

УДК 538.9+539.3

Вплив магнітного поля на енергетичний спектр квазічастинок у біонаноккомплексі квантова точка A^2B^6 – протеїн

Олеся Даньків¹, Владислав Кугівчак², Олександр Війчук³, Олег Кузик⁴

¹Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
кафедра фізики та інформаційних систем, м. Дрогобич, Україна
dankivolesya@dspu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-2154-8396>

²Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
кафедра фізики та інформаційних систем, м. Дрогобич, Україна
vladyslav.kuhivchak@dspu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0008-9338-7377>

³Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
кафедра фізики та інформаційних систем, м. Дрогобич, Україна
oleksandr.viychuk@dspu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0006-8775-0489>

⁴Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
кафедра фізики та інформаційних систем, м. Дрогобич, Україна
olehkuzyk@dspu.edu.ua
<https://orcid.org/0000-0002-8474-444X>

Анотація. Побудовано математичну модель сферичної квантової точки A^2B^6 з домішкою, яка перебуває у магнітному полі та взаємодіє з адсорбованими молекулами протеїнів. У межах розробленої моделі досліджено вплив однорідного магнітного поля на енергетичний спектр електрона, дірки та екситона у біонаноккомплексі напівпровідникова квантова точка CdTe – сироватковий альбумін людини. Запропонована модель враховує поляризаційні ефекти, спричинені дипольним потенціалом білкової оболонки, а також спінове розщеплення у магнітному полі. Встановлено закономірності зміни енергії квазічастинок від радіуса квантової точки (нелегованої та з донорною або акцепторною домішкою), концентрації альбуміну та величини індукції магнітного поля. Встановлено, що зі зменшенням радіуса квантової точки вплив білкової оболонки стає більш суттєвим. Вплив альбуміну та спінове розщеплення у магнітному полі посилюються за наявності електрично активних домішок. Отримані закономірності свідчать про можливість керування оптичними та електричними властивостями біонаноккомплексів за допомогою зовнішнього магнітного поля. Запропоновані результати мають важливе значення для розробки магніточутливих біосенсорів та систем адресної доставки ліків. Біогібридні структури квантова точка – протеїн можуть бути використані як флуоресцентні зонди для візуалізації при дії магнітного поля.

Ключові слова: біонаноккомплекс, квантова точка, протеїн, магнітне поле, енергетичний спектр.

1. Вступ

У сучасній нанонауці та біофізиці дедалі більшої уваги набувають дослідження біонаноконструкцій, що поєднують неорганічні наноструктури з біомолекулами [1]. Однією з найбільш перспективних таких систем є комплекси квантових точок (КТ) з протеїнами, зокрема із сироватковим альбуміном людини (HSA) [2]. Завдяки здатності до селективної взаємодії, біосумісності та унікальним оптикоелектронним властивостям, такі гібридні структури відкривають нові можливості для біосенсорики, цільової доставки ліків та оптичної діагностики [3]. Однак, глибоке розуміння квантово-механічних властивостей цих комплексів, зокрема їхньої енергетичної структури, потребує врахування впливу зовнішніх полів, які можуть суттєво змінювати поведінку квазічастинок (електронів і дірок), локалізованих у КТ.

Магнітне поле є важливим зовнішнім фактором, здатним змінювати енергетичний спектр системи через квантування орбітального руху носіїв заряду, збурення спінових станів, а також через модифікацію просторової локалізації хвильових функцій. Для наноструктур, зокрема КТ у гетерогенному середовищі, магнітне поле здатне індукувати розщеплення енергетичних рівнів та зміну густини станів, що безпосередньо впливає на оптичні переходи та інші експериментально вимірювані характеристики. За наявності білкової оболонки, яка змінює діелектричне оточення та створює додатковий потенціал взаємодії (наприклад, внаслідок дипольного або кулонівського характеру), поведінка квазічастинок у КТ значно ускладнюється.

Особливої уваги потребує дослідження того, як магнітне поле впливає на енергетичний спектр електронів і дірок у системі “КТ – протеїн”, з урахуванням домішкових рівнів, анізотропії потенціалу зв’язування та просторової обмеженості [4, 5]. Теоретичне моделювання таких ефектів дозволяє краще зрозуміти фізичну природу взаємодії у таких біогібридних системах та сприяти створенню нових функціональних наноматеріалів з керованими властивостями [6].

У цій роботі розглянуто вплив однорідного магнітного поля на енергетичний спектр квазічастинок (електрона, дірки та екситона) у біонаноконструкції на основі напівпровідникової квантової точки, модифікованої білком. Метою роботи було проаналізувати зміну енергетичних рівнів квазічастинок різних радіусів за різної індукції магнітного поля з урахуванням ефектів квантового обмеження, за наявності донорної (акцепторної) домішки з урахуванням поляризації КТ під впливом електричного поля дипольної молекули HSA. Отримані результати будуть важливими для подальшого дизайну магніточутливих біосенсорів і досліджень керованої біоселективності на нанорівні.

2. Постановка проблеми

Розглянемо біонаноконструкцію сферична напівпровідникова КТ з донорною (акцепторною) домішкою – HSA, який розташований в однорідному магнітному полі з індукцією $\mathbf{B}$. Гамільтоніан такої системи із врахуванням поляризаційних ефектів КТ, спричинених дипольною молекулою HSA, можна представити у вигляді [7, 8]:

$$\hat{H}^{(e,h)} = \frac{1}{2\mu(e,h)} (\mathbf{p} \mp e\mathbf{A})^2 + V_{pol}(\mathbf{r}) \mp \frac{e^2}{4\pi\epsilon_{QD}\epsilon_0 r} + V(r), \quad (1)$$

$$V_{pol}(r, \vartheta) = -\frac{p^2 R_0^3}{4\pi\epsilon_0} \frac{3\cos^2\vartheta + 1}{(r+l)^6} \left(\frac{\epsilon_{QD} - \epsilon_{HSA}}{\epsilon_{QD} + 2\epsilon_{HSA}} \right), \quad (2)$$

$$V(r) = \begin{cases} 0, & r < R_0, \\ \infty, & r \geq R_0, \end{cases} \quad (3)$$

де p – дипольний момент молекули альбуміну (дипольний момент молекули сироваткового альбуміну крові людини становить близько 500 D (1 D = $3.33 \cdot 10^{-30}$ Кл·м)

[9]); ϑ – полярний кут у сферичній системі координат; $\mu^{(e,h)}$ – ефективна маса електрона (дірки); l – відстань від поверхні КТ до центру диполя HSA; R_0 – радіус КТ; ε_{QD} , ε_{HSA} – діелектричні проникності КТ та розчину альбуміну, відповідно. Діелектричну проникність розчину HSA, залежно від концентрації адсорбованих молекул HSA на поверхні КТ (ступеня заповнення поверхні КТ альбуміном θ), представимо лінійною функцією:

$$\varepsilon_{HSA} = (1 - \varepsilon_{H_2O})\theta + \varepsilon_{H_2O}, \quad (4)$$

де ε_{H_2O} – діелектрична проникність розчинника; $0 \leq \theta \leq 1$.

Використаємо симетричне представлення векторного потенціалу $\mathbf{A} = [\mathbf{r} \times \mathbf{B}]/2$ та представимо хвильову функцію у вигляді $\Psi(r, \vartheta, \phi) = R_{nl}(r)Y_{lm}(\vartheta, \phi)$. Тоді рівняння Шредінгера для радіальної функції набуде вигляду:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu^{(e,h)}} \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) \mp \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_{QD}\varepsilon_0 r} + \frac{1}{8}\mu^{(e,h)}\omega_c^{(e,h)2}r^2 + sg^{(e,h)}\mu_B B + \right. \\ \left. + \frac{\hbar\omega_c^{(e,h)}m}{2} - \frac{p^2 R_0^3}{2\pi\varepsilon_0} \frac{1}{(r+l)^6} \left(\frac{\varepsilon_{QD} - \varepsilon_{HSA}}{\varepsilon_{QD} + 2\varepsilon_{HSA}} \right) \right] R_{nl}(r) = E_n R_{nl}(r), \quad (5)$$

де $\omega_c^{(e,h)} = \frac{eB}{\mu^{(e,h)}}$; μ_B – магнетон Бора; $g^{(e,h)}$ – спіновий g-фактор; $s = \pm 1/2$. Тут враховано, що середнє значення ϵ меншим від $\cos^2\vartheta$ та більшим або рівним $1/3$.

Для визначення енергетичного спектра частинки (електрона або дірки) у потенціальному полі, що описується рівнянням (5), скористаємось методом розкладання повного гамільтоніана за базисом власних функцій моделі, в якій враховано лише магнітне поле та нескінченну потенціальну яму.

Спершу розглянемо систему без кулонівської взаємодії та без поляризаційного потенціалу:

$$\widehat{H}^0 = \frac{1}{2\mu^{(e,h)}} (p \mp eA)^2 + V(r). \quad (6)$$

За відсутності кулонівського потенціалу та поляризації розв'язок має вигляд:

$$E_{n,l,m}^{(0)} = \frac{\hbar^2 \alpha_{nl}^2}{2\mu^{(e,h)} R_0^2} + \hbar\omega_c^{(e,h)} \left(2n + l + \frac{3}{2} \right) + sg^{(e,h)}\mu_B B + \frac{\hbar\omega_c^{(e,h)}m}{2}, \quad (7)$$

де α_{nl} – нулі сферичної функції Бесселя $j_l(\alpha_{nl})$.

Для обчислення поправки до енергії, спричиненої кулонівським та поляризаційним потенціалом, обмежимося першим наближенням у межах теорії збурень:

$$\Delta E_{n,l,m} = \left\langle \psi_{n,l,m}^{(0)} | V_C(r) + V_{pol}(r) | \psi_{n,l,m}^{(0)} \right\rangle, \quad (8)$$

де $\psi_{n,l,m}^{(0)} = R_{nl}^{(0)}(r) \cdot Y_{lm}(\vartheta, \phi)$ – власні функції незбуреної задачі.

Внаслідок сферичної симетрії та усереднення по ϑ , інтегрувати можна лише по r :

$$\Delta E_{n,l} = \int_0^{R_0} [V_C(r) + V_{pol}(r)] \cdot \left| R_{nl}^{(0)}(r) \right|^2 r^2 dr. \quad (9)$$

Тоді повна енергія квазічастинки у сферичній ямі з магнітним полем:

$$E_{n,l,m} = E_{n,l,m}^{(0)} + \Delta E_{n,l}. \quad (10)$$

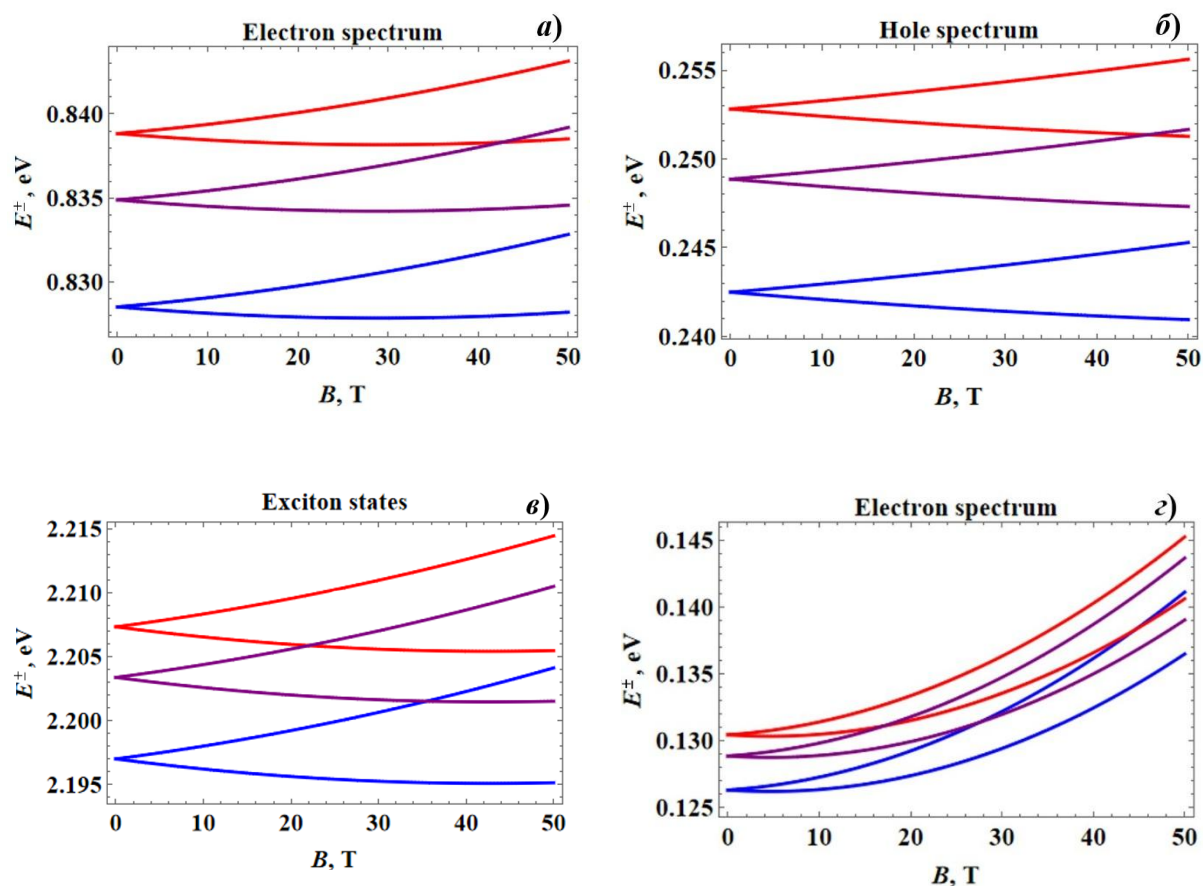
3. Результати розрахунків та їх обговорення

На рис. 1 наведено результати розрахунків енергії електрона й дірки в основному стані, а також енергії екситона у КТ CdTe з адсорбованими молекулами альбуміну, залежно від індукції магнітного поля з урахуванням спінового розщеплення. Параметри (ефективні маси носіїв заряду, діелектрична проникність, спіновий g-фактор, ширина забороненої зони) матеріалу CdTe взяті з роботи [10]. Дослідження проведені за різних радіусів КТ та різних концентрацій HSA (за різного ступеня заповнення поверхні КТ альбуміном).

З рисунків видно, що зі зростанням індукції магнітного поля енергетичні рівні як електрона, так і дірки загалом зростають, що пов'язано з додатковою локалізацією носіїв заряду в магнітному полі. Цей ріст є нелінійним через взаємодію кількох факторів, зокрема, впливу спінового розщеплення, кулонівської взаємодії в екситоні, наявності поляризаційного потенціалу на межі КТ – HSA.

Для різних радіусів КТ спостерігається чітка тенденція до пониження енергетичних рівнів при збільшенні радіуса. Із збільшенням ступеня заповнення поверхні КТ молекулами альбуміну (тобто концентрації HSA у колоїдному розчині) спостерігається незначне зростання енергії квазічастинок (не більше 10 меВ). Зі зростанням радіуса КТ цей ефект взагалі практично зникає (рис. 1з). У цьому випадку наявність альбуміну призводить до енергетичного зсуву, не більшого, ніж 1-2 меВ.

Зі збільшенням радіуса КТ величина енергетичного розщеплення у магнітному полі зменшується, що пов'язано зі зменшенням локалізації носіїв заряду. Величина енергетичного розщеплення у магнітному полі практично не залежить від концентрації альбуміну, що свідчить про незначний вплив поверхневого шару HSA на спінові ефекти та магнітну чутливість енергетичних рівнів.



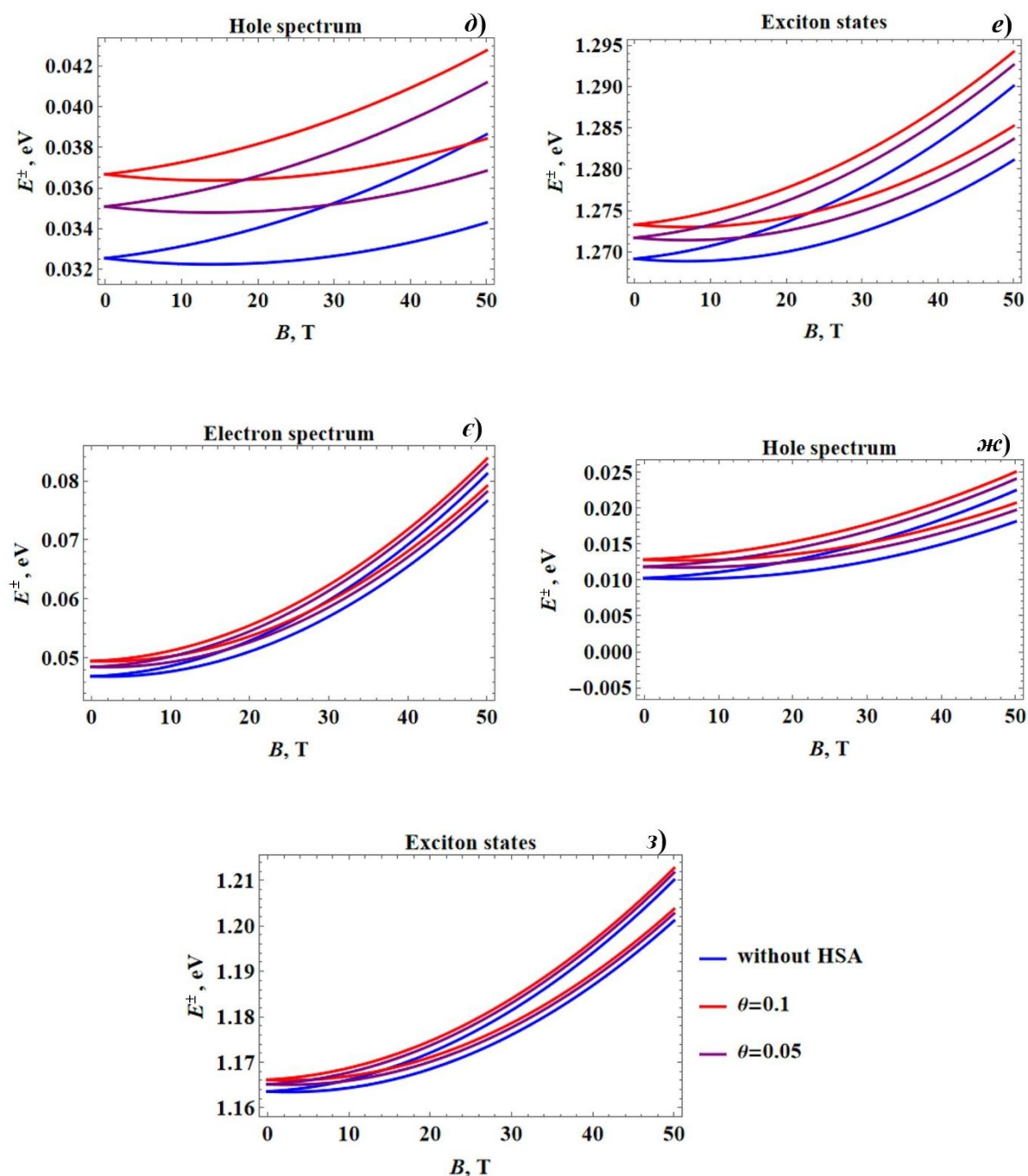


Рис. 1. Залежність енергії електрона (а, г, в), дірки (б, д, ж) та екситона (в, е, з) від індукції магнітного поля у біонаноконкомплексі КТ CdTe – HSA за різних значень ступеня заповнення поверхні КТ альбуміном та різних радіусів КТ:
 $R_0 = 2$ нм (а, б, в); $R_0 = 5$ нм (г, д, е); $R_0 = 8$ нм (е, ж, з)

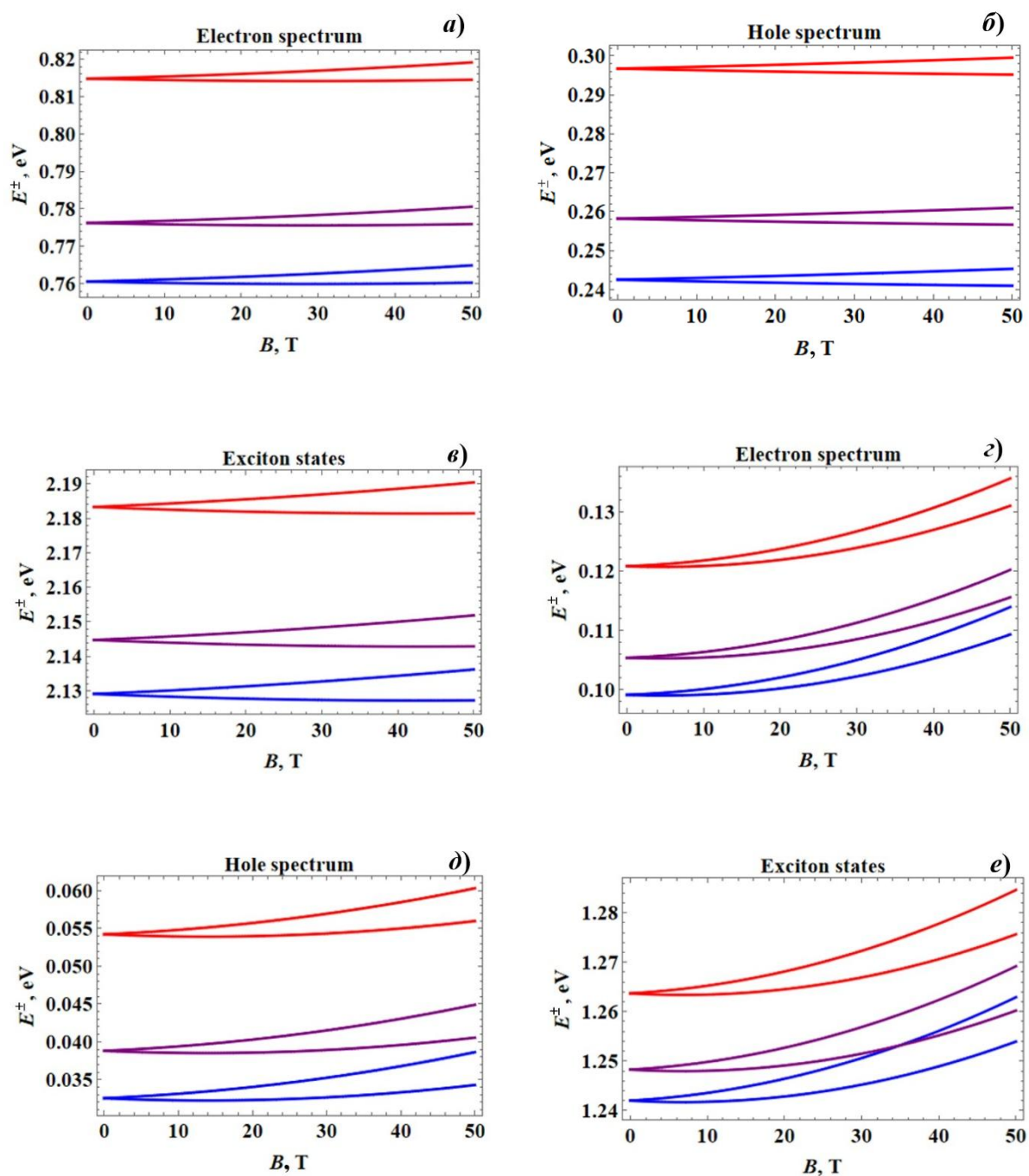
На рис. 2 приведено результати аналогічних розрахунків енергії електрона й дірки в основному стані, а також енергії екситона у біонаноконкомплексі HSA – КТ CdTe, яка містить донорну домішку, залежно від індукції магнітного поля з урахуванням спінового розщеплення. Дослідження проведені за різних радіусів КТ та різних концентрацій HSA (різний ступінь заповнення поверхні КТ альбуміном).

В цілому, закономірності є дуже подібними до описаних вище для КТ без домішки. Основними відмінностями є зміна енергії квазічастинок і зростання ролі альбуміну. У

цьому випадку, для малих КТ ($R_0 = 2$ нм), енергетичний зсув внаслідок наявності HSA може складати більше 50 меВ (рис. 2в). Домішка створює локальне електростатичне поле, яке у комбінації з біомолекулою HSA посилює поляризаційний потенціал, що призводить до більшого енергетичного зсуву. Також за наявності донорної домішки підсилюється ефект спінового розщеплення енергетичних рівнів.

На рис. 3 приведено результати аналогічних розрахунків енергії електрона й дірки в основному стані, а також енергії екситона у біонаноккомплексі HSA – КТ CdTe, яка містить акцепторну домішку. Як бачимо, енергія екситона не змінюється, як це було у випадку наявності донорної домішки. Однак, зменшується енергія електрона та збільшується енергія дірки в основному стані.

В обидвох випадках розглядалася немагнітна домішка.



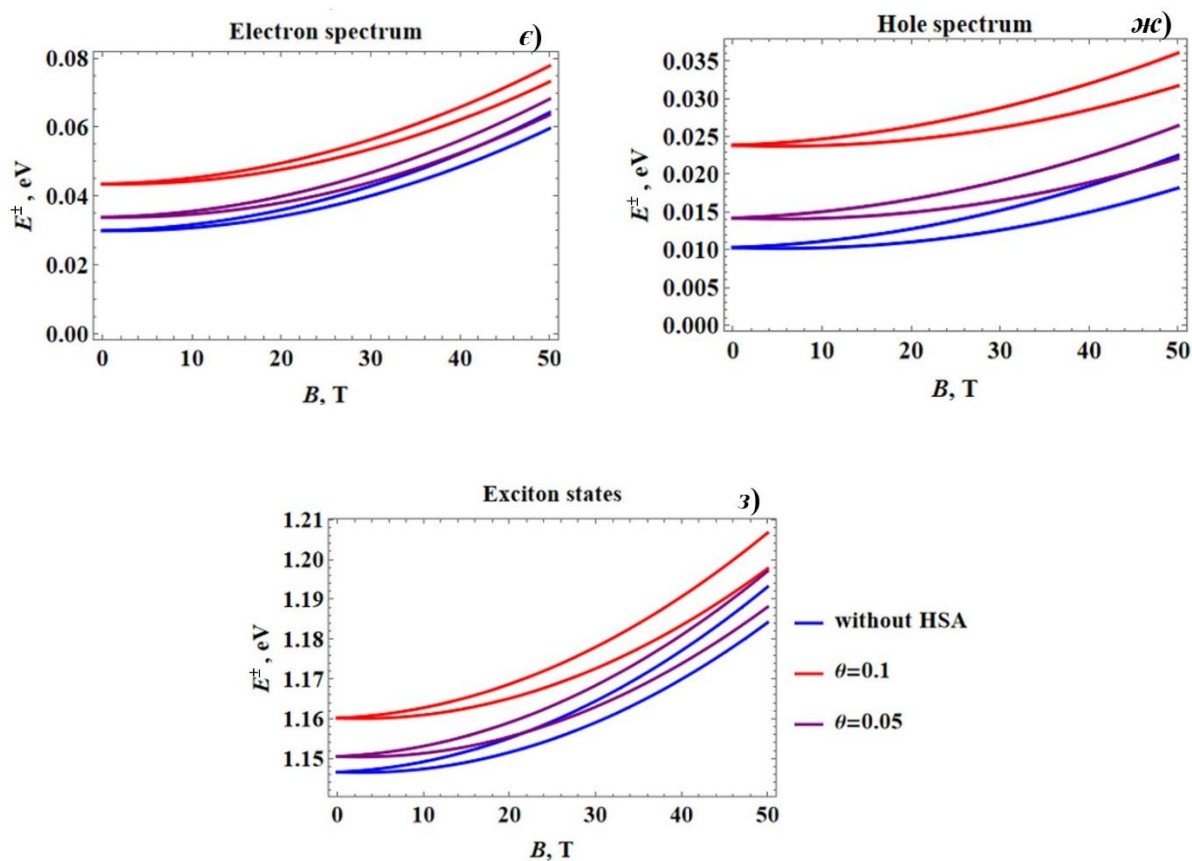
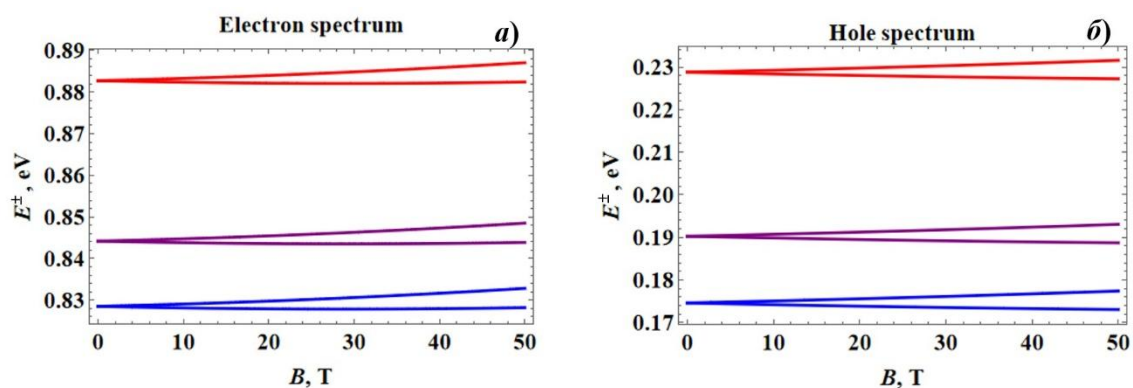


Рис. 2. Залежність енергії електрона (а, г, є), дірки (б, д, ж) та екситона (в, е, з) від індукції магнітного поля у біонаноконкомплексі КТ CdTe (з донорною домішкою) – HSA за різних значень ступеня заповнення поверхні КТ альбуміном та різних радіусів КТ: $R_0 = 2$ нм (а, б, в); $R_0 = 5$ нм (г, д, є); $R_0 = 8$ нм (є, ж, з)



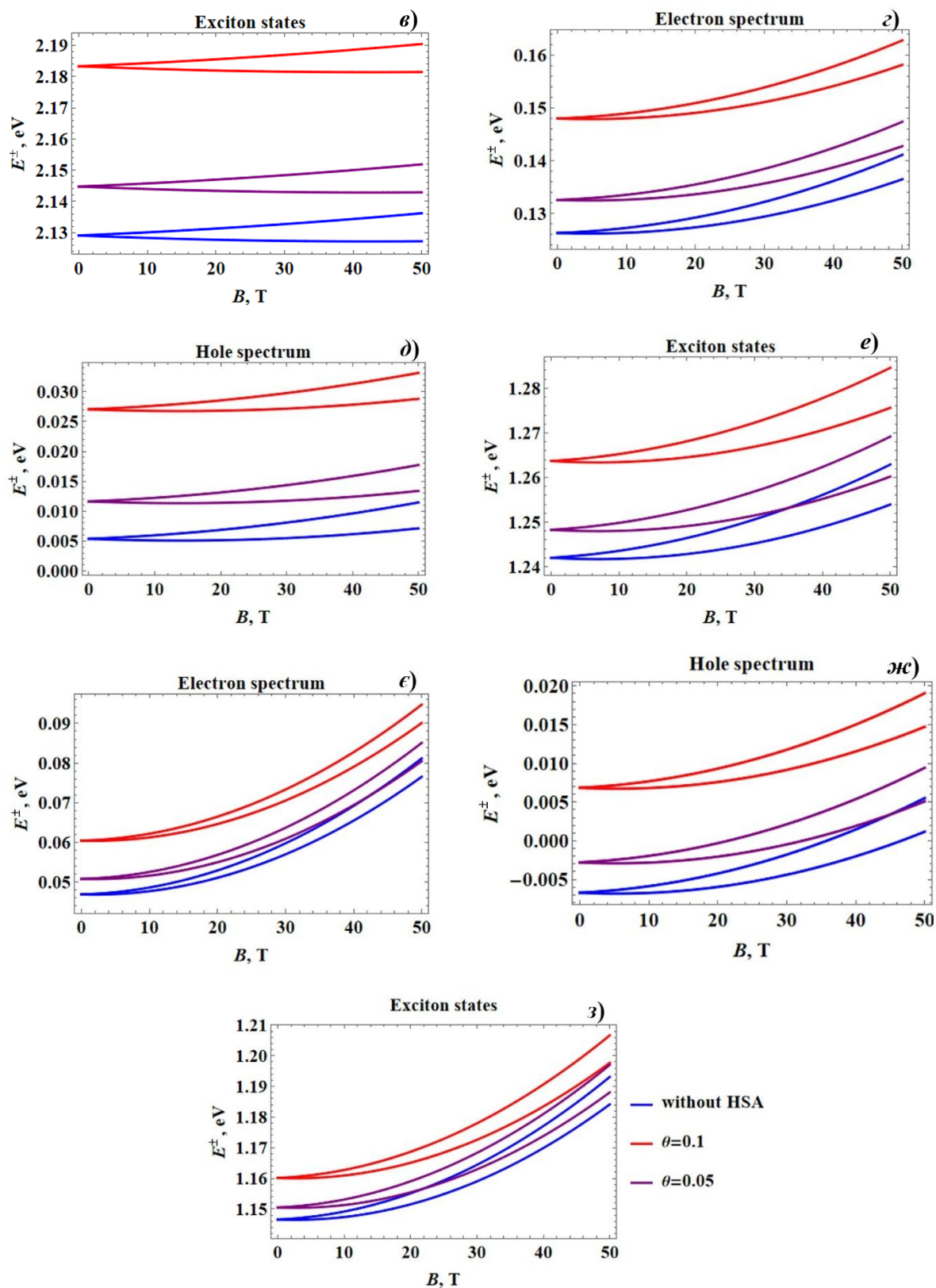


Рис. 3. Залежність енергії електрона (а, г, є), дірки (б, д, ж) та екситона (в, е, з) від індукції магнітного поля у біонанокомплексі КТ CdTe (з акцепторною домішкою) – HSA за різних значень ступеня заповнення поверхні КТ альбуміном та різних радіусів КТ: $R_0 = 2$ нм (а, б, в); $R_0 = 5$ нм (г, д, е); $R_0 = 8$ нм (є, ж, з)

Отримані результати є важливими для розвитку біомедичних технологій, зокрема магніточутливої діагностики та контролю доставки лікарських препаратів. Виявлена залежність положення енергетичних рівнів електрона, дірки та екситона у квантових точках CdTe від індукції магнітного поля, а також вплив біомолекул альбуміну та домішок на ці рівні, відкриває можливість створення керованих магнітним полем наносистем. Зокрема, такі біонанокомплекси можуть бути використані як магніточутливі флуоресцентні зонди для візуалізації тканин або клітин в умовах дії зовнішнього магнітного поля. Крім того, чутливість енергетичного спектра до магнітного поля дозволяє розробляти так звані “розумні” наноматеріали, які змінюють свої властивості у магнітному полі, що може бути корисним для контрольованого вивільнення ліків у цільових зонах організму [11]. Таким чином, дослідження сприяють створенню нових функціональних наноструктур для медичних застосувань, де поєднуються селективність біомолекул і зовнішнє магнітне керування.

Основні результати та висновки

1. Побудовано математичну модель сферичної квантової точки A^2B^6 з домішкою, яка взаємодіє з адсорбованими молекулами протеїнів, зокрема, альбуміну HSA, та розташована в однорідному магнітному полі.
2. У межах розробленої моделі досліджено енергетичний спектр електрона, дірки та екситона за різних значень радіуса КТ, ступеня покриття її поверхні HSA залежно від індукції зовнішнього магнітного поля з урахуванням спінового розщеплення. Показано, що магнітне поле призводить до зростання енергії квазічастинок, що зумовлено підсиленням локалізації носіїв заряду.
3. Показано, що зі збільшенням радіуса КТ енергетичні рівні знижуються, а ефект впливу поверхневого шару HSA на енергетичний спектр стає менш вираженим.
4. Встановлено, що спінове розщеплення у магнітному полі підсилюється за наявності донорної чи акцепторної домішки, що пояснюється додатковою локалізацією електронів у самоузгодженому електричному полі, створеному домішкою та дипольною біомолекулою.
5. Отримані результати можна використати для створення новітніх наноматеріалів та біосенсорів, для медичної візуалізації та систем адресної доставки ліків, чутливих до магнітного поля. Це відкриває можливості керування їхніми властивостями за допомогою зовнішнього магнітного поля, що є важливим для точної діагностики та терапії.

Конфлікт інтересів і етика. Автори заявляють, що не мають конфліктів інтересів. Автори також заявляють про повне дотримання всіх правил етики журнальних досліджень.

Подяки. Автори заявляють про відсутність спеціального фінансування цієї роботи.

Список використаних джерел

1. Díaz-González M., De la Escosura-Muñiz A., Fernandez-Argüelles M.T. et al. Quantum dot bioconjugates for diagnostic applications. *Topic in Current Chemistry*. 2020. Vol. 378. P. 35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41061-020-0296-6>
2. Ehzari H., Safari M., Samimi M., Shamsipur M., Gholivand M.B. A highly sensitive electrochemical biosensor for chlorpyrifos pesticide detection using the adsorbent nanomatrix contain the human serum albumin and the Pd:CdTe quantum dots. *Microchemical Journal*. 2022. Vol. 179. P. 107424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107424>

3. Kunachowicz D., Ścisławska M., Jakubek M., Kizek R., Kepinska M. Structural changes in selected human proteins induced by exposure to quantum dots, their biological relevance and possible biomedical applications. *NanoImpact*. 2022. V. 26. P. 100405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100405>
4. Mkrtchyan M. A., Sarkisyan H. A. Influence of external magnetic field on intraband transitions in lens-shaped quantum dot. *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19, № C05014. P. C05014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/05/C05014>
5. Zeng Z., Garoufalis C. S., Baskoutas S. Combination effects of tilted electric and magnetic fields on donor binding energy in a GaAs/AlGaAs cylindrical quantum dot. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012. Vol. 45, No 23. P. 235102. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/23/235102>
6. Pareek A., Kumar D., Pareek A., Gupta M. M. Advancing cancer therapy with quantum dots and other nanostructures: A review of drug delivery innovations, applications, and challenges. *Cancers*. 2025. Vol. 17, No 5. P. 878. DOI: <https://doi.org/10.3390/cancers17050878>
7. Shaer A., Elsaid M., Elhasan M. The magnetic properties of a quantum dot in a magnetic field. *Turkish Journal of Physics*. 2016. Vol. 40, No. 3. P. 209–218. DOI: <https://doi.org/10.3906/fiz-1510-4>
8. Raju G. G. Dielectrics in Electric Fields. New York – Basel: Marcel Dekker, Inc., 2003. 728 p.
9. Scheider W., Dintzis H. M., Oncley J. L. Changes in the electric dipole vector of human serum albumin due to complexing with fatty acids. *Biophysical Journal*. 1976. Vol. 16. P. 417–431. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0006-3495\(76\)85698-6](https://dx.doi.org/10.1016/S0006-3495(76)85698-6)
10. Корбутяк Д. В., Мельничук С. В., Корбут Є. В., Борисик М. М. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості. Київ: Іван Федоров, 2000. 224 с.
11. Abdellatif A. A. H., Younis M. A., Alsharidah M., Al Rugaie O., Tawfeek H. M. Biomedical applications of quantum dots: overview, challenges, and clinical potential. *International Journal of Nanomedicine*. 2022. Vol. 17. P. 1951–1970. DOI: <https://doi.org/10.2147/IJN.S357980>

UDC 538.9+539.3

The influence of a magnetic field on the energy spectrum of quasiparticles in the A^2B^6 quantum dot–protein bionanocomplex

Olesya Dan'kiv, Vladyslav Kuhivchak, Oleksandr Viychuk, Oleh Kuzyk

Abstract. A mathematical model of the spherical A^2B^6 quantum dot with an impurity, which is in a magnetic field and interacts with adsorbed protein molecules, and is located in a uniform magnetic field, was constructed. Within the framework of the developed model, the influence of a uniform magnetic field on the energy spectrum of an electron, hole, and exciton in the semiconductor CdTe quantum dot–human serum albumin bionanocomplex has been investigated. The proposed model takes into account the polarization effects caused by the dipole potential of the protein shell, as well as spin splitting in a magnetic field. The regularities of change in the energy of quasiparticles on the radius of the quantum dot (undoped and with a donor or acceptor impurity), the concentration of albumin, and the magnitude of the magnetic field induction were established. It was established that with a decrease in the radius of the quantum dot, the influence of the protein shell becomes more significant. The influence of albumin and spin splitting in a magnetic field are enhanced in the presence of electrically active impurities. The obtained regularities indicate the possibility of controlling the optical and electrical properties of bionanocomplexes using an external magnetic field. The proposed results are important for the development of magnetosensitive biosensors and targeted drug delivery systems. Biohybrid structures quantum dot–protein can be used as fluorescent probes for visualization under the action of a magnetic field.

Keywords: bionanocomplex, quantum dot, protein, magnetic field, energy spectrum.

References

1. Díaz-González, M., De la Escosura-Muñiz, A., Fernandez-Argüelles, M. T., et al. (2020). *Quantum dot bioconjugates for diagnostic applications*, Topics in Current Chemistry, **378**, 35. <https://doi.org/10.1007/s41061-020-0296-6>
2. Ehzaari, H., Safari, M., Samimi, M., Shamsipur, M., & Gholivand, M. B. (2022). *A highly sensitive electrochemical biosensor for chlorpyrifos pesticide detection using the adsorbent nanomatrix contain the human serum albumin and the Pd: CdTe quantum dots*, Microchemical Journal, **179**, 107424. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107424>

3. Kunachowicz, D., Ściskalska, M., Jakubek, M., Kizek, R., & Kepinska, M. (2022). *Structural changes in selected human proteins induced by exposure to quantum dots, their biological relevance and possible biomedical applications*, NanoImpact, **26**, 100405. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100405>
4. Mkrtchyan, M. A., & Sarkisyan, H. A. (2024). *Influence of external magnetic field on intraband transitions in lens-shaped quantum dot*, Journal of Instrumentation, **19** (C05014), C05014. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/05/C05014>
5. Zeng, Z., Garoufalidis, C. S., & Baskoutas, S. (2012). *Combination effects of tilted electric and magnetic fields on donor binding energy in a GaAs/AlGaAs cylindrical quantum dot*, Journal of Physics D: Applied Physics, **45** (23), 235102. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/23/235102>
6. Pareek, A., Kumar, D., Pareek, A., & Gupta, M. M. (2025). *Advancing cancer therapy with quantum dots and other nanostructures: A review of drug delivery innovations, applications, and challenges*, Cancers, **17** (5), 878. <https://doi.org/10.3390/cancers17050878>
7. Shaer, A., Elsaid, M., & Elhasan, M. (2016). *The magnetic properties of a quantum dot in a magnetic field*, Turkish Journal of Physics, **40** (3), 209–218. <https://doi.org/10.3906/fiz-1510-4>
8. Raju, G. G. *Dielectrics in Electric Fields*. Marcel Dekker, New York – Basel, 2003.
9. Scheider, W., Dintzis, H. M., & Oncley, J. L. (1976). *Changes in the electric dipole vector of human serum albumin due to complexing with fatty acids*, Biophysical Journal, **16**, 417–431. [https://dx.doi.org/10.1016/S0006-3495\(76\)85698-6](https://dx.doi.org/10.1016/S0006-3495(76)85698-6)
10. Korbutyak, D. V., Mel'nychuk, S. W., Korbut, E. V., & Borysyk, M. M. (2000). *Cadmium Telluride: Impurity-Defect States and Detector Properties*. Ivan Fedorov, Kyiv. [in Ukrainian]
11. Abdellatif, A. A. H., Younis, M. A., Alsharidah, M., Al Rugaie, O., & Tawfeek, H. M. (2022). *Biomedical applications of quantum dots: overview, challenges, and clinical potential*, International Journal of Nanomedicine, **17**, 1951–1970. <https://doi.org/10.2147/IJN.S357980>

Про авторів / About the authors

Олеся Даньків, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра фізики та інформаційних систем, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, вул. Івана Франка, 24, м. Дрогобич, 82100, Україна;

Olesya Dan'kiv, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics and Information Systems, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, 24, Ivan Franko Str., Drohobych 82100, Ukraine;

Владислав Кугівчак, аспірант, кафедра фізики та інформаційних систем, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, вул. Івана Франка, 24, м. Дрогобич, 82100, Україна;

Vladyslav Kuhivchak, Postgraduate, Department of Physics and Information Systems, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, 24, Ivan Franko Str., Drohobych 82100, Ukraine;

Олександр Війчук, аспірант, кафедра фізики та інформаційних систем, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, вул. Івана Франка, 24, м. Дрогобич, 82100, Україна;

Oleksandr Viychuk, Postgraduate, Department of Physics and Information Systems, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, 24, Ivan Franko Str., Drohobych 82100, Ukraine;

Олег Кузик, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра фізики та інформаційних систем, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, вул. Івана Франка, 24, м. Дрогобич, 82100, Україна;

Oleh Kuzyk, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics and Information Systems, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, 24, Ivan Franko Str., Drohobych 82100, Ukraine.

Отримано / Received 09.10.2025

Прийнято до друку / Accepted 04.11.2025

Опубліковано / Published 26.11.2025