

KO'P QATLAMLI STRUKTURALARDA TOK TASHUVCHILARNING KINETIKASINING NAZARIY TADQIQI. 1-QISM

Rasulov Rustam Yavkachovich

Farg'ona davlat universiteti professori

Muminov Islomjon Arabboyevich

Farg'ona davlat universiteti dotsenti

Mamatova Mahliyo Adhamovna

Farg'ona davlat universiteti dotsenti

Raxmatullayeva Feruza Ulug'bek qizi

Farg'ona davlat universiteti tayanch doktoranti

Yusupopova Maxliyo Shavkatjon qizi

Farg'ona davlat universiteti tayanch doktoranti

e-mail: islombek_muminov@mail.ru

UO'K 537.311.33:538.971(575.1)

Annotatsiya: *Shredinger tenglamasi asosida markazida potensial chuqurlik mavjud bo'lgan besh qavatli yarimo'tkazgich nanostruktura uchun nazariy hisoblashlar ishlab chiqildi. Zaryad tashuvchilar energiyasini hisoblashda birinchi va ikkinchi tartibli qo'zg'alish nazariyasi qo'llanildi. Qatlamlarning geometrik o'lchamlari hamda zaryad tashuvchilarning effektiv massalariga bog'liq holda elektron energiya spektri siljishini baholovchi munosabatlar olindi. Hisoblashlar qatlamlar kesimida elektron to'lqin funksiyasi hosilalari va qatlamlararo o'tish ehtimoli oqimlarining uzluksizligini ta'minlovchi chegaraviy shartlar asosida bajarildi.*

Kalit so'zlar: *potensial o'ra, elektron energiya spektri, energiya spektrining siljishi, qo'zg'alish nazariyasi, effektiv massa, qatlamning geometrik o'lchamlari.*

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НОСИТЕЛЕЙ
ТОКА В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ. ЧАСТЬ 1**

Расулов Рустам Явкачович

профессор Ферганского государственного университета

Муминов Исломжон Араббоевич

доцент Ферганского государственного университета

Маматова Махлиё Адхамовна

доцент Ферганского государственного университета

Рахматуллаева Феруза Улугбек кизи

базовый докторант Ферганского государственного университета

Юсупопова Махлиё Шавкатжон кизи

базовый докторант Ферганского государственного университета

Аннотация: На основе уравнения Шрёдингера разработана теоретическая модель пятислойной полупроводниковой наноструктуры с потенциальной ямой в центральной области. Для расчёта энергии носителей заряда применена теория возмущений первого и второго порядка.

Получены соотношения, позволяющие оценивать смещение электронного энергетического спектра в зависимости от геометрических размеров слоёв и эффективных масс носителей. Расчёты выполнены с учётом граничных условий, обеспечивающих непрерывность производных электронной волновой функции по слоям, а также непрерывность потоков вероятности перехода между соседними слоями.

Ключевые слова: потенциальная яма, электронный энергетический спектр, смещение энергетического спектра, теория возмущений, эффективная масса, геометрические размеры слоёв.

**THEORETICAL STUDY OF THE KINETICS OF CURRENT CARRIERS
IN MULTILAYER STRUCTURES. PART 1**

Rasulov Rustam Yavkachovich

Professor, Fergana State University

Muminov Islomjon Arabboyevich

Associate Professor, Fergana State University

Mamatova Mahliyo Adhamovna

Associate Professor, Fergana State University

Raxmatullayeva Feruza Ulug‘bek qizi

Basic Doctoral Student, Fergana State University

Yusupopova Maxliyo Shavkatjon qizi

Basic Doctoral Student, Fergana State University

Abstract: *Based on the Schrödinger equation, a theoretical model has been developed for a five-layer semiconductor nanostructure featuring a central potential well. The carrier energy levels were calculated using first- and second-order perturbation theory. Relationships were derived to evaluate the shift of the electronic energy spectrum as a function of the layers' geometric dimensions and the carriers' effective masses. The calculations were performed subject to boundary conditions ensuring continuity of the derivatives of the electron wave function across the layers, as well as continuity of the probability-current flux associated with interlayer transmission.*

Keywords: *potential well, electron energy spectrum, shift of the energy spectrum, perturbation theory, effective mass, geometric dimensions of layers.*

Kirish

Yarimo‘tkazgichli mikro- va nanoelektronika sohasida ayrim yarimo‘tkazgichli qatlamlarida elektr o‘tkazuvchanligi har xil bo‘lgan yoki tok tashuvchilar energetik spektri tabiatan o‘zgaradigan ko‘p qatlamli strukturalardan tobora ko‘proq foydalanilmoqda [1-4]. Shu sababli bunday strukturalarda elektronli hodisalarani ham klassik, ham kvant fizikaviy tadqiq qilish ularga asoslangan qurilmalarning effektivligini, ishchi parametrlarini orttirish imkonini yaratadi.

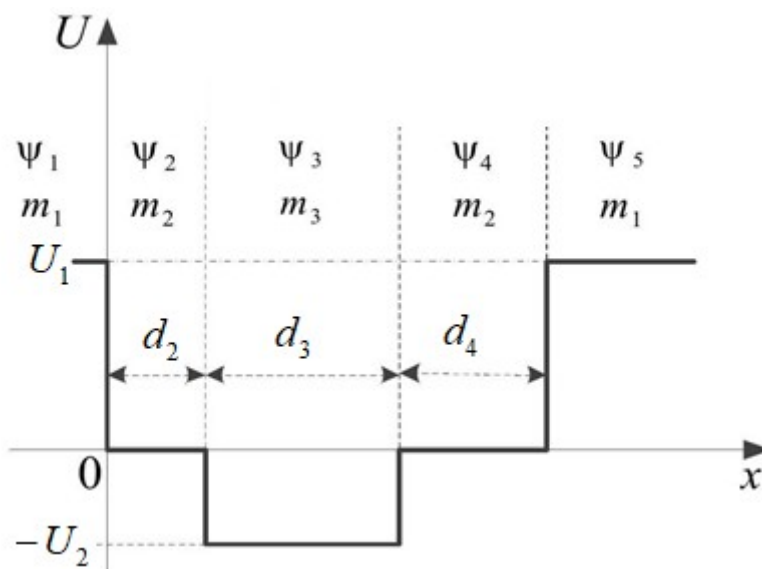
Adabiyotlar tahlili

So‘nggi yillarda tadqiqot etilayotgan har xil yarimo‘tkazgichlardan tashkil topgan qo‘p qatlamli tuzilmalaridagi qatlamning xarakterli o‘lchamlari 10-1000 Å ni

tashkil etadi [5]. Shuning uchun nanostrukturalardan tashkil topgan qatlamli tuzilmalar elektronikada noodatiy fizikaviy xususiyatlarga ega bo'lgan mutlaqo yangi turdagi sun'iy materiallar sifatida qo'llanilmoqda. O'z navbatida, nanostrukturalarga bo'lgan qiziqish atom darajasidagi zamonaviy texnologiyalar va sirt tuzilishini o'rganish sohalarini rivojlantirishga undaydi. Shu sababli ko'p qatlamli gomo- va geterostrukturalarda elektronli kinetik hodisalarni tadqiq qilish ham eksperimental, ham nazariy tadqiq qilish nuqtai nazaridan katta qiziqish uyg'otadi [6-9]. Bu hol bir tomondan rezonansli tunnel qurilmalarini yaratish imkonini yaratsa, ikkinchi tomondan, ko'p qatlamli tuzilmalarda de Broyl to'lqinlarining interferensiyasi [6-9] hisobiga namoyon bo'ladigan noyob xususiyatlarini kuzatish imkonini beradi.

Tadqiqot metodologiyasi

1-rasmda tasvirlangan markazida potensial o'raga ega bo'lgan besh qatlamli struktura tok tashuvchilarning holatlarini, masalan, to'lqin funksiyalari hamda



1-rasm. Uch potensial o'rali besh qatlamli struktura o'tkazuvchanlik zonasi tubining tasviri.

energetik spektrini hisoblaylik. Kelgusida har bir qatlam geometrik o'lchamining harxillligi, ulardagi tok tashuvchilar effektiv massalarining potensial energiya relefiga bog'liq holda o'zgarishini e'tiborga olamiz. 1-rasmda sxemasi keltirilgan, s rukturada

$m_n(d_n)$ - n -qatlamdagi tok tashuvchining effektiv massasi (qatlamlarning qalinliklari). $U_1 > 0$ - chetki qatlamlardagi potensial to'siq balandligi, $U_2 < 0$ - markaziy qatlamdagi potensial o'ra chuqurligi. Shredinger tenglamasining struktura qatlamlariga mos keladigan yechimlari quyidagi ko'rinishda qayd qilinadi:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= A_1 \cdot \exp(k_1 x), \quad \psi_2 = A_2 \cdot \cos(k_2 x) + B_2 \cdot \sin(k_2 x), \\ \psi_3 &= A_3 \cdot \cos(k_3 (x - d_3)) + B_3 \cdot \sin(k_3 (x - d_3)), \\ \psi_4 &= A_4 \cdot \cos(k_2 (x - d_2 - d_3)) + B_4 \cdot \sin(k_2 (x - d_1 + d_2)),\end{aligned}\quad (1)$$

bu yerda $k_1 = (2m_1 \hbar^{-2} (U_1 - E))^{1/2}$, $k_2 = (2m_2 \hbar^{-2} E)^{1/2}$, $k_3 = (2m_3 \hbar^{-2} (E + U_2))^{1/2}$.

To'liqin funksiyasi va oqim zichligining uzluksizligi talablaridan kelib chiqadigan chegaraviy shartlardan A_i va B_i noma'lum kattaliklarning old koefitsiyentlaridan tashkil topgan matritsaning aniqlanuvchisini nolga tenglashtirib tok tashuvchilar energetik spektrlari aniqlanadi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{aligned}& \left[\tilde{k}_4 \sin(k_2 d_2) - \tilde{k}_3 \cos(k_2 d_2) \right] \left[-\tilde{k}_2 (\tilde{k}_1 - \tilde{k}_3) \cos(k_2 d_2) + (\tilde{k}_1 \tilde{k}_3 + \tilde{k}_2^2) \sin(k_2 d_2) \right] \times \\ & \times \left[\tilde{k}_4 \cos(k_4 d_4) + \tilde{k}_5 \sin(k_4 d_4) \right] = 0.\end{aligned}\quad (2)$$

Masala yechimini soddalashtirish uchun $d_2 = d_4$ $k_2 = k_4$ deb hisoblasak, u holda

$$\begin{aligned}& \left[\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_3^2 - \tilde{k}_1^2) + (\tilde{k}_1^2 \tilde{k}_3^2 - \tilde{k}_2^4) \operatorname{tg}(k_2 d_2) \operatorname{tg}(k_2 d_2) \right] \operatorname{tg}(k_3 d_3) + 2 \tilde{k}_1 \tilde{k}_2^2 \tilde{k}_3 \cdot \left[\operatorname{tg}(k_2 d_2) \operatorname{tg}(k_2 d_2) - 1 \right] + \\ & + \tilde{k}_2 \left[\tilde{k}_3 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2) + \tilde{k}_1 (\tilde{k}_3^2 + \tilde{k}_2^2) \operatorname{tg}(k_3 d_3) \right] (\operatorname{tg}(k_2 d_2) + \operatorname{tg}(k_2 d_4)) = 0.\end{aligned}\quad (3)$$

Xususan. $0 \geq E > U_2$ shartda:

$$\begin{aligned} & \left[\tilde{k}_2^2 (\tilde{k}_1^2 - \tilde{k}_3^2) + (\tilde{k}_2^4 - \tilde{k}_1^2 \tilde{k}_3^2) \operatorname{th}(k_2 d_2) \operatorname{th}(k_2 d_2) \right] \operatorname{tg}(k_3 d_3) + 2 \tilde{k}_1 \tilde{k}_2 \tilde{k}_3 \cdot \left[1 + \operatorname{th}(k_2 d_2) \operatorname{th}(k_2 d_2) \right] + \\ & + \tilde{k}_2 \left[\tilde{k}_3 (\tilde{k}_2^2 + \tilde{k}_1^2) + \tilde{k}_1 (\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_3^2) \operatorname{tg}(k_3 d_3) \right] \left[\operatorname{th}(k_2 d_2) + \operatorname{th}(k_2 d_2) \right] = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

U_1 potensial to'siq balandligi potensial o'raning chuqurligidan miqdoran juda katta qiymatli bo'lsa, tok tashuvchilarning energiyalari: a) $E > 0$ shartda

$$\left[\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_3^2 \operatorname{tg}(k_2 a) \operatorname{tg}(k_2 d_4) \right] \operatorname{tg}(k_3 d_3) + \tilde{k}_2 \tilde{k}_3 \left[\operatorname{tg}(k_2 d_2) + \operatorname{tg}(k_2 d_4) \right] = 0, \quad 0 \geq E > |U_2|$$

b)

shartda esa
$$\left[\tilde{k}_2^2 + \tilde{k}_3^2 \operatorname{th}(k_2 d_2) \operatorname{th}(k_2 d_4) \right] \operatorname{tg}(k_3 d_3) + \tilde{k}_2 \tilde{k}_3 \left[\operatorname{th}(k_2 d_2) + \operatorname{th}(k_2 d_4) \right] = 0$$

munosabatlar yordamida aniqlanadi, bu yerda $\tilde{k}_{n'n} = \tilde{k}_{n'}/\tilde{k}_n = m_n k_{n'}/k_n m_{n'}$. G'alayonlar nazariyasiga ko'ra asosiy ($n=1$) va qo'zg'algan ($n=2$) holat energiyalari cheksiz chuqur potensial o'ra yaqinlashishia qo'zg'alishlar nazariyasiga ko'ra:

$$\delta E_n^{(1)} = \left[\frac{\pi n^2 \hbar^2}{2(d_2 + d_3)^2} \left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_2} \right) - U_2 \right] \cdot \left[\frac{d_2}{d_2 + d_3} - \frac{(-1)^n}{n\pi} \sin \left(\frac{2\pi n d_2}{d_2 + d_3} \right) \right]. \quad (5)$$

Natijalar va ularning tahlili

Qo'zg'algan sathning siljish sababi shundan iboratki, potensial o'ralarga ega potensial o'radagi tok tashuvchilarning gamiltoniani nafaqat potensial energiya bilan, balki o'raning turli qatlamlarida effektiv massalar bilan farqlanuvchi kinetik energiya bilan ham farq qiladi. Yuqorida qayd qilinganidek, oddiy potensial o'raning potensial profilini $-U_2$ chuqurlikka ega potensial o'ra hisobiga o'zgartirish sathning pasayishiga olib kelishi kerak va birinchi qo'zg'algan holat ($n=2$) uchun effektiv massalarning farqi ta'siri kuchliroq bo'ladi. Shu sababli qo'shimcha potensial chuqurlikkaa ega bo'lgan potensial o'ralar to'plamida qo'zg'algan sath oddiy potensial o'radagi qo'zg'algan sathdan yuqoriroqda joylashadi.

Shuni ta'kidlash o'rinliki, chiziqli g'alayonlar nazariyasi doirasida energiya siljishlarining tabiatini faqat b/l ning kichik qiymatlarida sifat jihatdan izohlash mumkin. Xususan, potensial o'ralarning eni ortishi bilan esa yaqinlashishning yuqoriroq darajalarini hisobga olish zarur.

Xulosa

Shunday qilib, keltirilgan ifodalar va hisoblangan grafik bog'liqliklar shunday xulosa qilish imkonini beradiki, murakkab shaklli kvant potensial o'ralardagi energetik sathlarning joylashuvini sifat jihatdan tavsiflash uchun cheksiz chuqur o'ra modelidan foydalanish faqat nisbatan katta chuqurlikka ega o'ralar uchungina mumkin. Murakkab shaklli kvant potensial o'ralarda energetik spektrni aniqlovchi ifodalar zamonaviy yuqori tezkor elektronika qurilmalarida qo'llaniladigan tunnellash–rezonansli tuzilmalarni loyihalash va modellashtirishda foydali bo'lishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Нанوفизика и наноэлектроника. Труды XXV Международного симпозиума // -Нижний Новгород, 9–12 марта 2021 г. № 2. Том 1. - Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета. -2021. - 521 с.
2. Rasulov V.R. Nanofizikaning nazariy asoslari. 2023. -279 b.
3. Ivchenko E.L., Pikus G.E. Superlattices and other heterostructures. Symmetry and optical phenomena // -Berlin : Springer. -1995. -370 p.
4. Ivchenko E.L. Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures // -Harrow (UK) : Alpha Science. - 2005. -350 p. ISBN: 1-84265-150-1.
5. Борисенко С.И. Физика полупроводниковых наноструктур//– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.–115 с.
6. Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Мамадалиева Н.З., Султанов Р.Р. Подбарьерный и надбарьерный перенос электронов через многослойные полупроводниковые структуры // -Известия ВУЗов. Физика. -2020. -Т.63. -№ 4. -С. 8-15.

7. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Eshboltaev I., Akhmedov B., Mamadaliyeva N.Z. Investigation of dimensional quantization in a semiconductor with a complex zone by the perturbation theory method // -European Sciences review. - 2018. -№ 9–10. 253-255 pp.
8. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Mamatova M. A., and Qosimov F. Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors. Part 1 // Journal of Physics: Conference Series, -2022. Vol. 2388, -P. 012156.