

## **Katkılı Tabakalar Arasındaki Uzaklığa Bağlı Olarak Çift**

### **Si $d$ - Katkılı GaAs Yapısı**

**Emine Öztürk**

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü SİVAS  
e-mail: [eozturk@cumhuriyet.edu.tr](mailto:eozturk@cumhuriyet.edu.tr)

Received:25.09.2003, Accepted: 22.12.2005

**Özet:**Bu çalışmada, katkılı tabakalar arasındaki uzaklığa bağlı olarak etkileşimli çift Si  $d$  -katkılı GaAs yapısının elektronik özellikleri, homojen bir dağılım için teorik olarak incelenmiştir. Etkin potansiyel profilleri, elektronik yoğunluk profilleri, altband enerji ve yerleşimleri, Schrödinger ve Poisson denklemlerinin self-consistent (kendi-içinde tutarlı) çözümüyle hesaplanmıştır.

Bu çalışmada, altband yapısındaki değişimlerin, katkılama tabakaları arasındaki uzaklığa oldukça duyarlı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Çift  $d$  -katkılama, GaAs yapısı, kendi-içinde tutarlılık.

### **The Double Si $d$ -Doped GaAs Structure as Dependent on the Separation Between the Doped Layers.**

**Summary:** In this study, the electronic properties of two coupled Si  $d$  -doped GaAs structure have been theoretically investigated for a uniform distribution. The effective potential profiles, the electronic density profiles, the subband energies and populations have been calculated by solving the Schrödinger and Poisson equations self-consistently.

In this study, it has been seen that the changes in the subband structure are quite sensitive to the separation between the doping layers.

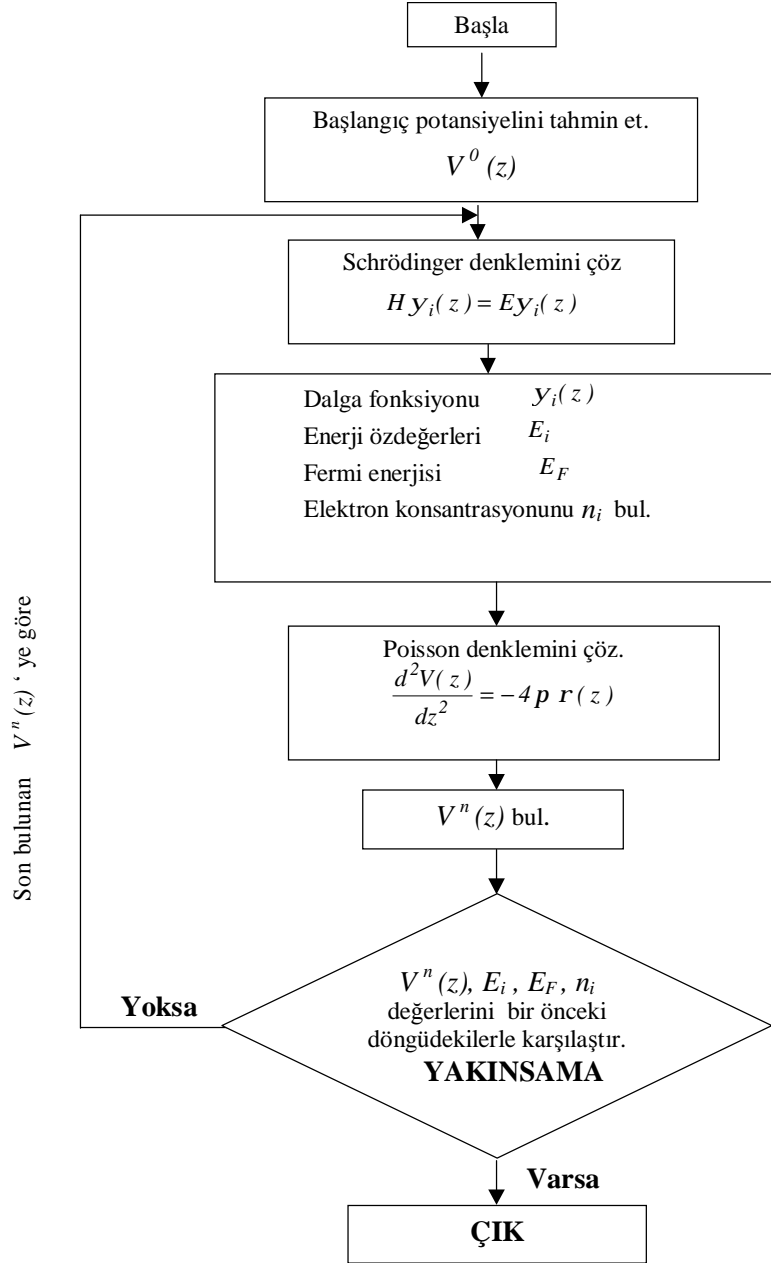
**Key Words:** Double  $d$  -doping, GaAs structure, self-consistency.

Son yıllarda, yüksek hızlı dijital ve mikrodalga uygulamaları için geliştirilen yarıiletken yapılar büyük ilgi çekmiştir. Bazı araştırmacılar, yüksek hareketliliğe sahip  $d$ -katkılı aletleri yapmak için, gelişen katkılama ve malzeme büyütme teknikleri üzerindeki deneysel ve teorik çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır [1, 6].

Bilindiği gibi, ideal  $d$ -katkılı yarıiletkenlerdeki sanki-iki boyutlu elektron sistemi, yüksek katkılama konsantrasyonunun ( $N_d \geq 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) çok ince bir tabakaya ( $L_d \leq 20 \text{ \AA}$ ) katkılanmasıyla gerçekleştirilir. Yüksek safsızlık konsantrasyonu, bir yandan sistemde yüksek elektron konsantrasyonuna yol açarak, birkaç altbandın yerleşimine neden olurken, diğer yandan bunun bir sonucu olarak, elektronlar üzerinde çok güçlü bir saçılma ve dolayısıyla da düşük elektron hareketliliğine neden olur. Bu katkılı tabakalardaki iyonize donörlerle saçılma, düşük sıcaklık ve yüksek katkılama konsantrasyonlarında en önemli saçılma mekanizmasıdır.  $d$ -katkılı yarıiletkenlerdeki elektron hareketliliğini artırmak için son zamanlarda geliştirilen alternatif bir yol, çift  $d$ -katkılı yapıları kullanmaktır[7-12]. Yani, etkileşimli kuyu yapılarını kullanarak daha yüksek hareketlilikler elde etmenin yolu, taşıyıcıların büyük bir kısmının katkısız uzay bölgesinde yerleştirilmesini sağlayacak bir yapı kurmaktır. Böylece band yapımında, safsızlık tabakalarındaki taşıyıcı kuşatmasını azaltacak ve kuyular arasındaki dalga fonksiyonu etkileşimini sağlayacak önemli gelişmeler sağlanabilir. Hem bu tür yapıların büyütülmesindeki kolaylıklar hem de yüksek orandaki taşıyıcı hareketlilikleri, çift  $d$ -katkılı GaAs yapıların yüksek hızlı elektronik ve optoelektronik alet uygulamalarında daha fazla kullanılmasına olanak sağlar. Bu tür yapılarda, elektron hareketliliğinin tek  $d$ -katkılı yapılara kıyasla 2 ila 5 kat arasında arttığı deneysel olarak tespit edilmiştir [7]. Fiziksel anlamda, tek ve çift kuyular arasındaki bu önemli hareketlilik farkının, her bir kuantum kuyusundaki taşıyıcı dalga fonksiyonu arasındaki etkileşimden dolayı olduğu söylenebilir. Özellikle etkileşimli  $d$ -katkılı kuyuların iletkenliği, düşük sıcaklıklarda homojen katkılı külçe yapılara kıyasla oldukça fazladır. Bu tür yapılar, yarıiletkenler için yüksek taşıyıcı yoğunluğuyla birlikte yüksek oranda taşıyıcı hareketlilikleri elde etmeye olanak sağlar.

Bu çalışmada, etkileşimli çift Si  $d$ -katkılı GaAs yapısının elektronik özelliklerindeki değişim, homojen bir dağılımda simetrik durumlar için incelenmiştir. Burada katkılı yarıiletken malzemenin etkin potansiyel profilleri, elektronik yoğunluk

profilleri, altband enerji ve yerleşimleri, self-consistent (kendi-içinde tutarlı) olarak Poisson ve Schrödinger denklemleri birlikte ele alınarak hesaplanmıştır.  $V(z)$ , etkin potansiyeli ve  $r(z)$  toplam yük yoğunluğunu göstermek üzere, self-consistent hesabı için akış şeması Şekil 1 de verilmiştir.



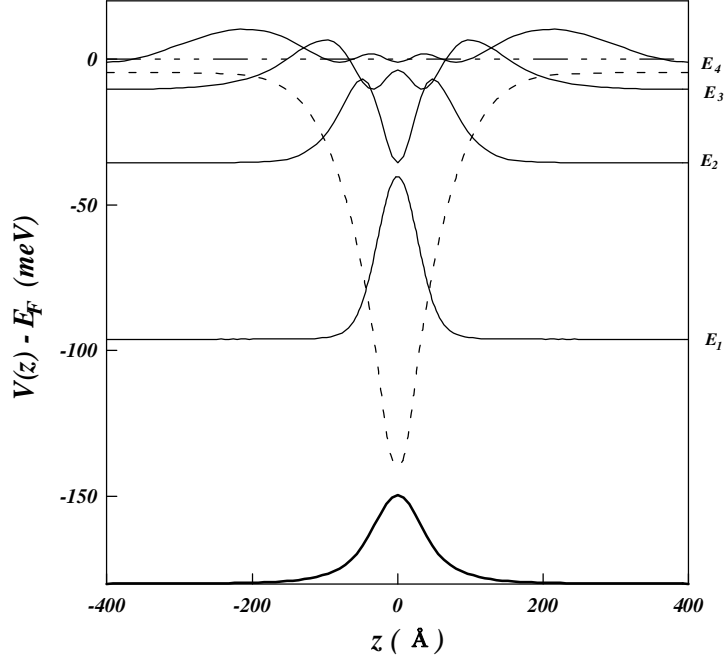
Şekil 1. Self-consistent hesabı için akış şeması.

Burada ilk olarak, birbirine çeşitli uzaklıklarda, her biri  $L_d = 20 \text{ \AA}$  kalınlığında ve  $N_d = 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  konsantrasyonunda olan iki Si-*d*-katkılama tabakasından oluşan

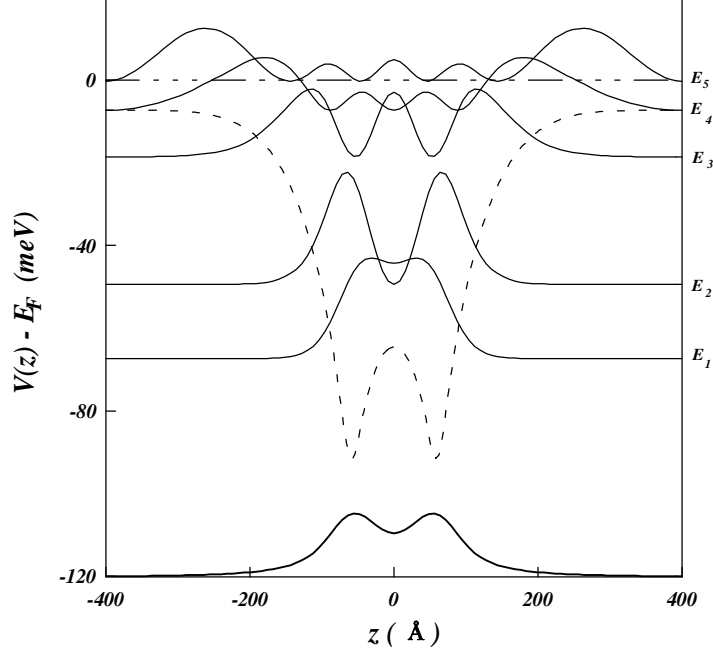
GaAs yapısının elektronik özellikleri incelenmiştir. Şekillerde etkin potansiyel profilleri ve altband enerjileri, Fermi enerjisi( üç nokta tek çizgi) ne göre verilmektedir. Şekil 2 den de görüldüğü gibi, katkılı  $d$ -tabakaları arasındaki uzaklık  $L_b=0\text{\AA}$  iken, sistemde toplam katkı konsantrasyonu  $N_d=(2 \times 2)10^{12} \text{ cm}^{-2}$  ve toplam katkılama genişliği  $L_d=2 \times 20 \text{\AA}$  olduğundan, yapıda derin bir potansiyel profili ortaya çıkar, elektronik yoğunluk  $d$ -katkılı GaAs etrafında çok iyi lokalizedir ve bu durumda yük taşıyıcılarının kuşatılmaları fazladır.

Katkılı tabakalar arasındaki uzaklık  $L_b=120\text{\AA}$  yapıldığında, kuyular arasında oluşan güçlü etkileşimden dolayı, taban durum  $d$ -tabakaları etrafında tamamen lokalize olmadığından, merkezi engelin tepesine doğru itilir (Şekil 3). Buradan da görüldüğü gibi, merkezde bir potansiyel engel ortaya çıkmakta ve elektronik yoğunluk daha geniş bir bölgede lokalize olmaktadır. İki  $d$ -katkılı tabaka, tek bir kuşatılmış potansiyele yol açarken çift kuyulu yapının merkezine çok fazla sayıda taşıyıcı yerleşir.

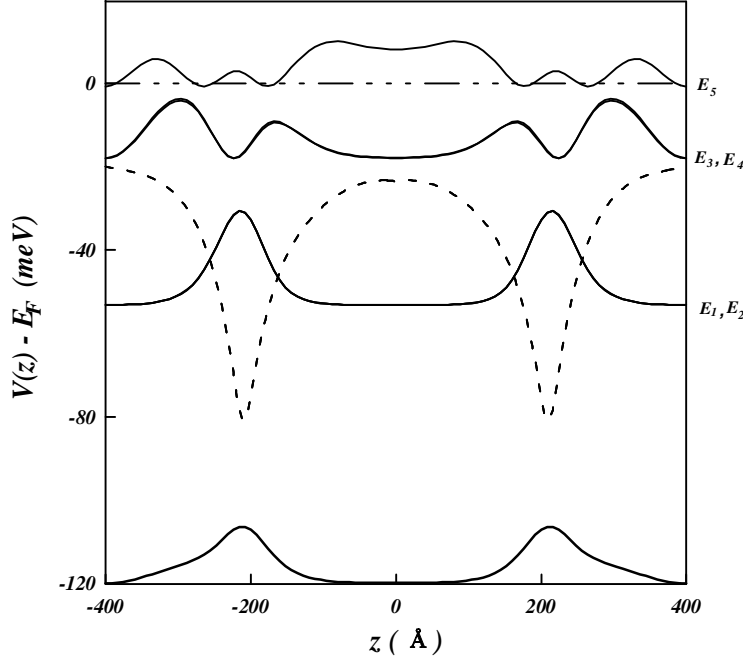
Aynı yapıda  $d$ -katkılama uzaklığı  $L_b=400\text{\AA}$ ' a çıkarıldığında, katkılı tabakalar arasındaki elektron dalga fonksiyonunun etkileşimi ortadan kalkar, taban ile 1.uyarılmış altband durumu dejenerasyona uğrar, bu durumda katkısız uzay bölgesinde yerleşen çok az sayıda taşıyıcı vardır (Şekil 4). En düşük iki altband seviyesi birbirine yakındır ve safsızlık tabakalarıyla üst üste gelen elektron dağılımları birbirine çok benzerdir. Buna rağmen daha yüksek seviyelerdeki elektron dalga fonksiyonları en düşük altbanddakine kıyasla çok daha geniş bir bölgede uzanır. Elektronik yoğunluk ise, her bir  $d$ -katkılı GaAs etrafında lokalizedir ve altbandlar arasında dejenerasyon vardır. Bu mesafede kuyular arasında etkileşim olmadığından, her bir  $d$ -katkılı potansiyel kuyu, izole edilmiş tek kuyudaki elektronik özelliklere benzer özellik gösterir. Ayrıca bu şekillerden katkılama uzaklığı artırıldığında, her bir  $d$ -katkılı GaAs tabakasındaki potansiyel profillerinin sığlaştığı ve buna bağlı olarak da elektronik yoğunluğun azaldığı görülmektedir.



Şekil 2. Katkılı  $d$ -tabakaları arasındaki uzaklık  $L_b=0\text{\AA}$  iken, sistemde toplam katkı konsantrasyonu  $N_d=(2 \times 2)10^{12} \text{ cm}^{-2}$  ve toplam katkılama genişliği  $L_d=2 \times 20\text{\AA}$  için elde edilen etkin potansiyel profili (kesikli eğri), elektronik yoğunluk profili (kalın eğri) ve farklı altbandlarda elektronların bulunma olasılıkları .



Şekil 2. Her biri  $L_d=20\text{\AA}$  kalınlığında ve  $N_d=2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  konsantrasyonunda olan çift Si- $d$ -katkılı GaAs yapısında, katkılı  $d$ -tabakaları arasındaki uzaklık  $L_b=120\text{\AA}$  olduğunda elde edilen etkin potansiyel profili (kesikli eğri), elektronik yoğunluk profili (kalın eğri) ve farklı altbandlarda elektronların bulunma olasılıkları .



Şekil 3. Her biri  $L_d=20\text{\AA}$  kalınlığında ve  $N_d=2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  konsantrasyonunda olan çift Si- $d$ -katkılı GaAs yapısında, katkılı  $d$ -tabakaları arasındaki uzaklık  $L_b=400\text{\AA}$  olduğunda elde edilen etkin potansiyel profili (kesikli eğri), elektronik yoğunluk profili (kalın eğri) ve farklı altbandlarda elektronların bulunma olasılıkları .

Taşıyıcıların safsızlık tabakası içinde ilk olarak yerleştiği taban durumun aksine, uyarılmış durumlardaki taşıyıcılar, uzay bölgesi içinde çok daha yüksek bulunma olasılığına sahiptir. Bu yüzden hareketlilik, uzay bölgesindeki uyarılmış durumların olasılık dağılımlarıyla belirlenir. Uyarılmış altbandlara taşıyıcı yerleşimi, taban durumdan daha düşük olmasına rağmen, çoklu altband geçiş durumundaki elektron hareketliliği, uyarılmış altbandlara yerleşen bu taşıyıcılar yardımıyla sağlanmaktadır. Uyarılmış altband enerji durumlarındaki taşıyıcıların katkısız uzay bölgesine yerleşimi, hareketliliği belirlemede önemli bir kriterdir ve bu yerleşim yüksek elektron hareketliliğine neden olur.

Özetlersek, tek  $d$ -katkılı potansiyel kuyusunda yük taşıyıcıları, iyonize safsızlık atomlarına yakın yerleşirler ve bu katkılı tabakadaki iyonize donörlerle çok güçlü bir saçılmaya uğrarlar, dolayısıyla da yapıda düşük elektron hareketliliğine neden olurlar. Katkılı tabakalar arasındaki uzaklık artırıldığında ( $L_b \cong 120 \text{\AA}$ ), çift  $d$ -katkılı yapılardaki uyarılmış altbandlar, Coulomb saçılmasının az olduğu katkısız uzay bölgesine yerleşen önemli taşıyıcı yoğunluklarına sahiptirler ve buradaki taşıyıcılar, ortaya çıkan hareketliliklerde önemli rol oynarlar. Bu iki katkılama tabakası yeteri kadar

ayrıldığında ( $L_b > 200 \text{ \AA}$ ), kuyular arasındaki altband dalga fonksiyonunun etkileşimi azalır ve taban durum ile 1. uyarılmış altband seviyeleri arasında dejenerasyon ortaya çıkar. Bu durumda her bir  $d$ -katkılı potansiyel kuyusu izole tek kuyu yapısına benzer özellik gösterdiğinden, yük yoğunluğu da her bir  $d$ -katkılı GaAs etrafında lokalizedir. Dolayısıyla katkısız uzay bölgesine çok az taşıyıcı yerleşir ve hareketlilik azalır.

Sonuç olarak, etkileşimli çift  $d$ -katkılı kuyuların, tek  $d$ -katkılı kuyuyla kıyaslanabilir derecede çok daha yüksek elektron hareketliliklerine sahip olduğu söylenebilir. Bu özelliğinden dolayı, etkileşimli çift  $d$ -katkılı GaAs yapısı yüksek hızlı elektronik alet uygulamalarında kullanılabilir.

### **Kaynaklar**

- [1]- E. F. Schubert, J. E. Cunningham and W. T. Tsong, Solid State Commun., 1987  
63,591
- [2]- G. Gillman, B. Vinter, E. Barbier and A. Tordella Appl. Phys. Lett., 1988, 52, 972
- [3]- E. Ozturk, Y. Ergun, H. Sari, I. Sokmen, Superlattice and Microstruct., 2000, 28, 35
- [4]- E. Ozturk, Y. Ergun, H. Sari, I. Sokmen, Applied Physics A 2001,73, 749
- [5]- E. Ozturk, Y. Ergun, H. Sari, I. Sokmen, Semicond. Sci. and Technol.,2001,16, 421
- [6]- E. Ozturk, Y. Ergun, H. Sari, I. Sokmen, J. Appl. Phys., 2002, 91, 2118
- [7]- X. Zheng, T. K. Carns, K. L. Wang and B.Wu, Appl. Phys. Lett., 1993, 62, 504
- [8]- P. M. Koenraad, A. C. L. Heessels, F. A. P. Bloom, J. A. A. J. Perenboom and J. H. Wolter, Physica B, 1993, 184, 221
- [9]- T. K. Carns, X. Zheng and K. L. Wang, Appl. Phys. Lett., 1993, 62, 3455
- [10]- H. H. Radamson, M. R. Sardela, Jr. O. Nur, M. Willander, B. E. Sernelius, W. X. Ni and G. V. Hansson , Appl. Phys. Lett., 1994, 64, 1842
- [11]- Guo-Qiang Hai, N. Studart and F. M. Peeters, Phys. Rev. B, 1995, 52 (15), 11273
- [12]- M. J. Kao, W. C. Hsu, H. M. Shieh and T. Y. Lin, Solid State Elect.,1995, 38 (6),  
1171