



Araştırma Makalesi / Research Article

**THE DETERMINATION OF BARRIER HEIGHT DURING VERTICAL
TRANSPORT IN GaAs/Al_xGa_{1-x}As QUANTUM WELL STRUCTURES**

Gökhan ALGÜN*

Istanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Vezneciler-İSTANBUL

Geliş/Received: 08.07.2008 Kabul/Accepted: 10.10.2008

ABSTRACT

In this work, how the changing of barrier height in GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well structures during vertical transport according to applied voltage, sample diameter and number of wells has been experimentally determined. The samples investigated here have 0, 2, 4, 7 and 10 quantum wells. To investigate the effect of sample diameter on barrier height, we used the samples with diameters of 100, 200, 400 and 800 µm. A voltage, parallel to growth direction, varies between 10 mV and 600 mV is applied. The barrier height values are being different which is determined from the current- temperature curves can be explained by the existence of space charges. The increasing the applied constant voltages reduce the barrier height and occurring a small difference on barrier height for the different diameter and increasing the number of well reduce the effect of the space charge has been determined.

Keywords: Vertical transport, quantum well, hot electron, barrier height.

**GaAs/Al_xGa_{1-x}As KUANTUM KUYULU YAPILARDA DİKEY TRANSPORT ESNASINDA
BARIYER YÜKSEKLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

ÖZET

Bu çalışmada, GaAs/Al_xGa_{1-x}As kuantum kuyulu yapılarda dikey transport esnasında, yapıdaki engel yüksekliğinin, uygulanan voltaja, örnek çapına ve kuyu sayısına bağlı olarak nasıl değiştiği deneysel olarak belirlendi. Çalışmada, 0, 2, 4, 7 ve 10 kuantum kuyusuna sahip yapılar incelendi. Örnek çapının etkisine bakılmak için 100, 200, 400, 600 ve 800 µm çapındaki örnekler kullanıldı. Voltaj, yapıların büyütülme doğrultusunda, 10 mV ile 600 mV arasında uygulandı. Akım-sıcaklık eğrilerinden belirlenen engel yüksekliği değerlerinin farklı oluşu, engel bölgesindeki uzay yükünün varlığı ile açıklandı. Uygulanan sabit voltajın değerinin artırılması ile engel yüksekliğinin azaldığı, çaptaki farklılığın engel yüksekliğinde küçük farklılıklara sebep olduğu ve kuyu sayısındaki artış ile uzay yükünün etkisinin azaldığı tespit edildi.

Anahtar Sözcükler: Dikey transport, kuantum kuyusu, sıcak elektron, engel yüksekliği.

1. GİRİŞ

Yarıiletken teknolojisinin gelişimi ile, elektronik ve optoelektronikte çok geniş uygulama alanları bulan, günümüz teknolojisinde kullanılan devre elemanlarının, boyutlarının daha küçük ve ömürlerinin daha uzun olmaları ve çok daha hızlı çalışmaları istenmektedir. Kullanım alanlarının

* e-mail/e-ileti: galgun@istanbul.edu.tr, tel: (212) 455 57 00 / 15283

genişlemesi, dolayısı ile, bunların yapısal ve fiziksel özellikleri hakkında kesin bilgilere sahip olma gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Sıcak elektron fiziği, yüksek elektrik alanlarda çalışan, çok küçük boyutlardaki yarıiletken devre elemanlarının, çok hızlı davranışını ve diğer karakteristik özelliklerini belirlemede etkilidir [1,2]. Dolayısı ile, bu olayın araştırılması, yukarıda belirtilen özelliklere sahip devre elemanlarının tam olarak anlaşılmasında ve optimizasyonunda büyük yararlar sağlayacaktır.

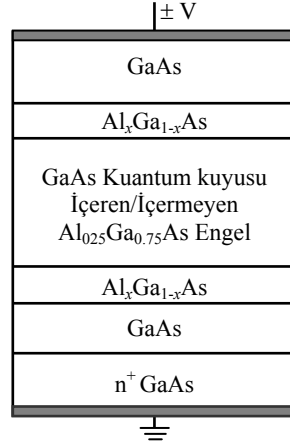
Moleküler Işın Epitaksi (Molecular-Beam Epitaxy- MBE) ve Metal-Organik Kimyasal Buhar Fazında Çökeltme (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition- MOCVD) gibi kristal büyütme tekniklerinin gelişimi, yarıiletkenlerdeki sıcak elektronlar üzerine yapılan çalışmaların artmasına neden olmuştur. Çünkü, bu teknikler sayesinde çok küçük boyutlara sahip devre elemanları yapılması daha kolay bir hale gelmiştir. Daha sonra, bu teknikler kullanılarak yapılan devre elemanlarında, boyutlardaki azalmanın (quantum confinement), transport ve performans üzerindeki etkileri araştırılmaya başlanmıştır. Özellikle, kuantum kuyulu yapılarda (Quantum Well Structures) enerji engelleri üzerinden/içinden sıcak elektronların transportuna ilgi oldukça fazladır [3-21]. Kuantum kuyulu yapılarda, elektronların transport özelliklerinin araştırılması, kuantum kuyulu kızılötesi fotodetektörler (Quantum Well Infrared Photodetectors; QWIPs), heteroyapıya sahip bipolar transistörler, yarıiletken lazerler ve sıcak elektron transistörler (Hot Electron Transistors; HETs) gibi hem elektronik hem de optik devre elemanlarındaki fiziksel olayları anlamada çok faydalıdır. Özellikle, bunlardan kuantum kuyulu kızılötesi fotodetektörler [10,11,13,21-24] ve yarıiletken lazerlerin [25-27] optik özellikleri oldukça iyi anlaşılmişken, bunların elektriksel özellikleri üzerine fazla çalışma yapılmamıştır.

Kuantum kuyuları mevcut olduğunda, bu gelişmiş devre elemanlarının performansı ile ilgili önemli faktörler ortaya çıkmaktadırlar [11]. Dolayısı ile bu mekanizmaların ve bunları etkileyen parametrelerin ne olduğunun bilinmesi, bu devre elemanlarının performansı açısından son derece önemlidir.

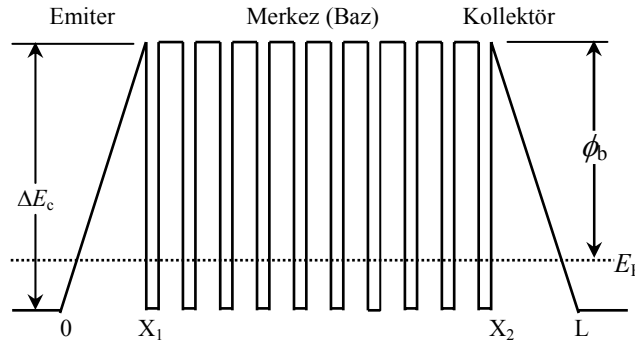
Bu çalışmanın temel amacı, transport mekanizması yapının büyütülme doğrultusunda olduğundan Dikey (Vertical) Transport olarak adlandırılan transport esnasında, GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs kuantum kuyulu yapılarda performansı etkileyebilecek bir parametre olan engel yüksekliğinin, voltaj, örnek çapı ve kuyu sayısı ile ilişkisini belirlemek ve incelemektir.

2. DENEY

Örnekler, n⁺-GaAs taşıyıcı üzerinde Metal Organik Buhar Faz Epitaksi (MOVPE) yöntemi ile hazırlanmış olup, örnek yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Ayrıca merkezi bölgede 10 tane kuantum kuyusu içeren bir yapının iletkenlik bandının potansiyel enerji profili Şekil 2 de verilmiştir.



Şekil 1. Örnek yapısı



Şekil 2. 10-Kuantum kuyulu yapının iletkenlik bandının potansiyel enerji profili

Büyütülme aşamasında, ilk önce örnek üzerine $1\mu\text{m}$ kalınlığında $n\text{-GaAs}$ ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) tabaka büyütülmüştür. Daha sonra, katkısız ve simetrik AlGaAs engel üç aşamada büyütülmüştür.

i) x 'in 0 'dan 0.25 'e kadar arttırıldığı 500°A 'luk eğimli bir tabaka,

ii) GaAs kuantum kuyular içeren/içermeyen, örneğe bağlı olarak $\sim 100 \text{ nm}$ ile 2100 nm arasında bir genişliğe sahip merkezi $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ bölgesi,

iii) x 'in 0.25 den 0 'a kadar azaltıldığı 500°A 'luk ikinci bir eğimli tabaka.

Son olarak üst tarafa yine $1\mu\text{m}$ kalınlığında $n\text{-GaAs}$ ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) tabaka büyütülmüştür.

Uzay yük etkilerinin neden olduğu band kıvrılmasını minimuma indirmek için, kuyular, $n_w = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ mertebesinde katkılanmıştır. Böylece, kuyulardaki Fermi seviyesi ile kontak tabakalardaki Fermi seviyesi aynı hizaya getirilmiştir. Örnekler, 0, 2, 4, 7 ve 10 kuyulu olmak üzere, her bir yapı için, 100, 200, 400, 600 ve 800 μm çapında mesalar şeklinde üretilmiştir. Tüm yapılar, 50 nm lik kademeli bariyerlere ve 3.5 nm lik kuyu genişliğine sahiptir. Engel genişliği ise, yapıya göre, 7.7 nm ile 100.6 nm arasında değişmektedir. Örnekler ile ilgili parametreler Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Örnek parametreleri

Örnek	Kuyu Sayısı (N_w)	Engel Genişliği L_B (nm)	Kuyu Genişliği L_z (nm)	Örnek Uzunluğu L_s (nm)	Merkezi Bölge Uzunluğu (nm)	Kontakt Taşıyıcı Yoğunluğu n_0 (m^{-3})
QT680A	0	---	---	208.4	108.4	8×10^{23}
QT680B	10	7.7	3.5	204.3	104.3	8×10^{23}
QT680C	7	13.5	3.5	205.5	105.5	7×10^{23}
QT680D	4	31.0	3.5	207.0	107.0	9×10^{23}
QT680E	2	100.6	3.5	207.6	107.6	9.5×10^{23}

Akım-sıcaklık ölçümleri, farklı kuantum kuyusuna sahip her bir yapının tüm örnek çaplarında gerçekleştirildi. Örnekler, sıcaklığa bağlılığının incelenmesi ve düşük sıcaklık ölçümlerinin yapılabilmesi için, 7 Teslalık Oxford Instrument süperiletken magnet kriostat içerisine yerleştirildi. Deneylerde, sıcaklık kontrolü, Oxford Instrument DTC-2 sıcaklık kontrol ünitesi ve Keithley 197 DMM kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde iki ısı çifti kullanılmış olup, bunun sebebi, sistem üzerindeki ısı çiftinin örneğin bulunduğu yerden farklı yerde olmasından dolayı ayrıca bir tane daha ısı çifti yapılarak örneğin olduğu yere konarak aradaki sıcaklık okuma hatasını minimuma indirmek içindir.

Tüm ölçümler karanlıkta gerçekleştirilmiştir. Ölçümler esnasında örnekler üzerine, üst kontak ile alt kontak arasına, genelde 10 mV kadar düşük sabit bir dc voltaj uygulandı. Ayrıca örnekler üzerine 100 mV, 200 mV, 400 mV ve 600 mV büyüklüğünde farklı voltajlar uygulanarak eğride bir değişiklik olup olmadığına bakıldı. Yük direnci (R_L) olarak uygun dirençler kullanıldı. Sıcaklık, 300 ⁰K'den 77 ⁰K'e düşerken, yük direnci üzerine düşen voltaj (V_L) Keithley 199 DMM ile okundu. Okunan bu değerlerden, her bir sıcaklık değerine karşılık, devreden geçen akım miktarı belirlendi. Sıcaklık değerleri de, Oxford Instrument DTC-2'den Kelvin cinsinden okunurken, Keithley 197 DMM'den voltaj cinsinden okunmuş ve buna karşılık gelen Kelvin değeri Çizelgeden bakılmıştır. Okunan sıcaklık ve belirlenen akım değerlerinden faydalanılarak, bilgisayarda, tüm örneklerin I - $1/T$ grafikleri çizdirilmiş ve elde edilen eğrilerin eğiminden, denk.1'deki

$$J = e \mu n_0 E \exp\left(\frac{-e(\phi_b - E_F)}{kT}\right) \quad (1)$$

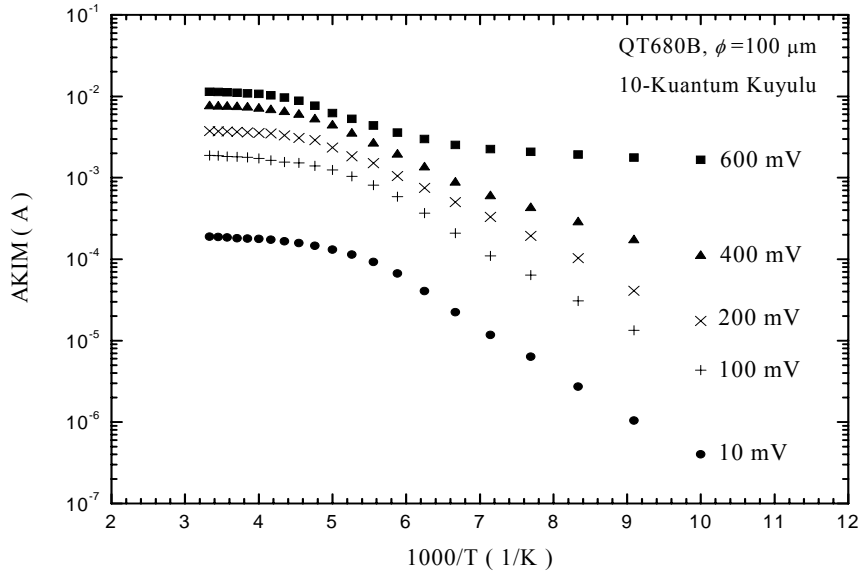
formülüne göre, etkin engel yükseklikleri belirlenmiştir. Burada J ; akım yoğunluğunu, e ; elektron yükünü, μ ; elektron mobilitesini, n_0 ; taşıyıcı yoğunluğunu, E ; uygulanan elektrik alanı, ϕ_b ; engel yüksekliğini, E_F ; Fermi enerjisini, k ; Boltzmann sabitini ve T 'de sıcaklığı göstermektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'de, merkezde 10-kuantum kuyusuna sahip yapının 100-300 ⁰K arasındaki sıcaklık bölgesinde akım-sıcaklık eğrisinin karakteristiği görülmektedir. Ölçümler esnasında yapı üzerine 10 mV'luk sabit voltaj (tünellemenin ihmal edilebileceği kadar düşük) uygulanmış ve elde edilen eğrinin eğiminden 10-kuantum kuyusuna sahip yapıdaki engel yüksekliği belirlenmiştir. Bununla birlikte, yapı üzerine uygulanan sabit voltajın engel yüksekliği üzerindeki etkisine bakılmak üzere farklı sabit voltajlarda akım-sıcaklık ölçümleri de yapılmıştır. Örnek üzerine 10 mV, 100 mV, 200

The Determination of Barrier Height During Vertical ...

mV, 400 mV ve 600 mV sabit voltaj uygulanması ile elde edilen eğriler de Şekil 3'de gösterilmiştir. Her bir sabit voltaj için eğrinin eğiminden belirlenen engel yükseklikleri Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 3. 10-kuantum kuyusuna sahip yapıda, voltajın, akım-sıcaklık eğrisi üzerindeki etkisi

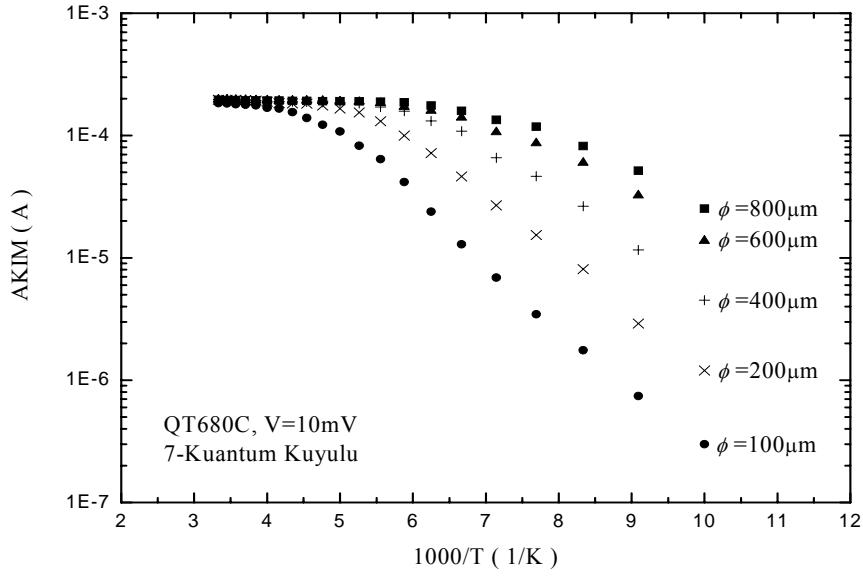
Çizelge 2. Farklı sabit voltajlar altında elde edilen akım sıcaklık eğrilerinden belirlenen engel yükseklikleri

10 mV	100 mV	200 mV	400 mV	600 mV
163.2 meV	146.4 meV	127.9 meV	103.7 meV	95.75 meV

Çizelge 2'den, uygulanan voltajın artışı ile taşıyıcı yoğunluğundaki değişimden dolayı, engel yüksekliğinde bir azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç, Daniels ve arkadaşlarının benzer yapılar üzerinde yaptıkları bir çalışmada buldukları sonuç ile uyumludur [8]. Grafikte, yüksek sıcaklıklarda ($T > 200K$) akım-sıcaklık eğrileri mobilitenin sıcaklığa bağlılığından dolayı lineer değildir. Bununla beraber, bu sıcaklık bölgesinde, 600 mV'luk voltajdaki akım değişim (eğimdeki değişim) oranı ile 10 mV'luk voltajdaki akım değişim oranı sabittir. Bu durum, engel yüksekliğinin uygulanan voltajdan bağımsız olduğu termal iletkenlik ile uyumludur. Diğer taraftan, sıcaklık azalırken ($T < 160K$), yüksek voltajlardaki eğrilerin lineerlikten sapması ve 600 mV'daki akım ile 10 mV'daki akım arasındaki oranın artması, tünellemenin sonucu şeklinde açıklanabilir.

Bu sonuçlar, 0, 2, 4 ve 7 kuantum kuyusuna sahip yapılar için de ayrıca tespit edilmiş ve benzer karaktere sahip oldukları görüldüğünden grafikler ve tespit edilen değerler ayrıca verilmemiştir.

Şekil 4 'de, aynı miktarda kuantum kuyusuna sahip farklı çapta örneklerin akım-sıcaklık eğrileri karşılaştırılmıştır.



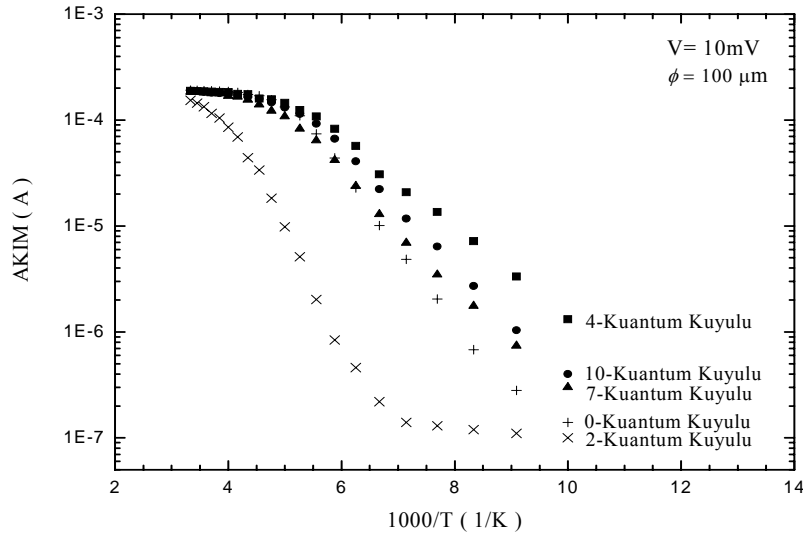
Şekil 4. Aynı sayıda kuantum kuyusu içeren, farklı çaptaki yapıların akım-sıcaklık eğrileri

Çizelge 3’de, 7-kuantum kuyulu yapıda, Şekil 4’deki akım sıcaklık eğrilerinden her bir çap için, 10 mV’luk sabit voltaj altında belirlenen engel yüksekliği değerleri verilmiştir. Tüm eğrilerin eğimleri hemen hemen paralel olmasına rağmen, engel yükseklikleri arasında az da olsa farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen grafiklerin eğimlerinin paralel olmasından dolayı, engel yüksekliklerinin de aynı olması gerektiği düşünülmektedir. Ancak, sıcaklığın düşmesi ile akım değerindeki değişim oranı çapın artışı ile azaldığından (direnc düştüğünden daha fazla akım sürülmekte), engel yüksekliğinin hesaplandığı eğimdeki veri sayısında azalma olacaktır. Bu durum hata olasılığını arttıracığından hesaplanan değerler arasında farklılıklar olabilecektir.

Çizelge 3. Farklı çapta örneklerde 10 mV’luk sabit voltaj altında elde edilen akım-sıcaklık eğrilerinden belirlenen engel yükseklikleri

100 μm	200 μm	400 μm	600 μm	800 μm
175.2 meV	170.7 meV	169.9 meV	167.3 meV	161.1 meV

Şekil 5’de, farklı kuantum kuyusuna sahip yapıların akım-sıcaklık eğrileri gösterilmiştir. Engel yüksekliğinin tanımı için en basit açıklama, genelde, GaAs ile $Al_xGa_{1-x}As$ ’ın iletkenlik bandları arasındaki fark (iletkenlik bandı süreksizliği) olarak verilmektedir. Bunun değeri de, $x = 0.25$ için, yaklaşık olarak, 210 meV’dur.



Şekil 5. Farklı kuantum kuyusuna sahip yapıların akım-sıcaklık eğrileri

Herbir yapı için, eğimden elde edilen engel yüksekliği değerleri karşılaştırılabilir. Buna göre kuyu sayısı ile engel yükseklikleri arasında sistematik bir ilişki olmadığı görülmüştür. Çizelge 4' den görüldüğü gibi, 0-kuantum kuyulu örnekte, 10 mV' da, ~220.5 meV' luk bir engel yüksekliği belirlenmiştir. Bu değer, $x = 0.25$ için yukarıda hesaplanmış olan band aralığı süreksizliği değerinden biraz daha büyüktür. Bunun sebebi de, merkezi bölgedeki uzay yükünün varlığı ile açıklanabilir. Katılanmamış olduğu farz edilen AlGaAs engel malzeme çok az p-tipi katkı ise (bu büyütülme esnasında istemeden yapı içerisine giren karbon atomlarından kaynaklanabilir), veya daha genel olarak söylemek gerekirse, termal denge durumuna gelmeden önce, katılanmamış AlGaAs engel malzemenin Fermi seviyesi, n^+ -GaAs kontak tabakalarındaki Fermi seviyesinden daha alçakta ise, sistemin, termal dengeye ulaştığı süreç içerisinde meydana gelen yük alışverişi sonucunda uzay yükleri ortaya çıkmaktadır. Bu, merkezi bölgedeki engel yüksekliğinin artmasına neden olmaktadır. Hickmott ve arkadaşları da, uzay yüklerinin engel yüksekliğine etkisi üzerinde çalışmalar yapmışlar ve onlar da uzay yüklerinin engel yüksekliğini arttırdığı sonucuna varmışlardır [28].

Çizelge 4. Farklı kuantum kuyusuna sahip örneklerden aynı çapta olanlarda 10mV'luk sabit voltaj altında elde edilen akım sıcaklık eğrilerinden belirlenen engel yükseklikleri

0-Kuantum Kuyulu	2-Kuantum Kuyulu	4-Kuantum Kuyulu	7-Kuantum Kuyulu	10-Kuantum Kuyulu
220.5 meV	228.1 meV	147.9 meV	175.2 meV	163.2 meV

2-kuyulu örnekte, eğer, merkezi bölgedeki iki kuyu arasındaki geniş AlGaAs engelde uzay yükü veya kuyularda, termal dengeye ulaşım esnasında yük oluşmuyor ise, uygulanan voltajın çoğu merkezi bölgeye düşecektir. Bu durumda, kuyulardaki taşıyıcılar, uygulanan voltajdan bağımsız kare bir engel göreceklerdir. Sonuçta, uygulanan voltaj artsa dahi akım değişmeden kalacaktır. Ancak, kuyular arasında 107.6 nm genişliğinde engele sahip 2-kuyulu

örneğin akım sıcaklık eğrilerinin eğimleri Şekil 3'dekine benzer şekilde, voltaj artarken paralel olduğu görülmüş ve 10 mV sabit voltaj altında elde edilen akım-sıcaklık eğrisinden engel yüksekliği 228.1 meV olarak belirlenmiştir. Bu 0-kuyulu örnekte belirlenen değerden daha yüksektir. 2-kuyulu örneğin artmış olan engel yüksekliği, iki kuyu arasındaki AlGaAs engeldeki uzay yükünün varlığına bağlıdır.

Çizelge 4'e göre, uzay yükünün etkisini bertaraf etmek için 4-kuyunun yeterli olduğunu görülmektedir. Çünkü, bu sayının yukarısında benzer karakteristik, yani, 7- ve 10- kuantum kuyulu yapılarıdaki bariyer yüksekliğinin, iletkenlik bandı süreksizliğinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

4, 7 ve 10 kuyulu örneklerde gözlemlenen engel yüksekliğindeki değişim küçük olmakla birlikte, engel yüksekliklerinin farklı olması merkezi bölge ile kontak bölgelerin Fermi seviyeleri arasındaki farktan kaynaklanır. Eğer merkezi bölgedeki kuyular, katılanmamış ise, büyütülme esnasında yapı içerisine istenmeden giren karbon atomları termal dengeye ulaşım sürecinde kontaklardan elektron alacaklardır. Bunun sonucunda merkezi bölge negatif olarak yüklenmiş olacak ve katottan akan elektronlar daha yüksek bir engel göreceklerdir. Diğer taraftan, eğer kuantum kuyuları aşırı katılanmış ise, termal dengeye erişinceye kadar, elektronlar, kontaklar tarafından toplanacaklar ve merkezi bölge pozitif olarak yüklenmiş olacaktır. Bu durumda ise, katot dan akan elektronlar daha alçak bir engel göreceklerdir.

Aslında kuyuların mevcut olduğu durumda, uzay yük etkileri ihmal edilemez. Çünkü kuyular tuzak gibi davranacağından uzay yükünün çoğu anoda en yakın kuyuda oluşacaktır. Bu durumda, büyütülme esnasında yapı içerisine istenmeden giren tuzaklanmış yükler olmasa bile, alan yapı boyunca üniform olmayacaktır. Bu kuyuların katılanması ile önlenileceğinden kuantum kuyularındaki katkı miktarı oldukça önemlidir. Ancak, kontaklardaki Fermi seviyesi ile merkezi bölgenin Fermi seviyesi, oda sıcaklığında, eşit olacak şekilde seçilse bile düşük sıcaklıklarda aynı kalmayacaktır. Dolayısı ile, Fermi seviyesinin eşitlenmesinden doğan uzay yükü etkilerinin dikkate alınması gereklidir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılardaki engel yüksekliklerini belirlemek üzere akım-sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Çalışmada, 0, 2, 4, 7 ve 10 kuantum kuyusuna sahip yapıların her birinin 100, 200, 400, 600 ve 800 μm çapındaki örnekleri kullanıldı. Voltaj, yapıların büyütülme doğrultusunda, 10 mV ile 600 mV arasında uygulandı.

Akım-sıcaklık eğrilerinden belirlenen engel yüksekliği değerlerinin farklı oluşu engel bölgesindeki uzay yükünün varlığı ile açıklandı. Kuyu sayısındaki artış ile uzay yükünün etkisinin azaldığı, bunda da kuyuların katılanmasının rol oynadığı belirtildi.

Engel yüksekliği belirlenirken uygulanan sabit voltajın değerinin artırılması ile taşıyıcı yoğunluğundaki değişimden dolayı engel yüksekliğinde azalma olduğu tespit edildi.

Çaptaki farklılığın neticesinde bariyer yüksekliğinde gözlemlenen küçük farklılıkların alınan veri sayısındaki azalma sonucu deneysel hatadan kaynaklandığı düşünüldü.

Teşekkür

Doktora tez danışmanım Prof. Dr. Çetin Arıkan'a ve örnekler için Prof. Dr. N. Balkan'a teşekkür ederim. Bu proje, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca desteklenmiştir. Proje no: T-233/06032003.

KAYNAKLAR

- [1] Ridley, B.K., Hot Electrons in Semiconductors, *Sci. Prog. Oxf.*, 70, 425-459, 1986.
- [2] Balkan, N., "*Hot Electrons in Semiconductors*", Clarendon Press, Oxford, 1998.

The Determination of Barrier Height During Vertical ...

- [3] Sibille, A., Palmier, J.F., Wang, H., et al., Observation of Esaki-Tsu Negative Differential Velocity in GaS/AlAs Superlattices, *Physical Review Letters*, 64(1), 52-55, 1990.
- [4] Skromme, B.J., Vertical Transport in Semiconductor Superlattices Probed by Miniband-to-Acceptor Magnetoluminescence, *Physical Review Letters*, 65(16), 2050-2053, 1990.
- [5] Beltram, F., Capasso, F., Sivco, D.L., et al., Scattering-Controlled Transmission Resonance and Negative Differential Conductance by Field-Induced Localization in Superlattices, *Physical Review Letters*, 64(26), 3167-3170, 1990.
- [6] Piazza, F., Pavesi, L., Cruz, H., et al., Vertical Transport Through Landau Levels in a GaAs/Al_xGa_{1-x}As Superlattice in The Presence of a Parallel Magnetic Field, *Physical Review B*, 47(8), 4644-4650, 1993-II.
- [7] Piazza, F., Pavesi, L., Vinattieri, A., et al., Influence of Miniband Widths and Interface Disorder on Vertical Transport in Superlattices, *Physical Review B*, 47(16), 10625-10632, 1993-II.
- [8] Daniels, M.E., Bishop, P.J., Jensen, K.O., et al., Electron Transport Across a Wide AlGaAs Barrier, *J. Appl. Phys.*, 74(9), 5606-5621, 1993.
- [9] Daniels, M.E., Bishop, P.J., Ridley, B.K., et al., Hot-Electron Transport Across a Wide AlGaAs Barrier Containing Quantum Wells, *Semicond. Sci. Technol.*, 9, 595-598, 1994.
- [10] Bishop, P.J., Daniels, M.E., Ridley, et al., The Effect of Quantum Wells on Electron Transport Across GaAs/AlGaAs Graded Barrier Structures, *Semicond. Sci. Technol.*, 11, 873-882, 1996.
- [11] Daniels, M.E., Bishop, P.J., and Ridley, B.K., The Effect of Quantum Wells on The Mobility of Electrons in Vertical Transport, *Semicond. Sci. Technol.*, 12, 375-379, 1997.
- [12] Wacker A., Vertical Transport and Domain Formation in Multiple Quantum Wells, *Cond. Mat.*, v1, 970105, 1997.
- [13] Bishop, P.J., Daniels, M.E., and Ridley, B.K., Electron Transport in a Short Al_{0.265}Ga_{0.735}As/GaAs Superlattice, *Semicond. Sci. Technol.*, 13, 482-487, 1998.
- [14] Lei, X.L., Cunha, Lima I.C., and Troper, A., Superlattice Vertical Transport With High-Lying Minibands, *Superlattices and Microstructures*, 23(2), 243-248, 1998.
- [15] Malzer, S., Heber, J., Peter, M., et al., Vertical Transport and Relaxation Mechanisms in δ -Doping Superlattices, *Physica E*, 2, 349-352, 1998.
- [16] Rott, S., Linder, N., and Döhler, G.H., Self-Consistent Hopping Transport in Superlattices: Non-Equilibrium Distribution Functions and Electron Heating, *Physica B*, 272, 213-215, 1999.
- [17] Helm, M., Hilber, W., Strasser, G., et al., Simultaneous Investigation of Vertical Transport and Intersubband Absorption in a Superlattice: Continuum Wannier-Stark Ladders and Next-Nearest-Neighbor Tunneling, *Physica B*, 272, 194-197, 1999.
- [18] Aristone, F., Portal, J.C., Palmier, J.F., et al., Shubnikov-de Haas – Like Oscillations in The Vertical Transport of semiconductor Superlattices, *Brazilian Journal of Physics*, 29(2), 375-379, 1999.
- [19] Patane, A., Ignatov, A., Eaves, L., et al., Miniband Magneto-Transport in GaAs/AlAs Island Superlattices, *Physica E*, 13, 786-789, 2002.
- [20] Broadley, V.J., Nicholas, R.J., and Mason, N.J., Magnetoresistance of Vertical Transport in InAs/GaSb Superlattices, *Physica E*, 13, 736-740, 2002.
- [21] Rosencher, E., Luc, F., Bois, PH., et al., Injection Mechanism at Contacts in a Quantum-Well Intersubband Infrared Detector, *Appl. Phys. Lett.*, 61(4), 468-470, 1992.
- [22] Perera, A.G.U., Shen, W.Z., Matsik, S.G., et al., GaAs/AlGaAs Quantum Well Photodetectors With a Cutoff Wavelength at 28 μm , *Appl. Phys. Lett.*, 72(13), 1596-1598, 1998.
- [23] Ryzhii, M., and Ryzhii, V., Monte Carlo Modeling of Electron Transport and Capture Processes in AlGaAs/GaAs Multiple Quantum Well Infrared Photodetectors, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38(10), 5922-5927, 1999.

- [24] Ryzhii, M., Ryzhii, V., and Willander, M., Effect of Donor Space Charge on Electron Capture Processes in Quantum Well Infrared Photodetectors, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 38(12A), 6650-6653, 1999.
- [25] Bhattacharya, P., "*Semiconductor Optoelectronic Devices*", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- [26] Jaros, M., "*Physics and Applications of Semiconductor Microstructures*", Clarendon Press, Oxford, 1990.
- [27] Kelly, M.J., "*Low Dimensional Semiconductors*", Clarendon Press, Oxford, 1995.
- [28] Hickmott, T.W., and Solomon, P.M., Fischer, R., et al., Negative charge, barrier heights, and the conduction-band discontinuity in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ capacitors, *J. Appl. Phys.*, 57(8), 2844-2853, 1985.