

## YARIPARABOLİK KVANT TƏBƏQƏSİNDƏ ENERJİ SƏVİYYƏLƏRİ

S.İ. ZEYNALOVA<sup>1,2</sup><sup>1</sup>AMEA Fizika İnstitutu, AZ 1143 Bakı, Azərbaycan<sup>2</sup>Bakı Dövlət Universiteti, AZ 1143 Bakı, Azərbaycan[sebine-zeynalova@mail.ru](mailto:sebine-zeynalova@mail.ru)

Yarımkəçirici əsaslı yarıparabolik potensiallı kvant təbəqəsində ölçü kvantlanmasına qoyulan şərtlər araşdırılmışdır. Göstərilmişdir ki, təbəqədəki yükdaşıyıcı üçün diskret halların sayı məhduddur, belə ki, müəyyən enerjili səviyyədən yuxarıda yerləşən səviyyələr üçün ölçüyə görə kvantlanma şərti ödənmir. Müəyyən edilmişdir ki, ölçü səviyyələrinin sayı 2-dən artıq ola bilməz.

**Açar sözlər:** de Broyl dalğasının uzunluğu, kvant təbəqəsi, yarıparabolik potensiallı kvant quyusu, ölçüyə görə kvantlanmış səviyyələr.

**DOI:** 10.15407/mfint.40.02.147

## 1. GİRİŞ.

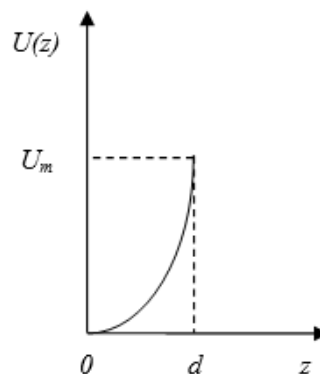
Müasir dövrdə mikro-nanoelektronikanın inkişafı nəticəsində molekulyar-şüa epitaksiyası, qaz fazalı epitaksiya, nanolitoqrafiya kimi texnoloji metodların yaranması aşağıölçülü sistemlər fizikasının inkişafında yeni bir mərhələ yaratdı. Bunun nəticəsində nəzəri sahədə alınan effektləri təcrübədə yoxlamaq imkanı əldə olundu və aşağıölçülü sistemlərdə yeni tədqiqatlar üçün stimül yarandı. Aşağıölçülü sistemlərin, məsələn, nazik təbəqələr, kvant məfilləri, kvant nöqtələri, kvant çuxurları (simmetrik və asimmetrik çuxurlar), laylı kristallar, süni ifratqəfəslər, heteroquruluşlar kimi növlərinin tədqiqatçıların diqqət mərkəzində olmasının digər səbəbləri onların böyük tətbiq imkanlarının olması və hazırda nanoelektronikanın müxtəlif sahələrində, eləcə də cihazqayırma geniş istifadə olunmalarıdır. Ona görə də, belə sistemlərdə müxtəlif fiziki hadisələrin, o cümlədən də optik effektlərin öyrənilməsi aktual və vacib məsələlərdən biridir [1,2]. Yeni-yeni daha kiçik ölçülü, daha sürətli və daha etibarlı cihaz və qurğuların yaradılmasının əsasında aşağıölçülü sistemlər fizikasının ən fundamental effekti, ölçü kvantlanması adlanan effekt durur [3,4]. Bu effektin mahiyyəti bundan ibarətdir: əgər sistemin (nümunənin) ölçüsü müəyyən bir istiqamətdə de-Broyl dalğasının uzunluğu tərtibində olarsa, həmin istiqamətdə nümunədəki yükdaşıyıcının (məsələn, elektronun) enerji spektri kvantlanmış, yəni, diskret olacaq. Önemli bir cəhət də odur ki, bu diskretlik nümunənin kvantlanma istiqamətindəki ölçüsündən kəskin asılıdır. Yəni, ölçü kiçildikcə, diskretlik kəskin artır. Topologiyanın belə dəyişməsi yarımkəçirici əsaslı optik detektorların, lazerlərin və müxtəlif tezliklər oblastında işləyən digər optoelektronika cihazlarının parametrlərinin yaxşılaşdırılmasına imkan yaradır. Ölçü kvantlanmasını səciyyələndirən ən vacib parametrlərdən biri ən aşağı səviyyənin (əsas halın) enerjisidir. Digər vacib parametrlər səviyyələrin (halların) sayıdır. Nəzəri olaraq bu say məhdudiyət qoyulmur. Amma real heterostrukturda, kvant təbəqələrində enerji səviyyələrinin sayı potensial quyunun dərinliyi, forması və həndəsi ölçüləri ilə təyin olunur və adətən bir neçə vahiddən çox olmur. Hazırda standart simmetrik profilli, yəni, düzbucaqlı, üçbucaqlı, parabolik potensiallı kvant quyuları ilə yanaşı asimmetrik, yarıparabolik, Poşl-

Teller kimi quyuların profilləri yaradılaraq tədqiq olunur. Belə kvant quyularında yeni, qeyri-adi qeyri-xətti optik xassələr aşkar meydana çıxır [5-8].

Belə kvant quyuları elektron sistemləri optikoelektronikanın müxtəlif sahələrində, o cümlədən, yaddaş elementlərində, birelektronlu tranzistorlarda və yarımkəçirici lazerlərdə tətbiq oluna bilər.

Təqdim olunan işdə yarıparabolik sonlu quyular modelində yarımkəçirici əsaslı kvant təbəqəsində ölçü kvantlanmasına qoyulan şərtlər araşdırılmışdır. Göstərilmişdir ki, təbəqədəki yükdaşıyıcı üçün diskret halların (enerji səviyyələrinin) sayı məhduddur və bu say təbəqənin qalınlığından asılıdır.

## 2. ENERJİ SPEKTRİ VƏ DALĞA FUNKSİYALARI



Şəkil 1.

Yarıparabolik kvant quyusunun potensialını (şəkil 1) aşağıdakı kimi yazmaq olar:

$$U(z) = \begin{cases} U_m \left( \frac{z}{d} \right)^2, & 0 < z < d \\ \infty, & z \leq d \end{cases} \quad (1)$$

Enerji spektrini tapmaq üçün (1) potensialı ilə

$$\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 \psi + [\varepsilon - U(z)] \psi = 0 \quad (2)$$

stasionar Şredinger tənliyini həll etməliyik. Burada  $U_m(z)$  potensial enerjinin maksimal qiymətidir və o, (1) ifadəsindən görüldüyü kimi  $z=d$  şərtindən tapılır,  $\psi(x,y,z)$  elektronun dalğa funksiyası,  $m^*$  isə onun effektiv kütləsidir.

Elektronun  $(x, y)$  müstəvisində və ona perpendikulyar  $z$  istiqamətindəki hərəkətləri qeyri-asılı olduğu üçün onun dalğa funksiyasını

$$\psi(x, y, z) = \varphi(x, y) \cdot \phi(z) \quad (3)$$

kimi yazmaq olar.

(3)-ü (2) tənliyində (1)-i nəzərə almaqla yerinə yazsaq, Şredinger tənliyi dəyişənlərinə ayrılır və müstəvidəki hərəkətin tənliyindən elektronun enerjisi və dalğa funksiyası üçün

$$\varepsilon_{k_{\perp}} = \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m^*} \quad (4)$$

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{\sqrt{L_x L_y}} e^{i(k_x x + k_y y)}$$

ifadələrini alırıq. Burada  $k_{\perp}^2 = (k_x^2 + k_y^2)$ . Təbəqə müstəvisinə perpendikulyar istiqamətindəki ( $z$  oxu istiqamətində) hərəkət tənliyi isə

$$\frac{d^2 \phi(z)}{dz^2} + \frac{2m^*}{\hbar^2} \left( \varepsilon_z - \frac{m^* \omega_m^2 z^2}{2} \right) \phi(z) = 0 \quad (5)$$

şəklində olacaq. Burada  $\omega_m = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{2U_m}{m^*}}$  kvant

quyusunda yarıparabolik potensialın maksimal tezliyidir. (5) tənliyinin həlli ossilyator funksiyalarını verir [9]. Nəticədə  $z$  oxu istiqamətindəki enerji spektri üçün

$$\varepsilon_z = \varepsilon_n = \hbar \omega_m \left( 2n + \frac{3}{2} \right) \quad (6)$$

ifadəsi alınır. Kvant təbəqəsindəki elektronun tam enerjisi isə

$$\varepsilon = \varepsilon(k_{\perp}, n) = \varepsilon_{\perp} + \varepsilon_n = \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m^*} + \hbar \omega_m \left( 2n + \frac{3}{2} \right) \quad (7)$$

olacaq, burada  $n=0, 1, 2, 3, \dots$

(6) düsturundan görünür ki, parabolik potensialı quyudakı enerji spektrindən fərqli olaraq yarıparabolik quyudakı enerji spektrində diskretlik daha güclüdür və əsas halın enerjisi  $\frac{1}{2} \hbar \omega_m$  deyil,  $\frac{3}{2} \hbar \omega_m$ -dir, yəni  $\hbar \omega_m$  qədər yuxarı sürüşmüş olur. Enerji səviyyələri ekvidistant olsa da, aralarındakı məsafə  $\hbar \omega_m$  deyil,  $2\hbar \omega_m$ -dir.

### 3. DİSKRET ENERJİ SƏVİYYƏLƏRİNİN SAYI.

İndi diskret səviyyələrin mümkün sayını tapmaq. Diskret səviyyələrin mövcudluğu üçün

$$d \leq \lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2m^* \varepsilon}} \quad (8)$$

şərti ödənməlidir. Bunun üçün (6)-nı (8)-də yerinə yazsaq:

$$d \leq \frac{h}{\sqrt{2m^* \left[ \hbar \omega_m \left( 2n + \frac{3}{2} \right) \right]}} \quad (9)$$

Buradan

$$d^2 \leq \frac{h^2}{2m^* \left[ \hbar \omega_m \left( 2n + \frac{3}{2} \right) \right]} \quad (10)$$

və

$$n \leq \frac{(2\pi\hbar)^2}{4m^* d^2 \hbar \omega_m} - \frac{3}{4} \quad (11)$$

$\hbar \omega_m$ -i qeyri-müəyyənlik prinsipindən qiymətləndirmək olar:

$$\hbar \omega_m = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} \quad (12)$$

Bunu (11) -də yerinə yazsaq,

$$n \leq 2 - \frac{3}{4} = \frac{5}{4} = 1,25 \quad (13)$$

alırıq. Yəni, yarıparabolik potensialı quyuda diskret səviyyələrin sayı 2-dən çox ola bilməz, çünki,  $n=2$ -dən böyük olan səviyyələrin enerjiləri üçün (1) şərti ödənmir.

[1] *Harrison, P. Valavanis, Alex.* Quantum wells, wires and dots: theoretical and computational physics of semiconductor nanostructures. Fourth edition, West Sussex, United Kingdom; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2016, 624 p.

[2] *В.Б. Тимофеев.* Оптическая спектроскопия объемных полупроводников и наноструктур: СПб.: Издательство «Лань», 2014, 512с.

[3] *T. Ando, A.B. Fowler, F. Stern.* Rev. Mod. Phys., 1982, 54, 437-672.

- [4] *Б.М. Аскеров*. Электронные явления переноса в полупроводниках. М., Наука, 1985, 320 с.
- [5] *N.D. Hien, C.A. Duque, E. Feddi*. Thin Solid Films, 2019. 682, p. 10-17.
- [6] *N.T. Tien, N.N. Hung, T.T. Nguyen*. Physica B, 2017. 519, p.63-68.
- [7] *R.Y. Yan, J. Tang, Z.H. Zhang*. Optical properties in GaAs/AlGaAs semiparabolic quantum wells by the finite difference method: Combined effects of electric field and magnetic field. International Journal Modern Physics B, 2018.32, p. 1850159 (1-12).
- [8] *B.İ. Guliyev, S.R. Figarova, H.I. Huseynov*. Semi-parabolic quantum well electrical conductivity. European Physical Journal plus. 2019. 134, p. 264 (1-6).
- [9] *M. Abramowitz, I. Stegun* (Editors), Handbook of mathematical functions, Nauka, Moscow, 1979, 832 p.

**S.İ. Zeynalova**

### **ENERGY LEVELS IN QUANTUM FILM WITH HALF-PARABOLIC POTENTIAL**

The fulfillment of the size quantization criterion in a quantum film with a half-parabolic potential is considered. It is shown that there is a limiting number of the discrete levels of charge carriers in a well above which the size quantization criterion is not satisfied. It is shown that in quantum wells of a half-parabolic profile, the number of size levels cannot exceed two levels.

**С.И. Зейналова**

### **УРОВНИ ЭНЕРГИИ В КВАНТОВОЙ ПЛЕНКЕ С ПОЛУПАРАБОЛИЧЕСКИМ ПОТЕНЦИАЛОМ**

Рассмотрено выполнение критерия размерного квантования в квантовой пленке. Показано, что существует ограниченное число дискретных уровней носителей заряда в яме, выше которого критерий квантования размера не выполняется. Установлено, что в квантовых ямах полупараболического профиля число уровней размерного квантования не может превышать двух.

*Qəbul olunma tarixi: 17.06.2021*