KOʻP QATLAMLI STRUKTURALARDA TOK TASHUVCHILARNING KINETIKASINING NAZARIY TADQIQI. 2-QISM

Rasulov Rustam Yavkachovich

Fargʻona davlat universiteti professori

Muminov Islomjon Arabboyevich

Fargʻona davlat universiteti dotsenti

Mamatova Mahliyo Adhamovna

Fargʻona davlat universiteti dotsenti

Raxmatullayeva Feruza Ulugʻbek qizi

Fargʻona davlat universiteti tayanch doktoranti

Yusupopova Maxliyo Shavkatjon qizi

Fargʻona davlat universiteti tayanch doktoranti

e-mail: islombek_muminov@mail.ru

UOʻK 537.311.33:538.971(575.1)

Annotatsiya: *Shredinger tenglamasi asosida markazida potensial toʻsiq mavjud boʻlgan besh qavatli yarimoʻtkazgich nanostruktura uchun nazariy hisoblashlar ishlab chiqildi. Qoʻzgʻalishlar nazariyasiga koʻra asosiy va qoʻzgʻatilgan holat energiyalarning oʻrta potensial oʻra balandligi hamda uchinchi va ikkinchi qatlamlar oʻlchamlarining nisbatiga bogʻlanishilari hisoblangan va ular elektronlar energiyasining qatlamlar oʻlchamlariga holda siljishiga oloib kelishi va bu siljishning musbat yoki manfiy boʻlishi qaralayotgan energetiya sohalariga, qatlamlarning zonaviy parametrlariga bogʻliqligi koʻrsatib oʻtilgan.*

Kalit soʻzlar: *potensial oʻra, potensial toʻsiq, elektron, energetik spektr, qoʻzgʻalishlar nazariyasi, effektiv massa, qatlamli struktura.*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ. ЧАСТЬ 2

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.*

Согласно теории возмущений расчитаны энергии основного и возбужденного состояний в зависимости от высоты потенциального барьера, находящегося в центре структуры и отношением размеров третьего и второго слоев и показано, что они приводят к сдвигу энергии электронов, зависящему от размеров слоев. Причем положительное или отрицательное значение этого сдвиги зависит от зонных параметров, а также от размеров слоев и зонных параметров слоев.

Ключевые слова: *потенциальная яма, потенциальный барьер, электроны, энергетический спектр, теория возмущений, эффективная масса, слоистая структура.*

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: *A theoretical model of a five-layer semiconductor nanostructure with a potential well in the central region has been developed using the Schrödinger equation.*

Using perturbation theory, the energies of the ground and excited states have been calculated as functions of the height of the potential barrier located in the center of the structure and the ratio of the sizes of the third and second layers. It has been shown that these values lead to a shift in the electron energy that depends on the layer sizes. Furthermore, the positive or negative value of this shift depends on the band parameters, as well as the layer sizes and band parameters of the layers.

Keywords: *potential well, potential barrier, electrons, energy spectrum, perturbation theory, effective mass, layered structure.*

Kirish

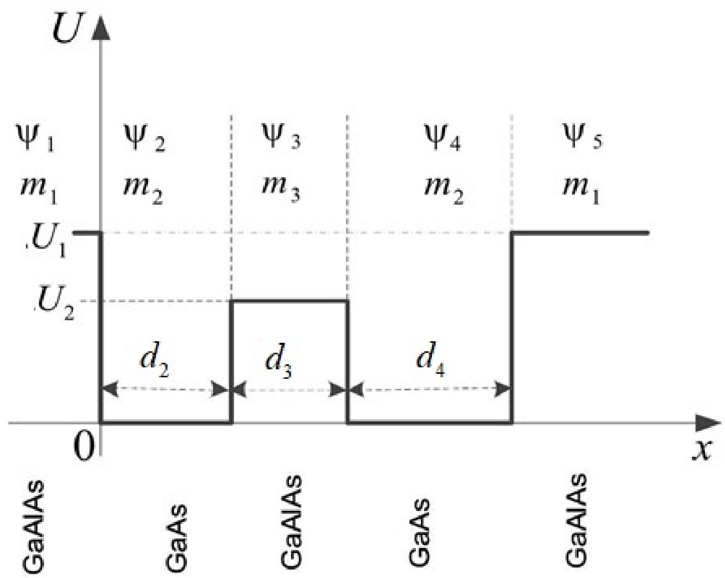
Qator adabiyotlarda ko‘p qatlamli geteroo‘tikli strukturalarda elektronli holatlar chekli energiyaviy chuqurlikli to‘g‘ri burchakli ko‘rinishdagi potensial o‘radagi tok tashuvchilarning harakati va tunellanishi masalasi kabi oddiy yaqinlashishda hal qilingan [1-11].

Adabiyotlar tahlili

Nanoelektronikaning rivojlanishi hisobiga bunday masalalarga qayta murojaat qilinib, murakkab ko‘rinishdagi qator potensiallar uchun bunday masalalar yechilgan [1-6]. Ammo ixtiyoriy ko‘rinishdagi potensialdagi mikrozarraning harakatiga tegishli kvant mexanikaviy masalalar kvaziklassik yaqinlashishda yechishni talab etadi. Shu sababli quyida nanostrukturalar, jumladan geteroo‘tikli tizimlar, o‘ta panjaralardagi tok tashuvchilarning energetik spektrini hisoblashda qo‘llaniladigan kvaziklassik hisoblash usuliga to‘xtalib o‘tamiz.

Tadqiqot metodologiyasi

Ayni paytda rezonans tunnelli diod (RTS) nanoelektronikaning istiqbolli qurilmalariningn asosini tashkil etadi. Xususan, RTSlarining yangi avlodlarini, masalan, elektron va optik cheklanishi ajratilgan geterolazerlarni yaratish uchun [7, 8] markazida qo‘shimcha to‘g‘ri burchakli potensial o‘raga ega bo‘lgan ko‘p qatlamli strukturalardan foydalaniladi (1-rasm). Energetik chuqurlik tufayli potensial o‘raning keng asosiy qismida kvant sathlarining joylashuvini boshqarish uchun yangi imkoniyatlar yuzaga keladi.



1-rasm. Rezonansli bog‘langan kvant potensial o‘ralar sistemasi.

Ushbu rasmda m_i - zaryad tashuvchilarning effektiv massalari; U_1 va U_2 - potensial o‘ralarning balandliklari; d_2, d_3, d_4 - struktura ichki qatlamlar qalinliklari. Shunday qilib, 1-rasmda qayd qilingan potensial maydonda elektronlarning hatti harakati bu potensialni o‘tkazuvchanlik zonasi ichiga olgan Shredenger tenglamasini yechish bilan hal etiladi. Har bir qatlam uchun Shredinger tenglamasining ($E < U_1, U_2$ da) yechimi quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi:

$$\psi_1 = A_1 \cdot \exp(k_1 x), \psi_2 = A_2 \cdot \cos(k_2 x) + B_2 \cdot \sin(k_2 x), \psi_3 = A_3 \cdot \mathrm{ch}\left(k_3\left(x - d_3\right)\right) + B_3 \cdot \mathrm{sh}\left(k_3\left(x - d_3\right)\right),$$
$$\psi_4 = A_4 \cdot \cos\left(k_2\left(x - d_2 - d_3\right)\right) + B_4 \sin\left(k_2\left(x - d_1 + d_2\right)\right), \psi_5 = B_5 \cdot \exp\left(-k_1\left(x - d_1 - d_2 - d_3\right)\right)$$

bu yerda $k_1 = \sqrt{2m_1\hbar^{-2}\left|U_1 - E\right|}, k_2 = \sqrt{2m_2\hbar^{-2}E}, k_3 = \sqrt{2m_3\hbar^{-2}\left|U_2 - E\right|}.$

Bastard sharti [1] e'tiborga olinb, A_i, B_i noma'lum noma'lumlar oldidagi

koeffitsiyentlardan tuzilgan determinant nolga teng bo'lish shartidan holatlar energiyasini aniqlash uchun quyidagi ifodani olamiz:

$$\left[-\tilde{k}_2\left(\tilde{k}_1 - \tilde{k}_3\right)\cos(k_2 d_2) + \left(\tilde{k}_1\tilde{k}_3 + \tilde{k}_2^2\right)\sin(k_2 d_2)\right]\left[\tilde{k}_4\cos(k_4 d_4) + \tilde{k}_5\sin(k_4 d_4)\right]\times$$
$$\times\left[\tilde{k}_4\, sh(k_3 d_3) - \tilde{k}_3 ch(k_3 d_3)\right] = 0. \tag{1}$$

Xususan $U_1 \geq E > U_2$ shartda:

$$\left[\tilde{k}_2^2\left(\tilde{k}_3^2 - \tilde{k}_1^2\right) + \left(\tilde{k}_1^2\tilde{k}_3^2 - \tilde{k}_2^4\right)\mathrm{tg}(k_2 d_4)\right]\mathrm{tg}(k_3 d_3) + 2\tilde{k}_1\tilde{k}_2^2 k_3 \cdot\left[\mathrm{tg}(k_2 d_2)\mathrm{tg}(k_2 d_4) - 1\right] +$$
$$+\tilde{k}_2\left[\tilde{k}_3\left(\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_1^2\right) + \tilde{k}_1\left(\tilde{k}_3^2 + \tilde{k}_2^2\right)\mathrm{tg}(k_3 d_3)\right]\left[\mathrm{tg}(k_2 d_2) + \mathrm{tg}(k_2 d_4)\right] = 0, \tag{2}$$

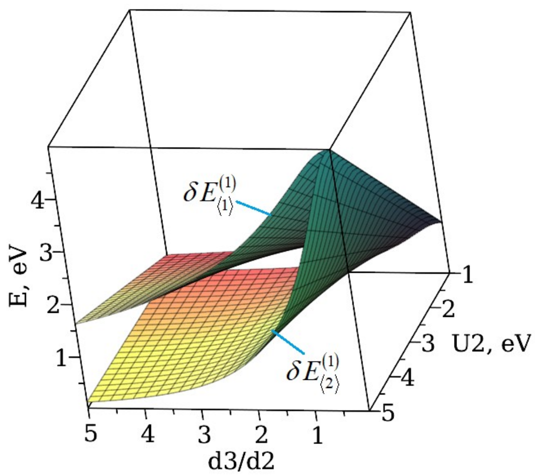
bu yerda $\tilde{k}_{n'n} = \tilde{k}_{n'}/\tilde{k}_n = m_n k_{n'}/k_n m_{n'}$. Potensial to'siqi balandligi $U_1 (U_1 >> U_2)$) shartni qanoatlantirganda $E < U_2$ va $d_2 = d_4$ shartda: $\left[\tilde{k}_2^2 + \tilde{k}_3^2\mathrm{tg}(k_2 d_2)\mathrm{tg}(k_2 d_4)\right]\mathrm{th}(k_3 d_3) + +\tilde{k}_2\tilde{k}_3\left[\mathrm{tg}(k_2 d_2) + \mathrm{tg}(k_2 d_4)\right] = 0$; $E > U_2$ shartda esa: $\left[\tilde{k}_2^2 - \tilde{k}_3^2\mathrm{tg}(k_2 d_2)\mathrm{tg}(k_2 d_2)\right]\mathrm{tg}(k_3 d_2) + +\tilde{k}_2\tilde{k}_3\left[\mathrm{tg}(k_2 d_2) + \mathrm{tg}(k_2 d_2)\right] = 0$.

Natijalar va ularning tahlili

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:

$$\delta E_n^{(1)} = \left[\frac{\pi n^2 \hbar^2}{2(d_2 + d_3)^2} \left(\frac{1}{m_3} - \frac{1}{m_2} \right) - U_2 \right] \cdot \left[\frac{d_2}{d_2 + d_3} - \frac{(-1)^n}{n\pi} \sin\left(\frac{2\pi n d_2}{d_2 + d_3} \right) \right]. \quad (3)$$

(3) ifodaga asoslanib qo‘zg‘alishlar nazariyasiga ko‘ra hisoblangan $\delta E_1^{(1)}$ asosiy va $\delta E_2^{(1)}$ qo‘zg‘atilgan holat energiyalarning o‘rta potensial o‘ra balandligi (U_2) hamda uchinchi va ikkinchi qatlamlar o‘lchamlarining nisbati (d_3/d_2)ga bog‘lanishilaridan ko‘rinyaptiki, ular elektronlar energiyasining qatlamlar o‘lchamlariga holda siljishiga oloib keladi va bu siljishning musbat yoki manfiy bo‘lishi qaralayotgan energetik sohalariga, qatlamlarning zonaviy parametrlariga bog‘liqdir.



2-rasm. Asosiy $\delta E_{\langle 1 \rangle}^{(1)}$ va qo‘zg‘algan $\delta E_{\langle 2 \rangle}^{(1)}$ holat energiyalarning o‘rta potensial o‘ra balandligi hamda uchinchi va ikkinchi qatlamlar o‘lchamlarining nisbatiga bog‘lanishi.

Sonli hisoblashlarda kattaliklarning quyidagi qiymatlari tanlangan [7, 8]: $d_2 = d_3 = d_4 = 20\,\overset{0}{\mathrm{A}}$, $U_1 = U_2 = 1,32\,\mathrm{eV}$, $m_1 = m_3 = 0,123 m_0$, $m_2 = 0,046 m_0$.

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. Rasulov R.Ya., Mamatova M.A. Ko‘p qatlamli kristall strukturalarda elektronlarni tashish nazaryasi. Monografiya //-Farg’ona sh. «Poligraf Super Servis» MChJ. -2023. -180 bet. UO’K: 631.171(075.8). KBK: 40.71ya73. R 25.
2. 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, IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/2388/1/012158 (Scopus. IF. 0,547).
3. Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Mamatova M. A., and Qosimov F. Semiclassical theory of electronic states in multilayer semiconductors. Part 2 // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. -Vol.2388. -P 012158. IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/2388/1/012158 (Scopus. 0,547).
4. Rasulov V.R., Mamatova M.A., Kodirov N.On the theory of distribution of current carriers in a three-layer semiconductor structure in a diode included// Scientific Bullettin of NamSU-Научный вестник НамГУ-NamDU ilmiy axborotnomasi. -2022. -№7. - Pp. 26-32.
5. Голант Е.И., Пашковский А.Б. Двухуровневые волновые функции электронов в двухбарьерных квантово-размерных структурах в электрическом поле конечной амплитуды// -ФТП. -2000. -Т.34. -№3. -С. 334-339.
6. Голант Е.И., Пашковский А.Б. Резонансные переходы между расщепленными уровнями трехбарьерных наноструктур и перспективы их применения в приборах субмиллиметрового диапазона// -ФТП. -2002. -Т.36. -№3. -С. 330.
7. Broekaert T.P.E., Lee W., Fonstad C.G. Pseudomorfic $In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs/InAs$ resonant tunneling diods with peak-to-valley current ratios of 30 at room temperature// Applied Physics Letters. -1988. -V.53. –No.16. –Pp.1545-1549.
8. Sze-Him Ng, Charles Surya. Studies of flicker noise in $In_{0.53}Ga_{0.47}As/AlAs/InAs$ resonant tunneling diodes// Solid-State Electronics. -1992. –Vol.35, Issue 9. -Pages 1213-1216. https://doi.org/10.1016/0038-1101(92)90151-2.