle akımın ve manyetik alanın yönlerini değiştirmekle Hall gerilimini etkileyebilen gerilimleri ortadan kaldırmak

mümkündür. Ölçümler iki akım yönü ve iki manyetik alan yönü olmak üzere toplam dört kez yapılır ve $V_H(I^+, H^+)$, $V_H(I^-, H^+)$, $V_H(I^+, H^-)$, $V_H(I^-, H^-)$ değerleri bulunur. Sonuç olarak 3 ve 4 kontakları arası hatasız Hall gerilimi değeri

$$V_H = \frac{1}{4} [V_H(I^+, H^+) + V_H(I^-, H^+) + V_H(I^+, H^-) + V_H(I^-, H^-)] \quad (2.2)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Bu değer (2.1) eşitliğine konmasından R_H Hall sabitinin değeri bulunur.

Hall sabitini kullanarak yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonunu bulabiliriz. p-tipi bir yarıiletken için delik konsantrasyonunu (p) veren ifade aşağıdaki gibidir.

$$p = \frac{1}{R_H e} \quad (2.3)$$

elektron konsantrasyonu (n) için ise ifade

$$n = -\frac{1}{R_H e} \quad (2.4)$$

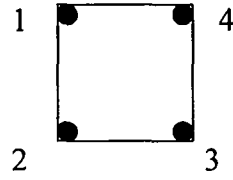
şeklini alır. n-tipi yarıiletkende Hall sabitinin işareti negatiftir.

Hall gerilimi ile birlikte örneğin iletkenliği (σ) de ölçülerek (2.5) eşitliği yardımıyla yük taşıyıcılarının Hall mobilitesi (μ) de elde edilebilir.

$$\sigma = ne\mu \quad (2.5)$$

İletkenlik ölçümü için önce Van der Pauw metodu ile öz direnç belirlenir ve buradan $\sigma = 1/\rho$ eşitliği ile iletkenlik hesaplanır.

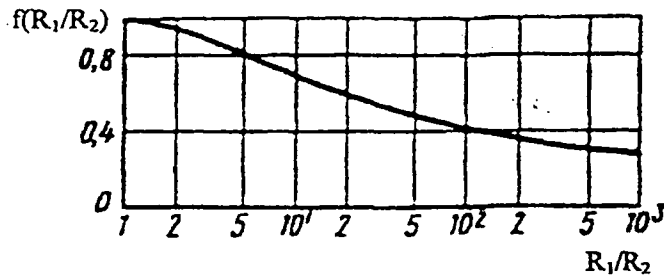
Van der Pauw metodu ile öz direnç ölçümünde, dörtgen şekilli örneğin (Şekil 2.3) önce 1 ve 2 kontaklarından akım geçirilerek 3 ve 4 kontakları arası gerilim ölçülür. Buradan Ohm bağıntısıyla R_1 direnci hesaplanır. Daha sonra 2 ve 3 kontaklarından akım geçirilir ve 1-4 kontakları arasındaki gerilim ölçülerek R_2 direnci hesaplanır. Elde edilen değerlerle aşağıdaki 2.6 eşitliği kullanılarak örneğin ρ öz direnci hesaplanır.



Şekil 2.3 Van der Pauw metodu ile öz direnç ölçümlerinde dörtgen şekilli örnekte kontakların yerleşimi

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.6)$$

Bu denklemde d örneğin kalınlığı, $f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ düzeltme fonksiyonudur. Düzeltme fonksiyonunun grafiği şekil 2.4'deki gibidir.



Şekil 2.4 Van der Pauw metodu için düzeltme fonksiyonunun R_1/R_2 'ye karşı grafiği.

Özdirenç, yük taşıyıcıları konsantrasyonu ve mobilitesi ölçümlerinde uygun birimler gerilim için milivolt, akım için miliamper, kalınlık için santimetre ve manyetik indüksiyon için Gaussdur.

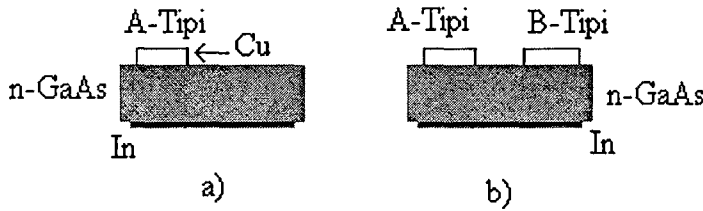
2.3 Cu-GaAs Yapıların Hazırlanması ve γ -ışınlanması

Cu-GaAs yapıların hazırlanması için n-tipi GaAs altlık üzerine vakum ortamında (10^{-5} Torr) ve oda sıcaklığında elektron demeti buharlaştırma tekniği ile Cu kaplandı.

Kullanılacak olan bakır önce HNO_3 içinde kısa süre tutularak yüzeyindeki oksit tabakası ve kirlilikten arındırıldı. GaAs altlığın diğer yüzeyine geniş In kontak yapıldı. Kontak yapımı esnasında örnek ısınacağı için Cu difüzyonuna sıcaklığın etkisini engellemek amacıyla In kontak, kaplamadan önce yapıldı.

γ -ışınlamanın Cu-GaAs eklem oluşumundan önce veya sonra yapılmasının, eklem karakteristikleri üzerindeki etkilerini karşılaştırabilmek için bazı örneklerde aynı GaAs altlık üzerinde iki farklı Cu-GaAs eklem oluşturuldu

Bu örnekler elde edilirken yine GaAs altlığın bir yüzeyine geniş In kontak yapıldı ve böylece her iki eklem için de aynı alt kontakın kullanılarak, kontak farkından doğabilecek etkiler ortadan kaldırıldı. Daha sonra ilk eklem için Cu kaplama yapıldı. İleride bu eklemden A-tipi eklem olarak bahsedeceğiz (Şekil 2.5a). İlk eklem oluşturulmuş örneğin bu yüzeyinin tamamı γ -ışınlandıktan sonra A-tipi eklemin yakınına ikinci bir Cu buharlaştırılması ile B-tipi eklem elde edildi (Şekil 2.5b).



Şekil 2.5 Cu-GaAs yapılar

Böylece A-tipi Cu-GaAs yapıların γ -ışınlanması sürecinde hem bakır hem de GaAs altlık ışınlarken, B-tipi örneklerde ise sadece GaAs altlık γ -ışınlarına maruz kalmıştır.

*Işınlamada 40 Ci'lik ^{60}Co gamma kaynağı kullanıldı. Bakır kaplanmış yüzeyi gamma kaynağına bakacak şekilde ve kaynak merkezinden 8 cm. uzağa yerleştirilen örnekler 170 saat boyunca oda sıcaklığında ışınladılar. Işınlama sonucunda, γ -ışınlarının etkisiyle varolan Cu-GaAs yapıda Cu atomlarının GaAs içine difüzyonunun artması ve böylece p-n eklem oluşturulması, γ -ışınlarının yapıyı nasıl etkilediğinin ve γ -ışınlarının etkisiyle zarar gören GaAs üzerinde yeni oluşturulacak Cu-GaAs yapının hangi özelliklere sahip olacağının araştırılması amaçlandı. Elektriksel özelliklerindeki değişimlerin inceleneceği Cu kaplanmamış temiz GaAs örnekler de aynı şartlarda ışınladılar.

2.4 Bakırın GaAs Altlıktaki Konsantrasyon Dağılımı Ölçümleri

γ -ışınlanmış Cu-GaAs yapılarıdaki bakır atomlarının konsantrasyon dağılımı ** ölçümleri, x-ışınları floresans yöntemi ile yapıldı. (Bacaksız, 1997)

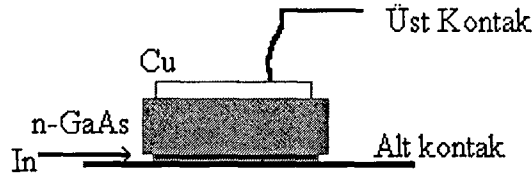
x-ışınları floresans yöntemi, yayınlanan x-ışınının enerjisinin ölçülmesiyle element hakkında bilgi verir. Bu metot önce yayınlanmış karakteristik pikin enerjisinin ölçülmesiyle verilen bir elementin, nitel analiz tayininin yapılmasını sağlar ve sonra bu pikin şiddetinin ölçülmesiyle de elemental konsantrasyon belirlenebilir. Cu atomlarını uyarmak için Am-241 halka kaynağı, karakteristik x-ışınlarını ve örnekten saçılmış radyasyonu saymak için Si(Li) sayıcı kullanıldı. Dedektörden çıkan pulslar önce ön yükselticiden ve sonra lineer yükselticiden geçirilerek çok kanallı (8192) puls yükseklik analizöründe (MCA) kaydedildi. Sayma işlemlerinde MCA'nın 2048 kanalı kullanıldı.

* Cu-GaAs yapıların γ -ışınlaması ÇNAEM'de yapıldı.

** Bu ölçümler Karadeniz Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünde yapıldı.

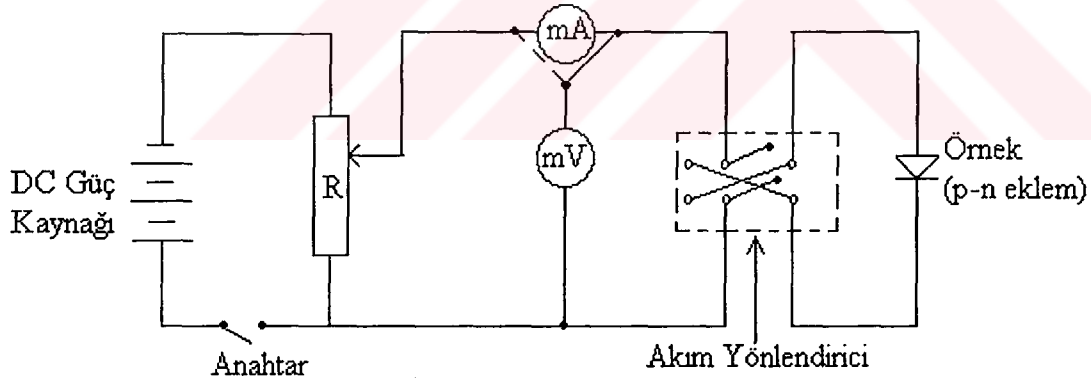
2.5 Akım-Gerilim Karakteristikleri

Hazırlanmış olan Cu-GaAs yapıların elektriksel ölçümlerinde kontak olarak alt yüzeydeki In tabaka ve üst yüzeye kaplanmış olan bakır kullanılmıştır. In'lu yüzey bir bakır tabaka üzerine oturtulmuş ve üst kontakt olarak kullanılan bakırın üzerine sabit bir metal ile bastırılmıştır (Şekil 2.6). Bu iki kontak arasındaki akım- gerilim karakteristikleri



Şekil 2.6 Cu-GaAs örneğinden kontaktların alınması

karanlıkta ve 50 Watt'lık tungsten lamba ile aydınlıkta (örneğin üzerine düşen ışık şiddeti $P=100 \text{ mW/cm}^2$), oda sıcaklığında çıkarılmıştır. Şekil 2.7 akım-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan devrenin şemasını göstermektedir.

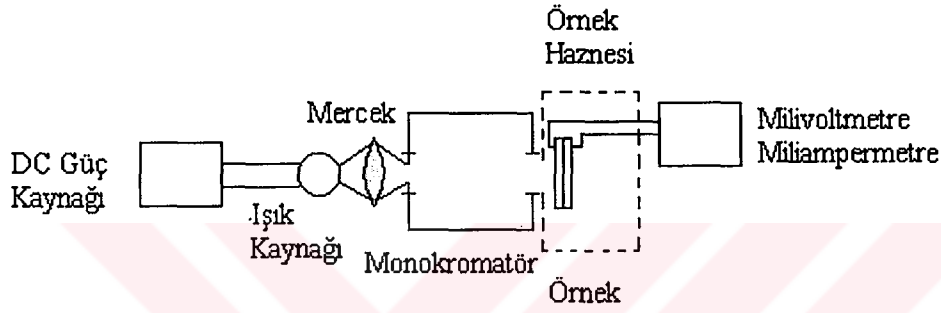


Şekil 2.7 Cu-GaAs eklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinin ölçüm devresinin şeması

2.6 Fotoduyarlılığın Spektral Dağılımı

Cu-GaAs eklemlerin fotoduyarlılık dağılım spektrumları $\lambda=300-1000 \text{ nm}$ dalgaboyu aralığında oda sıcaklığında incelendi. Fotoduyarlılığın spektral dağılımı ölçümlerinde "Oriell" marka monokromatör kullanıldı. Şekil 2.8 ölçüm düzeneğini göstermektedir.

“Osram” lambasından saçılan ışık merceklerle monokromatörün girişine odaklanmakta ve monokromatörden çıkan monokromatik ışık demeti örneğin yüzeyine düşürülmektedir. Işığın etkisiyle örnekte oluşan fotogerilim (veya fotoakım) milivoltmetre (veya miliampermetre) ile ölçüldü. Her ölçümde örneklerin monokromatöre eşit uzaklıkta bulunmalarına ve eşit miktarda ışık almalarına özen gösterildi. Örnekler kapalı bir hazne içinde tutularak ortamdaki ışık almaları engellendi. Bu ölçümlerin sonucunda örneğin yüzeyine düşen ışık şiddetinin spektral dağılımı değerlendirildi ve fotogerilim (fotoakım)-dalga boyu spektrumları elde edildi.



Şekil 2.8 Cu-GaAs eklemlerin fotoduyarlılık spektrumlarının ölçüm düzeneği

2.7 Kapasitans-Gerilim Ölçümleri

Cu-GaAs yapıların kapasitans-gerilim ölçümlerinde “Hewlett Packard Impedance Analyzer” kullanıldı. Elde edilen C-V değerlerinden 2.7 eşitliği kullanılarak sıfır voltteki kapasitans değerlerinden eklem genişlikleri bulundu.

$$W = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{C} \quad (2.7)$$

Burada $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-14}$ F/cm boşluğun, ϵ yarıiletkenin (GaAs için $\epsilon = 10$) dielektrik sabitidir, S , eklemin alanıdır. Çizilen $1/C^2$ -V ve $1/C^3$ -V eğrilerinin kıyaslanması ile $1/C^2$ -V eğrisinin

daha lineer olduğu görölerek eklemin keskin eklem olduğu fikrine varıldı. Bu eğriden

$$N = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 s^2} \frac{V_2 - V_1}{C_2^2 - C_1^2} \quad (2.8)$$

eşitliği kullanılarak yük taşıyıcılarının konsantrasyonu hesaplandı.

2.8 Optik Geçirgenlik Ölçümleri

GaAs örneklerin optik geçirgenlik ölçümleri, “Perkin Elmer Lambda 2S” spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Örnekler hazırlanan maskelere yerleştirilerek γ -ışınlamadan önce, sonra ve tavlamadan sonra $\lambda=500-1100$ nm dalgaboyu aralığında optik spektrumlar incelenmiştir.

3. BULGULAR

3.1 Temiz GaAs Örneklerin Elektriksel Özellikleri

Bu çalışmada dörtgen (6x6x0,4 mm) şekilli tek kristal n-tipi GaAs plakalar altlık olarak kullanıldı. Temiz GaAs örneklerin oda sıcaklığındaki elektriksel özellikleri deneysel metodlarla belirlendi. Yapılan ölçümlerden örneklerin iletkenlik tipi, yük taşıyıcılarının konsantrasyonu (n), öz direnci (ρ), ve yük taşıyıcıların hareketliliği (μ) hesaplandı.

İletkenlik tipi *Termal Elektromotor Kuvvet (TEMK)* yöntemiyle belirlendi. Yapılan ölçümler sonucunda örneklerin n-tipi olduğu görüldü.

Yük taşıyıcılarının konsantrasyonunun belirlenmesinde *Hall Olayı* kullanıldı. Örneklerin yük taşıyıcı konsantrasyonu $n=1,9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak belirlendi.

Özdirenç ölçümlerinde *Van der Pauw* metodu kullanıldı. Örnek tam kare şeklinde hazırlandı ve fotovoltmik etkilerden korunmak için ölçümler, örnek ışık almayacak şekilde yapıldı. Ölçümler sonucunda öz direnç $\rho=0,07 \text{ ohm.cm}$ olarak hesaplandı.

Yük taşıyıcılarının hareketliliğinin hesaplanmasında iletkenliği ifade eden (2.5) eşitliği kullanıldı. Öz direncin hesaplanan değerinden $\sigma = \frac{1}{\rho}$ bağıntısı ile iletkenlik hesaplandı ve buradan (2.5) eşitliği yardımıyla yük taşıyıcılarının hareketliliğinin değeri $\mu=4700 \text{ cm}^2/V.sn$ olarak hesaplandı.

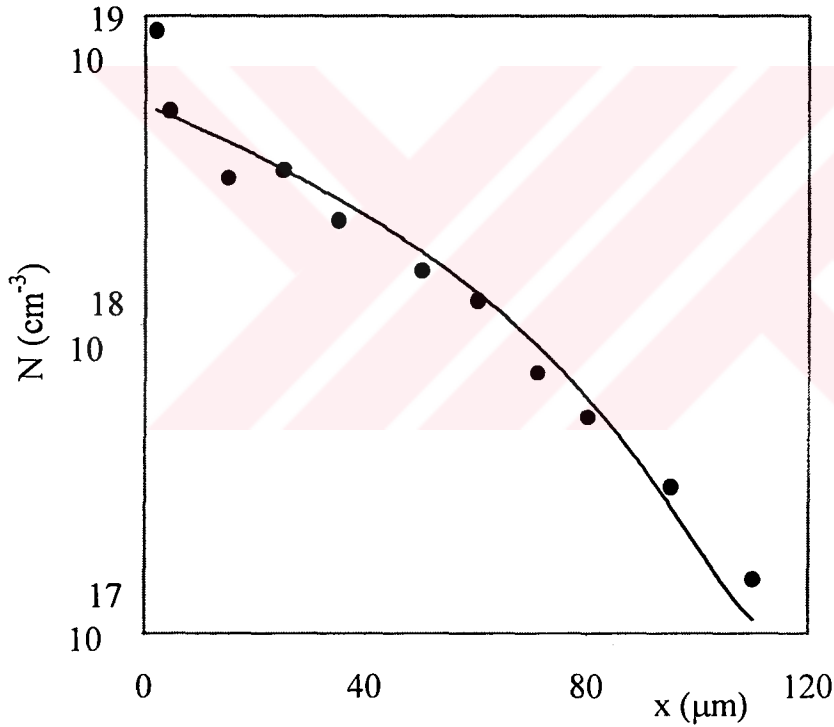
3.2 Cu-GaAs Yapılarda Bakır Konsantrasyonunun GaAs Altlıktaki Difüzyon Dağılımı

Bakırın GaAs altlıktaki konsantrasyon dağılımı Cu-GaAs yapıların γ -ışınlamasından sonra ($t=170$ saat) x-ışınları floresans yöntemiyle (XIF) incelendi. HNO_3 çözeltisi kullanılarak GaAs altlığın üzerinden Cu filmi çıkarıldı ve GaAs altlığın kalınlığı boyunca bakır atomlarının dağılımı XIF yöntemiyle ölçüldü. GaAs'dan seri olarak zımpara ile ince

tabakalı filmler çıkarılarak (yaklaşık 5-10 μm kalınlıkta) XIF ölçümleri yapıldı. Şekil 3.1'deki sürekli çizgi

$$N = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad 3.1$$

formülü ile verilen teorik eğridir. Görüleceği gibi bakır atomlarının konsantrasyon dağılımı teori ile uyumludur. Bu formülden hesaplanan GaAs altlıkta oda sıcaklığında γ -ışınları ile uyarılmış bakırın difüzyon katsayısı $D = 2,5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ 'dir. Oysa ışınlanmamış GaAs'da oda sıcaklığında bakırın difüzyon katsayısı daha küçüktür ($D = 1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$) (Dzhafarov vd., 1998).

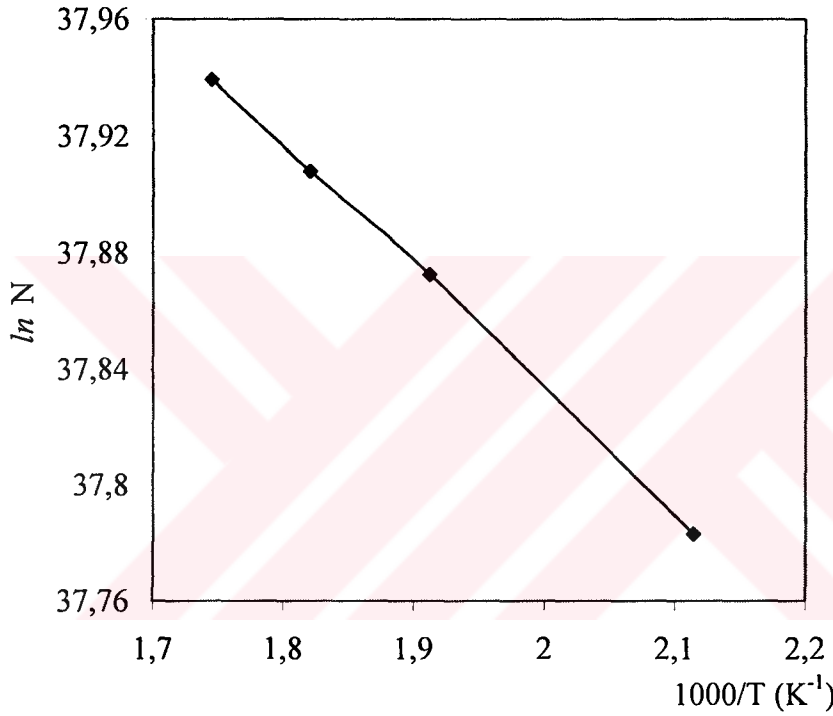


Şekil 3.1 Bakır atomlarının GaAs altlıktaki konsantrasyon dağılımı (γ -ışınlamadan sonra A-tipi eklem)

3.3 γ -ışınlarının GaAs Örneklerin Elektriksel ve Optik Karakteristiklerine Etkisi

γ -ışınlamanın ardından GaAs örneklerin elektriksel özellikleri oda sıcaklığında yeniden ölçüldü. Daha sonra aynı örneklere 50°C 'den başlayarak 300°C 'ye kadar farklı

sıcaklıklarda, atmosfer ortamında izokronik (t=15 dakika) tavlama yapıldı ve her tavlamanın sonrasında elektriksel özellikler (n, ρ) oda sıcaklığında yeniden ölçüldü. Elde edilen sonuçlar çizelge 3.1’de verilmektedir. Örneklerin tipinde değişim olmamıştır. Bu değerler kullanılarak taşıyıcı konsantrasyonu için T= 200 K-300 K aralığında Arrhenius çizimi yapıldı (Şekil 3.2). $\Delta E = 0,4 \frac{\ln N}{10^3 T^{-1}}$ formülü kullanılarak aktivasyon enerjisi $\Delta E = 0,09$ eV olarak hesaplandı. Bu aktivasyon enerjisi γ -ışınlanmış örneklerdeki noktasal kusurların (boşlukların) zayıf bağlı arayer atomları ile rekombinasyonuna bağlıdır.



Şekil 3.2 γ -ışınlanmış GaAs altlıktaki yük taşıyıcılarının konsantrasyonu-sıcaklık eğrisi

Bu örneklerde izokronik tavlamalardan sonra örneklerin özdirençlerinin sıcaklığa bağımlılığını belirlemek için örnekler ısıtılırken anında özdirenç ölçümleri de yapıldı (Çizelge 3.2).

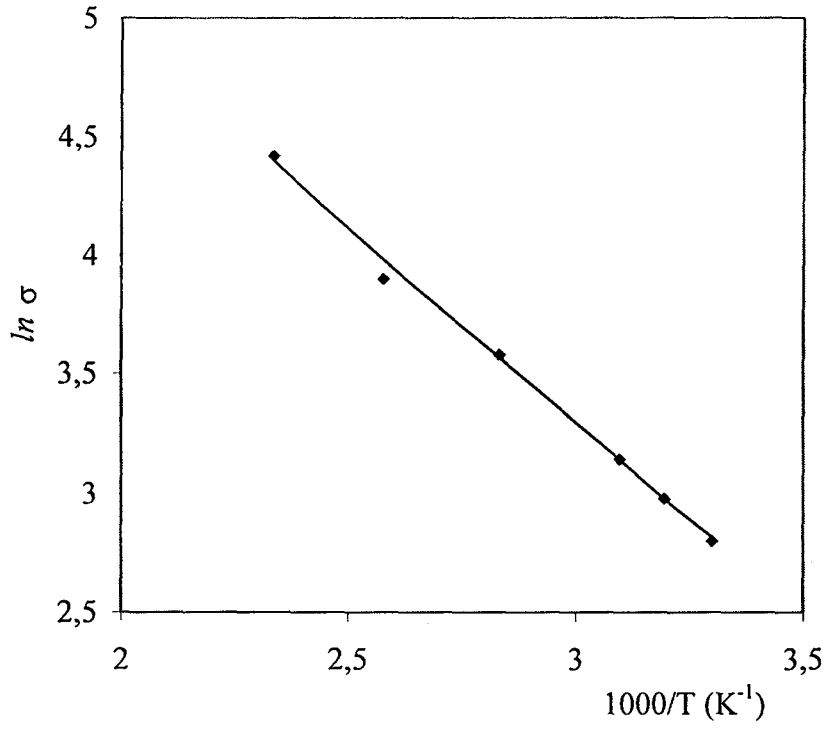
Çizelge 3.1 Temiz, γ -ışınlanmış ve farklı sıcaklıklarda tavllanmış GaAs örneklerin elektriksel özellikleri

Uygulanan işlemler	n (10^{16} cm^{-3})	ρ (ohm.cm)	μ ($\text{cm}^2/\text{V sn}$)
Temiz	1,90	0,070	4700
γ -ışınlanmış	2,58	0,060	4061
50 °C tavlama	2,61	0,066	3656
100 °C tavlama	2,64	0,066	3612
150 °C tavlama	2,57	0,064	3799
200 °C tavlama	2,58	0,062	3897
250 °C tavlama	2,77	0,061	3733
275 °C tavlama	2,85	0,056	3949
300 °C tavlama	3,10	0,058	3476

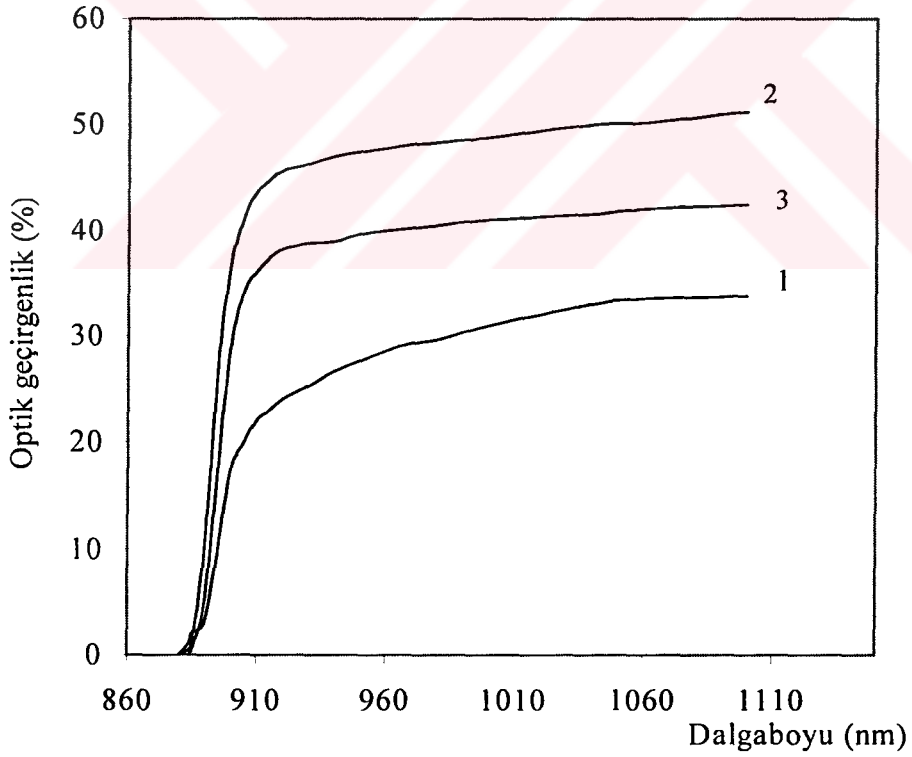
Çizelge 3.2 γ -ışınlanmış GaAs altlığın farklı sıcaklıklardaki özdirençleri

Sıcaklık	Özdirenç (ohm.cm)
17 °C	0,058
30 °C	0,061
40 °C	0,051
50 °C	0,043
80 °C	0,028
115 °C	0,020
155 °C	0,012

Ölçülen bu özdirenç değerlerinden iletkenlikler (σ) hesaplanarak iletkenlik-sıcaklık çizimi yapıldı (Şekil 3.3). $\Delta E = 0,2 \frac{\ln N}{10^3 T^{-1}}$ formülü kullanılarak, örgüde γ -ışınlarının etkisiyle oluşmuş donör tipi derin seviyeli kusurların iyonlaşma enerjisine bağlı aktivasyon enerjisi, $\Delta E = 0,33 \text{ eV}$ olarak hesaplandı.



Şekil 3.3 γ -ışınlanmış GaAs altlığın iletkenlik-sıcaklık eğrisi



Şekil 3.4 GaAs altlığın optik geçirgenlik eğrileri. (1) ve (2) sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra (3) $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ tavlama sonra

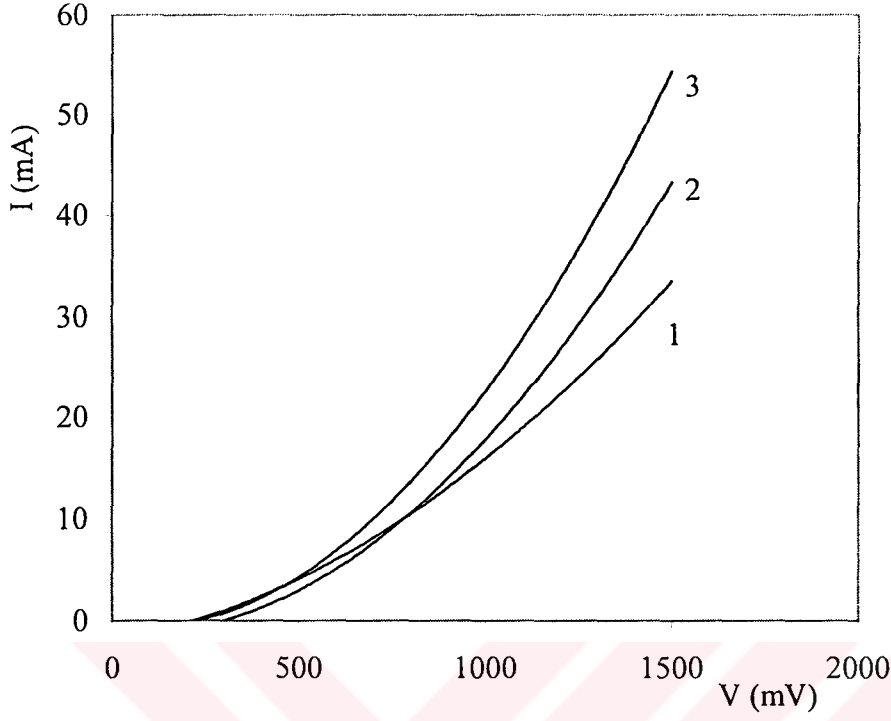
GaAs örneklerin optik geçirgenliği, γ -ışınlamadan önce, sonra ve aynı örneğe $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 15 dakika tavlama yapıldıktan sonra $\lambda=300-1100\text{ nm}$ aralığında ölçüldü (Şekil 3.4). Optik geçirgenlik γ -ışınlamadan sonra artarken (% 34'den % 51'e), tavlama sonrası azaldı ($T=\% 43$)

3.4 γ -ışınlarının Cu-GaAs Eklemlerin Akım-Gerilim Karakteristiklerine Etkisi

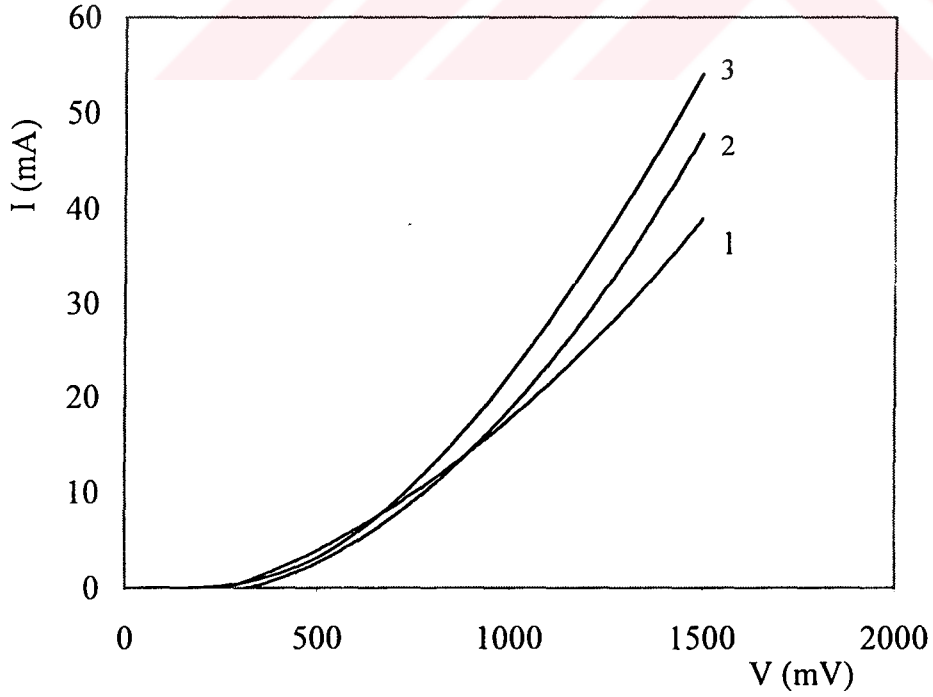
Cu-GaAs eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri ölçümlerinde A-tipi eklem γ -ışınlamadan önce, γ -ışınlamadan sonra ve B-tipi eklem karakteristikleri alındı (Şekil 3.5, 3.6, 3.7, 3.8). Her üç durumda da iletim yönündeki akımlar ışıktan fazla etkilenmezken ters yöndeki akımlarda ışığın etkisi daha fazla oldu. γ -ışınlanmış eklem γ -ışınlanmamış eklemden daha fazla doğrudan katsayısı artarken γ -ışınlamadan sonra oluşturulan eklem γ -ışınlanmamış eklemden daha küçük oldu (Çizelge 3.3). Eklemlerin fotoakım yoğunluğu-gerilim grafiklerinden (Şekil 3.9, 3.10) de görülebileceği gibi ayrıca ölçülen açık devre gerilimlerinden (V_{oc}) en büyük değere γ -ışınlanmış ilk eklem sahiptir. A-tipi ve B-tipieklemelerin açık devre gerilimleri (V_{oc}) ve kısa devre akım yoğunlukları (J_{sc}) çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Cu-GaAs eklemlerin parametreleri

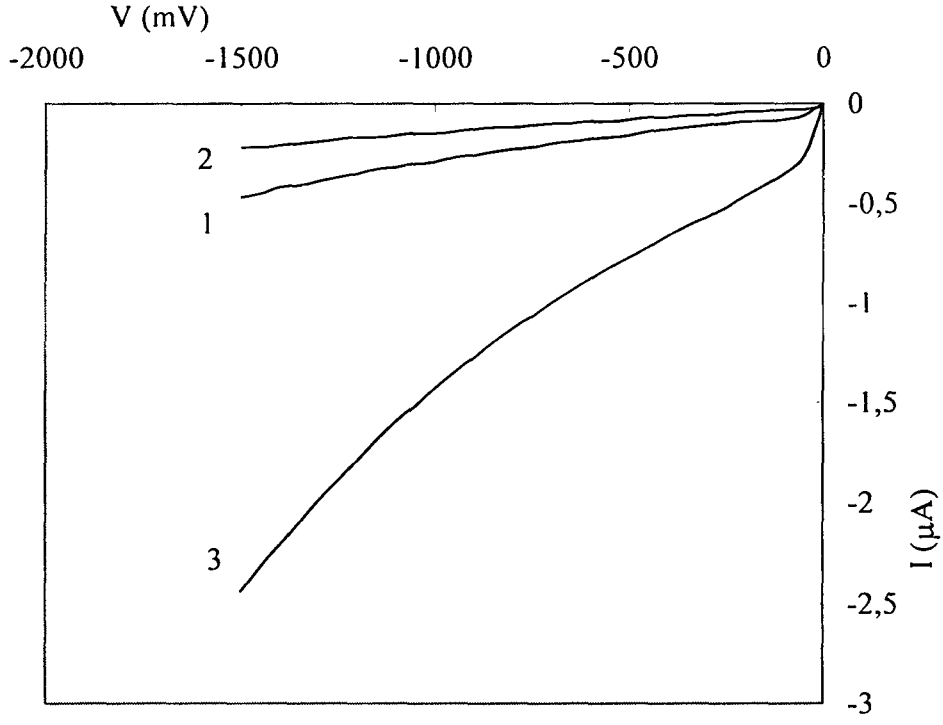
Eklem parametreleri	Ölçme Şartları	A-tipi eklem γ -ışınlamadan önce	A-tipi eklem γ -ışınlamadan sonra	B-tipi eklem
Doğrudan Katsayısı ($I_{doğru}/I_{ters}$)	Karanlık	$6,03 \times 10^4$	$1,4 \times 10^5$	$1,57 \times 10^4$
	Aydınlık	45	49	547
Fotoduyarlılık Katsayısı ($I_{aydınlık}/I_{karanlık}$)	Ters Yön	$1,31 \times 10^3$	$2,75 \times 10^3$	30
	Doğru Yön	0,98	0,97	1,05
V_{oc} (mV)	Aydınlık	230	386	99
J_{sc} (mA/cm ²)	Aydınlık	2,22	2,10	0,07
Eklem Kalınlığı d (μm) Konsantrasyon n (cm ⁻³)	C-V karakteristiklerinden	0,031	0,041	0,025
		$1,64 \times 10^{17}$	$1,62 \times 10^{17}$	$1,16 \times 10^{17}$



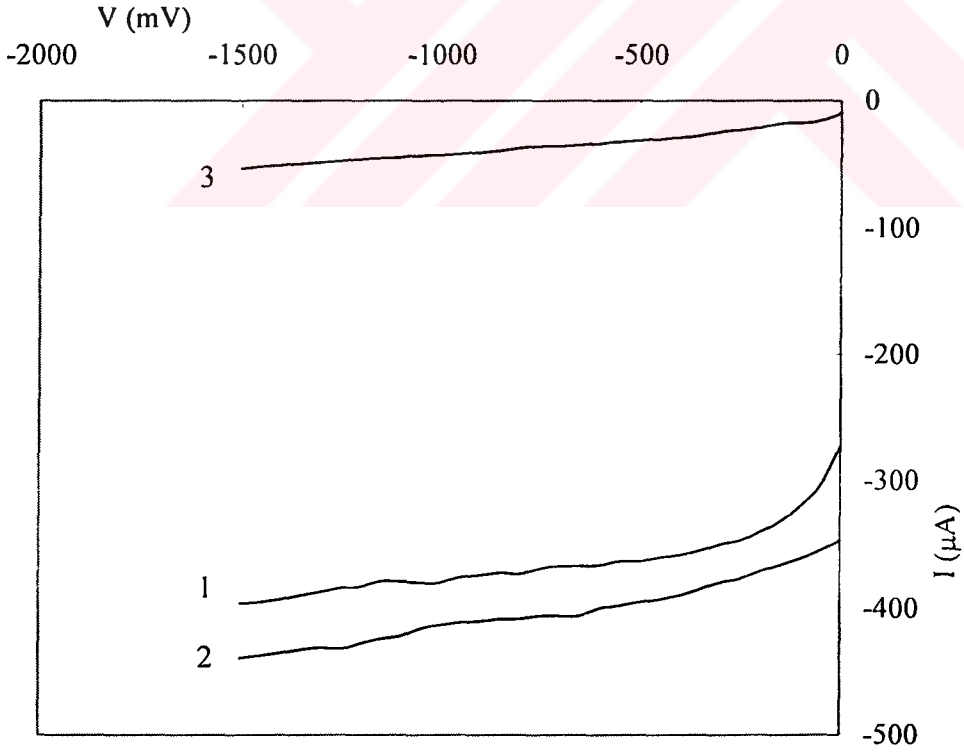
Şekil 3.5 Cu-GaAs eklemnin iletim yönünde akım-gerilim karakteristikleri (karanlıkta):
(1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem



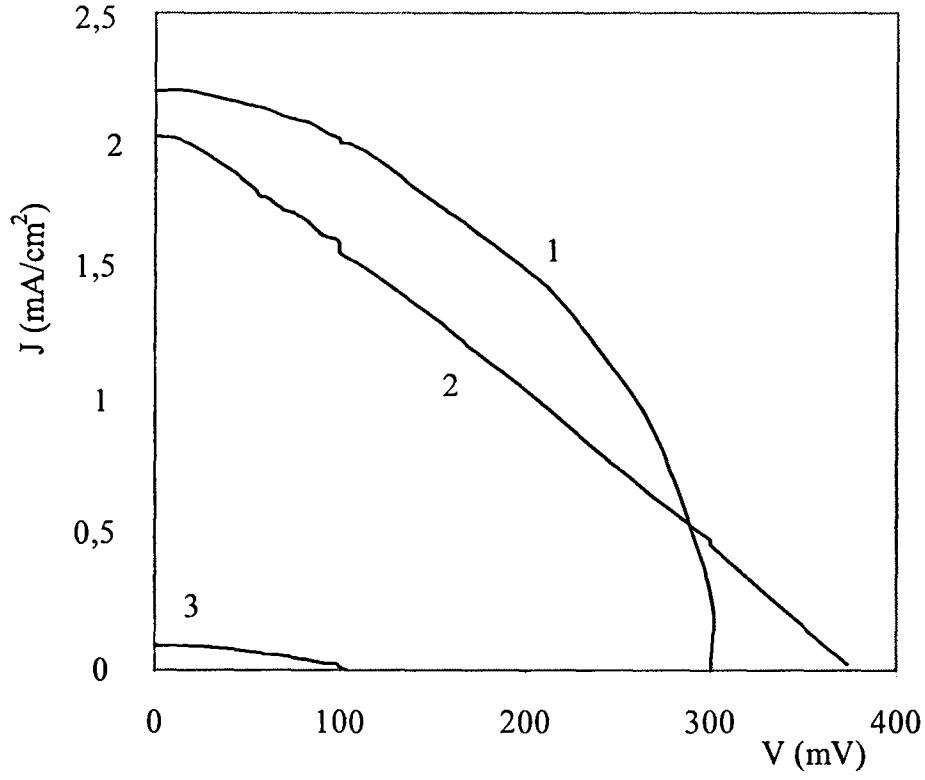
Şekil 3.6 Cu-GaAs eklemnin iletim yönünde akım-gerilim karakteristikleri (aydınlıkta):
(1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem



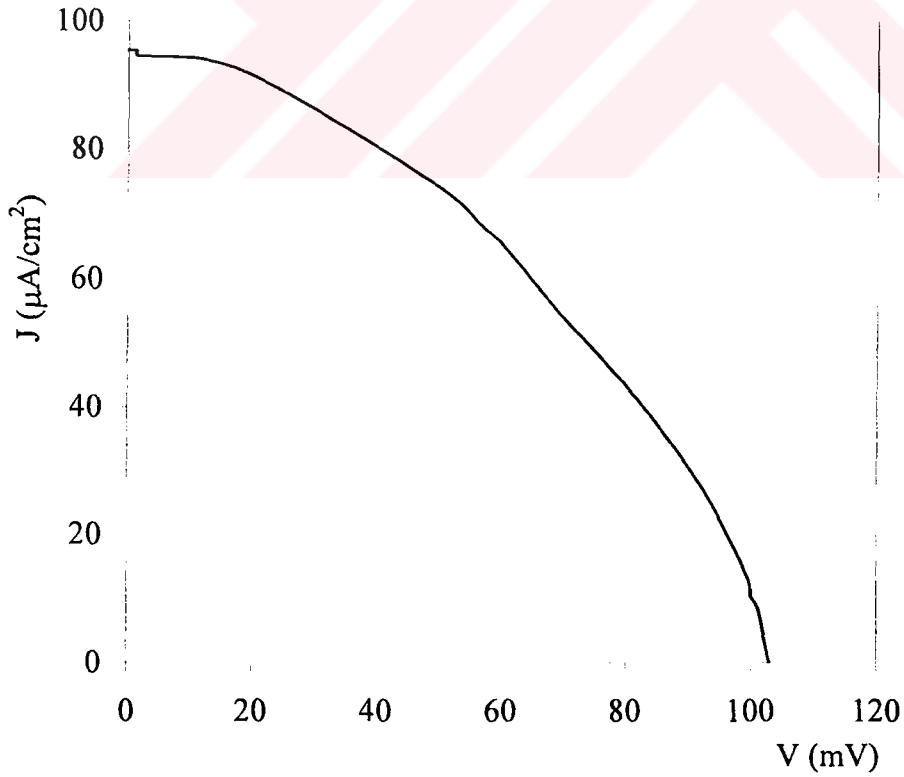
Şekil 3.7 Cu-GaAs eklemnin ters yönde akım-gerilim karakteristikleri (karanlıkta):
 (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem



Şekil 3.8 Cu-GaAs eklemnin ters yönde akım-gerilim karakteristikleri (aydınlıkta):
 (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem



Şekil 3.9 Cu-GaAs eklemnin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri. (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem

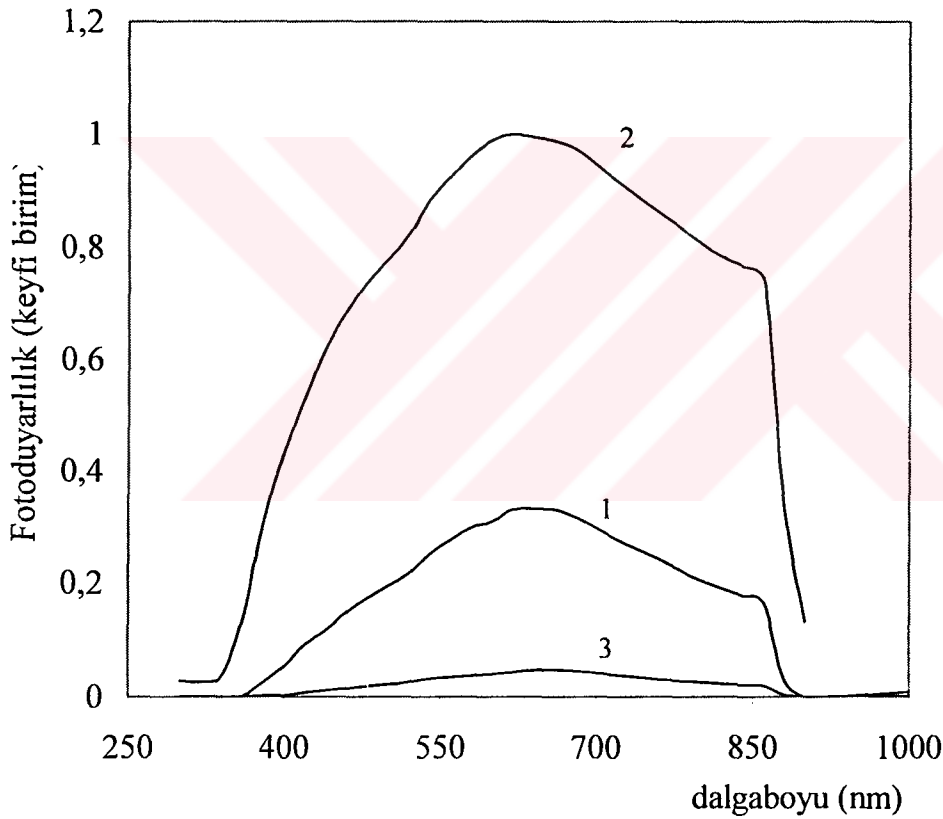


Şekil 3.10 Cu-GaAs eklemnin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri (B-tipi eklem) (Şekil 3.9'da gösterilen (3) numaralı grafiğin büyütülmüş gösterimi)

3.5 γ -ışınlarının Cu-GaAs Eklemlerin Fotoduyarlılık Spektrumlarına Etkisi

İlk Cu-GaAs eklem γ -ışınlamadan önce, sonra ve γ -ışınlamadan sonra oluşturulan ikinci Cu-GaAs eklem fotoduyarlılık spektrumları alındı ve karşılaştırmalı grafikleri çizildi (Şekil 3.11). Örnekler, $\lambda=350-880$ nm dalgaboyu aralığında fotoduyarlılığa sahiptirler.

Fotoakım yoğunluğu-gerilim ölçüleriyle uyumlu olarak fotoduyarlılığın γ -ışınlamadan sonra (A-tipi) arttığı ve γ -ışınlamadan sonra oluşturulan eklem (B-tipi) daha az fotoduyarlılığa sahip olduğu görülmektedir.

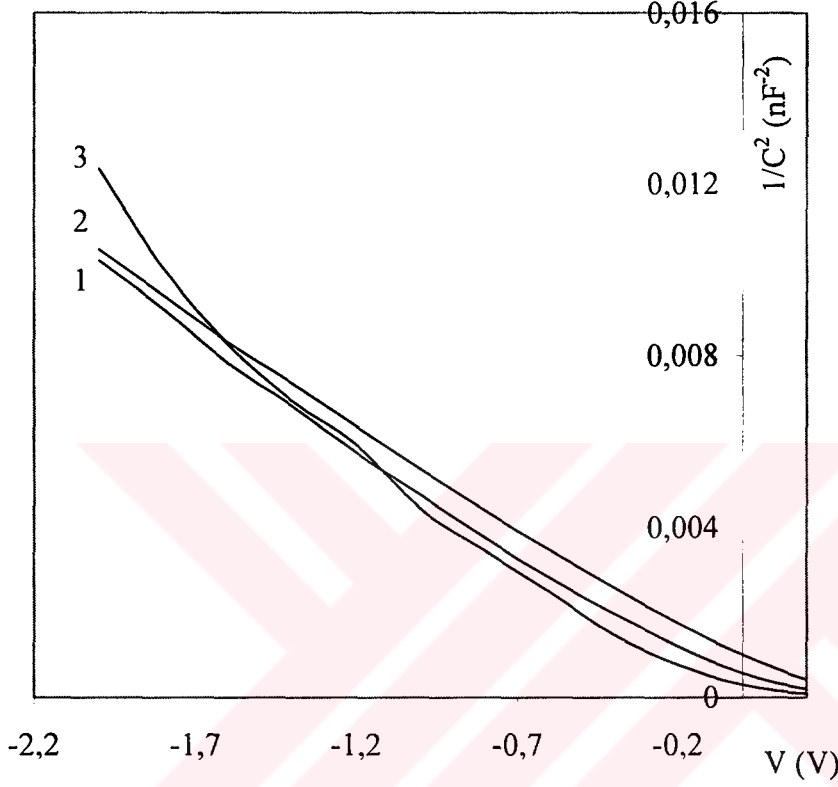


Şekil 3.11 Cu-GaAs eklemlerin fotoduyarlılıklarının spektral dağılımları. (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem

3.6 γ -ışınlarının Cu-GaAs Eklemlerin Kapasitans-Gerilim Karakteristiklerine Etkisi

γ -ışınlamanın etkisiyle oluşan Cu-GaAs p-n eklemler keskin eklem özelliği göstermekte, dolayısı ile $1/C^2-V$ eğrileri lineer olmaktadır. γ -ışınlanmış GaAs altlık üzerinde sonradan

oluşturulan eklem için $1/C^2$ -V eğrisi de ilk eklemeye göre lineerlikten çok az uzaklaşmakla birlikte yine keskin eklem özelliği göstermektedir (Şekil 3.12). Bu eğrilerden (2.8) eşitliği ile hesaplanan konsantrasyonlar A-tipi eklem için γ -ışınlamadan önce $1,64 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, sonra $1,62 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ve B-tipi eklem için $1,16 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ dür.



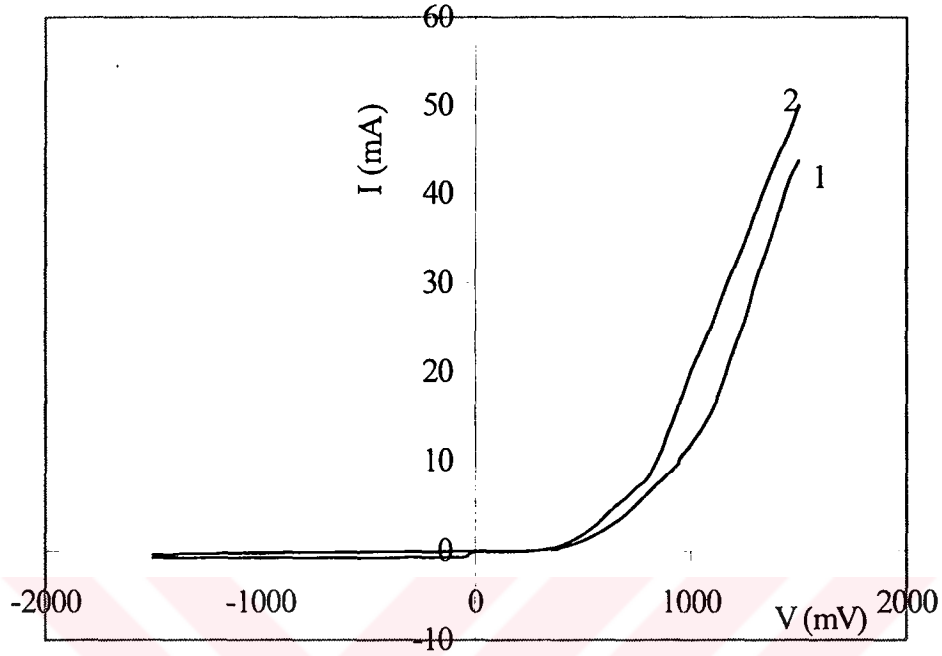
Şekil 3.12 Cu-GaAs eklemelerin kapasitans-gerilim karakteristikleri. (1) ve (2) A-tipi eklem, sırasıyla γ -ışınlamadan önce ve sonra, (3) B-tipi eklem

3.7 Bakır Elektrodifüzyonunun γ -ışınlama Yöntemiyle Hazırlanmış Cu-GaAs Eklemelerin Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerine Etkisi

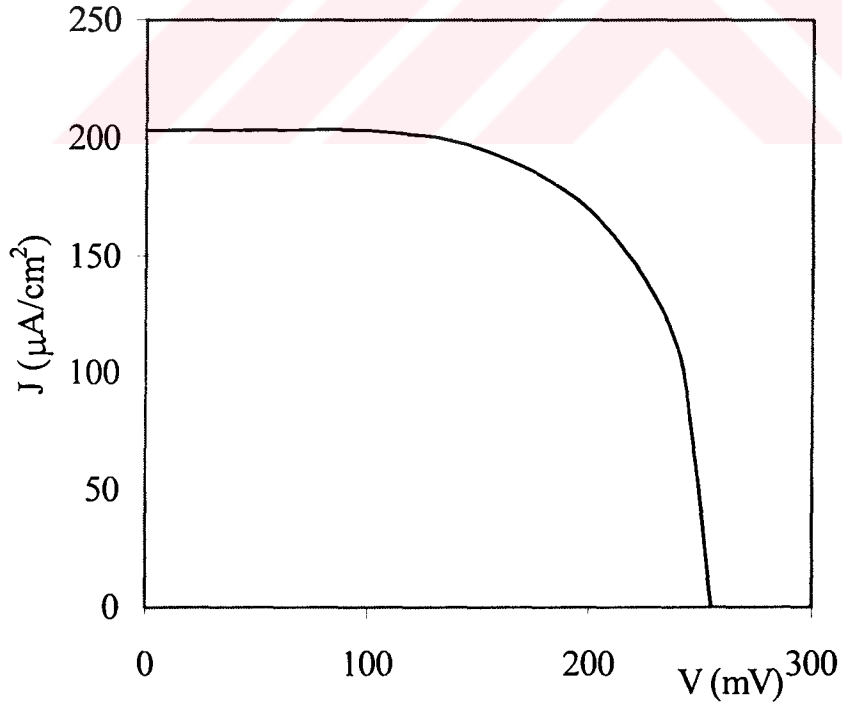
γ -ışınlama yöntemiyle hazırlanan Cu-GaAs eklemelerde, elektrik alan etkisiyle eklem karakteristiklerindeki değişimler incelendi. Elektrik alan uygulanması sırasında eklem bir fan ile soğutulmuş sıcaklığın doğurabileceği etkiler engellenmeye çalışıldı.

Her iki yönde de elektrik alan uygulanacak eklemelerin elektrik alan uygulanmadan önce aynı özelliklere sahip olması için ilk eklem, ölçümleri yapıldıktan sonra tam ortadan ikiye kesildi ve bir yarısına negatif, diğer yarısına pozitif elektrik alan uygulandı.

γ -ışınlanmış örneğin elektrik alan uygulanmadan önceki akım-gerilim karakteristiği, şekil 3.13'deki gibidir.



Şekil 3.13 Cu-GaAs eklemnin akım-gerilim karakteristikleri
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta

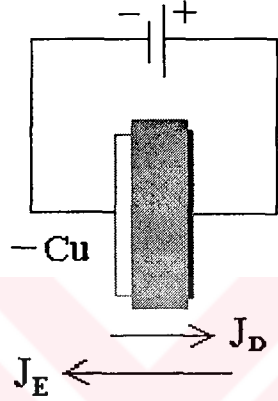


Şekil 3.14 Cu-GaAs eklemnin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği

Açık devre gerilimi $V_{oc}=254 \text{ mV}$ ve kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=203 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçülen bu eklem fotoğrafı karakteristiği şekil 3.14’de verilmiştir.

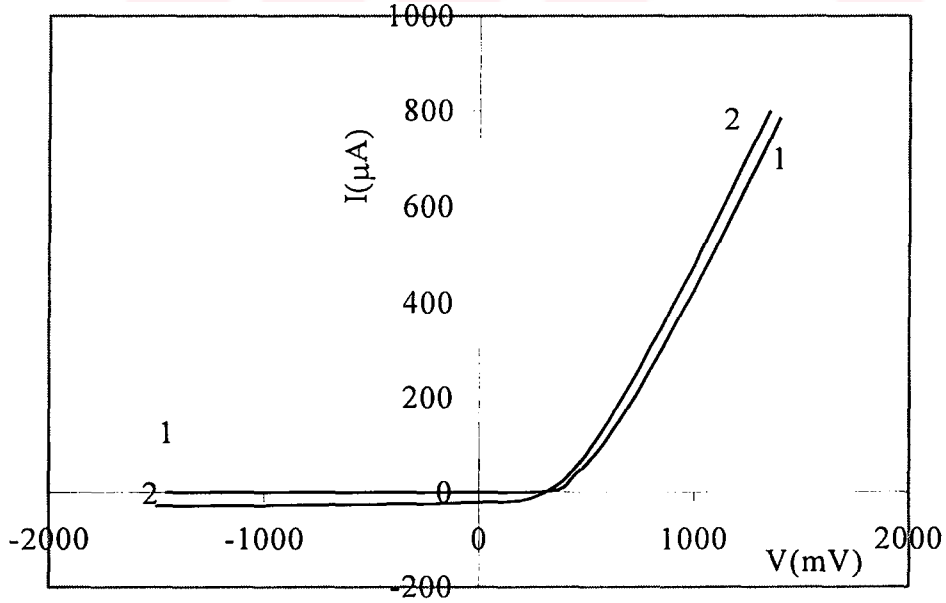
3.7.1 “- Cu” şartlarında elektrodifüzyon

Cu-GaAs eklem negatif yönde (bakırlı yüzeye negatif kutup bağlanarak) 5 saat boyunca ve $35 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 40000 V/m ’lik sabit elektrik alan uygulandıktan sonra (Şekil 3.15) eklem karakteristikleri ölçüldü.



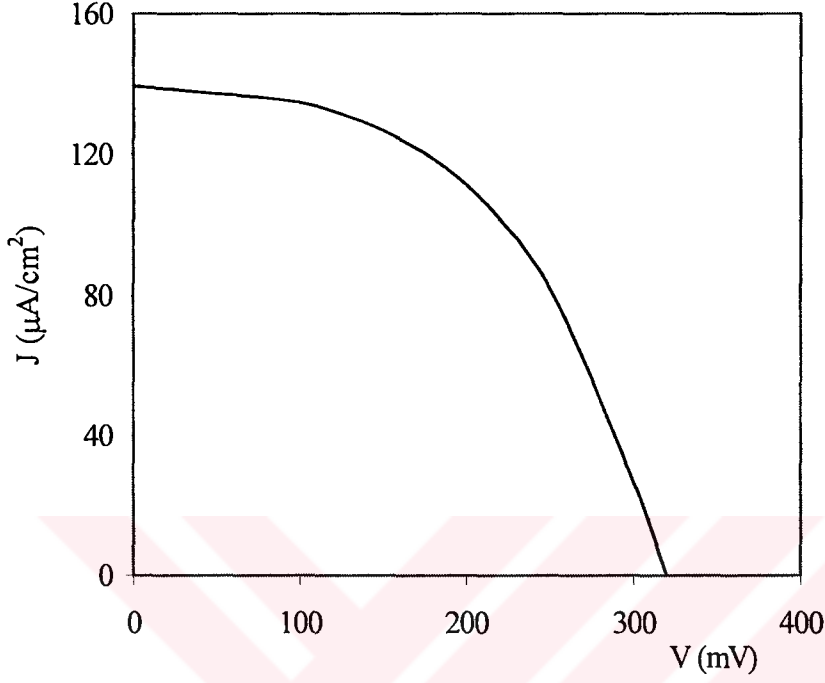
Şekil 3.15 “- Cu” şartlarında elektrodifüzyon. J_D difüzyon akısı, J_E elektrodifüzyon akısı

Negatif yönde elektrik alan uygulanan Cu-GaAs eklem akım-gerilim karakteristikleri şekil 3.16’de verilmiştir.

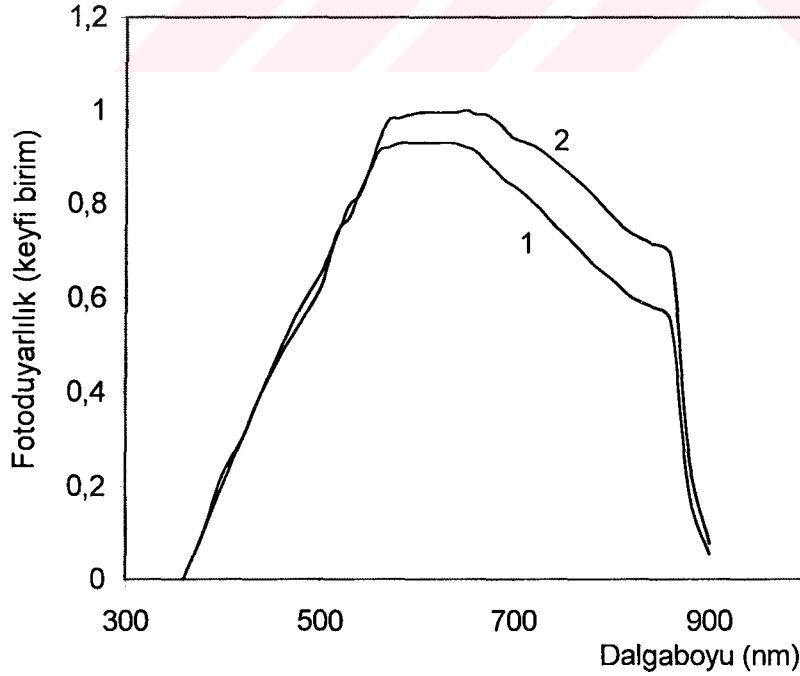


Şekil 3.16 Cu-GaAs eklem akım-gerilim karakteristikleri.
“- Cu şartlarında ED’den sonra. (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta

Negatif elektrodifüzyon sonucunda eklemın açık devre gerilimi artarken ($V_{oc}=320$ mV) fotoakım yoğunluğu azalmıştır ($J_{sc}=139$ $\mu A/cm^2$). Eklemın fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği şekil 3.17'de verilmiştir.



şekil 3.17 Cu-GaAs eklemın fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristiği.
“- Cu” şartlarında ED'den sonra

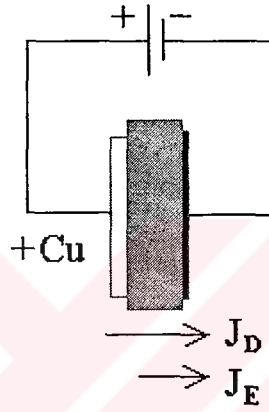


şekil 3.18 Cu-GaAs eklemın fotoduyarlılık spektral dağılımları (1) ED'den önce,
(2) “- Cu” şartlarında ED'den sonra

Negatif elektrodifüzyondan sonra Cu-GaAs eklemının fotoduyarlılığının arttığı görülmüştür (Şekil 3.18). Negatif elektrodifüzyondan sonra eklemının “0 Volt”daki kapasitans değerinden (2.7) eşıtlığı ile hesaplanan eklem genişliği $d=0,25 \mu\text{m}$ ’dir.

3.7.2 “+ Cu” şartlarında elektrodifüzyon

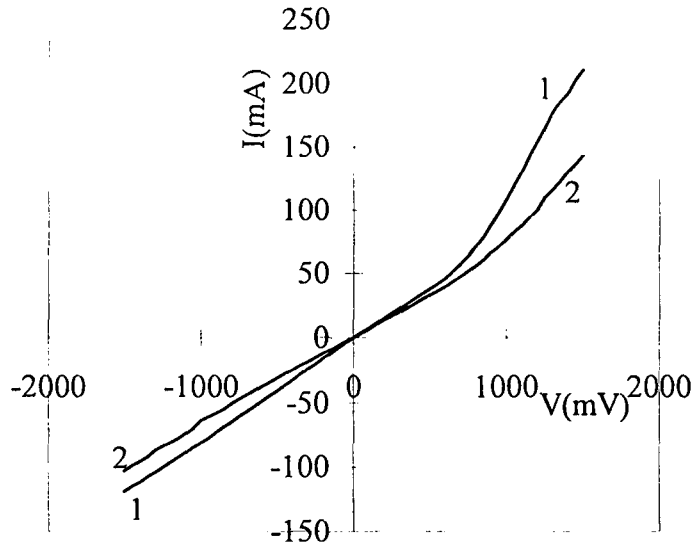
Pozitif yönde elektrik alan uygulanacak olan Cu-GaAs eklemının bakırlı yüzeyine doğru gerilim kaynağının pozitif kutubu bağlanarak (Şekil 3.19) yine 5 saat boyunca ve $35 \text{ }^\circ\text{C}$



Şekil 3.19 “+ Cu” şartlarında elektrodifüzyon. J_D difüzyon akısı, J_E elektrodifüzyon akısı

sıcaklıkta bu kez 4500 V/m ’lik sabit elektrik alan uygulandı ve ardından eklem karakteristikleri ölçüldü. Şekil 3.20 pozitif elektrik alan uygulanmış eklemının akım-gerilim karakteristiklerini göstermektedir.

Pozitif elektrik alan uygulanmasından sonra eklem genişlemekte ($d= 0,92 \mu\text{m}$) ve bu nedenle eklem içindeki elektrik alan azaldığından eklem karakteristikleri bozulmaktadır. Doğrultucu özelliğini kaybeden ve fotovoltaiik parametreleri kötüleşen eklem artık çok az derecede fotoduyarlılık göstermektedir. Eklemının önceki ve negatif ve pozitif elektrodifüzyonlardan sonraki parametreleri çizelge 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.20 Cu-GaAs eklemın akım-gerilim karakteristikleri
“+ Cu” şartlarında ED’den sonra. (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta

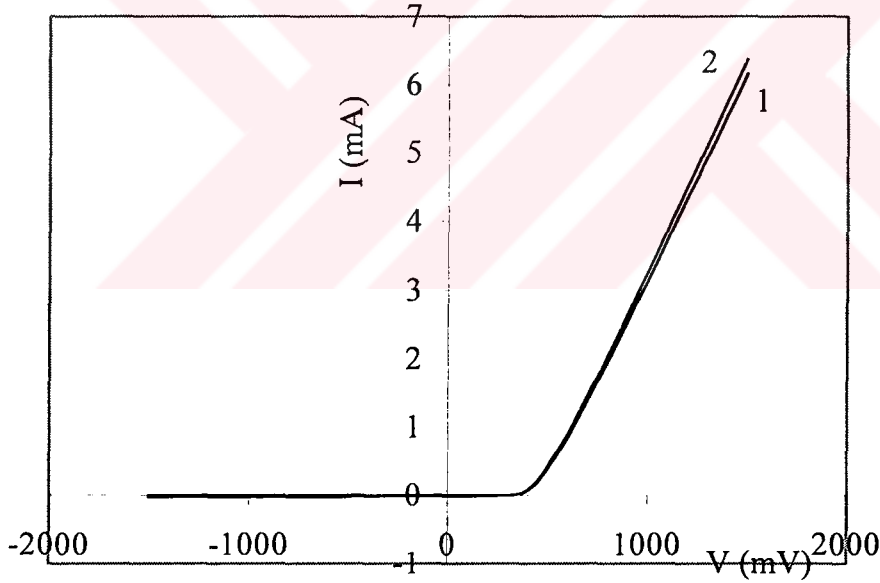
Çizelge 3.4 γ -ışınlatma yöntemiyle oluşturulan Cu-GaAs eklemın parametreleri

Eklem Parametreleri	Ölçme Şartları	Elektrodifüzyondan önce	Negatif Elektrodifüzyondan sonra	Pozitif Elektrodifüzyondan sonra
Doğrultma Katsayısı ($I_{doğru}/I_{ters}$)	Karanlık	5×10^4	3×10^3	1,34
	Aydınlık	154	17,36	1,22
Fotoduyarlılık Katsayısı ($I_{aydınlık}/I_{karanlık}$)	Ters Yön	310	197	0,78
	Doğru Yön	1,68	1,12	0,71
V_{oc} (mV)	Aydınlık	254	320	—
J_{sc} ($\mu A/cm^2$)	Aydınlık	203	139	—
Eklem Kalınlığı d (μm)	C-V karakteristiklerinden	0,84	0,25	0,92
Konsantrasyon n (cm^{-3})		$3,23 \times 10^{15}$	$5,33 \times 10^{13}$	$6,15 \times 10^{15}$

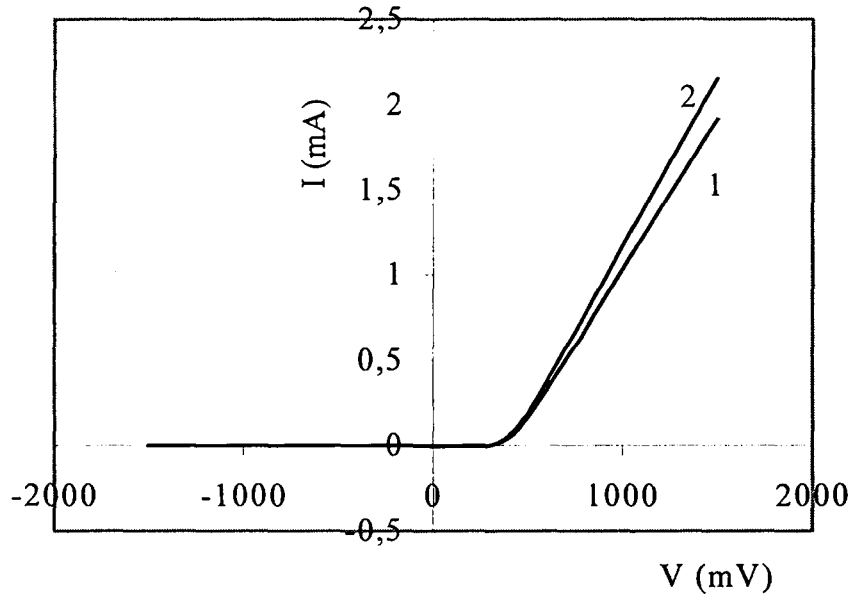
3.8 Bakır Elektrodifüzyonunun Fotouyarma Yöntemiyle Hazırlanmış Eklemlerin Karakteristiklerine Etkisi

Elektrodifüzyonun γ -ışınlama dışında başka bir yöntemle (ışıkla ışınlama) hazırlanmış Cu-GaAs eklem karakteristilerini nasıl değiştireceğini incelemek amacıyla, 1000 Watt'lık tungsten lamba altında görünür ışıkla ışınlanmış ve foton uyarması ile bakırın difüzyonu neticesinde oluşmuş p-n eklem pozitif yönde elektrodifüzyon uygulanmıştır.

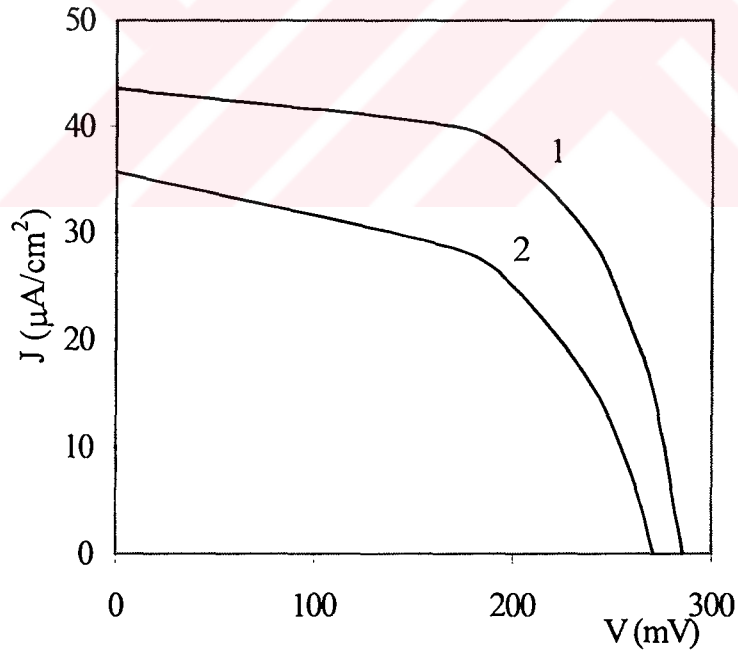
Elektrodifüzyon'da örneğe pozitif yönde 4 saat boyunca 50000 V/m 'lik sabit elektrik alan uygulanmıştır. Elektrodifüzyon'dan önce ve sonra p-n eklem akım-gerilim (Şekil 3.21 ve 3.22) fotoakım yoğunluğu-gerilim (Şekil 3.23), fotoduyarlılığın spektral dağılımı (Şekil 3.24), kapasitans-gerilim (Şekil 3.25) ölçümleri yapılmıştır. Bu sonuçlardan elde edilen eklem parametreleri , çizelge 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.21 Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklem akım-gerilim karakteristiği
(1) karanlıkta, (2) aydınlıkta (ED'den önce)

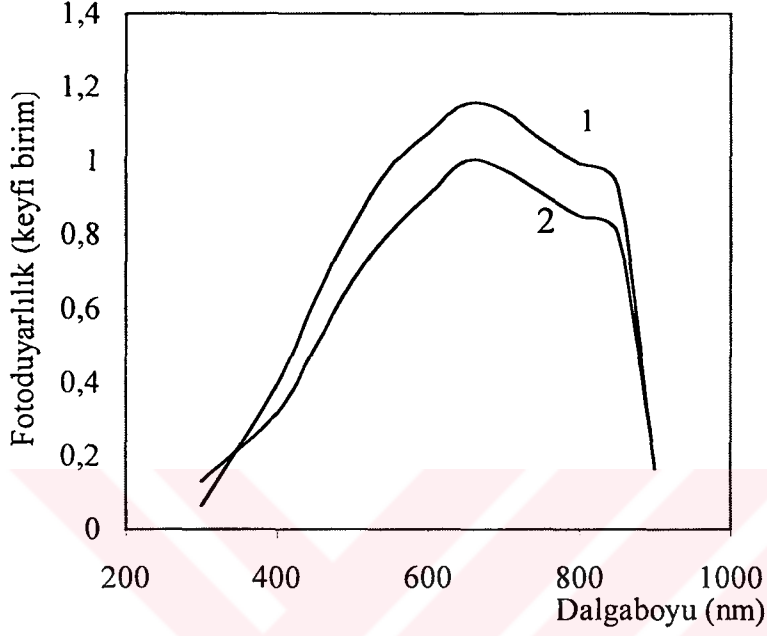


Şekil 3.22 Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklemin akım-gerilim karakteristiği “+ Cu” şartlarında Ed’den sonra (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta

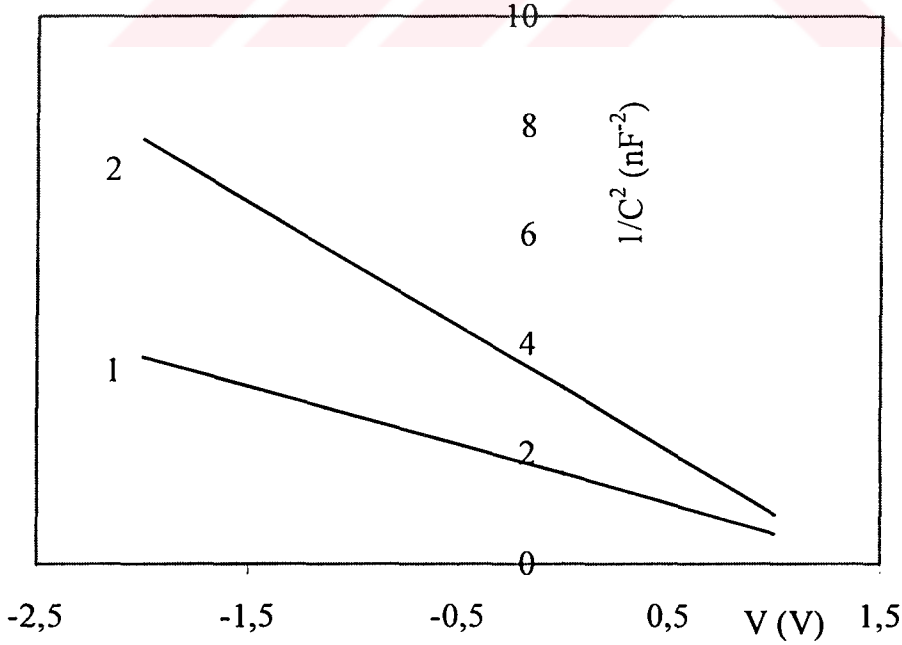


Şekil 3.23 Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklemin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri. “+ Cu” şartlarında ED’den (1) önce, (2) sonra

γ -ışınlama ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklem'den elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak pozitif elektrodifüzyondan sonra eklem'in kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) değerleri azalmış ve bu sonuçlardan beklendiği gibi eklem'in fotoduyarlılığı da azalmıştır.



Şekil 3.24 Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklem'in fotoduyarlılık spektral dağılımları "+ Cu" şartlarında ED'den (1) önce, (2) sonra



Şekil 3.25 Fotouyarma ile oluşturulmuş Cu-GaAs eklem'in kapasitans-gerilim karakteristikleri "+ Cu" şartlarında ED'den (1) önce, (2) sonra

Çizelge 3.5 Fotouyarılma yöntemiyle oluşturulan Cu-GaAs eklem parametreleri

Eklem Parametreleri	Ölçme Şartları	Elektrodifüzyondan önce	Elektrodifüzyondan sonra
Doğrultma Katsayısı ($I_{doğru}/I_{ters}$)	Karanlık	$2,80 \times 10^4$	$1,03 \times 10^4$
	Aydınlık	209	107
Fotoduyarlılık Katsayısı ($I_{aydınlık}/I_{karanlık}$)	Ters Yön	141	109
	Doğru Yön	1,04	1,13
V_{oc} (mV)	Aydınlık	286	271
J_{sc} ($\mu A/cm^2$)	Aydınlık	43,6	35,7
Eklem Kalınlığı d (μm) Konsantrasyon n (cm^{-3})	C-V karakteristiklerinden	1,76	2,46
		$6,60 \times 10^{14}$	$2,93 \times 10^{14}$

Elektrodifüzyondan önce 1,76 μm olan eklem genişliği elektrodifüzyondan sonra 2,46 μm olurken taşıyıcı konsantrasyonu $6,6 \times 10^{14} cm^{-3}$ iken elektrodifüzyondan sonra $2,93 \times 10^{14} cm^{-3}$ olarak değişmiştir.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

γ -ışınlanmanın Cu-GaAs eklemlerin elektrik ve fotovoltaiik karakteristiklerine etkisi ile ilgili sonuçları şu şekilde ifade edebiliriz;

1. γ -ışınlanmanın etkisiyle ($1,6 \times 10^6$ Rad'lık dozda) bakır, oda sıcaklığında Cu-GaAs yapılarda GaAs altlığın içine (yaklaşık 100 μm kalınlığa) hızla yayılmaktadır. GaAs altlıkta γ -ışınları ile uyarılmış bakırın etkin difüzyon katsayısı $D=2,5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ 'dir. Böylece γ -ışınlanmanın etkisiyle Cu-GaAs eklemden uyarılan Cu'nun GaAs altlığa difüzyon hızı, oda sıcaklığında ışınlanmamış GaAs'daki difüzyon katsayısından ($D=1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$) çok büyüktür. Cu-GaAs yapılarda γ -ışınları etkisi ile bakırın hızlı yayılması, GaAs'da noktasal kusurların (boşlukların) oluşmasından dolayıdır. Katkı atomu olarak bakırın, GaAs'da akseptör özelliği gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle Cu-GaAs yapıların γ -ışınlanması neticesinde bakırın GaAs altlığın üzerinden içine doğru difüzyonu ile n-tipi GaAs'da p-n eklem oluşabilir. Bu şekilde GaAs'da p-n eklem γ -ışınlama yöntemiyle hazırlanabileceği gösterildi.
2. 50-300 °C sıcaklık aralığında, γ -ışınlanmış GaAs örneklerin izokronik tavlama ve ardından yük taşıyıcılarının konsantrasyonu ölçümlerinden $\Delta E=0,09 \text{ eV}$ aktivasyon enerjisi elde edildi. Bu aktivasyon enerjisini γ -ışınlanmış örneklerdeki noktasal kusurların (boşlukların) örgüdeki zayıf bağlı arayer atomları ile rekombinasyonu ile yorumlayabiliriz.
3. 50-300 °C sıcaklık aralığındaki izokronik tavlamalardan sonra γ -ışınlanmış n-tipi GaAs örnekte öz direnç-sıcaklık ölçümlerinden $E_d=0,33 \text{ eV}$ aktivasyon enerjisi bulundu. Bu aktivasyon enerjisini örgüde γ -ışınlarının etkisiyle oluşmuş donör tipi derin seviyeli kusurların iyonlaşma enerjisine bağlamak mümkündür.
4. Cu-GaAs eklemlerin akım-gerilim karakteristiklerinden (γ -ışınlamadan önce ve sonra) A-tipi eklem (yani Cu-GaAs yapının tamamı ışınlanmış) ve B-tipi eklemden (Cu-GaAs yapının önce sadece GaAs altlığı ışınlanmış) aşağıdaki değişimler gözlemlendi (Çizelge 3.3)
 - a) A-tipi eklemlerin doğrultma katsayısı γ -ışınlamadan sonra ($k=1,4 \times 10^5$), γ -ışınlamadan öncekine ($k=6,03 \times 10^4$) göre 2,3 kat arttı, oysa B-tipi eklemlerin doğrultma katsayısı γ -ışınlamadan sonra ($k=1,57 \times 10^4$) 3,8 kat azaldı.

- b) A-tipi eklemlerin fotoduyarlılık katsayısı γ -ışınlamadan sonra ($f=2,75 \times 10^3$), γ -ışınlamadan önceki katsayının ($f=1,31 \times 10^3$) yaklaşık 2 katına çıktı, buna karşı B-tipi eklemlerin fotoduyarlılık katsayısı γ -ışınlamadan sonra ($f=30$) yaklaşık 44 katlık büyük bir düşüş gösterdi.
- c) A-tipi pillerin γ -ışınlamadan sonraki fotovoltmik parametrelerinden ($V_{oc}= 386$ mV, $J_{sc}=2,1$ mA/cm²) açık devre gerilimi V_{oc} , γ -ışınlamadan önceki parametrelerine ($V_{oc}= 230$ mV, $J_{sc}=2,22$ mA/cm²) göre keskin arttı fakat açık devre akımı J_{sc} biraz küçüldü. B-tipi pillerin fotovoltmik parametreleri γ -ışınlamadan sonra ($V_{oc}= 230$ mV, $J_{sc}=2,22$ mA/cm²) keskin azaldı.

Böylece γ -ışınlamadan sonra A-tipi eklemlerin doğrultma katsayısı, fotoduyarlılık katsayısı ve fotovoltmik parametreleri, γ -ışınlamadan önceki kendi parametrelerine karşı ve B-tipi eklemlerin γ -ışınlamadan sonraki parametrelerine karşı daha büyük oldular.

Tam ışınlanmış Cu-GaAs yapının (A-tipi) ve sadece GaAs altlığı ışınlanmış Cu-GaAs yapının (B-tipi) karakteristiklerindeki γ -ışınları ile uyarılmış parametrelerinin farklarını şu şekilde açıklamak mümkündür.

Yukarıda gösterildiği gibi, tam γ -ışınlanmış Cu-GaAs yapıda akseptör tipli bakırın n-GaAs altlığa difüzyonu neticesinde altlığın içinde p-n eklem oluşmaktadır. Böyle p-n eklemler daha yüksek elektrik ve fotovoltmik özelliklere sahiptirler. B-tipi eklemlerde ise γ -ışınlanmış GaAs altlığın yüzeyine bakır filminin buharlaşması ile Cu-GaAs Schottky kontağı meydana gelmektedir. Işınlanmış GaAs'in yüzey bölgesinde daha fazla kusurların (yüzey durumlarının) oluşması nedeniyle Cu-GaAs Schottky kontaklarının karakteristikleri, GaAs altlığın içindeki p-n eklem parametrelerine karşı daha kötü olmaktadır.

Dış elektrik alan ile uyarılmış bakır iyonlarının elektrodifüzyonunun, γ -ışınlama yöntemi ile hazırlanmış Cu-GaAs eklemlerin elektrik ve fotovoltmik karakteristiklerine etkisi ile ilgili sonuçlar şu şekildedir;

1. Negatif elektrodifüzyon uygulanan eklemin doğrultma katsayısı ($k=3 \times 10^3$) elektrodifüzyondan önceki değere ($k=5 \times 10^4$) göre yaklaşık 16 kat azalmasına rağmen pozitif elektrodifüzyon uygulanan eklemin doğrultma katsayısından ($k=1,34$) yaklaşık $2,25 \times 10^3$ kat daha büyüktür.
2. Elektrodifüzyondan önce $f=310$ olan fotoduyarlılık katsayısı negatif elektrodifüzyondan sonra ($f=197$), pozitif elektrodifüzyon uygulanan ekleminkine ($f=0,78$) göre, 253 kat daha büyük olmaktadır.
3. Negatif elektrodifüzyon uygulanan eklemin fotovoltmik parametrelerinden ($V_{oc}= 320$ mV, $J_{sc}=139 \mu A/cm^2$) açık devre gerilimi V_{oc} , elektrodifüzyondan önceki parametrelerine ($V_{oc}= 254$ mV, $J_{sc}=203 \mu A/cm^2$) göre artarken kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} , azaldı. Pozitif elektrodifüzyon uygulana eklemin fotovoltmik parametreleri ölçülemeyecek derecede azalmıştır.
4. Pozitif elektrodifüzyon uygulanmış eklemin genişliği ($d=0,92 \mu m$), negatif elektrodifüzyon uygulanmış ekleminkinden ($d=0,25 \mu m$) yaklaşık 3,7 kat daha fazladır.

Pozitif yönde uygulanan bakır elektrodifüzyonunun, fotouyarma yöntemi ile hazırlanmış Cu-GaAs eklemelerin elektrik ve fotovoltmik karakteristiklerine etkisi ile ilgili sonuçlar aşağıdaki gibidir;

1. Elektrodifüzyondan sonra doğrultma katsayısı ($k=1 \times 10^4$) elektrodifüzyondan önceki değere ($k=2,8 \times 10^4$) göre 2,8 kat azalmıştır.
2. Elektrodifüzyondan önce $f=141$ olan fotoduyarlılık katsayısı elektrodifüzyondan sonra ($f=109$) azalmıştır.
3. Elektrodifüzyondan sonra eklemin fotovoltmik parametrelerinden ($V_{oc}= 286$ mV, $J_{sc}=43,6 \mu A/cm^2$), açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} elektrodifüzyondan önceki parametrelerine ($V_{oc}= 43,6$ mV, $J_{sc}=35,7 \mu A/cm^2$) göre azaldı.
4. Elektrodifüzyondan önce $d=1,76 \mu m$ olan eklem genişliği, elektrodifüzyondan sonra $d=2,46 \mu m$ olarak artmıştır.

Bu sonuçlara dayanarak p-n eklemlerin karakteristiklerinde, elektrodifüzyon etkisiyle oluşan değişimlerin nedenlerini şu şekilde açıklayabiliriz;

Elektrodifüzyonla uyarılmış karakteristiklerin değişimi, dış elektrik alanın yönüne bağlıdır. Elektrik alanın yönü, bakır konsantrasyon gradyenti ile aynı olduğunda eklemlerin karakteristikleri bozulmaktadır. Bu durumda p-n eklem genişlemektedir. Böyle geniş p-n eklemler γ -ışınları, hızlı elektron ve iyon dedektörleri yapımında kullanılabilir. Dış elektrik alanın yönü, akseptör konsantrasyon gradyentine ters olduğunda eklem daralmakta ve bu nedenle eklem için elektrik alanının artmasıyla fotovoltaj özellikler iyileşmektedir.



KAYNAKLAR

Bacaksız, E., (1997) Bakır Difüzyonunun CuGaSe-GaAs Güneş Pillerinin Karakteristiklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fizik Bölümü

Caferov, T., (1998), Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul

Dzhafarov, T.D., Sirin, M. ve Akciz, S., (1998) "Photoelectrical Characteristics of GaAs p-n Junctions Formed by Cu Photostimulated Diffusion", J.Phys.D: Appl.Phys. 31 (17)

Hashizume, T. ve Hasegawa, H., (1990) "Variation of Deep Electron Traps Created by γ Irradiation of GaAs", J.Appl.Phys. 68 (9)

Hutchison, T.S. ve Baird, D.C., (1963), The Physics of Engineering Solids, John Wiley and Sons, Inc.

Krane, K., (1983), Modern Physics, John Wiley and Sons, Inc.

Lai, S.T., Nener, B.D., Faraone, L. ve Nassibian, A.G., (1993), "Characterization of Deep Level Defects in GaAs Irradiated by 1 MeV Electrons", J.Appl.Phys.73 (2)

Lai, S.T., Alexiev, D. ve Nener, B.D., (1995), "Comparision Between Deep Level Defects in GaAs Induced by Gamma, 1 MeV Electron, and Neutron Irradiation",J.Appl.Phys.78 (6)

Shur, M., (1987), GaAs Devices and Circuits, Plenum Press, New York

Sze, S.M., (1981), Physics of Semiconductor Devices, John Wiley and Sons, New York

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	17.05.1971	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1986-1989	Özel Evrim Lisesi
Lisans	1990-1994	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	1997-1999	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü
Çalıştığı Kurum	1996-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**