

## **In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As BİLEŞİK YARIİLETKEN MALZEMELERDE KALICI FOTOİLETKENLİK**

**Hüseyin SARI<sup>1</sup>, Harry H. WIEDER\***

**Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü  
06100 Tandoğan-ANKARA**

**\*Kaliforniya Üniversitesi San Diego, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,  
92093 La Jolla, San Diego-ABD**

### **ÖZET**

In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As bileşik yarıiletken malzemelerde kalıcı fotoiletkenlik etki indiyum kompozisyonuna bağlı olarak incelendi. In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As bileşiği (0.10 ≤ x ≤ 0.34), daha düşük enerji aralığına sahip olan In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As ile birlikte heteroyapı oluşturmaya elverişli olacak şekilde yarıyalıtkan GaAs alttaşı üzerinde molekül demetli epitaksi (MBE) yöntemi kullanılarak büyütüldü ve In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As katmanı büyütme sırasında silikon ile düzlemsel olarak katkılandı. Alttaş ile film arasında oluşan örgü uyumsuzluğu, basamak şeklinde tampon ara filmler büyütülerek giderildi. Kalıcı fotoiletkenlik etki, In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As arayüzeyde oluşan iki boyutlu elektron gaz yoğunluğu sıcaklığın fonksiyonu ve optik uyarılmaya bağlı olarak Hall yöntemi ile ölçüldü. Kritik sıcaklık T<sub>C</sub>=200 ± 10 K olarak bulundu. İncelenen örneklerin hepsinde fotoiletkenlik gözlemlendi ve fotoiletkenliğin en büyük değeri In<sub>0.15</sub>Al<sub>0.85</sub>As bileşiğinde ölçüldü.

**Anahtar Kelimeler:** DX merkezleri, bileşik yarıiletkenler, InAlAs, kalıcı fotoiletkenlik, MODFET

### **ABSTRACT**

The persistent photoconductivity effect in In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As compound semiconductors has been investigated as a function of indium composition. Different In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As epitaxial layers (0.10 ≤ x ≤ 0.34) in a In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As like heterostructure were grown by molecular beam epitaxy on (001) GaAs substrate and In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As layer was δ-doped with silicon. In order to compensate the lattice mismatch between epitaxial layers and their substrate, step graded buffer layer was used. The carrier concentration in the In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As interface as a function of temperature and optical excitation has been measured. Critical temperature for these compounds is estimated to be as T<sub>C</sub>=200 ± 10 K. PPC effect was observed in all samples with the highest percent change in In<sub>0.15</sub>Al<sub>0.85</sub>As sample.

**Key words:** DX centers, compound semiconductors, InAlAs, persistent photoconductivity (PPC), MODFET

---

<sup>1</sup> e-posta: hsari@eng.ankara.edu.tr

## 1-Giriş

Son yıllarda moleküler demetli epitaksi yöntemindeki gelişmelerle birlikte III-V olarak bilinen birleşik yarıiletkenler, örneğin GaAlAs, InAlAs ve InP, başta optoelektronik uygulamalar olmak üzere birçok teknolojik alanda heteroyapılar şeklinde kullanılmaktadır. Moleküler demetli epitaksiyel (MBE) tekniği ile bu türden yapılar, tek atomik katman mertebesinde büyütülerek kuantum etkilerin gözlenebildiği devre elemanlarının yapımında kullanılmaktadır (1). Bu yapılara kuantum çukurlu lazerler (QWL), yüksek mobiliteli alan etkili transistörler (MODFET) örnek olarak verilebilir. Elektronik ve optoelektronik devre elemanı yapımı sözkonusu olunca bu yarıiletkenlerin uygun şekilde katkılanması gerekmektedir. Bu malzemelerde n-tipi katkılama, homoyapılardaki gibi basit olmayıp, sıra dışı sorunlar yaşanmaktadır (2). Bu sorunların başlıcaları; serbest taşıyıcı yoğunluğunda azalma, düşük sıcaklıklarda gözlenen kalıcı fotoiletkenlik (KFİ), sıcaklığa bağlı elektron yakalama tesir kesiti ve bu malzemelerden yapılan transistörlerde gözlenen eşik gerilimdeki değişimlerdir. Bu anormalliklerin, yasak bant aralığının içinde, katkı atomlarının oluşturduğu derin (D) enerji seviyelerinden kaynaklandığı ve ilk zamanlarda mekanizması henüz bilinmediği (X) için bu merkezlere DX merkezleri adı verilmiştir (2). Son yıllarda yapılan araştırmalar sonucunda DX merkezlerinin katkı atomlarının taban enerji durumu olduğu, kararlı olabilmesi için iletim bandından iki elektron alarak ve büyük örgü yerdeğiştirmesi yaparak kararlı hale geldiği bilinmektedir (3). DX merkezlerinin elektron yakalama tesir kesitinin sıcaklığa bağlılığı, katkı atomunun iletim bandından iki elektron alarak kararlı hale gelmesi ve bu kararlı enerji durumuna geçebilmesi için büyük örgü yerdeğiştirmesi yapması bu kusurların en tipik özelliği olan kalıcı fotoiletkenliğin başlıca sebebidir. Kalıcı fotoiletkenlikte, düşük sıcaklıklarda fotonlarla uyarılan malzemede elektronlar, düşük enerji seviyelerinden iletim bandına geçer ve ışık enerjisi kesildikten sonra da uzun süre iletim bandında kalırlar. Bu süre malzemenin sıcaklığı kritik bir sıcaklığın üstüne çıkarılmadığı takdirde günlerce sürebilir.

Kalıcı fotoiletkenlik, n-katkılı birçok III-V bileşik yarıiletken malzemelerde gözlenmiştir. Bu konudaki araştırmaların birçoğu  $Al_xGa_{1-x}As$  bileşik yarıiletken yapılmıştır. Bunun sebebi  $Ga_xAl_{1-x}As$  bileşiklerini alüminyumun bütün kompozisyon değerlerinde GaAs alttaş üzerinde kristal kusurları oluşturmadan büyütülebilmesi ve bu malzemelerin teknolojik olarak en yaygın kullanılan birleşik malzeme olmasından kaynaklanmaktadır.  $Al_xGa_{1-x}As$  bileşiklerinde alüminyum konsantrasyonu % 22'nin üstünde olduğunda DX enerji seviyesi yasak bant aralığında oluşmakta ve KFİ etki gözlenmekte, % 22'nin altındaki değerlerinde ise DX enerji seviyesi iletim bandının içinde oluşmakta ve normal şartlarda KFİ etki gözlenmemektedir (4).

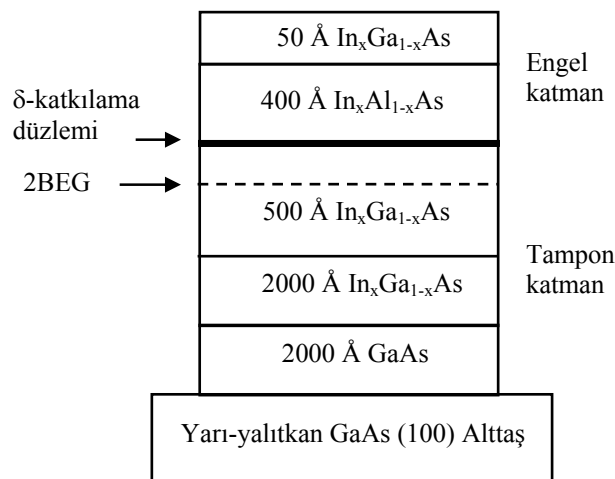
$In_xAl_{1-x}As$  bileşiklerinde KFİ çalışmaları ise oldukça sınırlıdır. Bunun sebebi indiyumun bütün yüzdelerinde  $In_xAl_{1-x}As$  bileşiklerini büyütebilmek için uygun bir alttaşın bulunmamasıdır. Örgü sabitinin uyuşmadığı alttaşlar üzerinde büyütülen  $In_xAl_{1-x}As$  bileşiklerinde diğer türden kristal kusurları çok fazla oluşabildiğinden bu kusurların KFİ'ye sebep olan DX merkezlerinin incelenmesini zorlaştırmaktadır. Sadece indiyumun % 52 olduğu  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  bileşik, InP alttaş üzerinde sorunsuz olarak büyütülerek DX merkezlerine bakılabilmektedir. İndiyumun bu konsantrasyon değerinde,  $In_{0.52}Al_{0.48}As$  ve InP'in örgü sabitleri uyuşmakta ve istenilen kalınlıkta ince filmler epitaksiyel olarak büyütülebilmektedir. Bunun dışındaki indiyum bileşikleri için uygun bir alttaşın olmadığı kompozisyon değerlerinde, tampon ara katman kullanarak büyütülen  $In_xAl_{1-x}As$  bileşiklere ilişkin ise çok az bir çalışma vardır (5).

$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşiği teknolojik olarak oldukça önemli bir bileşiktir. Özellikle  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  şeklinde oluşturulan heteroyapılar ile kuantum çukurları oluşturulabildiği için optoelektronik ve yüksek hızlı elektronik transistörlerin yapımında kullanılmaktadır. Teknolojik öneminden dolayı,  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşiklerinde KFİ, malzemenin elektronik ve optik özelliklerini yakından ilgilendirdiğinden bu bileşiklerde bu etkinin kompozisyona bağlılığının bilinmesi önemlidir.

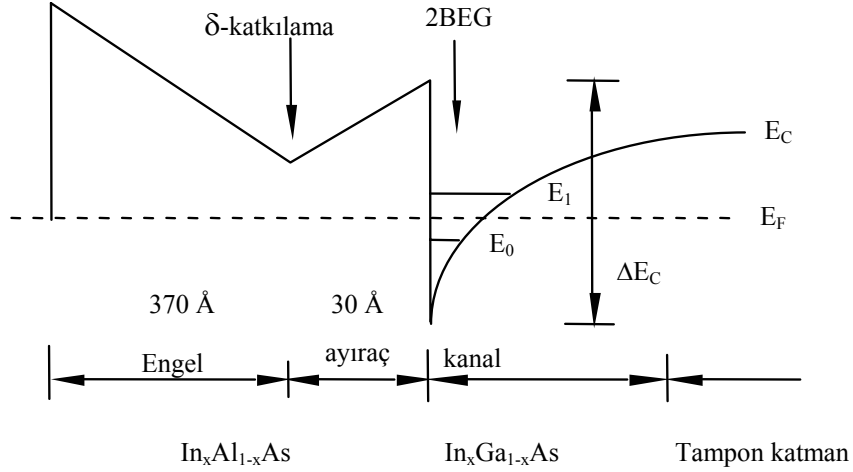
Bu çalışmada  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşiklerinde DX merkezlerinin sebep olduğu KFİ etki, indiyum konsantrasyonuna bağlı olarak deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla farklı indiyum kompozisyonuna sahip  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  ( $0.10 \leq x \leq 0.34$ ) ince filmler moleküler demetli epitaksi yöntemi ile (001) yönelimli GaAs alttaş üzerinde büyütüldü. Taşıyıcı yoğunluğu, sıcaklığın fonksiyonu olarak ve düşük sıcaklıkta ışık ile uyarılarak ölçüldü.

## 2-Yöntem

Farklı indiyum yüzdesine sahip ( $x=0.1, 0.15$  ve  $0.34$ )  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  örnekler (001) kristal yönelimli yarı-yalıtkan GaAs alttaş üzerinde MBE yöntemi ile büyütüldü. Heteroyapı katmanı, Şekil 1'de, bu yapıya karşı gelen enerji grafiği ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu yapıda sırası ile 2000 Å katkısız GaAs, istenilen indiyum kompozisyonu ile alttaş arasındaki kristal örgü sabitinden kaynaklanan örgü farkını azaltmak için kullanılan tampon bölgeyi oluşturan 2000 Å kalınlıktaki birkaç katman  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , 500 Å kalınlıkta  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  kanal katmanı, silikon atomları ( $N_D=8.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) ile düzlemsel olarak ( $\delta$ -katkılama) katkılanmış 400 Å kalınlıktaki  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  engel katmanından oluşmaktadır. Katkılama, engel katman içinde ve kanaldan ayıraç olarak adlandırılan 30 Å'luk uzaklıktaki bölgede yapılmıştır. Ayıraç katmanının amacı, kanalda oluşan iki boyutlu elektron gazının (2BEG) mobilitesini arttıracak kadar geniş, katkılanmış bölgede iyonlaşan elektronların kanala tünellenerek ulaşmasını sağlayacak kadar da dar olacak şekilde optimum kalınlıkta seçilmesidir (Şekil 2).



Şekil 1: DX merkezini incelemek için büyütülen örneklerin katman yapısı. Tampon bölgesi, engel katman ile alttaş arasındaki örgü sabitini arasındaki farkı asgariye indirmek için  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  katmanındaki indiyum yüzdesine bağlı olarak birkaç katman olarak büyütülmüştür.



Şekil 2: İncelenen örneklerin iletim bant ucu enerji diyagramı (basitlik olsun diye değerlik bandı gösterilmemiştir). Silikon atomları ile  $\delta$ -katkılanma  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bölgesinde yapılmıştır. Katkı atomlarından iyonlaşan serbest elektronlar  $30 \text{ \AA}$  kalınlıklı ayıraç bölgesinden tünelleme ile geçerek kanal bölgesinde iki boyutlu elektron gazı (2BEG) oluşturmaktadırlar.

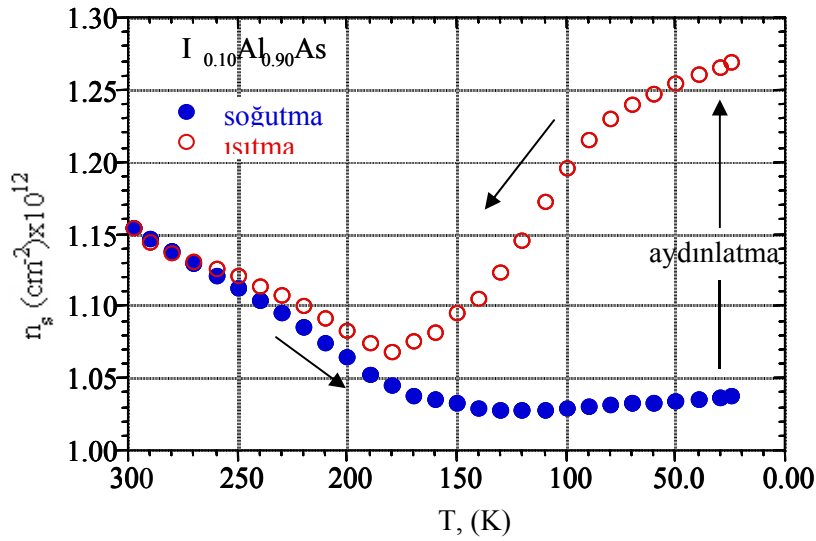
Elektriksel ölçümlerinin yapılabilmesi için büyütülen örnekler, Van der Pauw geometrisinde  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  boyutlarında kesildi. Omik kontaklar, kare şeklindeki örneklerin köşelerine saf indiyum koyarak  $420 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $15:85$  oranındaki  $\text{H}_2/\text{N}_2$  gazı altında 45 saniye tavlanaarak sağlandı. Kullanılan bu gazın amacı, malzemenin yüksek sıcaklıkta oksitlenmesini önlemektir.

Örneklerin taşıyıcı yoğunluğu, manyetik alan değeri  $1.22 \text{ kG}$  olan doğal mıknatısın kullanıldığı Hall ölçüm düzeneği ile ölçüldü. Kalıcı fotoiletkenlik ölçümü için örnekler önce oda sıcaklığından  $25 \text{ K}$ 'e kadar karanlıkta soğutuldu.  $25 \text{ K}$  sıcaklıkta, GaAs diyot ile 5 dakika süreyle aydınlatıldı. 5 dakika gibi uzun bir sürenin seçilmesi DX merkezlerindeki bütün elektronların uyarıldıklarından emin olmak içindir. Aydınlatma işleminden sonra 20 dakika beklenerek örneklerin elektronik dengeye gelmesi sağlandı. Daha sonra örnekler oda sıcaklığına kadar karanlıkta ısıtıldı. Soğutma ve ısıtma sürecinde taşıyıcı yoğunlukları her  $10 \text{ K}$  sıcaklık aralıklarında ölçüldü.

### 3-Bulgular

Şekil 3,  $\text{In}_{0.10}\text{Al}_{0.90}\text{As}$  bileşiğinde ölçülen sıcaklığa karşı  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ara yüzeyde oluşan iki boyutlu elektron gazının (2BEG) yoğunluğunu göstermektedir. Sıcaklığın azalması ile birlikte serbest elektron yoğunluğunda da azalma gözlenmektedir. Kritik bir sıcaklık değerinin altında ise taşıyıcı yoğunluğunda bir değişme görülmemektedir.  $25 \text{ K}$ 'de örneklerin GaAs diyot ışığı ile uyarılması ile birlikte taşıyıcı yoğunluğunda büyük bir artış gözlenmektedir. Şekil 3'de gösterilen  $\text{In}_{0.10}\text{Al}_{0.90}\text{As}$  için yüzde artış yaklaşık olarak  $14$ 'dür.

Taşıyıcı yoğunluğundaki bu artış, normal yarıiletken malzemelerde görülen etkinin aksine, ışık enerjisi kesildikten sonra da kalıcı olmaktadır ve malzemenin sıcaklığı kritik sıcaklığın altında kaldığı sürece çok uzun süre iletim bandında kalmaktadır. Bu çalışmada, fotonlarla uyarılarak iletim bandına geçen elektronların ışık kesildikten sonra taşıyıcı yoğunluğundaki azalmanın zamana bağımlılığı incelenmedi; ancak deney süresinde aydınlatmadan sonra en az bir saat kalıcılık gözlemlendi. Grafikten de görüldüğü gibi, uyarılmadan sonra örneğin sıcaklığı arttırıldığında, taşıyıcı yoğunluğu, kritik sıcaklığın üstüne çıkılması ile birlikte soğutulurken izlediği davranışı sergilemektedir.



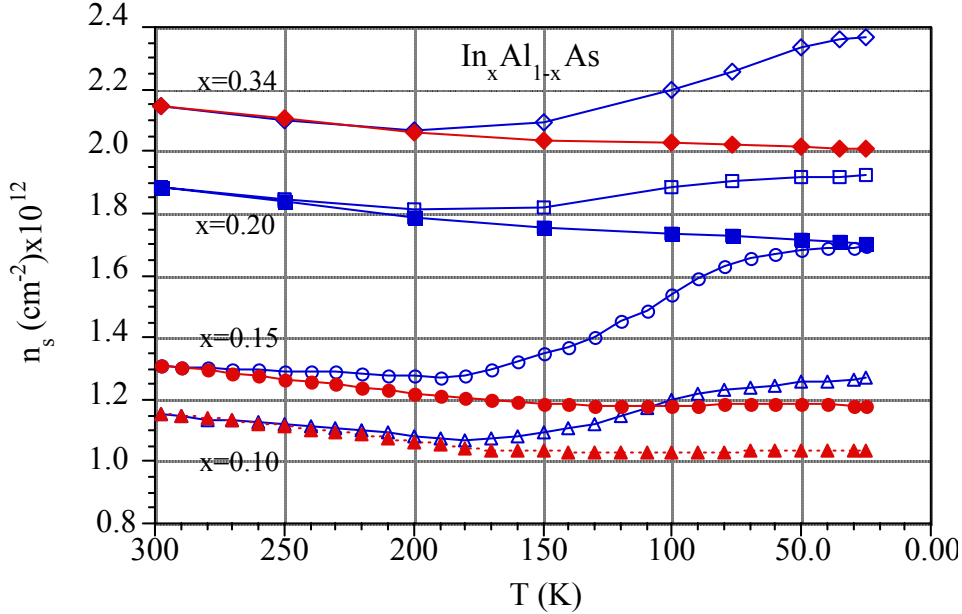
Şekil 3: 25 K'de  $\text{In}_{0.10}\text{Al}_{0.90}\text{As}$  bileşiğinde ölçülen kalıcı fotoiletkenlik. Dolu semboller soğutmayı, açık semboller ise aydınlatma işleminden sonraki ısıtmayı göstermektedir. Oklar ölçüm sırasını göstermektedir.

İncelenen tüm örneklerde gözlenen KFİ etki, Şekil 4'deki grafikte gösterilmektedir. Kalıcı fotoiletkenlik bütün örneklerde görülmektedir. Tablo 1,  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşiklerinde gözlenen KFİ değerlerini ve taşıyıcı yoğunluklarında oluşan yüzde artışı göstermektedir. İncelenen örnekler içinde en büyük fotoiletkenlik etki  $x=0.15$  indiyum yüzdesine sahip bileşikte gözlenmiştir.  $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.85}\text{As}$  bileşiğinde, 25 K'de uyarılmaya bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğundaki artış yaklaşık olarak % 40 mertebesindedir.

**Tablo 1:** İndiyum yüzdesine bağlı olarak 25 K'de gözlenen KFİ etki. Örnekler 25 K'de GaAs LED ışığı ile 5 dakika aydınlatıldıktan sonra taşıyıcı yoğunluğundaki net ( $\Delta n_s$ ) ve yüzde artış.

| $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$<br>$x$ (%) | $\Delta n_s$ ( $\text{cm}^{-2}$ ) | % artış |
|--|-----------------------------------|---------|
| 10   | $2.3 \times 10^{11}$              | 22      |
| 15   | $5.1 \times 10^{11}$              | 40      |
| 20   | $2.2 \times 10^{11}$              | 14      |
| 34   | $3.6 \times 10^{11}$              | 18      |

$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşiklerinde bulunan kritik sıcaklık değeri ise yaklaşık olarak  $200 \pm 10$  K mertebesindedir. Bu değer,  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşiğinin kritik sıcaklık değeri olan  $T_c = 120$  K'den (7) daha yüksektir ve optik uygulamalar için de önemlidir.

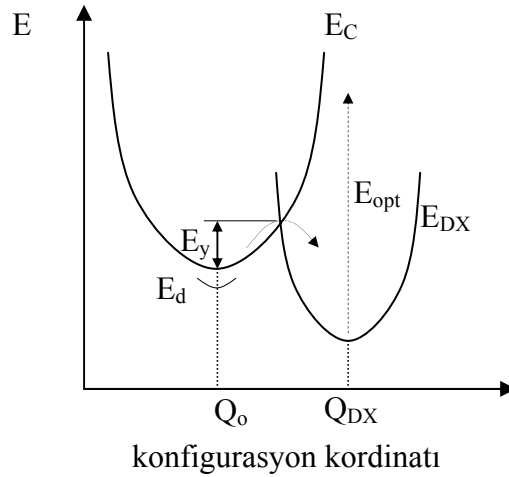


Şekil 4:  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşiklerinde ölçülen kalıcı fotoiletkenlik. Dolu semboller soğutmayı, açık semboller ise aydınlatma işleminden sonraki ısıtmayı göstermektedir.

#### 4-Tartışma ve Sonuç

Yapılan bu çalışmadaki KFİ etki, n-tipi katkılanmış III-V malzemelere özgü olan nokta kusurlu DX merkezlerinden kaynaklanmaktadır (8). KFİ etki, katkı atomunun enerji düzeylerini gösteren Şekil 5'deki enerji diyagramı yardımı ile açıklanabilir. Konfigürasyon diyagramı olarak adlandırılan ve bileşik yarıiletkenlerdeki katkı atomunun enerji seviyesini gösteren bu çizelgede yatay eksen, örgü düzenini temsil eden konfigürasyon koordinatını, düşey eksen ise elektronik ve örgü enerjilerinin toplamını temsil etmektedir. Konfigürasyon koordinatı  $Q_0$  olarak gösterilen konum, katkı atomunun sığ enerji durumunu,  $Q_{DX}$  konumu ise DX merkezinin enerji durumunu göstermektedir. Bu iki enerji minimumu, aynı örgü noktasında olmadığından, katkı atomunun daha düşük enerji durumu olan  $Q_{DX}$  duruma geçmesi için büyük örgü yerdeğiştirmesi yapması gerekecektir ( $Q_0 \rightarrow Q_{DX}$ ). Oda sıcaklığında sığ katkı atomlarından iyonlaşan elektronlar iletim bandına geçerek serbest taşıyıcı yoğunluğunu oluşturmaktadır. Sıcaklığın düşürülmesi ile birlikte iletim bandındaki elektronlar, yasak band içinde bulunan en düşük seviyedeki derin DX merkezlerini doldurmaya başlayacaklardır. Bu doldurma işlemi,  $E_y$  enerji engelini aşacak kadar ısıl enerjiye sahip elektronlar tarafından yapılacaktır. Bu enerji seviyesinin kararlı olabilmesi için, iki elektron tarafından doldurulması gerekmektedir (3). Sıcaklık, kritik ( $T_c$ ) bir değer altına düştüğünde ise DX merkezlerinin yakalama tesiri azalacağı için elektronlar bu seviyeleri artık doldurmayacaklar, ancak sığ katkı seviyeleri doldurmak için de ısıl enerjileri

yeterince fazla olacaktır ( $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  içinde silikon katkı atomu için bu enerji  $50 \text{ meV} < kT_C$ ). Dolayısı ile kritik sıcaklığın altında serbest elektron yoğunluğu sabit kalacaktır. Bu durum, yapılan çalışmadaki bütün örneklerde gözlenmiştir. Düşük sıcaklıkta, DX merkezlerindeki elektronları uyaracak yeterli enerjiye ( $E_{\text{opt}}$ ) sahip fotonlarla örnekler uyarıldığında, bu merkezlerde bulunan elektronlar uyarılarak önce iletim bandının üst noktalarına, oradan da fazlalık enerjilerini kaybederek, minimum enerji bandına geçeceklerdir. İletim bandı ile DX merkezin arasındaki enerji engeli ( $E_y$ ), bu elektronların tekrardan DX merkezlerini doldurmasını engelleyecektir. Sıcaklık kritik sıcaklığın altında tutulduğu sürece elektronlar iletim bandında kalmaya devam ederek kalıcı fotoiletkenliğe sebep olacaklardır. Eğer sıcaklık kritik sıcaklığın ( $T_C$ ) üstüne çıkarılırsa iletim bandında bulunan elektronlar engel enerjisini ( $E_y$ ) aşabilecek yeterli ısı enerjisiyle sahip olacaklar ve DX merkezlerini tekrardan dolduracaklardır. Bu, kritik sıcaklığın üstünde taşıyıcı yoğunluğunun, örnek soğutulurken izlediği davranışı sergilemesini açıklamaktadır.



Şekil 5: Bileşik yarıiletkenlerde n tipi katkı atomunun enerji seviyeleri.  $E_C$  iletim bandını,  $E_d$  sığ katkı atomu enerji seviyesi,  $E_{DX}$  DX merkezlerinin enerji seviyesini,  $E_{opt}$  optik uyarılma,  $E_y$  ise termal yakalama enerji engelini göstermektedir.

İncelenen örnekler arasında en büyük KFI etkinin,  $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.85}\text{As}$  bileşiğinde gözlenmesi bu kompozisyon değerindeki DX merkezinin enerji seviyesi ile ilgilidir. DX merkezlerinin  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşiklerinde oluşumuna ilişkin yapılan çalışmada,  $0 < x < 0.42$  indiyum kompozisyon aralığındaki en derin DX merkezi enerjisi  $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.85}\text{As}$  bileşiği için bulunmuştur (8). Enerji seviyesinin derinliğinden dolayı bu merkezlerin, oda sıcaklığından itibaren sıcaklığın azalması ile birlikte daha çok sayıda elektron tarafından dolduracağı, düşük sıcaklıkta ise daha fazla elektronun optiksel olarak uyarılarak iletim bandına geçeceğini, bunun sonucunda da KFI etkinin daha büyük olacağı sonucuna varılabilir.

Özet olarak,  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşik yarıiletken malzemelerinde kalıcı fotoiletkenlik indiyum kompozisyonuna bağlı olarak ( $0.10 \leq x \leq 0.34$ ) deneysel olarak incelendi. Kalıcı fotoiletkenlik incelenen bütün örneklerde gözlemlendi. En büyük fotoiletkenlik etki  $\text{In}_{0.15}\text{Al}_{0.85}\text{As}$  bileşiğinde gözlemlendi.  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  bileşik yarıiletken malzemeler için kritik sıcaklık, ortalama olarak  $T_C = 200 \pm 10 \text{ K}$  bulundu.

## 5- Kaynaklar

- 1- Dingle, R., Stormer, H. L., Gossard, A. C. ve Wiegmann, W., “Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices” **Appl. Phys. Lett.**, 33: 665-667, (1978).
- 2- Lang, D. V. ve Logan, R. A., “Large-Lattice-Relaxation Model for Persistent Photoconductivity in Compound Semiconductors” **Phys. Rev. Lett.**, 39: 635-639, (1977).
- 3- Chadi, D. J. ve Chang, K. J., “Theory of the Atomic and Electronic Structure of DX Centers in GaAs and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  Alloys” **Phys. Rev. Lett.**, 61: 873-876, (1988).
- 4- Mooney, P. M., “Deep donor levels (DX centers) in III-V semiconductors” **J. Appl. Phys.**, 67: 3, R1-R26, (1990).
- 5- Young, A. P. ve Wieder, H. H., “Evidence for the occupation of DX centers in  $\text{In}_{0.29}\text{Al}_{0.71}\text{As}$ ”, **J. Vac. Sci. Technol. B.**, 14 (4): 2944-2949, (1996).
- 6- Mooney, P. M. ve Caswell, N. S., Wright, S. L., “The capture barrier of the DX center in Si-doped  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ” **J. Appl. Phys.**, 62 (12):4786-4797(1987).
- 7- Malloy, K. J. ve Khachatryan, K., “**Semiconductors and Semimetals**”, Academic Press, 38, 235 (1993).
- 8- Sari, H. ve Wieder, H. H., “DX centers in  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ” **J. of Appl. Phys.**, 85, (6):3380-3382, (1999).