

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

YARIYALITKAN VE N-TİPİ GaAs KRİSTALLERİNİN YAKIN
BANT KENARI BÖLGESİNDE OPTİK SOĞURMA OLAYLARININ
İNCELENMESİ



Tacettin YILDIRIM

Yönetici: Doç. Dr. Sebahattin TÜZEMEN

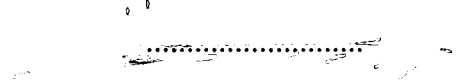
20.11.2023
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Yüksek Lisans Tezi

83673

JURİ ÜYELERİ

Doç.Dr. Sebahattin TÜZEMEN



Doç.Dr.Hasan EFEOĞLU



Yrd.Doç.Dr.Bahattin ABAY



08/10/1999 tarihinde **21/212** kararla kurulan jürimiz iş bu **Yüksek Lisans** tezini **27.12.1999** tarihinde kabul etmiştir.

ÖZET

Katkılanmamış ve yarıyalıtkan özelliğe sahip GaAs kristali ile Te katkılanmış n-tipi GaAs kristali üzerinde bant kenarına yakın bölgedeki soğurma spektrumları 10-300 K sıcaklık bölgesinde incelendi. Bant kenarına yakın bölgede maksimum değerleri sıcaklığa bağılı olarak 1.499 eV'dan 1.485 eV'a değışen soğurma pikleri gözlemlendi. Bu enerji değerleri bilinen Reverse-Contrast soğurmasıyla iyi uyuşmaktadır. Bu pikler, yarıyalıtkan GaAs ve n-tipi GaAs'da 100 K'nın üzerinde kaybolmaktadır. Sıcaklığa göre ($E_g - E_{max}$) değerlerinin ekstrapolasyonundan; yakın bant kenarı soğurma piklerinin yarıyalıtkan ve n-tipi numunede 200 K civarında iletkenlik bandı ile birleştiğı görüldü. Bununla birlikte, EL2 merkezlerinin ileri bir ışınlama ile foto-quench edilmesinden sonra yakın bant kenarı bölgesindeki soğurmanın da foto-quench edilebileceğı gösterildi. Soğurma ölçüleri ve spektral foto-akım ölçülerinin karşılaştırılması ile bu yakın bant kenarı soğurmasının herhangi bir merkez-içi soğurmaya sahip olmadığı kanaatine varıldı.

SUMMARY

Near bandedge optical absorption processes in semi-insulating (SI) GaAs and in Te doped n-type GaAs crystals was investigated in the range of 10-300 K. We observed absorption peaks whose maximum energies (E_m) ranging from 1.499 to 1.485 eV as the temperature increases from 10 K to 100 K. Such energy values are in agreement with known RC absorptions. The peaks for both SI and n-type GaAs were disappeared above 100 K. Extrapolating the graphs of $E_g - E_m$ versus temperature, we observed that near bandedge absorption is overlapped by conduction band at about 200 K for both SI and n-type samples. Furthermore, we demonstrated that the absorption in the region of near bandedge can be photo-quenched using further irradiation after EL2 photo-quenching at higher temperatures. Comparison of the absorption measurements with the spectral photo-current measurements, we conclude that Reverse Contrast (RC) centres that cause such absorption at energies close to the bandedge have no intra-centre transition.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmada, tez yöneticiliğini yapan ve çalışmanın gerçekleşmesinde büyük fedakarlık gösteren Sayın Hocam Doç. Dr. Sebahattin Tüzemen'e, yardımlarından dolayı Sayın Doç. Dr. Muhammet Yıldırım'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Bekir Gürbulak'a, Sayın Arş. Gör. Seydi Doğan'a, Sayın Arş. Gör. Aytun Ateş'e ve Bilgisayar uzmanı Sayın Necmettin Yıldırım'a teşekkür ederim. Numunelerin sağlanmasında büyük desteği olan Manchester Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Enstitüsü Öğretim üyelerinden Prof. Dr. M. R. Brozel'e ayrıca teőekkürlerimi sunarım.

Tacettin YILDIRIM



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i.
SUMMARY	ii.
TEŞEKKÜR.....	iii.
1. BÖLÜM	1
GENEL GİRİŞ	1
2. BÖLÜM.....	6
GaAs' da TABİİ NOKTA KUSURLAR.....	6
2.1 Katılarda Kusur Çeşitleri ve Onların Elektriksel ve Optik Bakımdan Önemi	6
2.1.1 Tabii Noktasal Kusurlar	6
2.1.2 Dislokasyonlar	9
2.1.3 Kümeler (Precipitates).....	10
2.1.4 Kimyasal (Extrinsic) Kusurlar	11
2.1.5 Nokta Kusurların Yapısı	11
2.2 GaAs' da Derin Seviyeler	14
2.2.1 Yarıyalıtkan Davranış ve Telafi Mekanizması	19
2.2.2 Çift Donor Olma Özelliği	20
2.2.3 Optik Soğurma ve Foto-quench Olayı	21
2.2.4 Fiziksel Yapı	22
2.3 Band Kenarına Yakın Optik Soğurmalar ve Reverse Contrast (Ters Desen)	24
2.3.1 Foto-quench Özellikleri	24
2.3.2 Optik Özellikler	26
2.3.2.1 Soğurma Katsayısı	26
2.3.2.2 Optik Yansıma ve Geçme	28
2.3.3 Elektriksel Özellikler	31
2.3.4 Işımsız Rekombinasyon Merkezleri	32
2.3.5 Fiziksel Yapı	33
2.4 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	35
3. BÖLÜM	36
DENEYSEL TEKNİKLER	36
3.1 Giriş	36
3.2 Numune Hazırlama ve Omik Kontak Yapılması	36
3.3 Infrared Soğurma Tekniği	37
3.4 Foto-Akım	39
3.5 Foto-quench Ölçümü	39
4. BÖLÜM	41
DENEYSEL SONUÇLAR	41
4.1 Kırmızı Ötesi Soğurma Spektrumu	41
4.2 EL2 ve RC Merkezlerini Foto-quench Yapma Ölçümleri	50
4.3 Foto-Akım Ölçümleri	54

5.	BÖLÜM	57
	SONUÇ VE TARTIŞMA	57
	KAYNAKLAR	62



1. BÖLÜM

GENEL GİRİŞ

Elektronikteki ilk deneyler cam vakum tüplerindeki elektrik akımlarıyla ilgilidir. 1890'lı yıllarda elektronun keşfinden sonra Fransız fizikçi Jean Baptiste Perrin vakum tüplerindeki akımın, daha sonra elektron olarak adlandırılacak olan, negatif yüklü, parçacıklardan oluştuğunu deneylerle göstermiştir. Elektronun yükü deneysel olarak 1909 yılında Amerikalı fizikçi Robert A. Millikan tarafından ölçülmüştür. Bu keşiflerle elektronik çağ başlamıştır.

Akımın geçmesine bir yönde imkan veren vakum tüpünün, 1904 yılında İngiliz bilimci John A. Fleming tarafından bulunmasından sonra çeşitli amaçlarla triyod, tetrod ve pentod tüpler geliştirilmiştir. Günümüzde de hala bazı elektronik aletlerde bunlar kullanılmaktadır.

Vakum tüpleri ile başlayan elektronik devri, 1947 yılında transistörün Bell laboratuvarlarında keşfi ile yeni bir boyut kazanmıştır. Transistörü keşfeden üç fizikçi Walter Brattain, John Bardeen ve William Shockley bu buluşlarından dolayı 1956 yılında Nobel Fizik ödülüne layık görülmüşlerdir. Elektronikteki bu yeni boyut **katı hal elektroniği** olarak adlandırılmıştır.

1960'lı yıllarda tümleşik devrelerin (integrated circuits; IC) ortaya çıkması ve bu konudaki yeni buluşlar elektronikte çok büyük gelişmelere sebep olmuştur. Tümleşik devre küçük bir yonga (pul, chip) üzerinde yerleştirilmiş çok sayıda diyot, transistör gibi aktif yarıiletken devre elemanları ve çok sayıda direnç, sığa gibi pasif devre elemanlarını bulundurur.

Elektronikte tümleşik devreler ile görülen gelişmede en büyük rolü silisyum oynamıştır. Optoelektronik uygulamalarda GaAs'ın silisyuma göre temel üstünlüğü vardır. Bunun sebebi GaAs'ın direkt band aralığı yapısına sahip olmasıdır. Yani, GaAs'ın iletkenlik

bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı dalga vektörüne sahiptir. Böylece, bir elektron fonon saçılmasına uğramadan iletkenlik bandından valans bandına geçebilir. Dışarıya sadece foton salınır. Silisyum, indirekt band yapısına sahiptir. Yani, iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu aynı dalga vektörüne sahip değildir. Dolayısıyla optik geçişler verimli bir şekilde sağlanamaz. Ayrıca GaAs'ın silisyuma göre elektronik avantajları da vardır. Örneğin GaAs'ın elektron mobilitesi silisyumunkine kıyasla 5 ile 10 kez daha büyüktür.

GaAs'ın yarıyalıtkan özelliği, onun tümleşik devre teknolojisinde kullanımını mümkün kılan en önemli özelliklerinden biridir. GaAs, büyütme esnasında elde olmayan nedenlerden dolayı karışan Zn ve C gibi sığ akseptörler nedeniyle p-tipi olarak büyümesi beklenirken yarıyalıtkan (semiinsulating; SI) olarak büyür. Bu olayın nedeni, sığ akseptörlerin derin donörler (EL2, EL3, EL5 ve EL6 gibi) tarafından kompanse (telafi) edilmesidir. Yarıyalıtkan GaAs'da Fermi enerjisi $E_c - 0.8$ eV ve özdirenç 10^6 ile 10^8 Ω cm civarındadır. GaAs'ın yarıyalıtkan özelliği tümleşik devre (IC) yapımında pek çok avantaj sağlar. SI-GaAs'ın yalıtım direnci büyük olduğundan tümleşik devrenin daha yüksek frekanslarda çalışması mümkün olur. Yine yüksek özdirençten dolayı GaAs taban malzeme (substrate) üzerine iyon ekme ile birbirinden izole edilmiş devreler yapılabilir.

GaAs altlıkların elektriksel bakımdan homojen olmaması farklı noktalarda farklı özdirenç değerlerine sahip olması anlamına gelir. Bu da altlık üzerine iyon implantasyonu ile yapılacak integre devrenin özelliklerini etkiler. Dobrilla (1985), MESFET (Metal yarıiletken alan etkili transistör) özelliklerinin dislokasyon ve donörlerin bölgesel konsantrasyonuyla yakından ilişkili olduğunu gösterdi. Böylece, tümleşik devre (IC) yapımında altlıkların karakterizasyonu çok önem kazandı. Yarıyalıtkan altlıklarda nokta kusurların karakterizasyonunda kırmızı ötesi soğurma, fotoluminesans ve diğer elektronik teknikler kullanılmıştır.

GaAs'ın karakterizasyonunda dikkate değer ilerleme DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) tekniğinin gelişmesi ile sağlandı (Lang, 1974). Bu metod, yarıiletkenlerde derin seviyelerin araştırılmasında en önemli tekniklerden biridir. Bu teknik ile derin

seviyelerin konsantrasyonu, tipi (akseptör, donör), yasak band aralığındaki enerji pozisyonları, elektriksel olarak aktif merkezlerin yakalama tesir kesitleri hakkında bilgi sahibi olabiliriz. DLTS tekniği ile Schottky yapılarında geçici kapasitans değişimleri ölçülerek çoğunluk taşıyıcı tuzakları gözlemlenebilir. p-n eklemine de geçici kapasitans ölçülerek hem azınlık hem de çoğunluk taşıyıcı tuzaklarını gözlemek mümkündür.

Külçe GaAs ve epitaxiel GaAs'da bu derin seviyeler çeşitli geçici kapasitans çalışmalarıyla gözlemlendi ve EL1-EL16 olarak adlandırıldı (Martin, et al., 1977). Bu derin tuzak seviyelerinden EL2, EL3, EL5 ve EL6, rekombinasyon mekanizmasında en önemli rolü oynar. Çünkü, bu seviyelerin elektron yakalama tesir kesiti yüksektir (10^{-13} cm²). Bunların içinde EL2'nin konsantrasyonu en yüksek olduğundan rekombinasyon mekanizmasında en önemli rolü oynar.

GaAs tek kristali Gooch tarafından 1961 yılında büyütüldü. Sturge (1962), yasak band aralığındaki soğurmaya iletkenlik bandının 0.70 eV altındaki bir donörün neden olduğunu önerdi. EL2'nin optik özellikleri orjinal olarak foto-kapasitans tekniği ile çalışıldı (Chantre, et al., 1981; Vincent, et al., 1982). Bu çalışmalarda elde edilen foton enerjisine göre foto-iyonizasyon tesir kesitinin spektral değişimi, Sturge tarafından ölçülen optik soğurma sabitinin foton enerjisine göre değişimine çok benzemektedir. Martin (1981), kapasitans metodları ile yaptığı ölçümlerde 1000 nm dalga boylu ışığı soğurma sabitinin EL2 konsantrasyonu ile orantılı olduğunu gösterdi ve soğurma sabitinin kalibrasyonunu yaptı. EL2'nin optik soğurma tesir kesitini de 7×10^{-15} cm² olarak buldu. EL2 soğurmasınının 120 K'in altındaki sıcaklıklarda foto-quench yapılabileceğini gösterdi.

Kusurun diğer özellikleri, foto-kapasitans etkiler (Chantre, et al., 1981; Vincent, et al., 1982), 0.68 eV-PL-emission-bandı (Yu, 1984), 1000 nm infrared soğurma görüntüleri (Skolnick, 1984) ve EPR sinyalleri'nin (Rong, et al., 1991) foto-quench edilebileceği gösterildi. Bu deneylerin pek çoğunda EL2 merkezlerindeki maksimum foto-quenching 1.15 eV enerjili fotonlarla olduğu görüldü. Kaminska (1983), paralel optik soğurma ve foto-akım ölçümleriyle EL2'nin merkez-içi (intra-centre) soğurmaya sahip olduğunu gösterdi.

EL2'nin lüminesans özellikleri tam anlaşılmış değildir. Fakat 0.6-0.7eV aralığında gözlenen fotolüminesans bantlarının EL2 merkezleriyle ilgili olduğu rapor edilmiştir (Tajima, 1988).

EL2'nin yapısını anlamak için EL2'nin sitokimiyetik bağımlılığı (Lagowski, et al., 1982; Holmes, et al., 1982), foto-elektron-paramagnetik-rezonans (Weber, 1982), sıfır fonon soğurma çizgisinin (Zero phonon line, ZPL) basınçla ayrılması (Kaminska, 1985), optik olarak dedekte edilen elektron-nükleer çift rezonans (ODENDOR) ölçümleri (Meyer, et al., 1987) yapıldı. As/Ga oranı arttıkça EL2 konsantrasyonunun arttığı gözlemlendi (Lagowski, et al., 1982; Holmes, et al., 1982; Elliott, et al., 1984). Yarıyalıtkan GaAs'da EPR ile belirlenen As_{Ga} konsantrasyonu ve optik metodlarla ölçülen EL2 konsantrasyonu arasında mükemmel bir uyumun varlığı belirlendi (Weber, et al., 1984). Foto-EPR ölçümleri EL2'nin yapısı hakkında daha ileri bilgi verir (Weber, et al., 1982). Foto-EPR ölçümlerinden As_{Ga} kusurunun bir double donör olduğu görüldü. Tüm bu araştırmalar sonucunda EL2'nin yapısı hakkında mümkün iki model kabul edildi; 1) EL2 yalıtık As-antisite kusurudur. 2) EL2 bir As arayer atomu içeren As-antisite kusurudur. EL2'nin Metastable durumdaki geometrisi hakkında $V_{Ga}-As_i$ modeli pek çok araştırmacı tarafından kabul edilir (Baraff, 1992; Chadi ve Chang, 1988; Dobrowski ve Scheffler, 1988).

150 K'in altındaki sıcaklıklarda EL2 ile ters korelasyona sahip soğurma veren diğer bir kusurda Reverse-Contrast (RC)'tir (Skolnick, 1984; Brozel ve Skolnick 1986; Mohades-Kassai ve Brozel 1990). RC merkezlerinin soğurması, 4 K sıcaklıkta, iletkenlik bandının minimumundan 50 meV aşağıya kadar uzanır. Bu kusurun EL2'ye benzer bir yol ile foto-quench edilebileceği Breivik (1990) tarafından gösterildi. Fakat RC merkezlerinin foto-quench olması 45 K'in altındaki sıcaklıklarda meydana gelebilir. RC soğurması ile EL2 konsantrasyonu arasındaki antikorelasyon bize bu iki kusurun birbirinden farklı olduğunu gösterir. Band kenarına yakın dalga boyuna sahip fotonlarla RC merkezleri daha verimli bir şekilde foto-quench edilebilse de, RC'nin foto-quench olmasının maksimum verimli olduğu dalga boyu hakkında birşey söyleyemiyoruz.

Reverse-Contrast (RC) merkezlerinin yapısı, deneysel (Corbel, et al., 1992) ve teorik (Puska, et al., 1986; Lin-Chung ve Reinecke, 1983) olarak çalışıldı. Meyer (1990), III-V yarıiletkenlerde kusurların sitokimiyetik bağımlılığını araştırdı (Spaeth, 1992). Hem yakın band kenarı foto-akım ölçümleri (Jimenez, 1987, 1992) hem de Speath'ın (1992) 1.48 eV'deki MCD verileri; RC merkezlerinin, Bulk GaAs'da tabii foto-quench edilebilir derin bir akseptör seviyesi olduğunu önerir. Bununla birlikte yarıyalıtkan GaAs'da RC merkezleri nötr olduğundan telafi (compensation) mekanizmasını etkilemez. Mohades-Kassai ve Brozel (1990), RC merkezlerinin As boşluğu ile ilgili olduğunu düşündü. Lin-Chung ve Reinecke (1983) ve Puska'nın (1986) teorik çalışmaları ile Dannefaer (1984) ve Corbel'in (1988) pozitron yok olma (annihilation) deneyleri RC kusurlarının As boşluğu olduğu görüşünü destekler. Bununla birlikte Meyer (1990), RC'nin Ga-antisite olduğu görüşünü ileri sürdü.

Reverse-Contrast, ışısız rekombinasyon merkezleridir. Si-GaAs'da bu merkezleri foto-quench yaptıktan sonra, banddan banda ışıklı geçişte bir artma olduğu Tüzemen, Breivik ve Brozel (1992) tarafından double beam fotoluminesans tekniği (DBPL) kullanılarak gösterildi. Ayrıca; Tüzemen ve Brozel (1993), RC soğurma sabiti ve Hall etkisi ölçümlerinden hesaplanan kusur konsantrasyonunu kullanarak RC soğurma tesir kesitini $7 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ olarak bulundu.

Bu tezde, yakın band kenarı bölgesinde optik olaylar incelendi. MESFET yapımında önemli rol oynayan EL2 ve RC 'nin optik ve elektriksel özellikleri araştırıldı. Kırmızı ötesi soğurma ile RC merkezlerinin soğurma pikleri elde edildi. EL2 ve RC'nin foto-quench özellikleri araştırılarak RC merkezleri için paralel soğurma ve foto-akım'ın spektral değişimi ortaya çıkarıldı.

2. BÖLÜM

GaAs' DA TABİİ NOKTA KUSURLAR

2.1. Katılarda Kusur Çeşitleri ve Onların Elektriksel ve Optik Bakımdan Önemi

Kristal büyütme esnasında termodinamik nedenlerden dolayı kusur oluşması kaçınılmazdır. Bu bölümde, kristalde oluşan kusurlar üzerinde durulacaktır.

Blakemore, kusurların sınıflandırmasını yapmıştır. Buna göre kusurları, Tabii kusurlar (Intrinsic) ve Kimyasal kusurlar (extrinsic) olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Tabii kusurlar, kristalin kendi atomları arasında meydana gelen düzensizlikten, kimyasal kusurlar ise kristale dışarıdan bilerek veya bilmeyerek karışan yabancı atomlardan oluşur. Şekil 2.1'de kusurların sınıflandırılması verilmiştir.

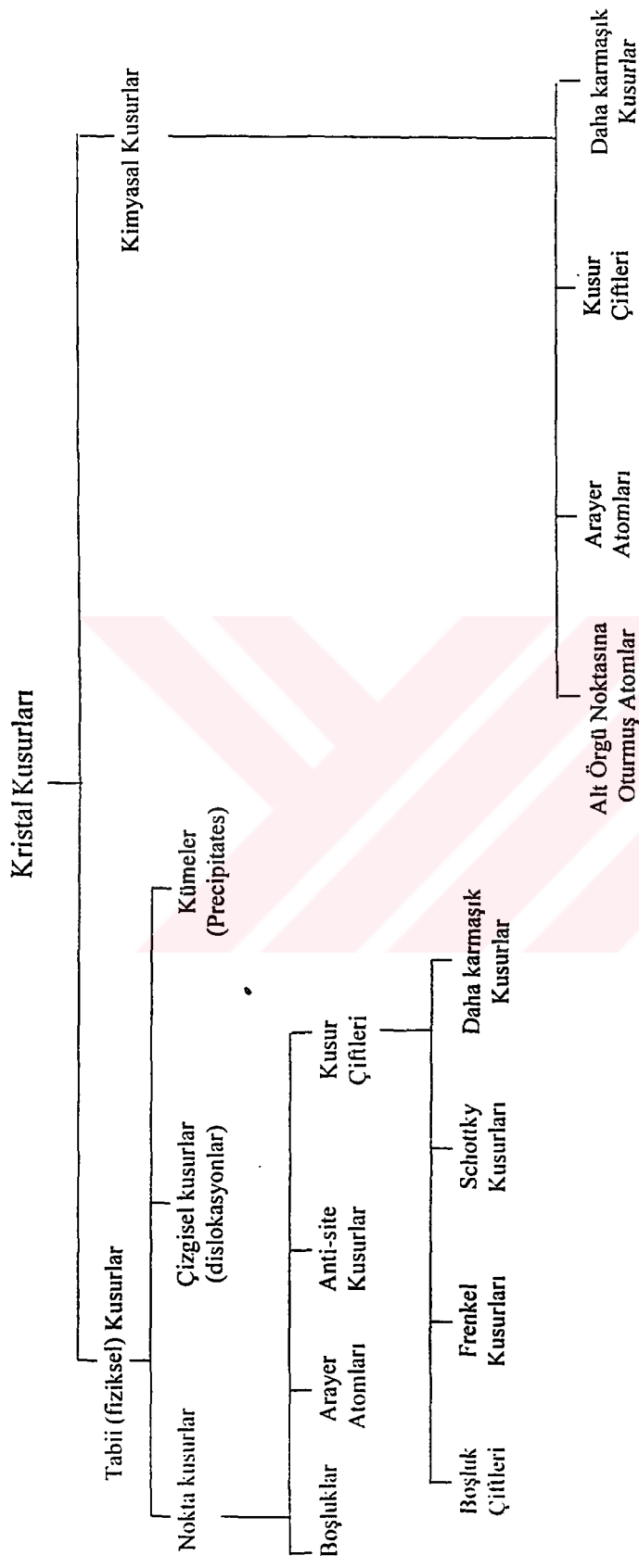
2.1.1. Tabii Noktasal Kusurlar

2.1.1.a. Boşluklar (Vacancies)

Boşluklar, genellikle çok yüksek sıcaklıklarda kristalin kendi atomlarının örgü noktasından çıkmasıyla meydana gelir. Bir boşluk ve bir arayer atomu oluşur. Boşluklar V_{As} , V_{Ga} , V_{In} şeklinde gösterilir. Ters Frenkel reaksiyonu ile bertaraf edilebilir. Buna ısıl işlem denir. Bu reaksiyona göre,



yazabiliriz.



Şekil 2.1 Kristal yapılarında oluşabilecek kusur çeşitleri

Frenkel reaksiyonu ile atom bulunduğu örgü noktasından çıkar ve bir boşluk ile bir arayer atomu oluşur. Ters Frenkel reaksiyonunda ise arayer atomu boşluğa dönerek boşlukları ortadan kaldırır.

2.1.1.b. Arayer Atomları

Kristalde örgü noktasındaki atomların yerlerinden çıkarak kristal içinde herhangi bir arayere yerleşmesiyle oluşur. Aynı şekilde yabancı kimyasal atomlarda arayer konumuna yerleşebilir. Arayer kusurları atomun kimyasal simgesinin altında i indisi ile gösterilir. Örneğin GaAs'daki arayer yerleşmiş Arsenik atomu As_i ile gösterilir ve burada i , arayer (instertitial) atomu demektir.

2.1.1.c. Anti-Site Kusurlar

Bu çeşit kusurlar bileşik kristallerde meydana gelir. Bir kristal A ve B atomlarından meydana gelmiş olsun, A atomunun alt örgüsüne B atomunun yerleşmesi yada B atomunun alt örgüsüne A atomunun yerleşmesi kusuruna anti-site kusur oluşturur. Bu kusur, A_B veya B_A şeklinde gösterilir. Anti-Site kusuru GaAs'da, As_{Ga} yada Ga_{As} şeklinde olabilir. Burada As_{Ga} arsenic anti-site kusurudur ve bu özel olarak EL2 kusuru ile ilgilidir.

2.1.1.d. Kusur Çiftleri

Bunların en önemlisi Di-Vacancy (V-V) kusurdur. İki boşluk elektron tuzakladığında oluşur.

2.1.1.e. Schottky Kusuru

İki arayer atomunun bağ oluşturması sonucunda meydana gelen kusurdur. $As_i - As_i$ çifti gibi.

2.1.1.f. Frenkel Kusuru

Bu kusur bir boşlukla bir arayer atomunun meydana getirdiği kusur çiftidir. Genelde iyonik kristallerde olur. Örgü noktasından çıkan bir arayer atomu ile onun bıraktığı boşluktur. V_{As} - As_i gibi.

2.1.2 Dislokasyonlar

Çizgisel kristal yapı kusurları olan dislokasyonlar, örgü içerisinde oldukça uzun atomik boyutlarda ortaya çıkarlar ve kristalin mekanik özelliklerinde çok önemli değişikliklere yol açarlar. Dislokasyonlar kristal yapı içerisinde yapının zayıflık merkezleri olarak bilinirler. Dislokasyonlar nedeniyle bir kristalin kırılabilirliği 10^4 kat artabilir. Bu yüzden özellikle materyal hazırlanmasında dislokasyonların varlığının ve yoğunluklarının bilinmesi büyük önem taşır. Dislokasyon, basit şekli ile, kristal yapı içerisinde konumlarını değiştirmiş atomların oluşturduğu bir çizgi olarak düşünülebilir.

Dislokasyonların kristal içerisinde ortaya çıktığı bölgeler kristalin ideal halindeki bölgelere göre daha yüksek enerjili bölgelerdir ve bu yüzden yüksek enerjili bölgeler olarak tanımlanırlar. İdeal ve dislokasyon içeren kristaller enerjileri açısından karşılaştırıldıklarında, bu şekilde bir kusur ile oluşan kristalin entropisinin, ideal kristalin entropisinden daha büyük olduğu görülür.

Üzerinde hiçbir etki olmaksızın oluşturulan kristaller bile cm^2 başına 10^3 dislokasyon içerebilir. Oldukça yüksek oranda deforme edilmiş bir kristal yapıda bu büyüklük cm^2 başına 10^{12} 'ye kadar yükselebilir. Kristallerde dislokasyon türü yapı bozukluklarının gözlenmesi ve özelliklerinin ortaya çıkarılması TEM ve SEM ile kolayca yapılabilmektedir.

Dislokasyonlar, kristalin özelliklerini doğrudan etkileyen kusurlardandır. Dislokasyonlar nokta kusurları doğrudan etkiler. Bu etkileşimde dislokasyonların zor alanlarının etkisiyle bazı kusurlar dislokasyonlara doğru yönelir ve dislokasyonların etrafında yoğunlaşır.

Mesela, GaAs'da EL2 kusurunun dislokasyonlar civarında çok yoğun olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda GaAs'daki As arayer atomları dislokasyonların zor alanları tarafından sürüklenerek $1000A^0$ genişliğinde Arsenik yığıntıları oluşur. Ayrıca, dislokasyonlar boyunca bir nokta kusurun difüzyonu kristalin kendi içindeki normal difüzyonundan 100 kez daha büyük olabilir.

Bir kristal yapı içerisindeki dislokasyonların oluşum özellikleri ve cinsi, Burgers vektörü ile tanımlanır. Burgers vektörü dislokasyon çizgisine dik yada paralel olabilir. Burgers vektörünün dislokasyon çizgisine paralel olduğu dislokasyon türleri vida tipi, dik olduğu dislokasyon türleri de kenar tipi dislokasyonlar olarak tanımlanırlar.

Dislokasyonların bulunduğu yerde zor alanı meydana gelir. Dar bölgede yüksek zor alanı, geniş bölgede zayıf zor alanı oluşur. Dislokasyonlar boyunca bir zor gradyenti vardır. Bu, dislokasyonların zor bölgesine difüze olmasını sağlar. Katkı atomlarının dislokasyonlar boyunca toplanması dekorasyon diye adlandırılır.

GaAs'da bu dekorasyon, tabii nokta kusurlar tarafından sağlanır ve dislokasyonlar boyunca bazı tabii kusurlar yoğun bir şekilde meydana gelir. Yine bu yollarda GaAs'da dislokasyonlar incelenebilir. Kristal yapı içinde hem nokta kusurlar hem de dislokasyonlar için zor alanı vardır. Zor alanı dislokasyonlar için $\frac{1}{r}$ ile nokta kusurlar için $\frac{1}{r^3}$ ile değişir.

Bu nedenle, nokta kusurların zor alanı uzak mesafelere gidemez. Dislokasyonların zor alanı daha uzak mesafelere kadar etkisini gösterir.

2.1.3. Kümeler (Precipitates)

Bu kusur, dislokasyonların zor alanı nedeniyle difüze olup kümeleşen arayer atomları ile meydana gelir. GaAs'da As kümeleri, InP'da P kümeleri çok rastlanan durumdur. GaAs'daki As kümelerinin büyüklüğü $1000-2000A^0$ arasında değişmektedir. Bu küme 10^7 tane As atomu içerir. Bunlar genellikle dislokasyonlar civarında yer almaktadır.

2.1.4. Kimyasal (Extrinsic) Kusurlar

Kristal yapı içerisine dışarıdan isteyerek yada elde olmayan nedenlerle karışan yabancı atomlardır. Bu kusurlara en iyi örnek GaAs'ı p-tipi yapmak için katılan isteyerek (intentional) katılan Si ve Ge atomlarıdır. İstenmeyerek (unintentional) karışan kusurlara örnek ise, C ve Zn atomlarıdır. Bunlar, gerek saf malzemelerden gerek büyütme sisteminden elde olmayan sebeplerle karışır. Yabancı atomlar kristale karıştığına, örgü noktalarındaki atomların alt örgüsüne yerleşirse, bu kusurlara substitutional, şayet ara yere yerleşirse, bunada interstitial kusurlar olarak adlandırılır. Ayrıca bu iki kusur atomları kendi aralarında kusur oluşturabilir.

2.1.5. Nokta Kusurların Yapısı

2.1.5.a. Geometrik Yapı

Geometrik yapıdan kristaldeki kusurun atomik yapısını anlamalıyız. Örneğin, "GaAs' daki EL2 kusuru As anti-site mi?", "Si kusuru GaAs'ın kristal yapısı içinde nereye yerleşmiştir?" gibi soruların cevabı kusurun geometrik yapısı olmaktadır. Kusurun geometrik yapısı onun anlaşılması açısından çok önemlidir. Simetrisinin ortaya çıkarılması yani çevresinde hangi atomların olduğunun bilinmesi elektronik yapının anlaşılmasına yardım eder. Geometrik yapının anlaşılması için kullanılan teknikler; EPR, magnetik alan ve stress splitting deneyleridir.

2.1.5.b. Dinamik Yapı

Örgüdeki atomların titreşiminden fononlar oluşur. Bu esnek dalgalar, iki atomlu kristallerde optik ve akustik olmak üzere iki moddur. Kristal yapıda kusur varsa, bu titreşim modları optik ve akustik modların dışında veya optik ve akustik modları ayıran yasak bölgede meydana gelir.

Kristale kusur karışır, bu modlar ilk modun dışına düşer ve yeni titreşim modları oluşur. Başka bir deyişle, bir çizgi boyunca yerleşmiş atomları düşünelim. Katkısız bir yapıda kristalin kendi atomları vardır ve atomların titreşimleri nedeniyle fononlar oluşur. Kusur olarak yabancı bir atom örgü noktasına yerleşirse, örgünün titreşim frekansı farklı olur. Bu yeni titreşim modlarından dolayı kristalin dinamik modları değişir. Buna kusurun dinamik yapısı denir. Ayrıca, kusurların örgü ile etkileşmesiyle fonon soğurması yada fonon yayınlanması olur. Buna, örgünün durulması (lattice relaxation) denir. Dinamik yapıyı incelemek için “Local Vibrational Modes” (LVM) tekniği kullanılır. Bu teknik GaAs’da C ve O atomlarını incelemek için etkin şekilde kullanılmaktadır. LVM tekniğinin esası optik soğurmadır. Bu soğurma uzak infrared bölgeye düşer.

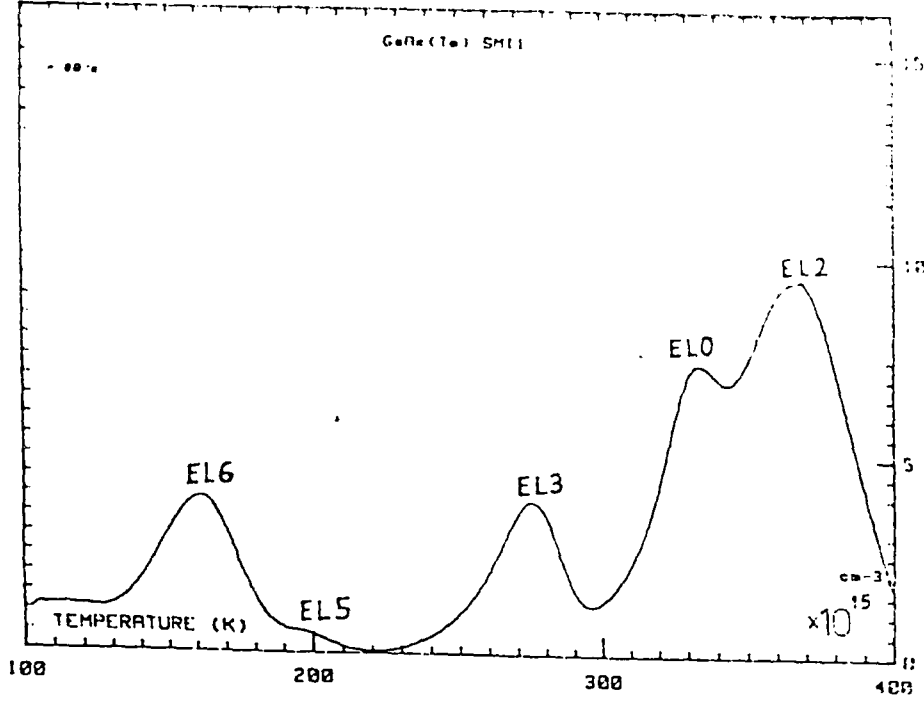
Yerel titreşim modları (LVM) tekniğinde, kusur atomunun titreşim frekansına eşit frekanslı bir dalga gönderilir. Bu dalga uzak infrared bölgesindedir. Bu dalga kristal tarafından soğurulursa, yerel titreşim modları (LVM) ortaya çıkarılır. LVM, kusurun kütlesine bağlıdır. Kusurun kütlesi küçükse, frekans artar; büyükse, frekans azalır. Titreşim modlarının tesbitiyle kusurun kütlesi bulunabilir. LVM metodu, kristalin kendi atomlarından küçük kütleli kusurları incelemek için kullanılır.

2.1.5.c. Elektronik Yapı

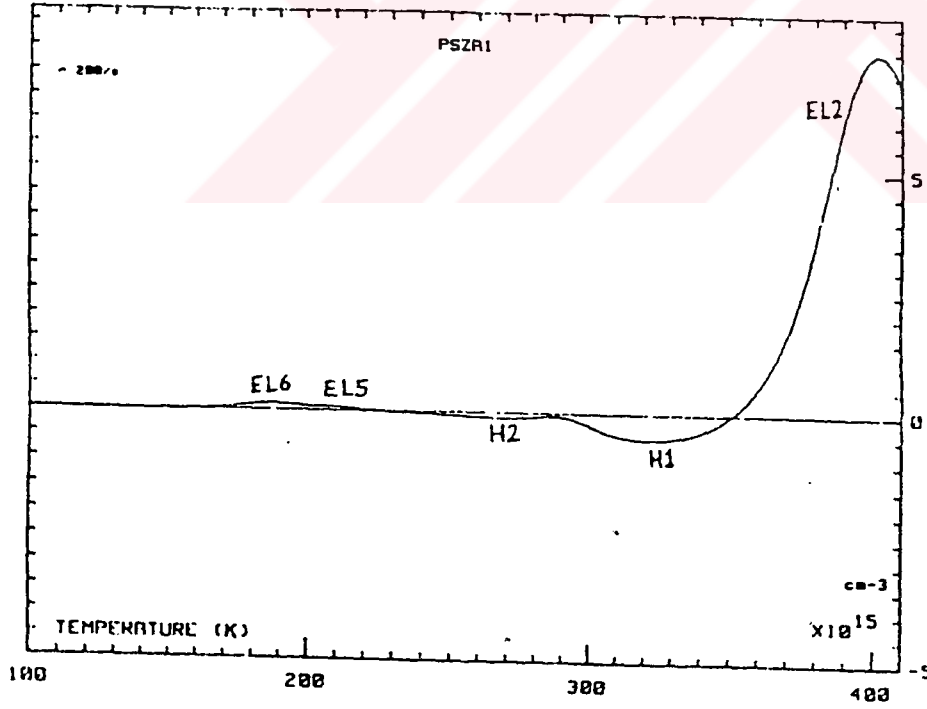
Kusursuz bir kristal örgü tamamen periyodiktir ve bu örgüde elektronların hareketi Bloch fonksiyonları ile temsil edilir. Bloch fonksiyonlarını,

$$\psi(k, r) = U(k, r) \exp(ik \cdot r)$$

şeklinde yazabiliriz. Mükemmel bir kristalin bant yapısında; valans bandı, iletkenlik bandı ve bu iki band arasında yasak enerji aralığı vardır. Kusur ihtiva eden kristalde ise, bu yasak enerji aralığında yeni enerji seviyeleri meydana gelir. Oluşan bu enerji seviyeleri tarafından yarıiletkenin, optik ve elektriksel özellikleri kontrol edilir. Bu enerji seviyeleri



Şekil 2.2 Schottky kontak kullanarak n-tipi külçe GaAs'da DLTS ile gözlenen elektron tuzakları (Tüzemen, 1993)



Şekil 2.3 p+-n eklemi kullanarak n-tipi külçe GaAs'da DLTS ile gözlenen elektron ve boşluk tuzakları (Tüzemen, 1993)

derin veya sıg olabilir; enerji seviyeleri, $0.1\sim 0.8\text{ eV}$ aralığında ise derin seviyeler; $1\sim 50\text{meV}$ aralığında ise sıg seviyelerdir.

2.2.GaAs'da Derin Seviyeler

Yarıiletkenlerde kusur karakterizasyon tekniklerinden Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) tekniği ile kusurun aktivasyon enerjisi, tipi ve konsantrasyonu hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3 de DLTS tekniği ile alınmıő ölçümler gösterilmiştir. Bu ölçümler Schottky diyot ve p-n eklemi üzerinde alınmıőtir.

Şekil 2.2' de görülen bu derin seviyeler Martin ve arkadaşları (1977) tarafından EL2, EL3, EL5 ve EL6 olarak adlandırılmıőtir. Tablo 2.1 de bu kusur seviyelerinin aktivasyon enerjisi ve konsantrasyonu verilmiştir.

Tablo 2.1'de görülen boşluk tuzaklarında p^+-n eklemine gözlemlendiğini burada belirtelim. EL2, EL3, EL5 ve EL6 kusuru, tabii nokta kusurdur. Bu kusurların yapısı hakkında çok açık fikre sahip değiliz. Bununla birlikte, en yüksek konsantrasyona sahip EL2 kusuru büyük öneme sahiptir.

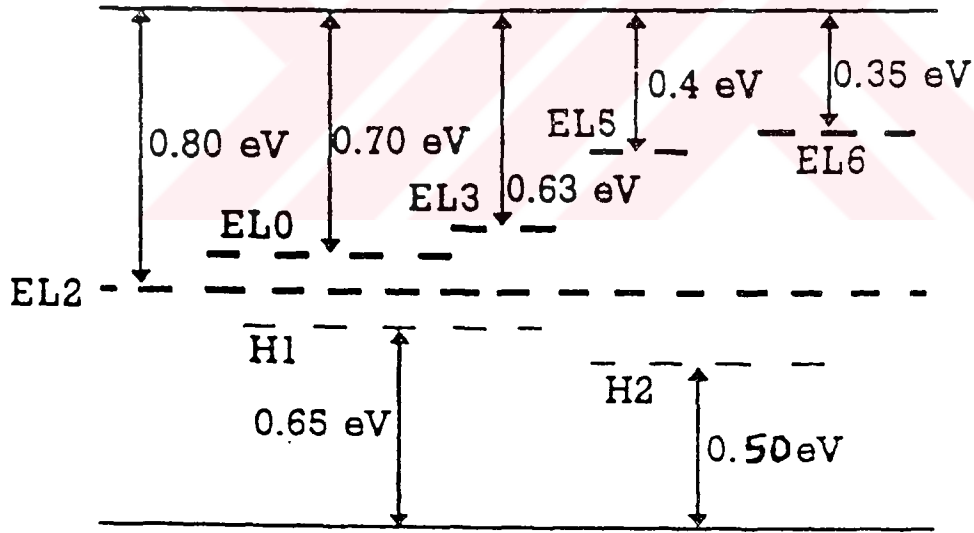
Şekil 2.4'te gösterilen veriler, LEC ile büyütölen n-tipi GaAs'da 80-400K aralığında DLTS tekniğiyle alınmıőtir. Orta bandgap'teki EL2 ve EL0 seviyelerinin iletkenlik bandının minimumundan aőađıda 0.80 eV ve 0.70 eV seviyesine yerleőtiđi ve konsantrasyonlarının $\sim 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ ve 10^{15} cm^{-3} olduğu gözlenmiştir.

Orta band aralığı seviyesinin detaylı incelemesi Ishida ve arkadaşları(1985) ile Yahata ve arkadaşları (1985) tarafından yapıldı. Bunlar çalışmalarında, orta bant aralığı bölgesinde E01 (0.80eV), E02 (0.78) ve E03 (0.706eV) tuzak seviyelerinin olduğu sonucuna vardılar. Bu seviyelerin konsantrasyonları sırasıyla, 2.10^{16}cm^{-3} , 2.10^{15}cm^{-3} - 1.10^{16}cm^{-3} ve

8.10^{14}cm^{-3} dür. Burada, EL2'nin optik soğurması ile korelasyon gösteren sadece E03 (0.706eV) seviyesidir.

Tablo 2.1 n-tipi GaAs'da DLTS ile gözlenen elektron ve hol tuzaklarının konsantrasyon ve aktivasyon enerjileri

Tuzak Adı	Tuzak Tipi	Aktivasyon Enerjisi(eV)	Konsantrasyon(cm^{-3})
EL2	Elektron	0.80	$1-2 \times 10^{16}$
EL0	Elektron	0.70	1×10^{15}
H1	Hol	0.65	5×10^{13}
EL3	Elektron	0.63	$5-20 \times 10^{14}$
H2	Hole	0.50	5×10^{13}
EL5	Elektron	0.40	$1-20 \times 10^{14}$
EL6	Elektron	0.35	$1-50 \times 10^{14}$



Şekil 2.4 LEC ile büyütülmüş bulk GaAs'da yasak band aralığı profili (Martin et al., 1977)

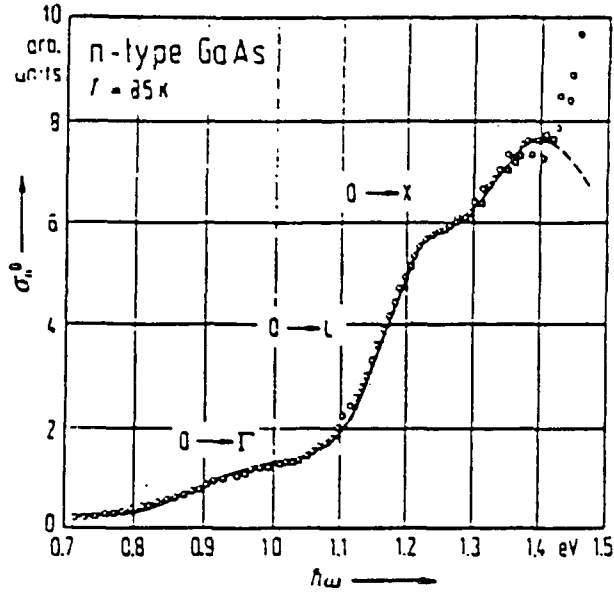
EL3 tuzak seviyesi, iletkenlik bandının 0.65eV altında ve konsantrasyonu 1.10^{14} cm^{-3} civarındadır. Bu kusur seviyesi büyütülmüş tüm numunelerde bulunur ve konsantrasyonu basit termal işlem yöntemiyle düzenlenebilir. Daha sık tuzak seviyesi olan EL5, iletkenlik bandının altında 0.39 eV seviyesine yerleşmiştir ve konsantrasyonu 10^{13} ile 10^{14} cm^{-3} arasında değişir. İletkenlik bandının altında 0.35eV seviyesine yerleşmiş olan EL6 tuzağının konsantrasyonu, 10^{15}cm^{-3} 'den 10^{13} cm^{-3} 'e değiştirilebilir. Bununla birlikte, EL6'yı ısı işlem ile EL2' ya dönüştürmek mümkündür. Fang ve arkadaşları 1987 yılında n-tipi GaAs üzerinde yaptığı çalışmada; düşük EL2 konsantrasyonuna sahip bir numunede, ısı işlem metoduyla azaltılan EL6 konsantrasyonunun EL2'deki konsantrasyon artışına yaklaşık eşit olduğunu gösterdi. Bu çalışmada EL6'nın, EL2'ye dönüştürülen $V_{Ga}-V_{As}$ kompleksi olduğu önerildi ve bu kusurun As_i ile etkileşim içinde $As_{Ga}-V_{As}$ olduğu şeklinde yorumlandı. Aynı zamanda bu çalışmada EL6'nın ışımasız rekombinasyon merkezi olduğu önerildi. Ayrıca, Levinson (1988) yaptığı çalışmada, EL6'nın EL2'ye çok benzer As_{Ga} 'yla ilgili bir kompleks olduğunu önerdi.

$p^+ - n$ eklem diodları kullanılarak DLTS tekniği ile gözlenmiş H1 ve H2 hol tuzakları valans bandının maksimumunun üzerinde 0.65 eV ve 0.50 eV seviyesine yerleşmiştir ve bunların konsantrasyonu, 10^{13} cm^{-3} civarındadır (Martin et al., 1977).

EL2'nin optik özellikleri, orjinal olarak, foto-kapasitans tekniğiyle çalışıldı. Bu çalışmalar, EL2'nin temel seviyeden metastable seviyeye geçişi ile foto-iyonizasyon tesir kesiti ve foto-nötralizasyon tesir kesitinin spektral bağımlılığı hakkında bilgi sağlar. Şekil 2.5'de EL2 merkezlerinin foto-iyonizasyon tesir kesitinin spektral dağılımı gösterilmiştir.

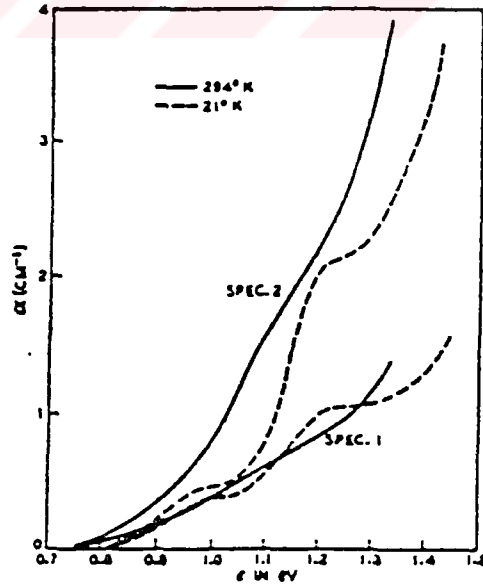
Şekil 2.5'de görülen eğrideki değişimler; elektronların, iletkenlik bandının minimumlarına (Brillouin bölgesindeki X, L, Γ noktalara) iyonizasyonu ile ilgilidir. Eğrideki ilk değişim elektronların Γ noktasına direk iyonizasyonundan ileri gelir. Diğer değişimler elektronların X ve L noktasına iyonizasyonu ile ilgilidir.

Şekil 2.6'da GaAs'ın yasak band aralığındaki soğurma spektrumu verilmiştir. Görüldüğü gibi soğurma, 0.75 eV 'dan band kenarına kadar devam eder.



Şekil 2.5 EL2'nun foto-iyonizasyon tesir kesitinin spektral değişimi (Chantre, 1981)

Sturge (1962), bu soğurmanın iletkenlik bandının altında 0.70 eV seviyesine yerleşmiş bir donordan kaynaklandığını ileri sürdü. Martin (1981), kapasitans metotları ile yaptığı ölçümde GaAs'ın soğurma sabitinin, 1 μm dalga boyunda, EL2 konsantrasyonuyla bire bir ilişkili olduğunu gösterdi. EL2'nin soğurma katsayısı ile konsantrasyonunun kalibrasyonunu yaparak optik soğurma tesir kesitini hesapladı.

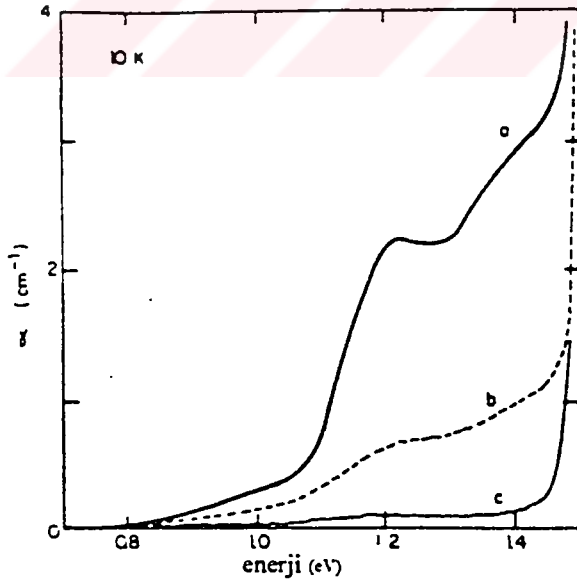


Şekil 2.6 GaAs'ın yasak band aralığındaki soğurma spektrumu (Sturge, 1962)

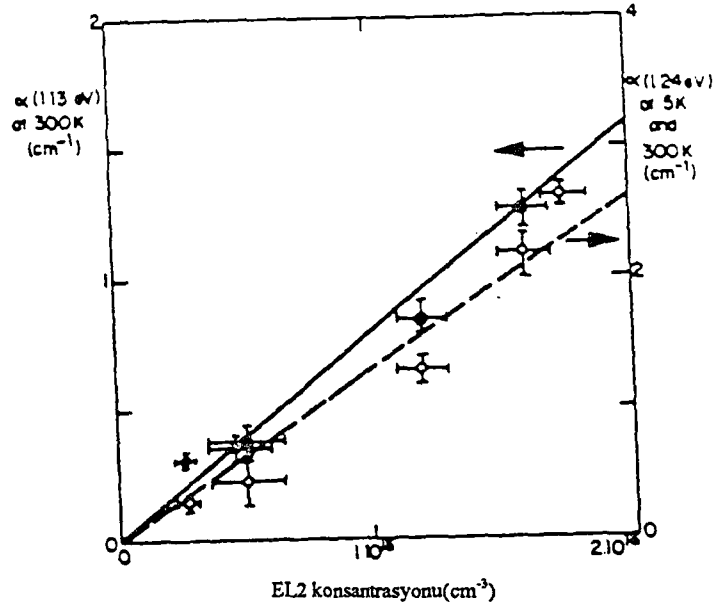
Ayrıca Martin (1981), EL2'nin fotoquenç edilebileceğini de gösterdi. EL2'nin optik soğurması 120 K'den daha düşük sıcaklıklarda fotoquenç edilebilmektedir. EL2 kusuru, aktif olmayan bir metastable duruma (EL2*) geçirilebilmekte ve sıcaklık 120 K'nin üzerine çıkmadıkça ilk durumuna dönememektedir. Foto-kapasitans etkiler, EPR sinyalleri, 0.68 eV-PL-emission bandı, IR soğurma görüntüleri gibi özelliklerde fotoquenç edilebilmektedir. EL2 kusurunun metastable duruma geçişinde maksimum tesir kesiti 1.15 eV'lik enerjiye karşılık gelir.

Kaminska (1983), yaptığı paralel foto-akım ve optik soğurma deneylerinde, EL2'nin merkez içi (intra-centre) soğurmaya sahip olduğunu gösterdi. Merkez-içi soğurma spektrumu 1.03 eV'dan 1.32 eV'a kadar uzanır.

Tajima (1988), 0.6-0.7 eV spektral aralığındaki fotolüminesans bandının EL2 merkezlerinden kaynaklandığını önerdi ve bu fotolüminesansın iki band içerdiğini söyledi. Birisi, numune 1.4 eV enerjili fotonlarla uyarıldığında gözlenen 0.63 eV emisyon çizgisi; diğeri, numune 0.8-1.4 eV enerjili fotonlarla uyarıldığında görünen 0.68 eV'luk emisyon çizgisidir. Bu çalışmada, 0.63 eV'luk emisyon çizgisinin iletkenlik bandına



Şekil 2.7 Yarıyalıtkan GaAs tek kristalinde 10 K'da kaydedilen optik soğurma spektrumu (a) karanlık ortamda soğuduktan sonra, (b) ve (c) sıra ile 1 ve 10 dakika aydınlatmadan sonra (Martin, 1981).



Şekil 2.8 EL2 konsantrasyonuna göre optik soğurma sabitinin değişimi (Martin, 1981)

uyarılmış bir elektronla temel seviyedeki EL2 kusurunun rekombinasyonundan kaynaklandığı ve 0.68 eV'luk emisyon çizgisinin ise EL2 seviyesinden uyarılmış elektronun valans bandındaki boşluk ile rekombinasyonundan kaynaklandığı önerildi.

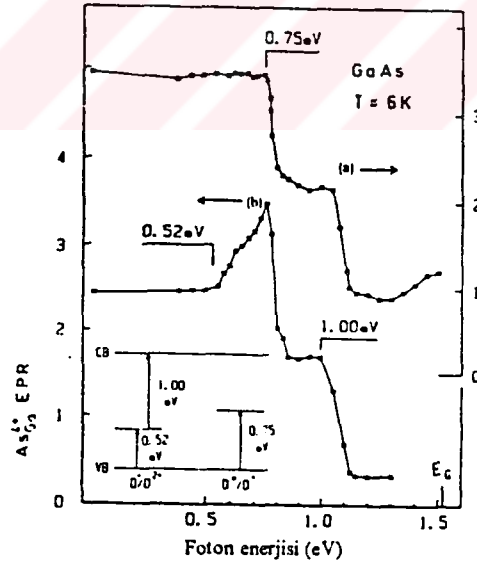
2.2.1 Yarıyalıtkan Davranış ve Telafi Mekanizması

Katkılanmamış GaAs'ın yarıyalıtkan özellik göstermesinin nedeni EL2'dir. Büyütme sırasında GaAs'a kendiliğinden Zn ve C karışır. Bu iki element ikinci grup elementtir ve sığ akseptör özelliği gösterir. Büyütülen GaAs, bu akseptörler nedeniyle p-tipi olması beklenirken, derin donörler (EL2,EL3,EL5,EL6) tarafından kompanse edilmesiyle yarıyalıtkan (intrinsic'e yakın davranış) özellikte ortaya çıkar. Bu derin donör seviyeleri elektronlarını akseptör seviyelerine vererek, Fermi enerji seviyesini (E_f) band aralığının ortasına çeker. Yarıyalıtkan GaAs'ın özdirenci 10^6 - $10^8 \Omega\text{cm}$ civarındadır. Bu yüksek özdirenç nedeniyle GaAs, tümleşik devre fabrikasyonunda aşağıdaki avantajları sağlar;

1. GaAs altlık yüksek özdirenç sahip olduğundan şönt direnci (toprak direnci) yüksektir ve üzerindeki devre silisyuma göre daha yüksek frekanslarda çalışabilir.
2. GaAs altlık üzerine çeşitli devre elemanları birbirinden izole edilerek yapılabilir. Bu da devrenin boyutunu küçültme avantajı sağlar.
3. İyon ekme yöntemiyle GaAs altlık üzerine çeşitli karmaşık devreler kurulabilir.

2.2.2 Çift Donor Olma Özelliği

EL2 kusuru bir çift donordur ve bu çift donurun iki seviyesi $E_c-0.77$ eV ve $E_v+0.52$ eV seviyelerine yerleşmiştir. Bu çift donör As_{Ga}^{3+} , As_{Ga}^{4+} , As_{Ga}^{5+} iyonik yük durumlarına sahiptir. Bu durum D^0, D^+, D^{++} şeklinde de gösterilir. As_{Ga}^{4+} (D^+)'ün çiflenmemiş elektronu olduğundan EPR sinyaline yalnız bu yük durumu cevap verir. Şekil 2.9'da (a) eğrisi, yarıyalıtkan GaAs'da fotonlarla uyarılmış As_{Ga}^{4+} EPR sinyalini foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak gösterir.



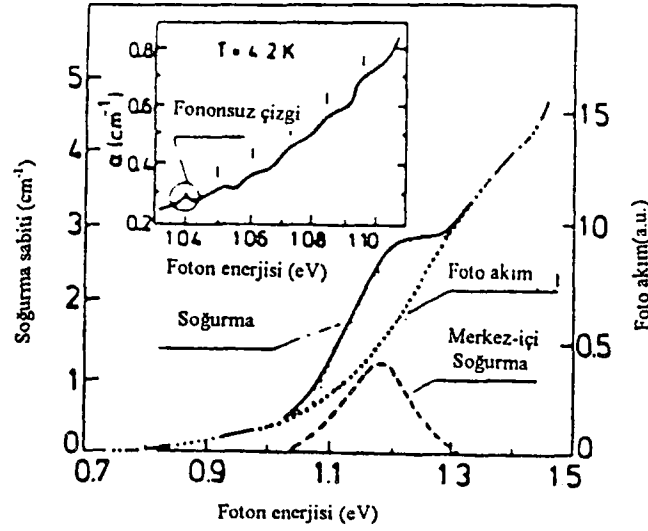
Şekil 2.9 EL2'nin Foto-EPR spektrumları (a) yarıyalıtkan GaAs, (b) p-tipi GaAs (Weber, et al., 1982)

Bu şekilde de görüldüğü gibi; As_{Ga}^{4+} sinyali, 0.75eV ve 1.0eV 'li fotonlarla aktif olmayan duruma (Metastable) geçer. Yani EPR'ye aktif donör seviyesi (D^+), valans bandından elektron geçmesi ile nötralize olur ve $E_c-0.1\text{ eV}$ 'deki çift donör ilk yük durumdan ikinci yük durumuna iyonize olur.

Şekildeki (b) eğrisi p-tipi GaAs üzerinde alınmıştır. Burada EPR sinyali 0.52 ve 0.75eV foton enerjilerinde aktiftir. Bu da muhtemelen $E_v+0.52\text{ eV}$ seviyesinde $D^{++} \rightarrow D^+$ geçişi ve $E_c-0.77\text{eV}$ seviyesinde $D^0 \rightarrow D^+$ geçişi nedeniyledir. Bu deneyler 6 K sıcaklığında yapılmıştır ve bu sıcaklıkta GaAs'ın yasak band enerji aralığı 1.52 eV 'dur. Yasak enerji aralığının bu değeri, $E_c-1.0\text{ eV}$ seviyesindeki ($As_{Ga}^{4+} \rightarrow As_{Ga}^{5+}, D^+ \rightarrow D^{++}$) geçişi ile $E_v+0.52\text{eV}$ seviyesindeki ($As_{Ga}^{5+} \rightarrow As_{Ga}^{4+}, D^{++} \rightarrow D^+$) geçişinin aktivasyon enerjisi ve gözlemlenen EPR-quenching değerleriyle iyi uyumaktadır. Diğer EPR aktivasyon enerjisi $E_c-0.77\text{ eV}$ muhtemelen ($As_{Ga}^{3+} \rightarrow As_{Ga}^{4+}, D^0 \rightarrow D^+$) geçişi ile ilgilidir. Bu değer Hall etkisi ve DLTS ile gözlemlenen EL2 merkezlerinin iyonizasyon enerji değerleri ile iyi uyumaktadır (Weber et al., 1982). Lagowski (1985), Dischler ve Kaufmann (1988)'ın yaptıkları Foto-Kapasitans ölçümleri, fotoquench edilebilir bir çift donör için yukardaki değerlere benzer aktivasyon enerji değeri verir. Bu EL2'nin çift donör olduğu modelini destekler.

2.2.3 Optik Soğurma ve Foto-quench Olayı

Daha önce değindiğimiz gibi yasak band aralığındaki soğurma EL2 seviyesinden kaynaklanıyordu. EL2'nin soğurması 0.75eV 'den başlar yasak band kenarına kadar devam eder. Martin 1981 yılında bu soğurmanın foto-quench edilebileceğini gösterdi. Ayrıca, EL2'nin foto-quench edilebildiği foto-akım spektroskopisi, foto-lüminesans ve foto-kapasitans deneyleriyle de gösterildi. 120 K 'nin altındaki sıcaklıklarda maksimum foto-quench oranı 1.15 eV enerjili fotonlarla meydana gelir. Bu enerji değeri EL2'nin merkez-içi soğurmasının pik değerine çok yakındır. Merkez-içi soğurma 1.03eV 'den 1.32eV 'e kadar devam eder. EL2'nin metastable duruma geçişi ve merkez-içi soğurmanın spektral dağılımı Şekil 2.10'de gösterilmiştir.



Şekil 2.10 GaAs'da optik soğurma ve foto-akımın spektral dağılımı (Kaminska, et al., 1983)

$EL2^0 \rightarrow EL2^*$ ye geçişi ile merkez-içi geçişin sıfır fonon soğurma çizgisi arasında iyi bir uyum vardır. Samuelson (1984) merkez-içi soğurmayı, EL2 merkezleri metastable duruma geçerken bir ilk adım olarak değerlendirdi. Sıfır fonon çizgisi (ZPL), nötr EL2'nin temel durumdan 1A1 uyarılmış duruma 1T2 merkez-içi geçişinin neticesidir. Metastable durumdaki EL2 merkezlerinin optik yolla temel seviyeye dönüşü iletkenlik bandına elektronun geçişi ile olmaktadır. Bu geri dönüşün çoğunluğu iletkenlik bandındaki rezonant durumuna geçiş ile olmaktadır.

2.2.4. Fiziksel Yapı

EL2'nin fiziksel tabiatı, tartışma konusudur. Bugün EL2'nin açık kimliği ortaya konabilmiş değildir. DLTS, foto-lüminesans ve infrared soğurma teknikleri; kusur konsantrasyonu, optik ve elektriksel tesir kesiti ve enerji seviyesi hakkında bilgi verir. Fakat kusurun fiziksel yapısı hakkında pek bilgi vermez. Bununla birlikte kusur konsantrasyonu hesaplanmış enerji seviyeleri ile DLTS, PL, Hall etkisi ve kızıl ötesi soğurma ile ölçülen değerler karşılaştırılarak EL2 merkezlerinin yapısı hakkında bilgi edinebiliriz.

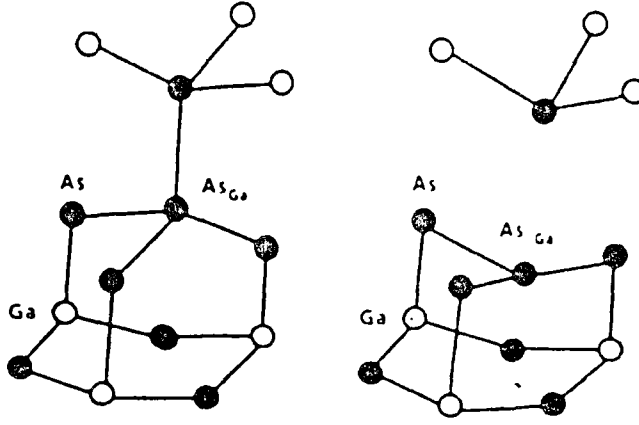
EL2 konsantrasyonunun stokiometrik bağımlılığı(Lagowski et al., 1982, Holmes et al., 1982), foto-elektron-paramagnetik-rezonans (foto-EPR)(Weber et al.,1982), sıfır-fonon-soğurma çizgisinin stress splittingi (Kaminska et al., 1982) ve optik olarak dedekte edilen nükleer çift rezonans (ODENDOR) ölçümleri (Meyer et al., 1987) EL2' nin fiziksel tabiatını araştırmada başarılı oldu.

Stokiometrik ölçümler EL2'nin fiziksel tabiatını araştırmada başarılı oldu. As/Ga oranının artması EL2 konsantrasyonunu artırır. Buna göre EL2 merkezleri Ga boşluğu (V_{Ga}) yada As-antisite (As_{Ga}) gibi.Arsenik zenginliği ile ilgili olmalıdır (Lagowski et al.,1982).

EL2'nin izole arsenik-antisite kusuru olduğu hakkında görüşler stress splitting ve manyetik alan (zeeman) splitting deneyleriyle desteklenir(Kaminska et al., 1985). Bu deneylerde, EL2 soğurmasının 1.04 eV'lik sıfır fonon çizgisi (ZPL) üç farklı yönde stress uygulanarak araştırıldı. Örneğin bu yönler [111], [100] ve [110] olabilir. Bu deney sonuçları dörtlü (tetrahedral) simetriye sahip izole olmuş bir kusurun hesaplanan ZPL splittingiyle iyi uyar. Bu da bize EL2'nin izole arsenik antisite kusuru olduğunu gösterir.

Özet olarak söyleyecek olursak; EL2, ya Arsenik antisite'dır yada As-antisite kusuru birde Arsenik arayer atomu içerir.

Burada metastable durumdaki EL2'nin atomik yapısına da değinelim. Chadi ve Chang (1988) ile Dabrowski ve Scheffler (1988) EL2'nin metastable durumunun atomik yapısını araştırdı. Bu araştırmacılar, Ga'un yerine oturmuş As'in en yakın dört komşu As atomu ile dörtlü yapı oluşturduğunu ve bu durumun stable durum olduğunu; merkezdeki As atomunun bu dört bağın birini koparıp geride Ga boşluğu (V_{Ga}) bırakarak ara yere geçmesi durumunun ise metastable durum olduğunu söyledi. Metastable durumdaki As ara yer atomu (As_i) örgü noktasındaki enerjisinden 0.24 eV'lik daha fazla enerjiye sahiptir.



Şekil 2.11 EL2'nin atomik yapısı ve metastable seviyeye geçişi (Chadi ve Chang, 1988)

Böylece EL2'nin özelliklerine ana hatlarıyla değindikten sonra band kenarına yakın bölgedeki soğurmanın özelliklerini tanıtmaya çalışalım.

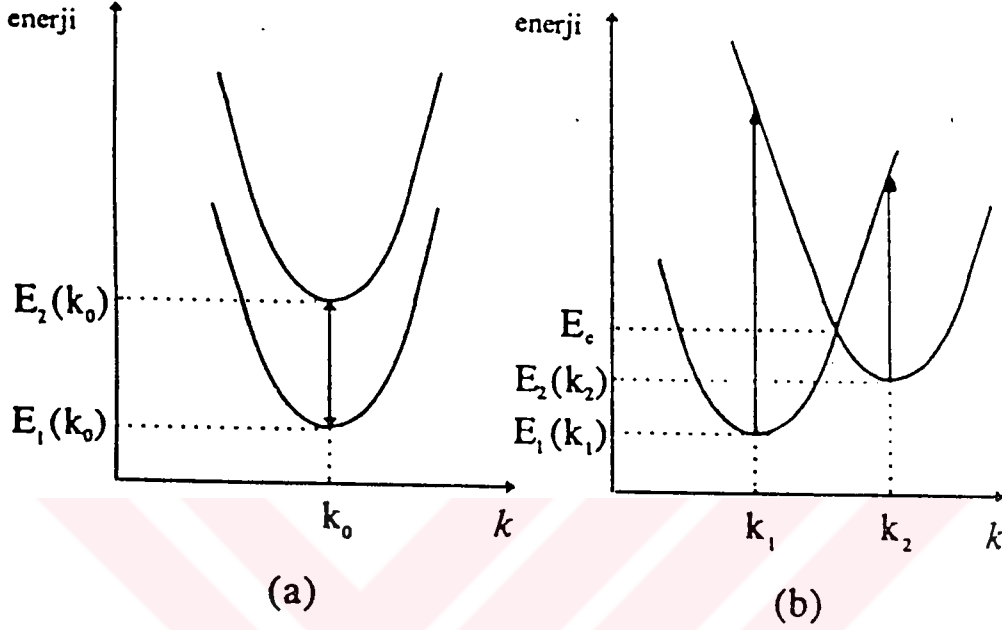
2.3. Band Kenarına Yakın Optik Soğurmalar ve Reverse Contrast (Ters Desen)

Bundan önceki bölümde belirttiğimiz gibi EL2'nin soğurma sopektrumu $1.5\mu\text{m}$ 'den başlar band kenarına kadar devam eder. Soğurma spektrumunun band kenarına yakın bölgesinde ikinci bir soğurma daha vardır. Bu soğurma, EL2 soğurması ile anti-korele olduğundan "Reverse-Contrast (RC)" olarak adlandırılır. Band kenarına yakın bölgedeki bu soğurma 4K'de iletkenlik bandının minimumundan yaklaşık 50 meV aşağıya kadar uzanır. Sıcaklık arttıkça bu soğurma azalır ve 140 K 'nin üzerinde görülmez. RC soğurması yüksek sıcaklıklarda iletkenlik bandı ile birleşir. Sıcaklık azaldıkça iletkenlik bandının altında yasak bölgede tekrar görünmeye başlar.

2.3.1 Foto-quench Özellikleri

Foto-quench olayı, örgü ile güçlü etkileşim içinde olan bir kusurda tuzaklanmış elektronun foton yoluyla uyarılması sonucu aktif olmayan metastable duruma geçmesidir. Kusur örgü ile güçlü etkileşim içinde olduğundan uyarma sırasında fononlar ya soğurulur yada salınır. Bu da $E-k$ diyagramında k değerinin değişmesine neden olur. Uyarılmış

durumun minimum enerjisinin k değeri temel durumun k değerinden farklıdır. Şekil 2.12 E-k diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.12 E - k diyagramı (a) Örgü etkileşimi yok, (b) kuvvetli örgü etkileşimi var

Foto-quench olayının meydana gelmesi için, numune üzerine gelen fotonun enerjisi temel seviye ile metastable seviye arasındaki enerji farkına eşit olması gerekir. Metastable seviyeye geçmiş elektron, örgüye momentum aktararak bu seviyenin minimumuna iner. Metastable seviyedeki elektronun temel duruma dönüşü iki şekilde olabilir. Birisi, termal olarak $E_c - E_2(k_2)$ enerjisi verilerek; diğeri, fotonla k_2 de okla gösterilen enerji verilerek elektron temel seviyeye döndürülür. Daha önce belirttiğimiz gibi EL2, 1.15 eV enerjili fotonlarla maksimum seviyede foto-quench edilebiliyordu. Breivik (1990), RC merkezlerinin EL2'nin foto-quenchine benzer şekilde foto-quench edilebileceğini gösterdi. Numune üzerine gelen ışığın dalga boyu band kenarına yaklaştıkça RC merkezlerinin foto-quench oranı da artar. Bununla birlikte RC'nin maksimum foto-quench olduğu enerji değerini söylemek mümkün değildir. Ayrıca, EL2 120 K'nın altındaki sıcaklıklarda foto-quench olurken, RC merkezleri 45 K'nın altındaki sıcaklıklarda foto-quench olur.

2.3.2 Optik Özellikler

2.3.2.1 Soğurma Katsayısı

Bu çalışmamızın konusu band kenarına yakın bölgedeki soğurma olayları olduğundan, yarı-iletkenlerde optik soğurma üzerinde durmak kayda değer. Bir yarıiletken üzerine foton düşürelim. Bu ışığın fotonu sahip olduğu enerji değerine ve yarıiletkenin yasak enerji aralığına bağlı olarak soğurulur yada yarıiletkenden geçer. Fotonun enerjisi ($E = h\nu$) yasak enerji aralığından küçükse yarıiletkenden geçer, büyük yada yasak enerji aralığına eşitse soğurulur. Soğurulan foton, valans bandındaki enerji seviyelerinden elektronun geride boşluk (hole) bırakarak iletkenlik bandındaki enerji seviyelerine geçmesine neden olur. $h\nu > E_g$ olduğu takdirde bir elektron-boşluk çifti oluşur ve fazlalık enerji örgüye fonon olarak aktarılır. Şekil 2.13'de gönderilen fotonun enerjisine göre temel soğurma işlemleri gösterilmiştir.

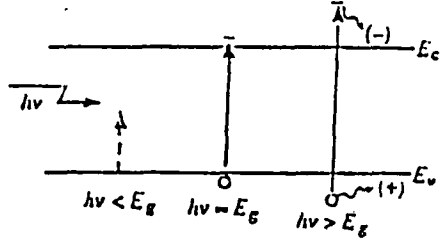
Işık akısının şiddeti $I_\nu(x)$ ve birimi *enerji/cm² sn* şeklindedir. Şekil 2.14'de yüzeye gelen ışık şiddeti ve $x+dx$ mesafesinden çıkan ışık şiddeti gösterilmektedir. dx mesafesinde birim zamanda soğurulan enerji

$$\alpha I_\nu(x) dx \quad (2.1)$$

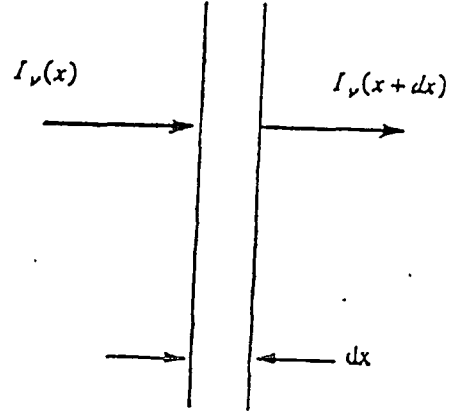
şeklinde verilir.

Burada α soğurma katsayısıdır. Soğurma katsayısı cm^{-1} biriminde olup birim uzunlukta soğurulan foton sayısı ile ilişkilidir. Şekil 2.14'den yararlanarak

$$I_\nu(x + dx) - I_\nu(x) = \frac{dI_\nu(x)}{dx} dx = -\alpha I_\nu(x) dx \quad (2.2)$$



Şekil 2.13 Bir yarıiletkende elektron-boşluk çiftinin oluşumu



Şekil 2.14 dx kalınlıklı numunedeki optik soğurma.

yada

$$\frac{dI_v(x)}{dx} = -\alpha I_v(x) \quad (2.3)$$

yazabiliriz. $x=0$ 'da $I_v(x) = I_{v0}$ şartını kullanarak, (2.3) eşitliğini çözersek

$$I_v(x) = I_{v0} e^{-\alpha x} \quad (2.4)$$

eşitliğini elde ederiz. Bu eşitlikte görüldüğü gibi ışık akısının şiddeti yarıiletken malzeme boyunca mesafe ile eksponansiyel olarak azalmaktadır.

Soğurma katsayısı yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı ve fotonun enerjisi ile sıkı sıkıya ilişkilidir. Soğurma katsayısı $h\nu > E_g$ olduğu durumda hızlı bir şekilde artar. $h\nu < E_g$ durumunda ise küçük değerler alır ve bu durumda bu enerji bölgesinde yarıiletken şeffaf olarak görünür.

2.3.2.2 Optik Yansıma ve Geçme

Optik spektroskopi, numune yüzeyinin ön kısmından yansıtılan veya numunenin geometrisine bağlı olarak arka yüzeyine geçen ışık miktarını ölçer. Elektromagnetik dalgaların ara yüzeydeki davranışı Maxwell'in kısmi diferansiyel denklemleri kullanılarak sınır şartlarından belirlenir. Buradan hareketle numune yüzeyine düşen ışığın yansıtılan kısmını ve numune boyunca ışığın geçirilen kısmını hesaplamak mümkündür. Şekil 2.15'de gösterilen x kalınlığına sahip tek kristal özellik gösteren ve soğurmaya sebep olan kusurların dağılımının homojen olduğu paralel kenarlı bir yarıiletken dilimini göz önüne alalım. Numune üzerine gelen ışığın yansıma katsayısı

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (2.5)$$

ile verilir. Eğer sonlu kalınlıktaki numune hiçbir soğurma yapmıyorsa, bu durumda söndürme sabiti (k) küçüktür. Buradan hareketle (2.5) eşitliği,

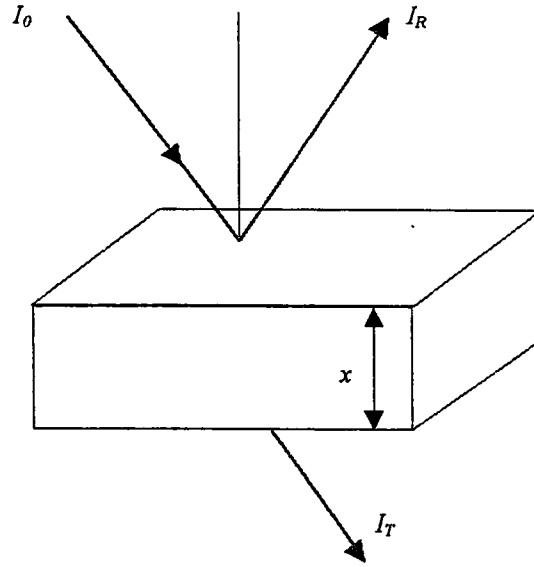
$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \quad (2.6)$$

olarak elde edilir. Bu durumda yansıma katsayısının davranışı kırılma indisinin reel kısmını içerip soğurma kısmını içermemektedir.

Şekil 2.15'da gösterilen numune için geçirilen ışık şiddeti

$$I_T(\lambda) = I_o(\lambda) \frac{[1 - R(\lambda)]^2 e^{-\alpha(\lambda)x}}{1 - R(\lambda)^2 e^{-2\alpha(\lambda)x}} \quad (2.7)$$

olarak yazılabilir. Burada $I_T(\lambda)$ geçen ışık şiddeti, $I_o(\lambda)$ numune yüzeyine düşen ışık şiddeti, $R(\lambda)$ yansıma katsayısı ve $\alpha(\lambda)$ soğurma katsayısıdır.



Şekil 2.15 Yüzeyine gelen, yansıyan ve diğer tarafa geçen ışık şiddetini gösteren x kalınlıklı bir yarıiletken numune

Eğer soğurma yalnızca nokta kusurlardan oluşuyorsa soğurma katsayısı,

$$\alpha(\lambda) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(\lambda) N_i \quad (2.8)$$

olarak yazılabilir. Burada, n soğurmaya sebep olan farklı kusurların sayısı; N_i , i . kusurun yoğunluğu; σ_i , i . kusurun optik tesir kesitidir.

Eğer bir dalga boyunda ya da belirli bir dalga boyu aralığında herhangi bir kusurun (k . kusur) konsantrasyonu ile optik tesir kesitinin çarpımı, yer alan diğer kusurların konsantrasyonu ve optik tesir kesitlerinin çarpımından çok büyük ise, yani

$$\alpha_k(\lambda_0) N_k \gg \sum_{i=1}^n \sigma_i(\lambda_0) N_i \quad (2.9)$$

olduğu zaman soğurmanın k 'inci kusur tarafından meydana getirildiği söylenebilir ve soğurma katsayısı yaklaşık olarak

$$\alpha(\lambda_0) = \alpha_k(\lambda_0)N_k \quad (2.10)$$

şeklinde verilir. Şimdi gelen ışığın düştüğü düzlemde kusur konsantrasyonlarının homojen olmadığını ($N_i(x,y)$) düşünelim. Ayrıca kusur konsantrasyonundaki değişimin yansıma katsayısında değişikliğe sebep olmadığını ve saçılmanın ihmal edildiğini de farzedelim. Bu durumda geçen ışık şiddeti,

$$I_T(\lambda, x, y) = I_o(\lambda) \frac{[I - R(\lambda)]^2 e^{-\alpha(\lambda, x, y)x}}{I - R(\lambda)^2 e^{-2\alpha(\lambda, x, y)x}} \quad (2.11)$$

olarak yazılır. Burada

$$\alpha(\lambda, x, y) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(\lambda)N_i(x, y) \quad (2.12)$$

şeklindedir. Numune yüzeyine gelen ışık şiddeti $I_o(\lambda, x, y)$ homojen olmadığı zaman (2.10) eşitliği,

$$I_T(\lambda, x, y) = I_o(\lambda, x, y) \frac{[I - R(\lambda)]^2 e^{-\alpha(\lambda, x, y)x}}{I - R(\lambda)^2 e^{-2\alpha(\lambda, x, y)x}} \quad (2.13)$$

olarak yazılabilir. (2.13) eşitliğinin her iki tarafı $I_o(\lambda, x, y)$ 'a bölünerek geçen ışığın gelen ışığa oranı yani geçme katsayısı (T) hesaplanabilir. Buna göre

$$T = \frac{I_T(\lambda, x, y)}{I_o(\lambda, x, y)} = \frac{[I - R(\lambda)]^2 e^{-\alpha(\lambda, x, y)x}}{I - R(\lambda)^2 e^{-2\alpha(\lambda, x, y)x}} \quad (2.14)$$

elde edilir. $R(\lambda)$ ile $\alpha(\lambda, x, y)$ yerine kısaca R ve α yazılacak olursa (2.14) eşitliği

$$T = \frac{(I - R)^2 e^{-\alpha x}}{I - R^2 e^{-2\alpha x}} \quad (2.15)$$

eşitliğine dönüşür.

Eğer (2.15) eşitliğindeki yansıma katsayısı sıfır olarak alınırsa $e^{-\alpha x}$ 'in manası daha açık hale gelir. Bu durumda geçen ışığın şiddeti yansıma kayıplarından dolayı azalmayacaktır.

Buna göre arka yüzeyden çıkan ışığın şiddeti $I_T(\lambda, x, y)$ numune yüzeyine gelen ilk şiddeti olan $I_0(\lambda, x, y)$ ile

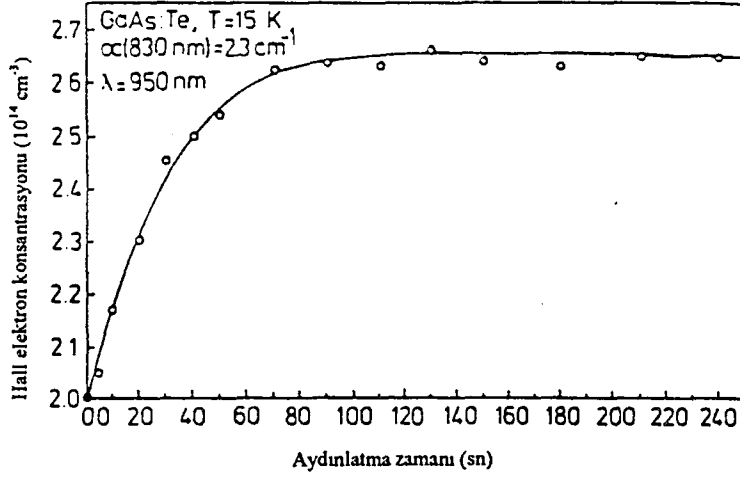
$$I_T(\lambda, x, y) = I_0(\lambda, x, y)e^{-\alpha x} \quad (2.16)$$

şeklinde bağlantılıdır. Fiziksel işlemlerdeki bu direk ilişki transmittansdan ziyade α 'yı çok faydalı bir spektroskopik nicelik yapar. Buradan, soğurmanın soğurma yapan niceliklerin (kirliliklerin) konsantrasyonu (N) ile direk ilişkili olduğunu söylemek kesinlikle doğrudur. Yansıma katsayısı (R) uygun şartlar altında ölçülürse kalınlıkta (x) ölçülebileceğinden soğurma katsayısı (α), (2.15) eşitliğinden kolaylıkla hesaplanabilir.

2.3.3 Elektriksel Özellikler

EL2 ile anti-korele RC benzeri kusurların, numunenin düşük sıcaklıklarda aydınlatılmasından sonra foto-iletkenlikte artış olduğu Jimenez (1992) tarafından belirtildi. Bu kusurlar RC merkezleri olabilir. Bu konuyu Tüzemen ve Brozel (1992) araştırdı. Onlar, Foto-Hall etkisi deneyini yaptı. Bu deneyde Te katkılanmış n-tipi GaAs kullandılar ve RC merkezlerinin foto-quenchinden sonra serbest elektron konsantrasyonunda sürekli bir artış gözlemlədiler. Telafi merkezi olarak davranan RC merkezlerinin bu şekilde davranması beklenen bir sonuçtur ve RC konsantrasyonun nicel hesaplanmasını sağlar. Şekil 2.16'da foto-quench zamanına bağlı olarak taşıyıcı konsantrasyonundaki değişim gösterilmiştir.

Şekil 2.16'da da görüldüğü gibi 15 K'da taşıyıcı konsantrasyonu $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ dür ve tam foto-quench'den sonra taşıyıcı konsantrasyonu $2.65 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ e kadar yükselir. Bu durum ya sığ donor aktivitesindeki artmanın yada aktif akseptör konsantrasyonundaki azalmadan kaynaklanır. Sonuçta her iki durum, taşıyıcı konsantrasyonunda $6.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ lük bir artışı netice verir. Tüzemen ve Brozel (1993) elektron mobilitesindeki artışı da dikkate alıp ve bu verileri Fermi-Dirac istatistiğine uygulayarak "RC merkezleri akseptördür ve n-tipi GaAs'da konsantrasyonu $8 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ dür." sonucuna vardılar.



Şekil 2.16 Foto-quench zamanına göre Foto-Hall elektron konsantrasyonu (Tüzemen, 1993)

2.3.4 Işımasız Rekombinasyon Merkezleri

Bir yarıiletken elektriksel yada optik yolla uyarılırsa, çeşitli rekombinasyon olayları meydana gelir. Rekombinasyon hızı, yakalama tesir kesiti ve rekombinasyon merkezlerinin yoğunluğuna bağlıdır. Mükemmel bir kristal yapıda sadece banddan banda geçiş olayı varken, pratikte mükemmel kristal üretmek mümkün değildir. Bu nedenle, fiziksel kusurlar (boşluklar, boşluk çiftleri, anti-site kusurlar, dislokasyonlar) ve kimyasal kusurlar (kirlilikler) rekombinasyon mekanizmasında etkilidir.

Yüksek enerji seviyesinden (E_1) daha düşük enerji seviyesine bir elektron geçerse, foton ve fonon emisyonuna sebep olur. Bu geçişi matematiksel olarak,

$$E_1 - E_2 = \frac{1}{2\pi} \left[\sum h\omega_i + \sum h\Omega_j \right] \quad (2.17)$$

şeklinde yazabiliriz. Burada; h , plank sabiti; ω_i , foton açısal frekansı ve Ω_j , fonon açısal frekansıdır. Fonon emisyonu içermeyen geçişler ışımali rekombinasyon olarak adlandırılır. Foton emisyonu içermeyen geçişler ise, ışımasız rekombinasyon olarak adlandırılır. Işımalı emisyonun kuantum verimi, ışımali rekombinasyonun toplam rekombinasyona oranıdır.

$$Q = \frac{\tau_r^{-1}}{\tau_r^{-1} + \tau_n^{-1} + \tau_o^{-1}} \quad (2.18)$$

Burada Q , kuantum verimidir. τ_r , ışıklı rekombinasyon hayat süresi; τ_n , ışımaz rekombinasyonla ilgili hayat süresi; τ_o , diğer proseslerle ilgili hayat süresidir. Bu eşitlikten görüldüğü gibi ışımaz sürecin hızı artarken, kuantum verimi azalır. Yarıiletkenlerde lüminesans şiddeti kuantum verimi ile orantılıdır.

Striland (1991), GaAs'ın katodoluminesans haritalarının düşük sıcaklıkta RC soğurma resimlerine çok benzediğini gösterdi. Şekil 2.17 GaAs'da RC'nin IR soğurma ve CL ile görüntülenen resimleri gösterilmiştir. CL resimlerinde koyu bölgeler kuvvetli ışımaz rekombinasyonun meydana geldiği yerlerdir. Yani bu bölgeler yüksek RC konsantrasyonunun olduğu yerlerdir. Eğer RC merkezlerini ışımaz rekombinasyon merkezleri olarak düşünürsek, RC soğurmasının haritalaması bize baskın ışımaz rekombinasyon merkezinin dağılımı hakkında bilgi verir. Bu merkezlerin foto-quenchi lüminesans verimini artırması lazımdır ki sonuç gerçekte öyledir.

2.3.5 Fiziksel Yapı

Şimdi, RC soğurmasına sebep olan kusur nedir? diye sorabiliriz. Önceki açıklamalarda; RC soğurması, yasak band aralığındaki dislokasyonların oluşturduğu zor alanının neticesi şeklinde düşünüldü (Skolnick, 1984). Dislokasyon zor alanı, yasak band aralığını artırır. Bu da band kenarına yakın bölgelerde RC soğurmasına neden olur. Bu görüş doğru ise, RC soğurmasının tüm sıcaklıklarda gözlenmesi gerekir. Biz biliyoruz ki RC soğurması sadece düşük sıcaklıklarda gözlenebilir. Dolayısıyla, bu görüş doğru değildir.

Diğer bir mümkün açıklama; Negatif olarak iyonize olmuş sığ karbon akseptöründen iletkenlik bandına bir elektronun geçmesi RC soğurmasına neden olduğudur. Fakat, RC soğurması, karbon ve diğer akseptör konsantrasyonunun çok düşük olduğu numunelerde de gözlenmiştir (Brozel ve Skolnick, 1986). Öyleyse, RC merkezi diğer nokta kusurlardan farklı bir kusur olmalıdır.



(a)

500 μm 

(b)

Şekil 2.17 Yarıyalıtkan GaAs'da IR soğurma (a) ve yakın band kenarı kadodoluminesans (b) ile görüntülenen resimler (Tüzemen, 1993)

Optik soğurma ve sitokiyometrik ölçümlerden RC'nin doğasını ayırt etmek zordur. Sitokiyometrik ölçümlerden bu kusurun Ga zenginliği içerdiğini söyleyebiliriz. 1.48 eV'luk fotonlarla alınan foto-iletkenlik ölçümleri ve "Magnetic Circular Dichroism" (MCD) verileri, RC'nin bulk GaAs'da derin, tabii ve foto-quench edilebilir bir kusur olduğunu söyler.

Teorik olarak hesaplanmış arsenik boşluğu iyonizasyon enerjisinin 50meV civarında olması RC'nin arsenik boşluğu ile ilgili bir kusur olduğunu akla getirir. Bu görüşü açıklamak için pozitronun yok olması deneyi yapıldı (Corbel et al.,1988). Bu deneyde kullanılan teknik pozitif yüklü boşluklara hassas değildir. Boşluğun enerji seviyesine göre Fermi enerji seviyesi pozitronun yaşam süresini etkiler. RC merkezleri Fermi enerjisinin üzerinde iken nötrdür. Eğer Fermi enerjisinin altında ise negatif yüklüdür. Nötr As-boşluğu 1.42 eV'den büyük enerjili fotonlarla uyarılırsa negatif yüklenir. Bu olay sadece 20-150 K aralığında gözlemlenir. Bu deneylerin sonucu RC'nin As-boşluğu içerdiği görüşünü destekler.

2.4 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yüksek lisans tezi olarak yapılan bu çalışmada; Katılanmamış yarıyalıtkan GaAs ve Telluryum (Te) katılanmış n-tipi GaAs'da kızıl ötesi soğurma spektrumu 10-300 K aralığında incelendi. Yasak band aralığındaki EL2 ve RC merkezlerinden kaynaklanan soğurmalar üzerinde duruldu. Band kenarına yakın bölgedeki soğurmanın RC merkezlerinden ileri geldiği tespit edilerek bu soğurmanın pik eğrileri ortaya çıkarıldı. Bu piklerin maksimum değerlerinin sıcaklığı bağlı nasıl değiştiği tespit edildi ve 100 K'den yukarı sıcaklıklarda gözlenemedi. RC merkezlerinin iletkenlik bandıyla birleştiği sıcaklık değeri $E_g - E_m$ 'nin sıcaklığa bağlı ekstrapolasyonu kullanılarak bulunmaya çalışıldı. RC ve EL2 merkezlerini ayrı ayrı foto-quench edildi ve bu kusur merkezlerinin konsantrasyonları hesaplandı. Soğurma ve foto-akım verileri birlikte incelenerek RC merkezlerinin merkez-içi (intra-centre) soğurmaya sahip olup olmadığı tespit edilmeye çalışıldı.

3. BÖLÜM

DENEYSEL TEKNİKLER

3.1 Giriş

Bu bölümde katkılanmamış yarıyalıtkan GaAs ve Telluryum (Te) katkılanmış n-tipi GaAs kristallerinde kızıl ötesi soğurma ve foto-quench için numune hazırlama, foto-akım ölçümü için kontak yapımı, deney sistemleri ve ölçülerin alınması hakkında bilgi verilecektir.

3.2 Numune Hazırlama ve Omik Kontak Yapılması

Soğurma ve diğer deneylerde kullanılan numunelerin hepsi külçe haldedir. Katkılanmamış yarıyalıtkan GaAs, Te katkılanmış n-tipi GaAs ve yarıyalıtkan GaAs “bad backgating” numuneleri “University of Manchester Institute of Science and Technology” den temin edilmiştir. Soğurma deneylerinde kullanılmak üzere numune hazırlamada ilave hiçbir işleme gerek olmadığı gibi numuneye zarar verilmediğinden aynı numuneler başka amaçla da kullanılabilir. Soğurma deneyinde kullanılan yarıyalıtkan GaAs numunesinin boyutları $5 \times 5 \text{ mm}^2$, Te katkılanmış n-tipi GaAs numunesinin boyutları $4 \times 6 \text{ mm}^2$ ve yarıyalıtkan GaAs “bad backgating” numunesinin boyutları $7 \times 7 \text{ mm}^2$ ’dir. Bad backgating, MESFET yapısında altlık olarak kullanılan yarıyalıtkan GaAs ile n tipi GaAs arasında deplesyon bölgesi oluşması olayına denir. Bu numuneler, ayna mükemmelliğinde yüzeye sahip olduklarından dolayı herhangi bir mekanik parlatma işlemine tabi tutulmadılar. Kimyasal temizleme işlemi için ise numuneler sırasıyla aşağıdaki işlemlere tabi tutuldular.

1. Ultrasonik banyoda trikloretilen ile 3 dakika yıkandı,
2. Ultrasonik banyoda aseton ile 3 dakika yıkandı,
3. Ultrasonik banyoda metanol ile 3 dakika yıkandı,
4. HCl: H₂O (1:15) bileşiminde 1 dakika bekletildi,

5. Deiyonize su ile iyice temizlendi.

Ultrasonik temizleme yaparken numune kırılğan olduğundan titreşim frekansının düşük olmasına dikkat edilmelidir. Kimyasal temizleme işlemleri bittikten sonra yarıyalıtkan GaAs ve n-tipi GaAs numuneleri, soğurma ölçüleri alınmak üzere kapalı devre helyum kroystata yerleştirildi ve ölçüler 10-300 K aralığında alınmaya başlandı.

Absorbans ölçüleri alındıktan sonra foto-quench deneylerini yapabilmek için infrared bölgede ışık yayan GaAs LED, Perkin Elmer UV/VIS Lambda 2S spektrometresi üzerine uygun konumda yerleştirildi. LED'in uçları arasında 4 volt sabit gerilim uygulandı. Yarıyalıtkan GaAs, n-tipi GaAs ve yarıyalıtkan GaAs "bad backgating" numuneleri üzerinde 15 K sıcaklığında foto-quench ölçüleri ayrı ayrı alındı. Bu ölçülerden sonra foto-akım ölçülerini alabilmek için yarıyalıtkan GaAs numunesi üzerine omik kontak yapma işlemine geçildi.

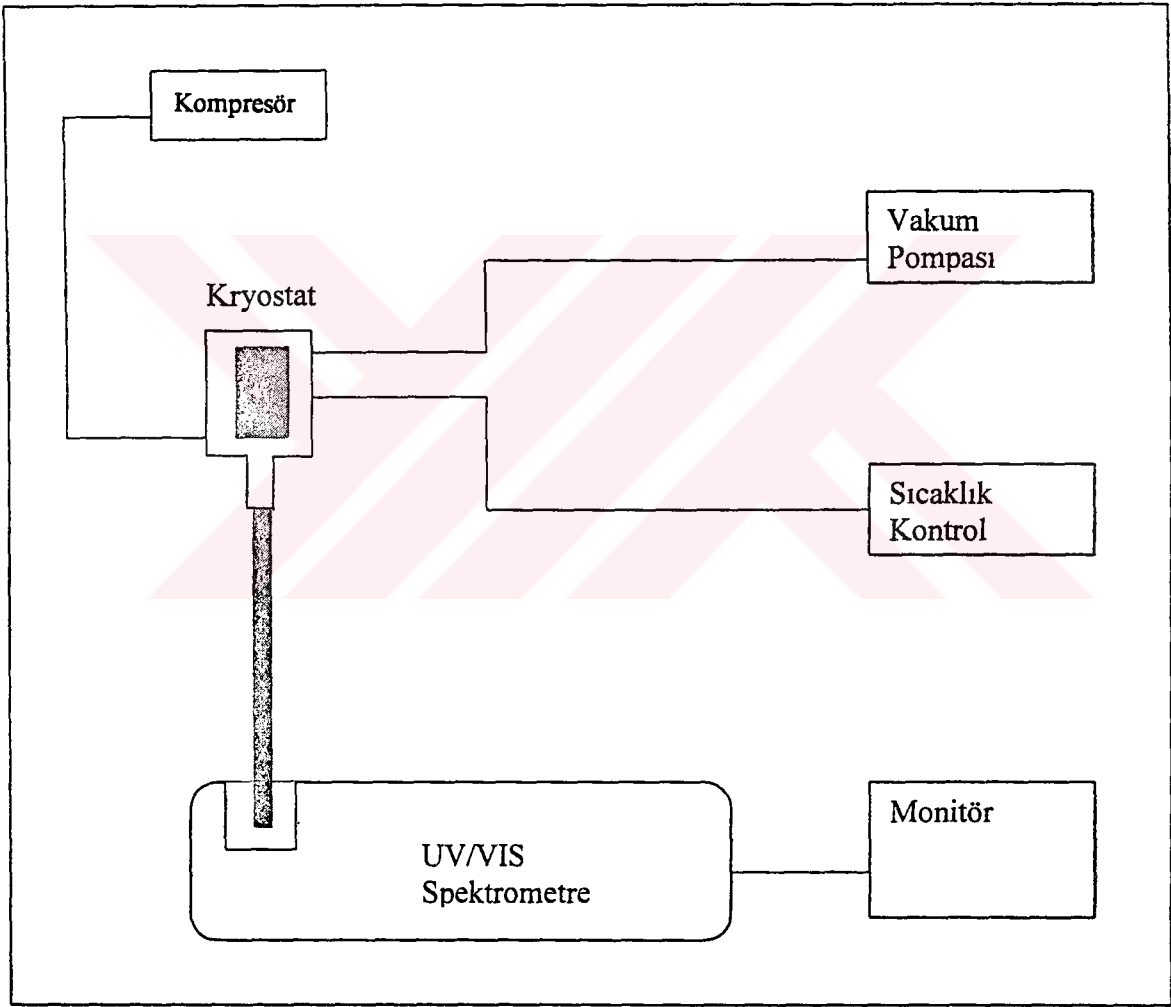
3.2.1 Yarıyalıtkan GaAs'a Omik Kontak Yapılması

Yarıyalıtkan GaAs numunesine nokta kontak yapmak için indiyum elementi küçük parçalar halinde kristalin yanal yüzeylerine tutturuldu. Bu numune, "Edwards High Vacum-Model 6E4 Coating Unit" kaplama ünitesi içerisinde konularak ortamın vakumu 10^{-5} mbar'a kadar düşürüldü. Daha sonra sıcaklık yavaş yavaş artırılmak kaydıyla indiyum elementinin yüzeylere difüze olması sağlandı. Böylece nokta kontak yapımı tamamlandı ve numune foto-akım ölçüleri alınmak üzere numune tutucuya yerleştirildi. Foto-akım ölçüleri "Kiethley 487 picoammeter/voltage source" ölçü aleti ile alındı.

3.3 Infrared Soğurma Tekniği

Yarıiletkenlerin kristal yapısı, yasak band aralığı, kirlilik çeşidi ve konsantrasyonu, fonon enerjilerinin hesap edilmesi, taşıyıcı yoğunluğu, mobilite, direkt ve indirekt yasak band aralığının belirlenmesi gibi yarıiletkeni tanımlayan özellikleri birkaç teknik haricinde genellikle soğurma deneyleri ile yapılır.

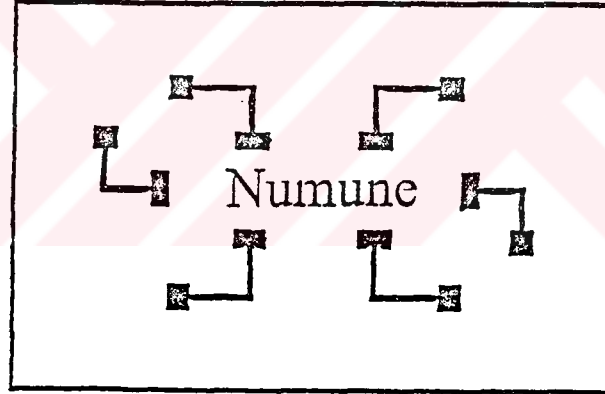
SI-GaAs ve n-tipi GaAs kristalleri üzerinde gönderilen ışığın dalga boyuna bağlı soğurma ölçülerini almak için her iki kristalde numune tutucu yardımıyla kapalı devre helyum kroystatına yerleştirildi. Kapalı devre kroystat, çalışma aralığı dalga boyu cinsinden 190-1100 nm olan Perkin Elmer UV/VIS Lambda 2S spektrometresi içerisine uygun şekilde konumlandırıldı. Spektrometrenin dalga boyu rezulasyonu seçiciliği 2 nm'den daha küçüktür. Sistemin sıcaklığı 10 K'e düşürüldü. Blok diyagramı Şekil 3.1'de gösterilen sistemde sıcaklık 10 K adımlarla artırılarak 300 K'e kadar soğurma ölçüleri her bir numune için ayrı ayrı alındı.



Şekil 3.1 Soğurma ölçülerinin yapıldığı sistemin blok diyagramı

3.4 Foto-Akım

Herbir köşesine indium kontak yaptığımız yarıyalıtkan Ga-As numunesi 0.15-0.20 mm kalınlığa kadar inceltilen pertinaks taban malzeme üzerine vernik yadımı ile yapıştırıldı. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi pertinaks taban malzeme üzerindeki bakır yollar ile numune üzerindeki nokta kontaklar arasındaki bağlantı, indium kontaklar yardımıyla lehim yapılarak sağlandı. Bu işlemlerden sonra numune dışarıya akım yolu veren uçlara lehim yapılarak kapalı devre helyum kroystatına yerleştirildi. Numune iki çapraz uçdan “Kiethley 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazına bağlandı. Kapalı devre helyum kroystat, Perkin Elmer UV/VIS Lambda 2S spektrometresi içerisine uygun şekilde yerleştirildi. Sıcaklık 80 K’e kadar düşürüldükten sonra diğer iki çapraz uç arasına 500 volt sabit gerilim uygulandı. Numune üzerine 818-886 nm dalga boyu aralığında ışık düşürülerek 80, 100, 110, 120,140 ve 180 K sıcaklıklarında foto-akım ölçüleri alındı.



Şekil 3.2 Foto-akım ölçümleri için numune tutucu

3.5 Foto-quench Ölçümü

Yarıyalıtkan ve n-tipi GaAs numuneleri kapalı devre helyum kroystatına yerleştirildi. Perkin Elmer UV/VIS Lambda 2S spektrometresinin üzerine ışınlamada kullanılacak infrared bölgede ışın yayınlayan LED tutturuldu. Kapalı devre kroystat, spektrometrenin içerisine uygun şekilde yerleştirildi. Sıcaklık 15 K’e düşürüldükten sonra uçları arasına 4 volt gerilim uygulanan LED ile numuneler belirli sürelerde ayrı ayrı ışınlanarak; yarıyalıtkan Ga-As için 830 nm ve 1000 nm dalga boylarındaki absorpsiyon, n-tipi Ga-As

içinde 835 nm ve 1000 nm dalga boylarında absorbands değerleri kaydedildi. Tüm bu işlemler SI GaAs (Bad backgating) numunesine de uygulanarak foto-quench ölçüleri alındı.

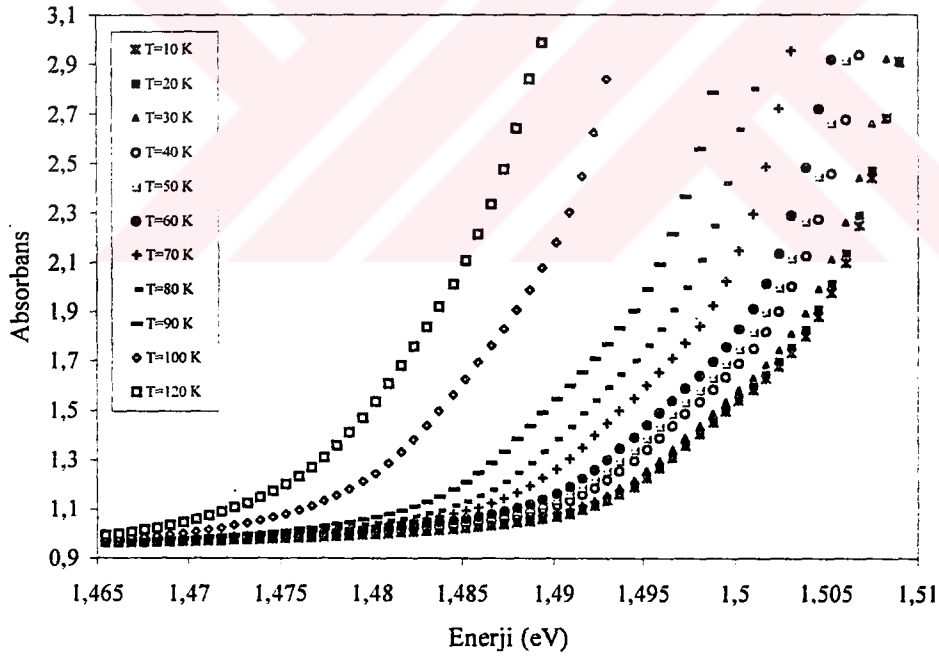


4. BÖLÜM

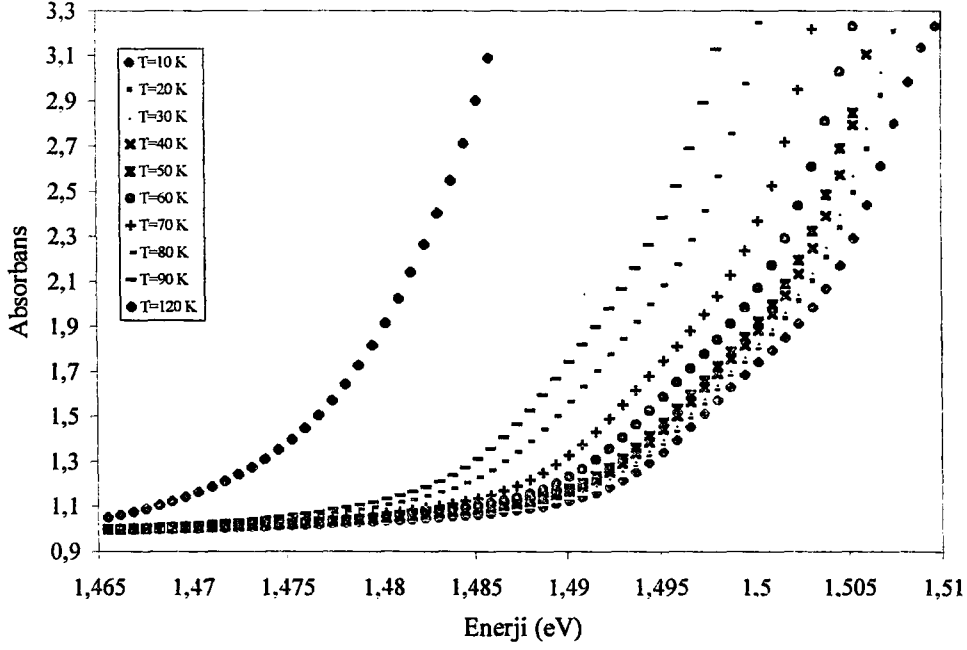
DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Kırmızı Ötesi Soğurma Spektrumu

GaAs'ın yasak band aralığındaki karakteristik soğurmaya iletkenlik bandının 0.70 eV altındaki donörün neden olduğu gösterildi (Sturge,1962). Bu daha sonra EL2 kusuru ile açıklandı (Martin, 1980). 1984 yılında Skolnick, yasak band aralığında band kenarına yakın bölgede ikinci bir soğurmanın daha var olduğunu gösterdi. Şekil 4.1a yarıyalıtkan GaAs numunesindeki 10-100 K sıcaklık aralığında ve 120 K sıcaklığında enerjiye karşılık absorptans değişimlerini göstermektedir. Benzer olarak, Şekil 4.1b'de n-tipi GaAs numunesinde 10-90 K sıcaklık aralığında ve 120 K sıcaklığında enerjiye karşılık absorptans değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.1a SI-GaAs'ın yakın bant kenarı bölgesindeki karakteristik soğurmaya ait spektral absorptans değişimleri

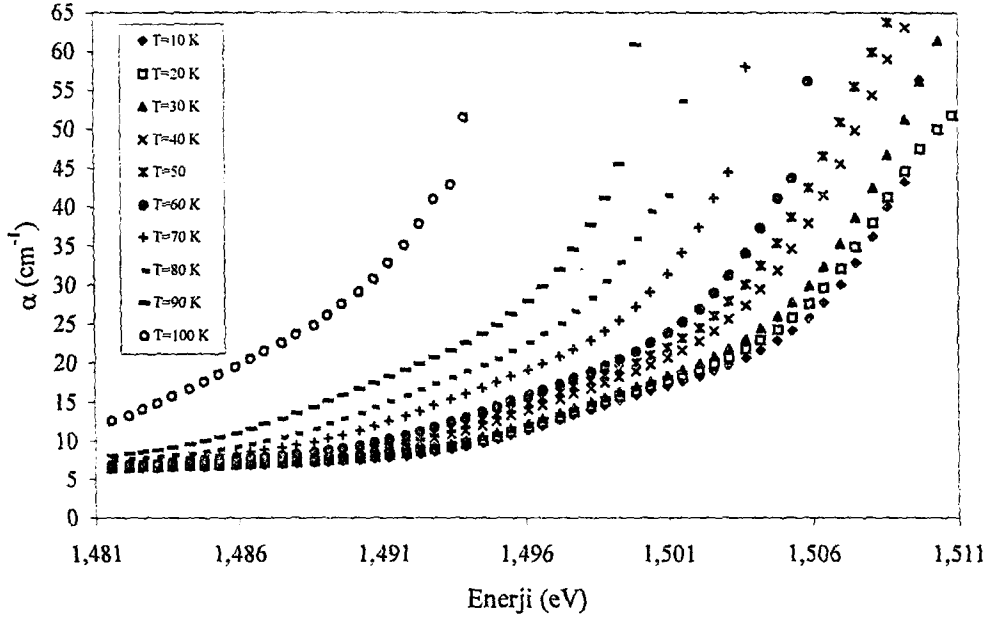


Şekil 4.1b n-GaAs 'ın yakın bant kenarı bölgesindeki karakteristik soğurmaya ait spektral absorbans değişimleri

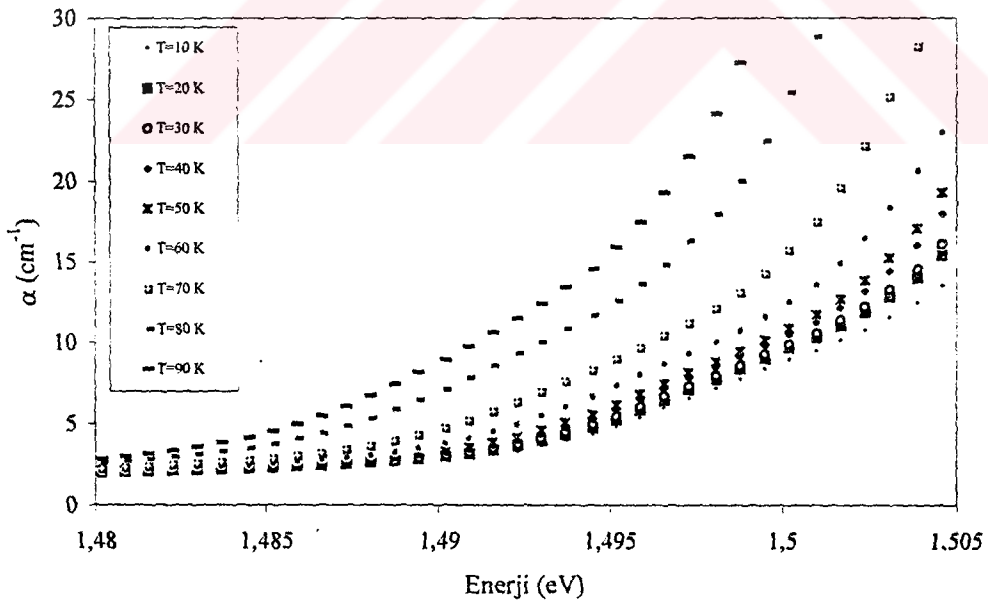
Şekil4.1a ve Şekil4.1b'de T=120 K için spektral değişim, bant kenarına yakın bölgede RC merkezlerinden kaynaklanan soğurmanın olmadığı absorbans değişimini göstermektedir.

Herbir numunenin absorbans verilerini soğurma katsayısı (α) değerlerine dönüştürmek için daha önce Kesim 2.3'de verilen 2.15 eşitliği kullanıldı. Bu numunelerde, yarıyalıtkan ve n-tipi GaAs'ı foto-quench yaptığımızda soğurma katsayısının sıfır olduğu kabul edilerek yansıma katsayıları hesaplandı. Yansıma katsayısı değerleri, (2.15) eşitliğinde yerine yazılarak soğurma katsayısı (α) değerleri bulunmuştur. Soğurma katsayılarının spektral değişimleri de Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b' de görülmektedir.

Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b'de görülen yasak band aralığındaki soğurmalar, EL2 ve RC merkezlerinden ileri gelir. EL2 soğurmasına, EL2 merkezlerinin fotoiyonizasyonu neden olmaktadır (Martin. 1981). RC soğurmasına ise, As boşluğu ile ilgili bir kusurun negatif yük durumuna iyonize olması neden olmaktadır (S. Tüzemen ve M.R. Brozel, 1993).



Şekil 4.2a SI-GaAs' in yakın bant kenarı bölgesindeki karakteristik soğurmaya ait spektral soğurma katsayısı değişimleri



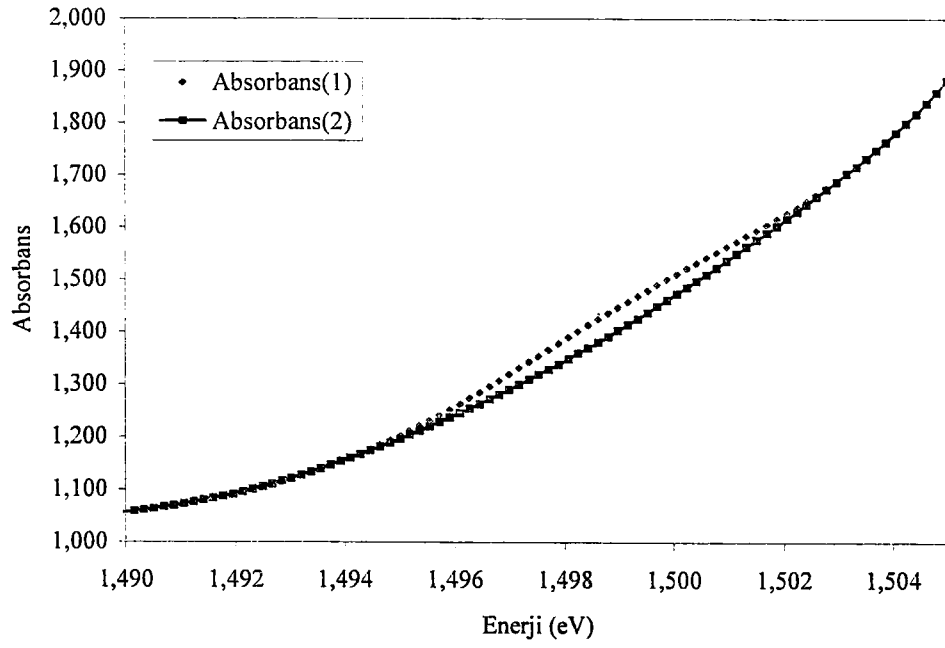
Şekil 4.2b n-GaAs' in yakın bant kenarı bölgesindeki karakteristik soğurmaya ait spektral soğurma katsayısı değişimleri

Her iki numune için yasak enerji aralığı sıcaklık artışına bağlı olarak hesaplandı. Bu hesaplamada $\alpha = \frac{\beta(\hbar\omega - E_g)^M}{\hbar\omega}$ eşitliği kullanıldı. GaAs direk yasak bant aralığına sahip olduğundan $M = \frac{1}{2}$ dir. Bu eşitlikte $(\alpha\hbar\omega)^2 = 0$ alındığında $E_g = \hbar\omega$ olur. $(\alpha\hbar\omega)^2$ 'nin $\hbar\omega$ 'ya göre grafiğinin yüksek enerjili bölgesinde doğrusallaşan eğriye fit edilen doğrunun $\hbar\omega$ eksenini kestiği nokta E_g olarak alındı. Her iki numunede de sıcaklık arttıkça yasak band aralığı daralmaktadır.

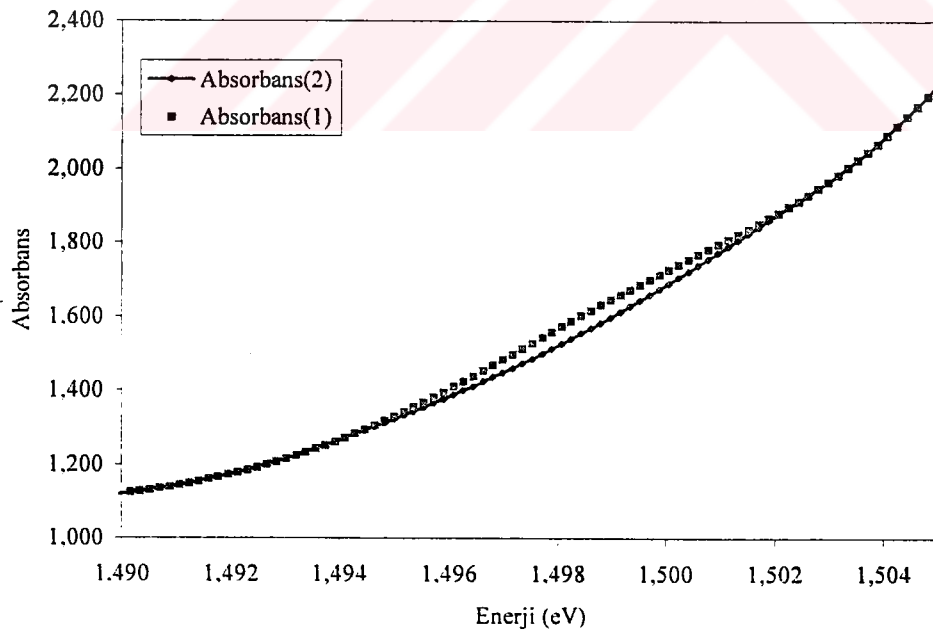
RC merkezlerinden ileri gelen soğurma, soğurma spektrumunun daha kısa dalga boylu bölgesindedir. Bu merkezlerin absorpsiyon pikleri Şekil 4.3a ve Şekil 4.3 b'de gösterilen karakteristik değişimler yardımıyla bulunmuştur. Burada Absorbans(1) deneysel verilerle elde edilen spektrumu, Absorbans(2) ise RC merkezlerinden kaynaklanan absorpsiyon değerlerinin olmadığı durum için deneysel olarak elde edilmiş verilere ikinci dereceden polinom tipinde bir eğrinin fit edilmesi ile oluşan spektrumu göstermektedir. Fit işleminde deneysel verilere fit edilen eğrinin hata kareler toplamının %5 veya daha küçük olmasına dikkat edilmiştir.

Şekil 4.4 a ve Şekil 4.4 b'de gösterilen absorpsiyon pikleri deneysel veriler ile fit edilen eğri arasındaki farklar yardımıyla elde edilmiştir.

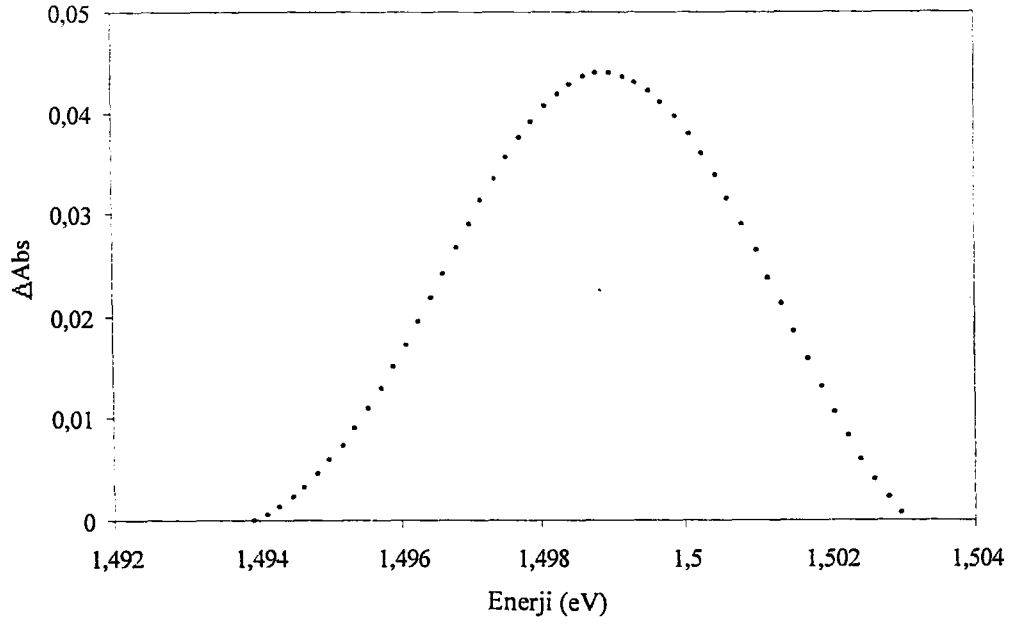
Bu karakteristik piklerin maksimum enerji değerleri (E_{max}), piklerin maksimum absorpsiyon değerlerine karşılık gelen değerlerdir. Bu değerler (E_{max}), hem yarıyalıtkan hemde n-tipi numuneler için ayrı ayrı elde edildi. E_{max} değerlerinin sıcaklık arttıkça yasak enerji aralığında olduğu gibi azaldığı gözlenmiştir. Pikler, yarıyalıtkan GaAs numunesinde 100 K'dan; n-tipi GaAs numunesinde 90 K'dan yüksek sıcaklıklarda gözlenememiştir. E_{max} değerleri yarıyalıtkan GaAs için 1.499 eV'den 1.485 eV'a; n-GaAs için 1.499 eV'dan 1.490 eV'a azalmaktadır. Sıcaklığa bağlı E_{max} değerlerinin değişimi Şekil 4.5a ve Şekil 4.5b de görülmektedir.



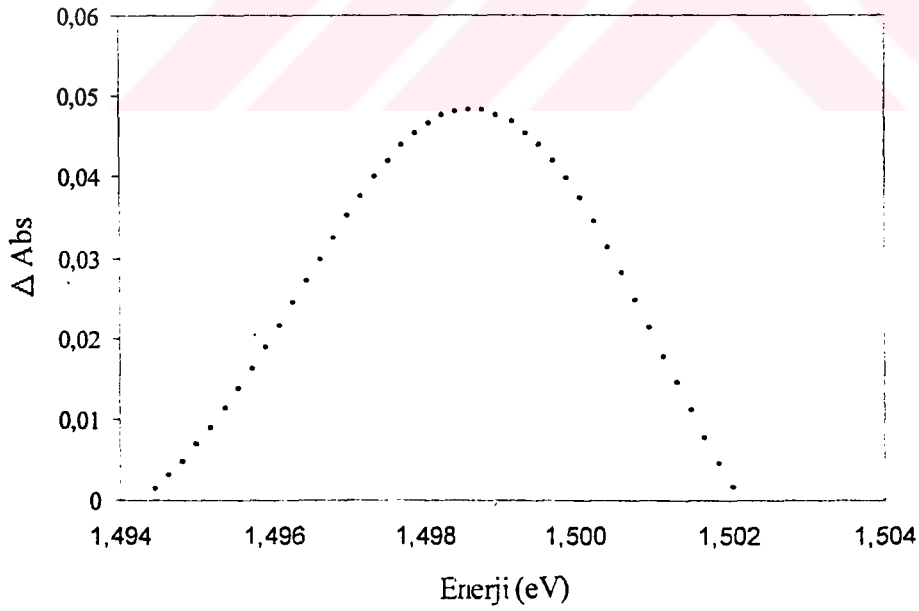
Şekil 4.3 a SI-GaAs'da deneysel veriler ve fit edilen eğri ile elde edilen absorbanans değışimleri



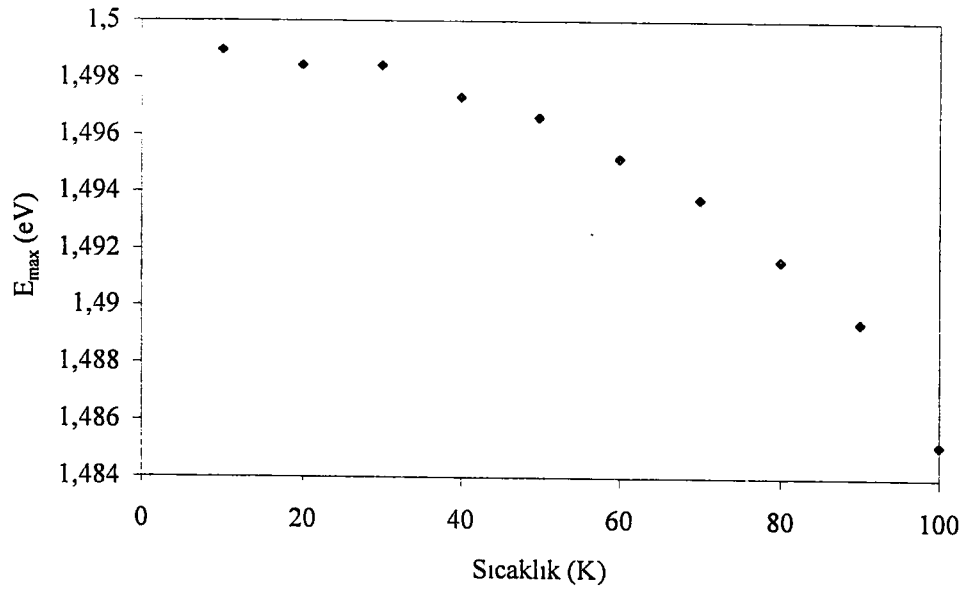
Şekil 4.3 b n-GaAs'da deneysel veriler ve fit edilen eğri ile elde edilen absorbanans değışimleri



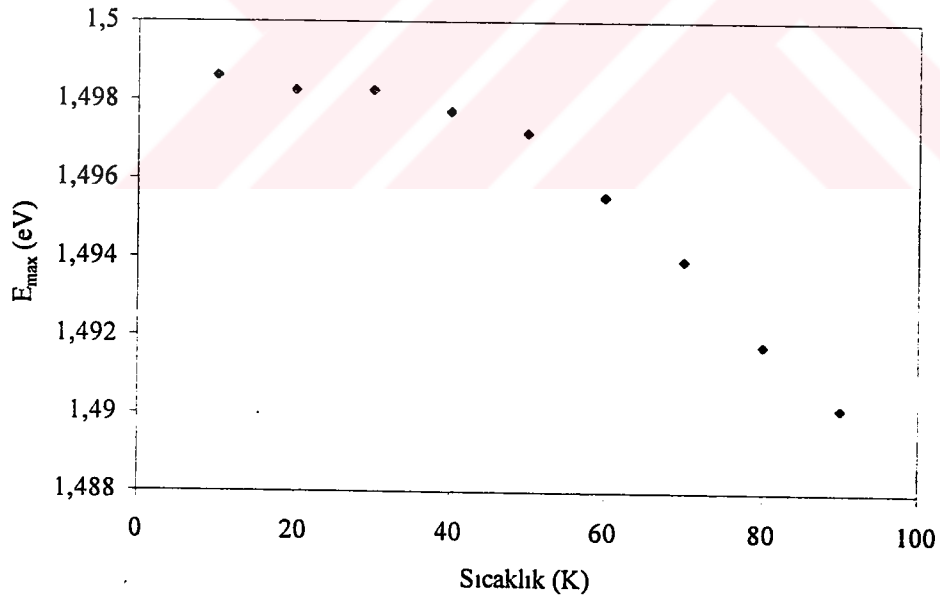
Şekil 4.4 a SI-GaAs'da $T=10$ K'da deneysel veriler ve fit edilen eğri arasındaki farklar ile elde edilen absorbanz piki



Şekil 4.4 b n-GaAs'da $T=10$ K'da deneysel veriler ve fit edilen eğri arasındaki farklar ile elde edilen absorbanz piki



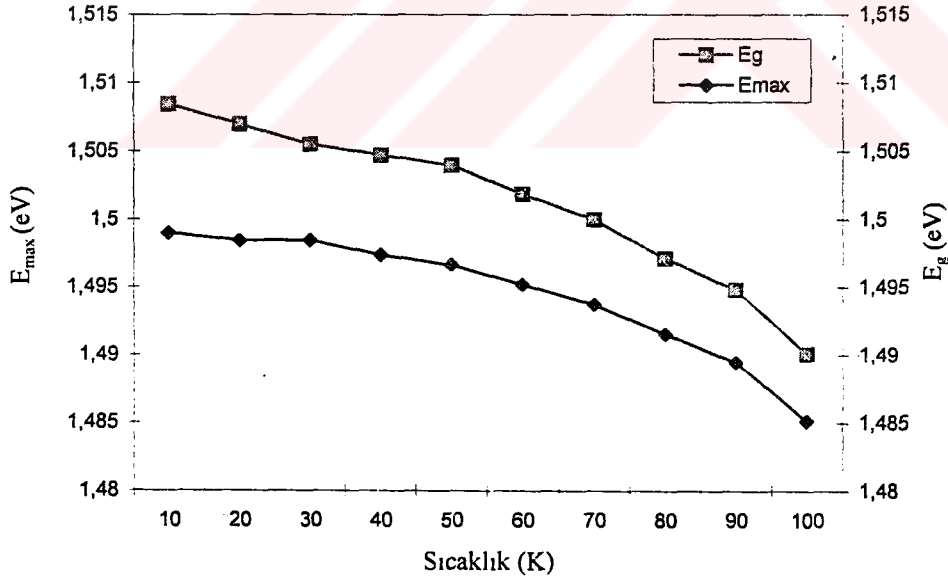
Şekil 4.5 a SI-GaAs' da sıcaklığa bağlı E_{\max} değişimi



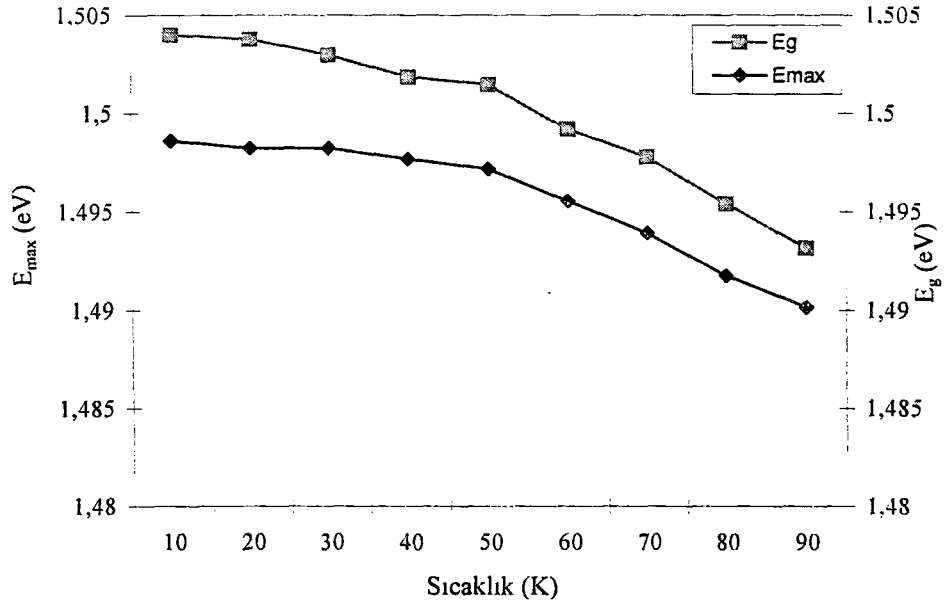
Şekil 4.5 b n-GaAs' da sıcaklığa bağlı E_{\max} değişimi

E_g ve E_{max} 'ın ikili grafiği Şekil 4.6 a ve Şekil 4.6 b' de gösterilmiştir. E_{max} değerleri, E_g değerlerinin hemen altında yer almaktadır. Her iki nicelik de sıcaklık arttıkça azalan bir değişim göstermektedir.

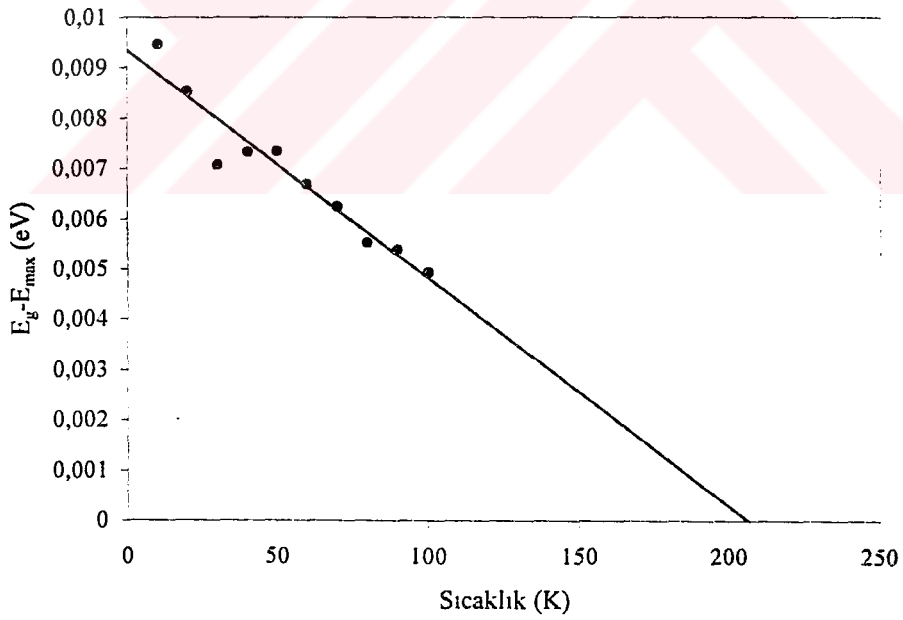
Hesapladığımız E_g - E_{max} değerleri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Tüm E_g - E_{max} değerleri 50 meV'den küçüktür. Bu değerler, Tüzemen ve Brozel'in 1990'da gözlemlediği 4 K'da 50 meV olan RC soğurması ile uyumaktadır. E_g - E_{max} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimini temsil eden doğrunun n-tipi GaAs ve yarıyalıtkan GaAs için sıcaklık eksenini 200 K civarında kestiği görülmektedir. Bu durum; n-tipi ve yarıyalıtkan GaAs'da RC merkezlerinin enerji seviyelerinin 200 K'da iletkenlik bandı ile birleştiği, şeklinde yorumlanabilir. Şekil 4.7 a ve Şekil 4.7 b'de E_g - E_{max} 'ın sıcaklığa bağlı değişimi ve bu değişime fit edilen doğrular görülmektedir. Bu doğrular, en küçük kareler metoduyla fit edilen yarıyalıtkan GaAs için ($y = -4,5.10^{-5}x + 9,34.10^{-3}$) ve n-tipi GaAs için ($y = -2,89.10^{-5}x + 5,70.10^{-3}$) formunda doğrulardır. Doğruların deneysel veriler ile korelasyonu SI-GaAs' da 0,96 ve n-GaAs' da 0,95 dir.



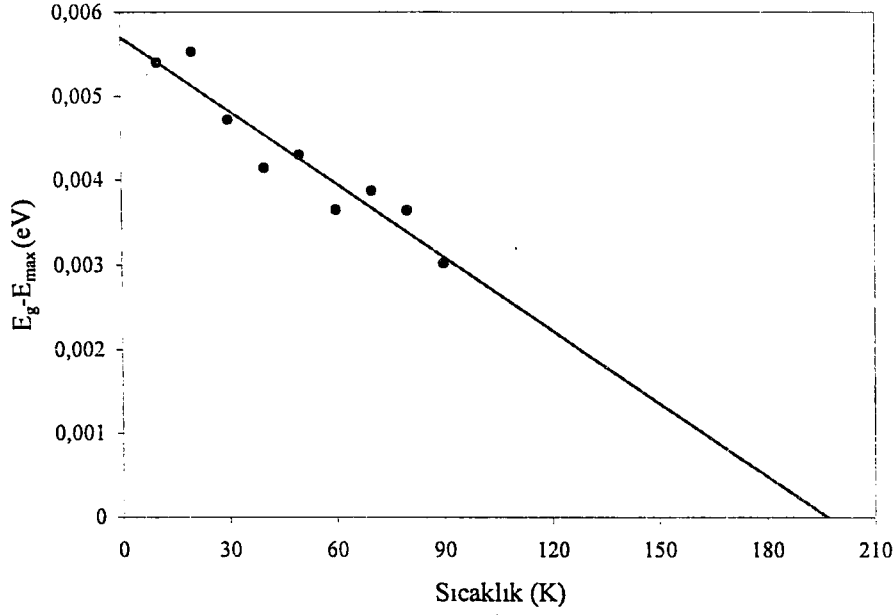
Şekil 4.6 a SI-GaAs'da E_g ve E_{max} 'ın sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.6 b n-GaAs'da E_g ve E_{max} 'in sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.7 a SI-GaAs'da $E_g - E_{max}$ 'in sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.7 b n-GaAs'da $E_g - E_{max}$ 'ın sıcaklığa bağlı değişimi

Yarıyalıtkan GaAs, n-GaAs ve yarıyalıtkan GaAs “badbackgating” numunelerinde [EL2] ve [RC] merkezlerinin konsantrasyonunu Martin (1981) ve Tüzemen (1993) kalibrasyonu kullanılarak hesaplandı. Hesaplanan değerler Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Tablo 4.1’de de görüldüğü gibi yarıyalıtkan GaAs”badbackgating” de [RC] konsantrasyonu yalıtkan GaAs’a göre yaklaşık iki kat daha fazladır.

Tablo 4.1 SI-GaAs, n-GaAs ve SI-GaAs (B.B.G)

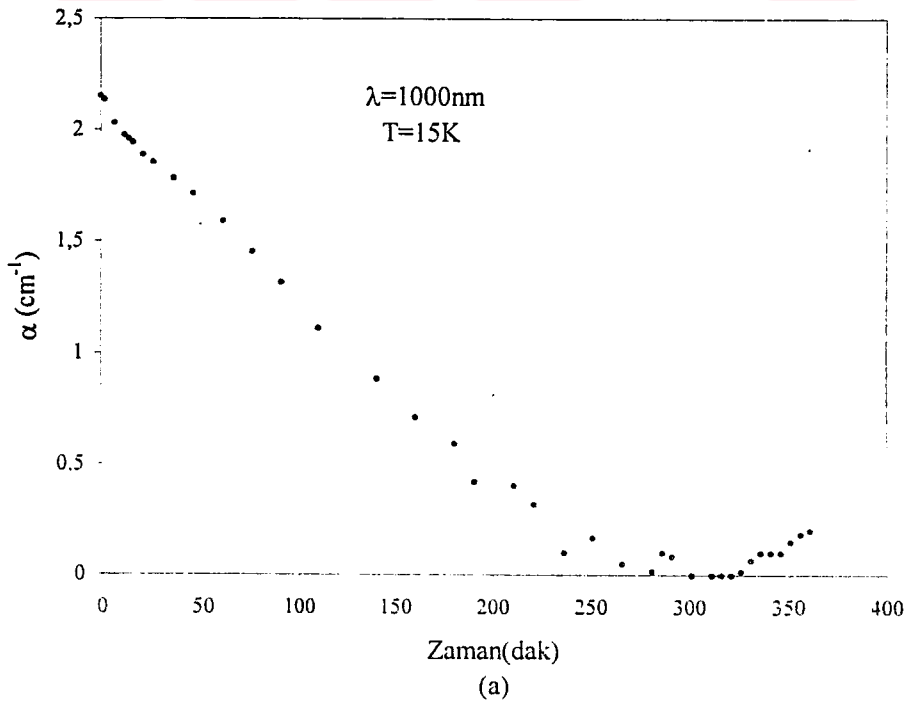
Numuneler	[EL2] (cm^{-3})	[RC] (cm^{-3})
n-GaAs	$1,5 \times 10^{16}$	$1,0 \times 10^{15}$
SI-GaAs	$2,7 \times 10^{16}$	$1,2 \times 10^{15}$
SI-GaAs(badbackgating)	$2,2 \times 10^{16}$	$2,5 \times 10^{15}$

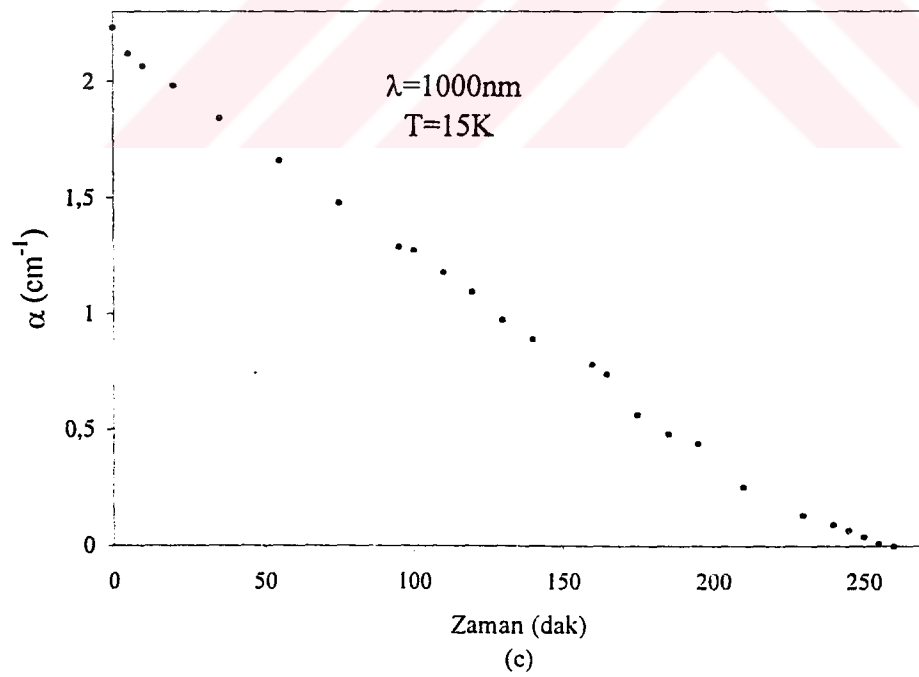
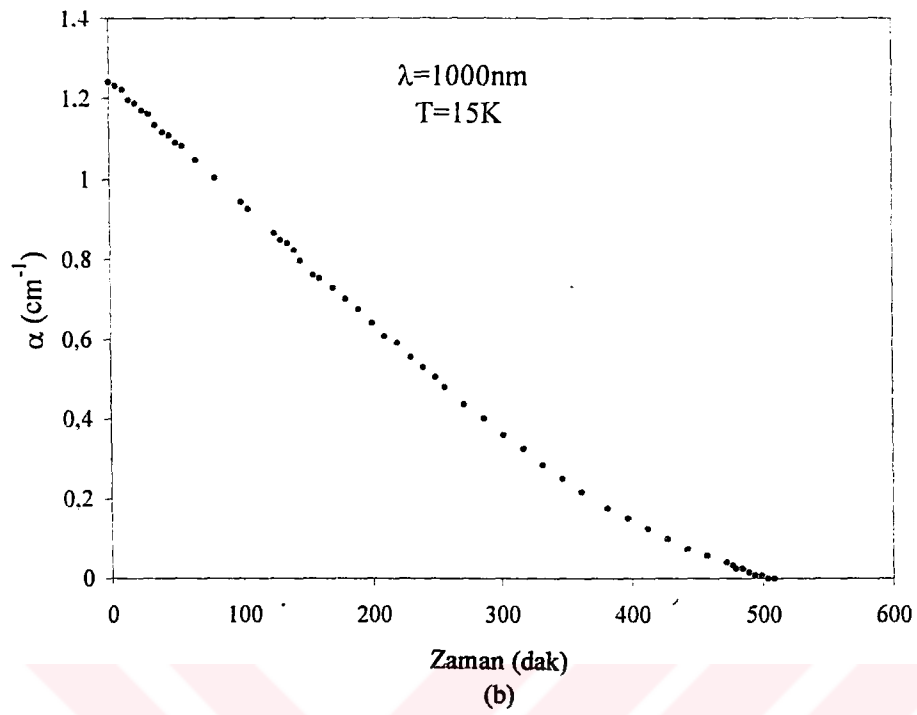
4.2 EL2 ve RC Merkezlerini Foto-quench Yapma Ölçüleri

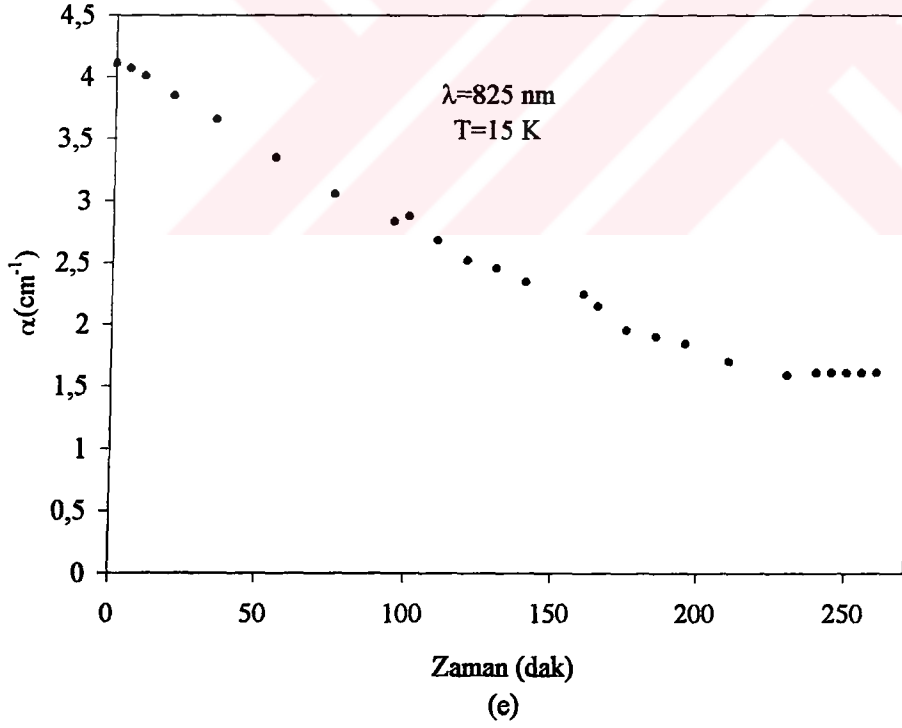
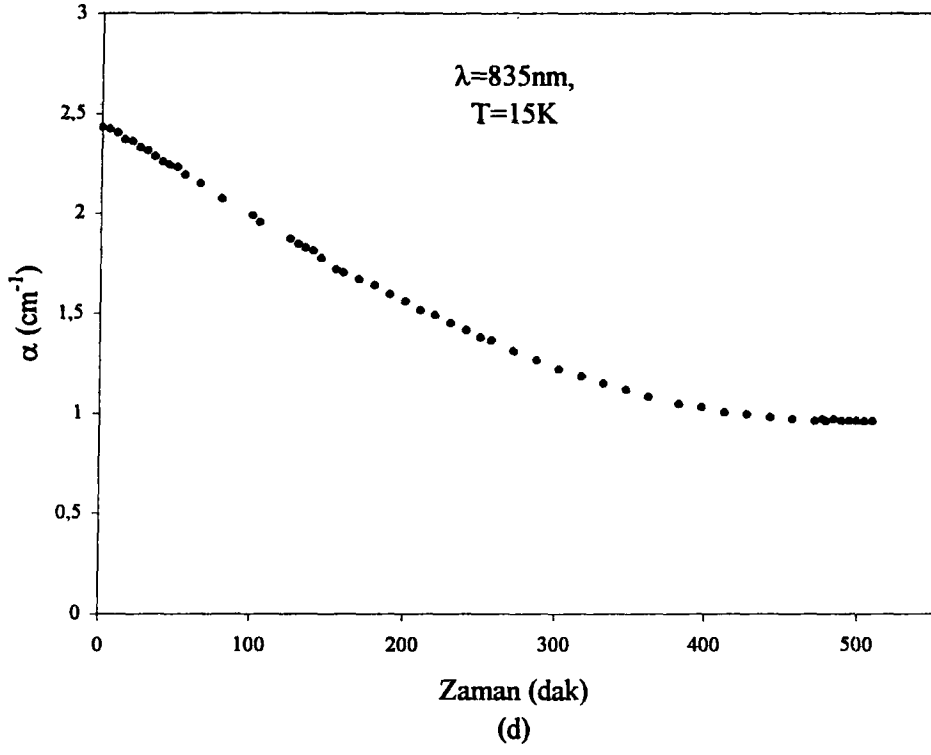
EL2 ve RC merkezlerini ayrı ayrı foto-quench yapabiliriz. Bu kesimde; bu özelliği. yaptığımız deneylerle göstermeye çalışalım. Foto-quench ölçüleri için yarıyalıtkan

GaAs, n-tipi GaAs ve yarıyalıtkan GaAs “badbackgating” numuneleri kullanıldı. Aydınlatma infrared bölgede ışık yayınlayan GaAs LED kullanılarak sağlandı. Numunelerin hepsinde ölçüler 15 K’da alındı. Numuneler ışınlanmadan önce 830nm, 835nm ve 1000nm dalga boylarında absorbands değerleri kaydedildi. Daha sonra belirli sürelerde aydınlatma yapılarak absorbands değerleri kaydedildi. Bu değerler (2.15) eşitliği kullanılarak soğurma katsayısı (α) değerlerine dönüştürüldü. Soğurma katsayısının zamana göre değişimi Şekil 4.8 (a), (b), (c), (d) ve (e)’de gösterilmiştir. Bu şekillerde 830nm ve 835nm dalga boylu ışınlar RC merkezlerinin soğurmasını, 1000nm dalga boylu ışın ise EL2’nin soğurmasını göstermektedir. Her üç numunede; hem EL2 soğurması hemde RC soğurması aydınlatma süresi arttıkça azalmaktadır. Belirli bir süre sonra foto-quench durumunda, EL2 merkezlerinin soğurması minimumda sıfır olur. RC merkezlerinin soğurması ise azalarak belirli bir minimum değerine ulaşır ve bu değerde sabit olarak devam eder. Böylece, EL2 ve RC merkezleri ayrı ayrı foto-quench yapılıır.

Foto-quench olma durumu; elektronun, örgü ile kuvvetli etkileşim içinde olan kusur seviyesinden farklı k değerine sahip daha yüksek enerjili metastable seviyeye geçmesidir. Böylece kusur elektriksel ve optiksel olarak aktifliğini kaybeder.







Şekil 4.8 (a) SI-GaAs, (b) n-GaAs, (c) SI-GaAs “badbackgating”, (d) n-GaAs ve (e) SI GaAs “badbackgating” numunelerinde foto-quench ölçümleri

EL2 foto-quenchinin geometrik anlamını şöyle açıklayabiliriz; galyum yerine oturmuş arsenik atomu (EL2), en yakın komşu dört arsenik atomu ile bağ yapmıştır. Metastable seviyeye geçerken arsenik atomu bu bağlardan birini koparır ve geride Ga boşluğu bırakarak arayere geçer. Metastable seviyedeki arsenik arayer atomu önceki seviyesine göre daha yüksek enerjilidir.

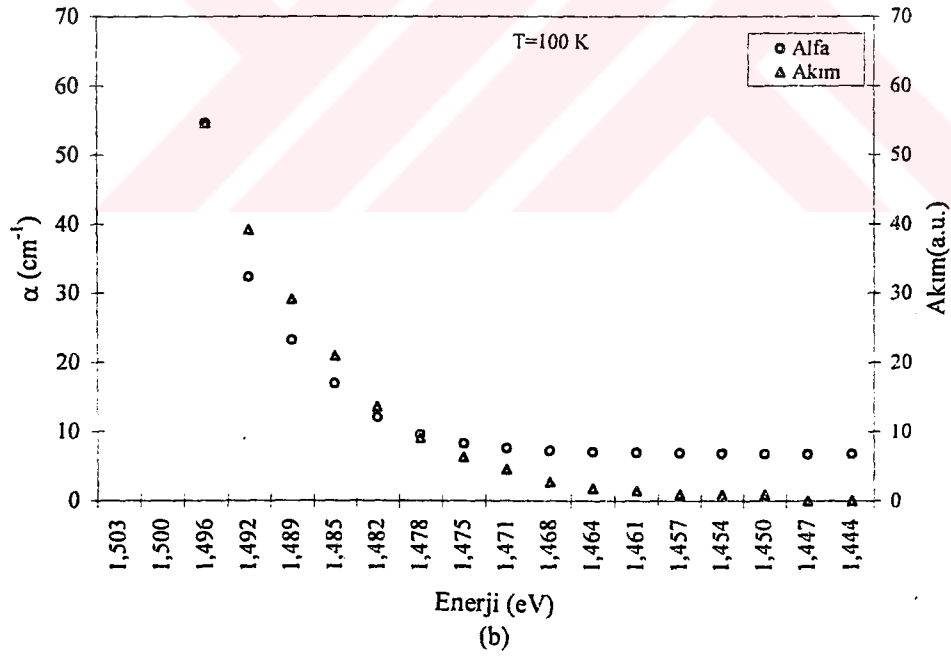
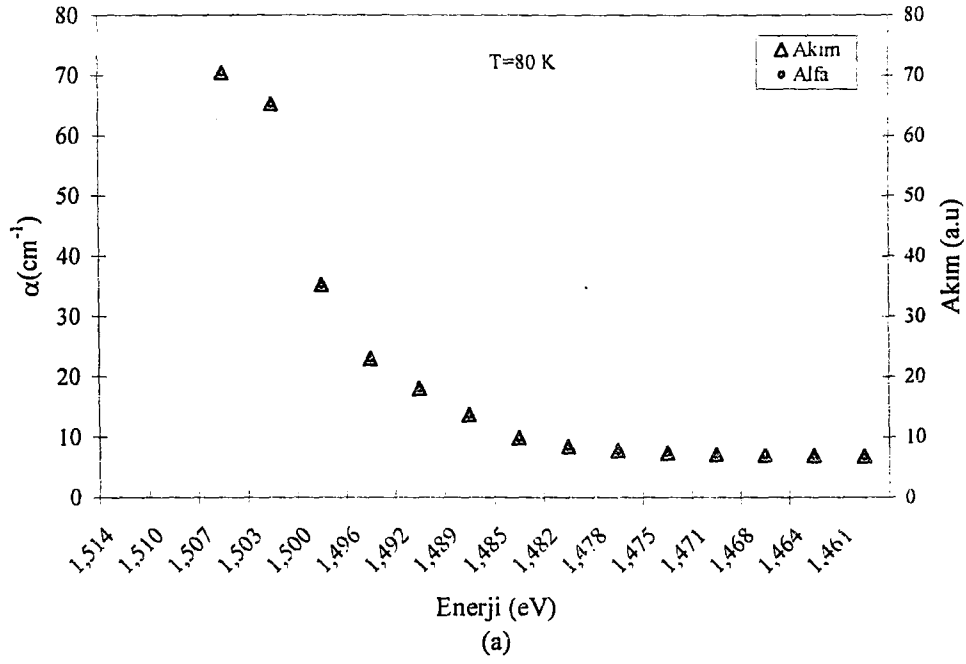
RC merkezlerinin ışığı soğurmasının nedeni, As-boşluğunun nötr durumdan negatif duruma geçmesi yada pozitif yük durumundan negatif yüklü duruma geçmesidir. Bu merkezlerin foto-quench olmasını As-boşluğunun metastable duruma geçmesi şeklinde söyleyebiliriz. Yalnız, bu olayın geometrisi hakkında şu anda bir şey söyleyemiyoruz.

EL2 merkezleri en verimli şekilde 1.15 eV enerjili fotonlarla fotoquench olmaktadır. RC merkezleri için böyle bir değer veremiyoruz.

4.3 Foto-Akım Ölçümleri

Foto-iletkenlik, numunenin fotonlarla uyarılması sonucu valans bandından ve kusur seviyelerinden elektronların iletkenlik bandına geçmesiyle yada valans bandından kusur seviyelerine geçen elektronların geride bıraktıkları boşlukların hareketiyle meydana gelir. Mükemmel bir kristalde sadece valans bandından iletkenlik bandına elektronların geçişi söz konusudur. Dolayısıyla, numuneye gönderilen fotonların enerjisi yasak band aralığından daha küçük olmamalıdır. Daha küçük enerjili fotonlar ise kusur seviyelerinden iletkenlik bandına elektronların geçmesine neden olabildiği gibi valans bandından kusur seviyesine elektronların geçişine de neden olabilir. Gönderdiğimiz fotonun enerjisine göre o bölgedeki kusur seviyelerinden elektron koparmak mümkündür.

Kaminska (1983), EL2'nin spektral foto-akım ve soğurma ölçülerini birlikte inceleyerek 1.03 eV ve 1.32 eV enerji aralığında soğurma olmasına rağmen foto-akımda aynı şekilde paralel artış olmadığını görmüş ve bu olaya EL2'nin merkez-içi (intra-centre) soğurmasının neden olduğunu söylemiştir (Şekil 2.10).



Şekil 4.9 a ve b SI-GaAs'da Soğurma ve Foto-akımın spektral değişimi

Farklı sıcaklıklarda aldığımız soğurma ve foto-akımın spektral değişimi Şekil 4.9a ve b'de gösterilmiştir. Numuneye gönderilen ışığın dalga boyu 818 nm ve 866 nm arasındadır. Bu değerler, daha önce belirttiğimiz RC merkezlerinin enerji seviyelerini içine alan değerlerdir. Dolayısıyla elektronların valans bandından maksimum sayıda geçeceği seviyeler RC seviyeleridir. Soğurma ve foto-akımın ikili spektral değişiminde gördüğümüz gibi soğurma katsayısının artışına paralel olarak foto-akım değerleri artmakta ve soğurmanın maksimum değerine karşılık foto-akım değeri de maksimum olmaktadır. Bu durum bize RC merkezlerinin merkez-içi (intra-centre) soğurmaya sahip olmadığını gösterir. Bugüne kadar RC merkezlerini merkez-içi soğurmaya sahip olduğuna dair herhangi bir kanıt gösterilememiştir. Burada sıcaklık arttıkça RC merkezlerinden ileri gelen maksimum soğurmanın ve bu soğurmaya karşılık gelen enerji değerlerinin de azaldığını ilave edelim. Bu durum, kırmızı ötesi soğurma bölümünde değindiğimiz RC merkezlerinden ileri gelen soğurma E_{max} 'larının sıcaklık arttıkça azaldığı sonucu ile uyum içindedir.

5. BÖLÜM

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, yakın bant kenarı optik özellikler hem yarıyalıtkan GaAs'da hem de telluryum (Te) katkılanmış n-tipi GaAs'da araştırıldı. Önce, 10-300 K aralığında EL2 ve yakın bant kenarı bölgesinde soğurma veren RC merkezlerinin soğurma spektrumu elde edildi. Sonra bu merkezler foto-quench yapıldı ve RC merkezlerinin neden olduğu soğurma ve foto-akım değerleri ölçüldü.

Katkılanmamış GaAs'ın en önemli özelliklerinden biri yarıyalıtkan davranış göstermesidir. LEC tekniği ile büyütülen GaAs'ın, istenmeyen nedenlerden karışan karbon (C)ve çinko (Zn) gibi sığ akseptörler nedeniyle p-tipi olarak büyümesi beklenirken, bu akseptörlerin derin donör olan EL2 tarafından telafi edilmesiyle yarıyalıtkan olarak büyür. Yarıyalıtkan GaAs'da Fermi enerji seviyesi $E_c-0.8$ eV'de ve numune öz direnci $10^6-10^8 \Omega$ cm civarındadır. Bu değerler sığ akseptörlerin yoğunluğuna bağlıdır.

Yarıyalıtkan GaAs wafer boyunca direnç değeri homojen değildir. Bu özellik, numuneyi büyütme teknikleri, stokiometrik özellikler ve büyütme sonrası yok etme işlemlerine bağlıdır. Külçe GaAs kristalinde dislokasyon yoğunluğu, iyon ekme metodu ile üretilen alan etkili transistör'ün (FET) özelliklerini etkiler. MESFET özellikleri de yasak band aralığındaki doğal donör ve dislokasyon yoğunluğundan etkilenir. Burada, EL2'nin haritalanması önemlidir. GaAs numunesi üzerine gönderdiğimiz infrared bölgedeki 1000 nm dalga boylu ışığın fazla soğrulduğu bölgede EL2 yoğunluğu fazladır. Soğurulmanın az olduğu yerde de EL2 yoğunluğu azdır.

EL2 kusurları, yasak band aralığında sıcaklık 300 K'de iken dalga boyu $1.5 \mu\text{m}$ 'den band kenarına $0.85 \mu\text{m}$ 'e uzanan aralıkta kırmızı ötesi ışığı soğurmaya neden olur (Martin, 1981). Bu merkezlerin kırmızı ötesi ışığı soğurması, foto-nötralizasyondan ziyade foto-iyonizasyon ile mümkün olmaktadır. Numune ışığı soğururken EL2 merkezlerinde bulunan elektronlar, iletkenlik bandının birinci Brillouin bölgesindeki

minimum noktalarına (Γ, X, L) geçer. Nötr EL2 seviyesinden 0.8 eV yukardaki Γ noktasına elektronun geçişi direk olmaktadır. Nötr EL2 seviyesinden yukardaki 1.0 eV ve 1.3 eV enerjili L ve X noktalarına elektronların geçişi fonon yardımlıdır.

Yarıyalıtkan GaAs ve n-tipi GaAs'ın soğurma spektrumlarındaki benzerliğide yukardaki bilgilerin ışığı altında şöyle açıklamak mümkündür; EL2'nin enerji seviyesi, p-tipi numunede Fermi enerjisinden yukarda ve EL2 merkezleri pozitif yüklüdür. Yarıyalıtkan numunede Fermi enerji seviyesi ve EL2 enerji seviyesi yasak band aralığının ortasına yerleşmiştir ve nötr ve pozitif yüklü EL2'ler vardır. n-tipi numunede ise Fermi enerji seviyesi EL2 seviyesinden yukarda ve EL2'ler nötrdür. Bu merkezler, n-tipi ve yarıyalıtkan numunede, ışığı soğururken EL2'lar iyonlaşacaktır. Yani, soğurma olayı her iki numunede de foto-iyonizasyon ile olduğundan soğurma spektrumları birbirine benzeyecektir (Şekil 4.2a ve b).

Yasak band aralığında ikinci bir soğurmaya neden olan kusur RC merkezleridir (Skolnick, 1984). Bu kusur EL2 soğurması ile antikorele soğurma verdiğiinden Reverse-Contrast (RC) olarak adlandırılır. RC soğurması, soğurma spektrumunun daha kısa dalga boylu bölgesindedir. Bu soğurma, Arsenik boşluklarının (RC) nötr yük durumundan negatif yük durumuna iyonize olması ile meydana gelir. RC soğurmasının yakın band kenarı bölgesinde 4K sıcaklıkta iletkenlik bandının minimumundan yaklaşık 50 meV'a kadar uzadığı gözlemlenmiştir (Brozel ve Tüzemen,1993). RC merkezlerinin absorpsiyon pikleri Şekil 4.4a ve b'de görülmektedir.

Maksimum soğurmaya karşılık gelen E_{max} değerlerini elde edebiliriz. Bu E_{max} değerleri her iki kristalde sıcaklık artışına bağlı olarak 10 K'da 1.499 eV' dan 100 K'da 1.485 eV'a değişir. Burada E_{max} değerleri RC merkezlerinin yakın band kenarı bölgesinde en verimli soğurmaya verdiği foton enerjilerini gösterir. Bu değerlere bağlı olarak iletkenlik bandının altındaki RC merkezlerinin enerji seviyeleri hakkında bilgi edinebiliriz. Maksimum pik değerleri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu pikler, yarıyalıtkan GaAs'da 100 K'dan sonra; n-tipi GaAs'da 90 K'dan sonra gözlenemedi.

Şekil 4.4a ve b'deki soğurma piklerinin birbirine benzediğini görüyoruz. Ancak, RC merkezlerinin n-tipi GaAs kristalinde negatif yüklü ve yarıyalıtkan GaAs kristalinde nötr olduğundan dolayı soğurma piklerinin farklı olması beklenebilir. Bununla birlikte soğurma ölçümü esnasında numune üzerine ışık düştüğünden n-tipi numunelerde de bu merkezlerin çoğunun nötr hale geçtiği bir denge durumu düşünülmektedir.

Yarıyalıtkan ve n-tipi GaAs kristallerinde sıcaklığa bağlı E_g-E_{max} değerleri elde edildi. Bu değerlere en küçük kareler metodu ile fit edilen doğrunun her iki numunede de sıcaklık eksenini 200 K civarında kestiği görüldü. Bu sıcaklık değerleri RC seviyelerinin iletkenlik bandıyla birleştiği değerlerdir. n-GaAs kristalinde 200 K değeri Hall ölçümleriyle gözlenen sıcaklığa bağlı taşıyıcı konsantrasyonu grafiğinden tesbit edilen sonuçlar ile uyumludur (Tüzemen v.d., 1999).

EL2 soğurmasının yüksek olduğu yerlerde RC konsantrasyonu düşüktür. Çünkü bu iki kusurun soğurma şiddeti arasında anti-korele durum var. EL2 soğurmasının yüksek olduğu yerlerde RC soğurması zayıf, RC soğurmasının yüksek olduğu yerlerde EL2 soğurması zayıftır. EL2 konsantrasyonu ve RC soğurması arasındaki anti korele durum pek çok yazar tarafından gözlenmiştir (Skolnick,1984; Brozel ve Skolnick, 1986). Tüzemen ve Brozel 1992'de arsenik bakımından zengin olan numunelerde daha yüksek EL2 konsantrasyonu, galyum zengin numunelerde daha yüksek RC konsantrasyonu ve daha düşük EL2 konsantrasyonu aldığını bulmuşlardır. Bu sonuçlar bize EL2'nin arsenik zengini kusurlar olduğunu, RC'nin galyum zengini kusurlar olduğunu gösterir.

EL2 ve RC'nin farklı iki kusur olduğunun delillerinden biriside farklı enerjilere sahip fotonlarla foto-quench edilebilmeleridir. Biz EL2 ve RC merkezlerinin ayrı ayrı foto-quench edilebileceğini deneylerle gözlemledik. Yarıyalıtkan GaAs, n-tipi GaAs ve yarıyalıtkan GaAs "badbackgating" kristalleri üzerinde EL2 ve RC merkezlerinin foto-quenchi ayrı ayrı gözlemlendi. Her iki kusur seviyeside farklı dalga boylarına sahip fotonlarla foto-quench olduğu görüldü. Ayrıca bu durum soğurmanın sıfır olması anlamına geldiğinden buradan numuneden geçen ışık miktarı ve yansıyan ışık miktarı hesaplandı. EL2 merkezlerini maksimum verimde foto-quench yapan fotonlar 1.18 eV enerjili fotonlardır. RC merkezlerini maksimum foto-quench yapan fotonların enerji

değerini bilmiyoruz. Her üç kristalin de foto-quench ölçüleri 15 K sıcaklığında alındı. EL2'nin foto-quenchi 120 K'dan yukarı sıcaklıklar da, RC'nin foto-quenchi de 45 K'dan yukarı sıcaklıklarda gözlenememektedir. Buradan bu iki kusur farklıdır diyebiliriz.

EL2 ve RC merkezlerinin foto-quench olması yani elektriksel ve optiksel olarak aktif olmayan metastable seviyeye geçmesinin atomik modeli nedir? diye sorabiliriz. EL2 kusurunda galyum yerine oturmuş arsenik atomu en yakın 4 As atomu ile bağ yaparak tetrahedral yapı oluşturmuştur. As_{Ga} atomu bağlardan birini koparır ve geride Ga boşluğu bırakarak arayere geçer. Bu olaya EL2'nin metastable seviyeye geçmesi denir. RC merkezlerinin metastable seviyeye geçmesinin ne anlama geldiği konusunda şu an da açık bir fikrimiz yoktur. Bu konu şimdilik anlaşılmış değildir.

Martin ve Tüzemen kalibrasyonu kullanılarak [EL2] ve [RC] merkezlerinin konsantrasyonu hesaplandı. Her üç kristalde [EL2] konsantrasyonu 10^{16} cm^{-3} civarında, [RC] konsantrasyonu da 10^{15} cm^{-3} civarında bulundu. Bu değerlerin farklı çıkması bu iki kusurunda birbirinden farklı olduklarını gösteren delillerden biridir.

Yarıyalıtkan GaAs kristali üzerinde yakın band kenarı soğurma ve foto-akım ölçüleri alındı. Yarıyalıtkan (SI) GaAs kristalinde RC merkezlerinin nötr olduğunu biliyoruz. Bu kristalde soğurma, nötr RC merkezlerinin valans bandından elektron alarak negatif yüklenmesi neticesinde olur. Meydana gelen foto-akım, boşluk akımıdır. Paralel soğurma ve foto-akım değerlerinin spektral incelemesini yaptığımızda, bu değerlerin birbirini fit ettiğini görürüz. Bu da bize RC merkezlerinin EL2'de olduğu gibi merkez-içi (intra-centre) soğurmaya sahip olmadığını gösterir.

Böylece bu bölümde, Bölüm 4'de yapılan deneysel çalışmalar değerlendirilerek EL2 ve RC kusurlarının optiksel ve elektriksel özellikleri bir yüksek lisans çalışması seviyesinde anlaşılmasına çalışıldı. Görüldü ki, EL2 ve RC ayrı ayrı kusurlardır ve ayrı ayrı foto-quench yapılabilir. EL2 galyum yerine oturmuş arsenik kusurudur. RC akseptörü, arsenik boşluğudur ve baskın ışısız rekombinasyon merkezleridir. RC merkezleri, band kenarına yakın bölgede soğurma vermektedir. Bu soğurma maksimum değerini 1.499 eV ile 1.485 eV arasında değere sahip fotonlarla almaktadır ve 100K'

dan yukarı sıcaklıklarda gözlenmemektedir. RC enerji seviyeleri, her iki numunede de 200 K civarında iletkenlik bandı ile birleşmektedir. EL2 merkezleri merkez-içi soğurmaya sahip iken RC merkezlerinin merkez-içi soğurması yoktur. Ayrıca, tümleşik devre yapımında taban malzeme olarak kullanılan GaAs'ın kalitesinin değerlendirilmesinde EL2 ve RC merkezlerinin dağılımı önemlidir.

Daha ileri çalışmalar için, RC merkezlerinin merkez-içi soğurmaya sahip olup olmadığı daha hassas deneysel sistemlerle yeniden denenebilir. Bundan başka MESFET'in eşik voltajı üzerine RC merkezlerinin etkisi araştırılabilir. Ayrıca, RC merkezlerinin soğurma spektrumunun elektronik özellikleri hem yarıyalıtkan hem de n-tipi GaAs'da araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Baraff, G. A., 1992, Recent changes in our understanding of EL2 in GaAs.
Semiinsulating III-V Materials, C. J. Miner, W. Ford, E.R. Weber (ed.) by
Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 11
- Blakemore, J.S., 1985, Solide State Physics, Cambrige University Press, London, (2
nd.,ed.) p74
- Breivik, L., Brozel, M. R., Mohades-Kassai, A., Langer, J. M., 1990, Proceeding 6th
Conference on Semiinsulating III-V Materials., (ed:) by, A. J. Milnes, and C.J.
Miner, Toronto, p257.
- Brozel, M. R., Grant, I., Ware, R. M., Stirland, D. J., and Skolnick, M. S., 1984, J. Appl.
Phys., 56(4), 1109
- Chadi, D.J., and Chang, K. J., 1988, Phys. Rev. Lett., 60(21), 2187
- Chantre, A., Vincent, G., and Bois, D., 1981, Phys. Rev. B., 23,5335
- Corbel, C., Stucky, M., Hautojavri, P., Saarinen, K., and Moser, P., 1988, Phys. Rev. B.,
38(12), 8192.
- Dabrowski, J., and Scheffler, M., 1988, Phys. Rev. Lett., 60(21), 2183.
- Dannefaer, S., Hoff, B., and Kerr, D., 1984, Phys. Rev. B., 30(6), 3355.
- Durlu, T.N., 1992, Katıhal Fiziğine Giriş, Set Ofset Ltd., Ankara, s15.
- Fischer, D. W., 1987, Appl. Phys. Lett., 50(24), 1751.
- Fornari, R., and Kumar, J., 1990, Appl. Phys. Lett., 56(7), 638.

- Holmes, D.E., Chen, R.T., Elliot, K.R., and Kirkpatrick, C.G., 1982, Appl. Phys., Lett., 40(1), p46.
- Hovel, H. J., 1992. Semiconductors Science Technology. IOP publishing Ltd. ,U.K.,7, P A16.
- Jimenez, J., Gonzalez, M. A., Sanz, L. F., de Angulo, L. R., and Bonnafe, J., 1992, Semiconductors. Science and Technology. IOP publishing Ltd. ,U.K.,7, pA202.
- Kaminska, M., Skowronski, M., Lagowski, J., Parsey, J. M., and Gatos, H.C., 1983, Appl. Phys. Lett., 43(3), 302.
- Kaminska, M., Skowronski, M., and Kuszko, W., 1985, Phys. Rev. Lett., 55(20), 2204.
- Lagowski, J., Gatos, H.C., Parsey, J.M., Wada, K., Kaminska, M., and Walukiewicz, W., 1982, Phys. Rev., Lett., 40(4), 342.
- Lang, D.V., 1974, J. Appl. Phys., 45, 3023.
- Martin, G. M., Mitonneau, A., Mircea, A., 1977, Electron. Lett.13.,191
- Martin, G. M., 1981, Appl. Phys. Lett,747
- Meyer, B.K., Hofmann, D. M., Niklas, J. R., and Spaeth, J.M., 1987, Phys.,Rev., B36, 1332
- Mohades-Kassai, A., and Brozel, M. R., 1990, J. Cryst. Growth, 103,303
- Mullenborn, M., Alt, H. Ch., and Heberle, A., 1991, J. Appl. Phys.,69(8), 4310
- Puska, M.J., Japsen, O., Gunnorsson, O., and Nieminen, R. M., 1986, Phys. Rev., B34(4), 2695.

Rong, F.L., Buchwold, W. R., Hormatz, M., Poindexter, E.H., and Warren, W.L., 1991, Appl. Phys., Lett., 59(18), 2281.

Simmons, J.G., and Taylor, G.W., 1972, Phys. Rev.(B), 5,1619

Skolnick, M., Reed, L. J., and Pitt, A. D., 1984, Appl. Phys. Lett., 44, 447

Skowronski, M., Lagowski, J., and Gatos, H. C., 1985, Phys. Rev. B., 32, 4264

Skowronski, M., Lagowski, J., and Gatos, H. C., 1986, J. Appl. Phys.,59, 2451

Sturge, M. D., 1962, Phys. Rev., 127(3),768.

Tüzemen, S.,and Brozel, M. R., 1991, Appl. Surface Sci., 50, 395

Tüzemen, S., Breivik, L., and Brozel, M. R., 1992, Semiconductors Science and Technology. IOP Publishing Ltd.,U.K.,7, pA36

Tüzemen, S., and Brozel, M. R., 1992, The correlation of reverse contrast absorption imaging with photouenchable deep acceptor centres in semiinsulating LEC GaAs. Semiinsulating II-V Materials, C.J. Miner, W. Ford, and E.R: Weber (ed.) by, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 223

Tüzemen, S.,1993, An investigation of Reverse-Contrast Centers in Bulk Gallium Arsenide, Ph.D. Thesis, The Victoria University of Manchester, (yayınlanmamış)

Tüzemen, S., Gürbulak, B., Yıldırım M., and Doğan, S.,1999, Phys. Stat. Sol (a),174 (2), p 467

Vincent, G., Bois, D., and Chantre, A., 1992, J.Appl. Phys., 53, 3643

Yu, P. W., 1984, Appl. Phys. Lett., 44(3), 330

Weber, E. R., Ennen, H., Kaufmann, U., Windscheif, J., Schneider, J., and Wosinski, T.,1982, J. Appl. Phys., 53(9), 6140