

Токоперенос в системе зонд туннельного микроскопа—туннельный зазор—слой квантовых точек полупроводников соединений A^3B^5 и A^2B^6 при освещении

© В.Ф. Кабанов, А.И. Михайлов, М.В. Гавриков

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: maks.gavrikov.96@gmail.com

Поступило в Редакцию 29 декабря 2024 г.
В окончательной редакции 29 декабря 2024 г.
Принято к публикации 29 декабря 2024 г.

Исследованы особенности токопереноса в системе зонд туннельного микроскопа—туннельный зазор—слой квантовых точек полупроводников соединений A^3B^5 и A^2B^6 под воздействием внешнего электромагнитного излучения видимого спектрального диапазона. Установлено, что пики на нормированных дифференциальных туннельных вольт-амперных характеристиках, соответствующие дискретным уровням энергетического спектра исследуемых квантовых точек, при освещении могут исчезать, что обусловлено включением в процесс токопереноса фотогенерированных электронов.

Ключевые слова: полупроводниковые квантовые точки, энергетический спектр, фотогенерация, туннельные вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.61011/JTF.2025.05.60287.470-24

Введение

Современная электроника базируется на физических эффектах, проявляющихся в объектах и системах, размеры активных областей в которых лежат в интервале от единиц нанометров до десятков сантиметров. Миниатюризация размеров электронных элементов, приборов и устройств уже многие годы и десятилетия является важнейшей тенденцией развития всей электроники в целом [1–3].

Одними из важных и перспективных объектов исследования в данных направлениях в силу своих уникальных свойств являются наноразмерные частицы и квантовые точки. Среди них особый интерес для микро- и нанoeлектроники представляют именно полупроводниковые квантово-размерные объекты [4–6]. Для полупроводниковых низкоразмерных систем актуальными и наиболее принципиальными с точки зрения электроники являются вопросы электронных состояний, поведения электрона и токопереноса [7–11]. Данные вопросы требуют проведения детальных теоретических и экспериментальных исследований. В частности, особый интерес вызывает исследование процесса туннельного токопереноса через полупроводниковые квантовые точки посредством измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на сканирующем туннельном микроскопе ввиду возможности протекания тока поэлектронно [12–14]. На процесс туннельного токопереноса через полупроводниковые квантовые точки могут оказывать влияние различные внешние факторы, такие как температура или освещение, вызывая проявление новых эффектов

или внося в процесс изменения, требующие учета при дальнейшем рассмотрении результатов измерений.

Наши исследования полупроводниковых квантовых точек методом нормированных дифференциальных туннельных ВАХ показали, что пики на дифференциальных ВАХ соответствуют уровням энергетического спектра исследуемых квантовых точек (КТ), что позволяет как определять положение данных уровней, так и анализировать механизмы проводимости исследуемых структур, рассчитывать некоторые параметры КТ и ряд других важных характеристик электронных процессов в них [15–17]. Ранее уже было показано влияние температуры на картину дифференциальных ВАХ туннельного токопереноса из металлической подложки в металлический зонд СТМ через полупроводниковые КТ [18]. Поэтому в настоящей работе было проведено исследование влияния освещения в разных частях оптического диапазона на процесс туннельного токопереноса в аналогичной системе.

1. Методика исследования

В качестве объектов исследования были выбраны полупроводниковые КТ соединений InSb (A^3B^5) и CdSe (A^2B^6), ввиду того, что они уже многие годы относятся к числу наиболее актуальных и интересных с практической точки зрения полупроводниковых материалов, так как являются прямозонными, имеют высокий квантовый выход люминесценции и фотостабильность, вследствие чего широко используются в оптоэлектронике, а также обладают очень важными характерными особенностями

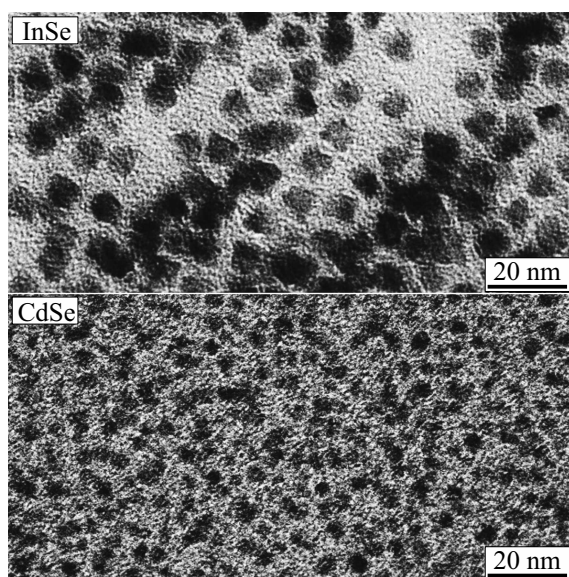


Рис. 1. ПЭМ изображения используемых КТ InSb и CdSe.

энергетического спектра и экстремально малыми значениями эффективной массы электронов проводимости.

КТ представляли из себя структуру типа „ядро без оболочки“ состава InSb и CdSe. Методы синтеза исследуемых в настоящей работе КТ подробно описаны в работах [17,19–22]. В качестве стабилизаторов использовались олеиновая кислота для раствора КТ CdSe и триоктилфосфин (TOP) для раствора КТ InSb. Полученные растворы предварительно подвергались очистке от избыточного количества стабилизатора, после чего добавлялся хлороформ до получения концентрации КТ порядка $(5–6) \cdot 10^{-3}$ М. Используемые в экспериментах КТ представляли собой объекты сложной формы, которая, однако, была все же ближе к кубической для InSb и к шаровой для CdSe (изображения КТ, полученные при помощи просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Libra 120 (Zeiss, Germany), представлены на рис. 1).

Спектры поглощения растворов КТ представлены на рис. 2.

Для формирования на основе наноразмерных объектов структур, удобных для исследования различными методами, в том числе методом сканирующей туннельной микроскопии, многообещающими являются технологии, использующие эффекты самоорганизации, когда структуры определенных размеров формируются сами, под влиянием внутренних сил, действующих в процессе роста, например, технология Ленгмюра–Блоджетт [23–25].

Методами технологии Ленгмюра–Блоджетт были сформированы монослои выбранных КТ, после чего они были перенесены на твердые подложки для дальнейшего исследования. Растворы коллоидных КТ концентрацией порядка $5 \cdot 10^{-3}$ М добавлялись на поверхность воды в объеме 50 л, после чего слой на поверхности сжимался барьерами до значения поверхностного давле-

ния, соответствующего состоянию плотноупакованного монослоя без проявления коллапса или формирования мультислойной структуры (12 мН/м для CdSe и 16 мН/м InSb соответственно). Далее производился перенос полученных монослоев на твердые подложки, в качестве которых использовалось стекло с напылением индий-оловянного оксида (ИТО). Таким образом были сформированы структуры, пригодные для исследования методом сканирующей туннельной микроскопии (рис. 3).

Полученные образцы исследовались с помощью сканирующего зондового микроскопа SOLVER NANO (NT-MDT, Россия). Методика измерения и анализа туннельных ВАХ аналогична описанной в [26], расстояние между КТ и зондом составляло порядка 1–2 нм, а напряженность электрического поля по величине составляла более $5 \cdot 10^6$ В/см при напряжениях выше 0.5 В. В настоящей работе эксперименты проводились при дополнительной подсветке образцов в оптическом диапазоне. Использовалась подсветка от светодиодов зеленого (длина волны излучения 530 нм, энергия кванта 2.3 эВ), синего (450 нм – 2.75 эВ) и красного (640 нм – 1.9 эВ) света. Мощность излучения во всех случаях составляла ~ 60 мВт. Расстояние от источника освещения до образца было порядка 10–12 мм. Плотность мощности излучения на поверхности образцов составляла $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ Вт/см².

2. Результаты и обсуждение

В системе зонд туннельного микроскопа–нанометровый зазор–слой КТ–подложка с проводящим электродным слоем ИТО происходит туннелирование электронов из заполненных электронных состояний вблизи уровня Ферми ИТО в зонд туннельного микроскопа при соответствующей полярности приложенного напряжения. При условии совпадения энергии туннелирующего электрона, поступающего из металлического контакта, с энергией одного из уровней КТ вероятность туннелирования резко возрастает. Модельные представления этого процесса, рассмотренные в работах авторов [17,26,27], схематически изображены на рис. 4 при напряжении смещения V , соответствующем условиям для процесса туннелирования электронов из ИТО в зонд микроскопа через соответствующие энергетические уровни КТ.

Анализ экспериментальных данных проводился с использованием методики нормированных дифференциальных туннельных ВАХ — зависимостей $(dI/dV)/(I/V)$ от напряжения V (при отрицательном потенциале на электроде ИТО). Эта методика является одной из наиболее эффективных и информационно насыщенных для экспериментального исследования энергетического спектра локальной плотности электронных состояний в квантовых точках [17,20,28].

Пики на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ соответствуют дискретным уровням энергетического спектра исследуемых КТ, которые в большой

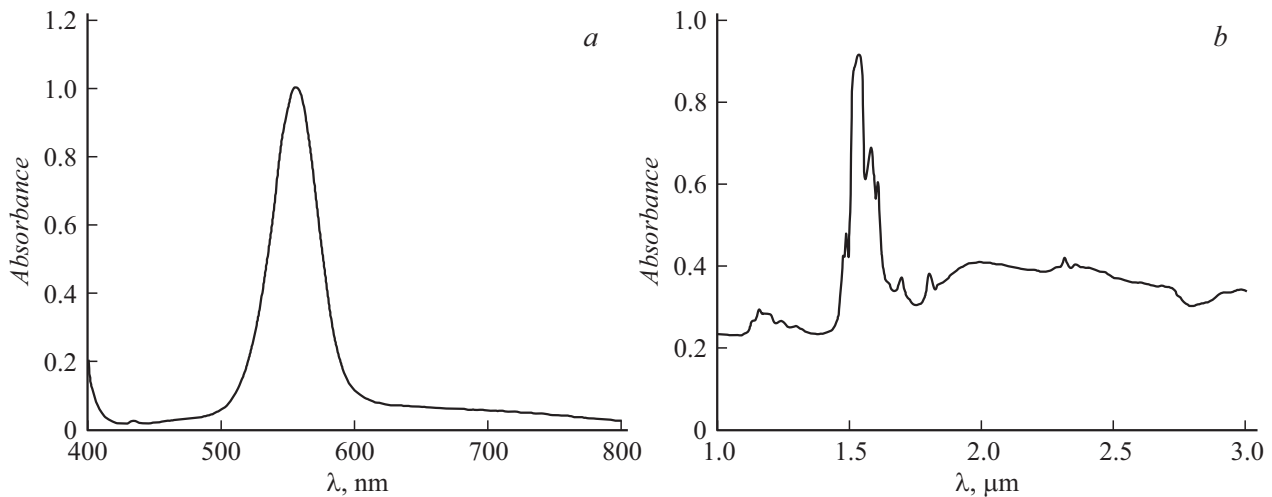


Рис. 2. Спектры поглощения используемых КТ: *a* — CdSe, *b* — InSb.

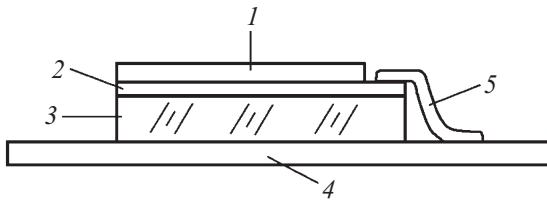


Рис. 3. Структура полученных образцов с монослоями КТ: 1 — исследуемый монослой; 2 — слой ИТО; 3 — стекло; 4 — металлическая подложка; 5 — проводящая клейкая лента.

степени определяются материалом, характерными размерами и их формой [17,29]. Они связаны с изменением условий токопрохождения через структуру, описанным выше. Так как основной токоперенос осуществляется прежде всего и преимущественно через первый энергетический уровень КТ, то в дальнейшем именно этому процессу будет уделено основное внимание в анализе.

Известно, что механизм автоэлектронной эмиссии является доминирующим механизмом токопереноса [30]. Приближенное выражение для плотности тока автоэлектронной эмиссии с учетом туннелирования через первый уровень квантовой точки (E_{c1}) в системе металл–квантовая точка–нанометровый зазор–металл представляется формулой [31]:

$$j_s \approx q(n_0 + n_1) \left(\frac{kT}{2\pi m_0} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{8\pi \sqrt{2m_0 A_s^3}}{3\hbar q E} \theta \right], \quad (1)$$

$$n_1 \approx N_{\text{eff}} \exp \left[-\frac{E_{c1}}{kT} \right],$$

$$N_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^* kT}{\hbar^2} \right)^{3/2},$$

где q — модуль заряда и масса электрона; θ — величина функции Нордгейма; A_s — работа выхода

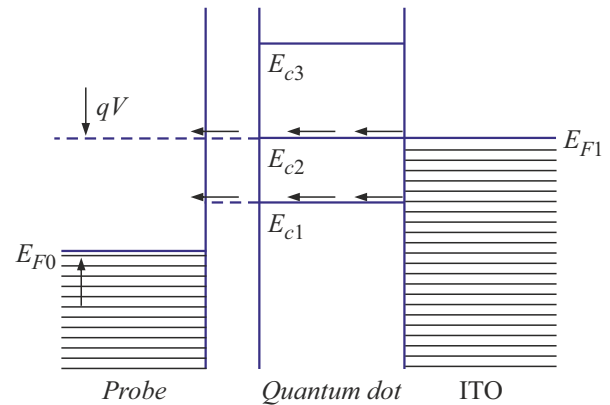


Рис. 4. Схема энергетических уровней КТ, подложки и зонда туннельного микроскопа в процессе туннелирования электронов через воздушный зазор: E_{F0} , E_{F1} — уровень Ферми металлического зонда и подложки ИТО соответственно, E_{c1} , E_{c2} , E_{c3} — величина энергии 1-го, 2-го и 3-го уровня электрона КТ, отсчитываемого от дна зоны проводимости объемного материала.

электронов из полупроводника; E — локальная напряженность электрического поля; остальные обозначения в (1) стандартные.

Для изучения влияния электромагнитного излучения видимого диапазона на токоперенос в данной системе было проведено освещение образцов с КТ излучением с разными длинами волн. В том случае, если энергии кванта света будет достаточно для перехода электрона с уровня E_{v1} (величина энергии первого уровня дырки, отсчитываемой от потолка валентной зоны объемного материала) на уровень E_{c1} (величина энергии первого уровня электрона квантовой точки, отсчитываемой от дна зоны проводимости объемного материала), появятся дополнительные фотогенерированные электроны и соответственно обусловленный ими фото-

Значение величины k_{nl}

k_{nl}	$l = 0$	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$
$n = 0$	3.14	4.49	5.76	6.99
$n = 1$	6.28	7.73	9.1	10.42

ток. Этот процесс должен отразиться на токопереносе в системе зонд туннельного микроскопа–нанометровый зазор–слой КТ–подложка с проводящим электродным слоем ИТО и соответственно на виде нормированных дифференциальных туннельных ВАХ.

Энергия кванта для перехода электронов с уровня E_{v1} на уровень E_c с учетом ширины запрещенной зоны объемного материала определялась из выражения:

$$E_{hv} = E_{g0} + E_{c1} + E_{v1}, \quad (2)$$

где $E_{hv} = h\nu$ — энергия кванта в области максимума поглощения, E_{g0} — ширина запрещенной зоны объемного материала, E_{c1} — величина энергии первого уровня электрона КТ, отсчитываемой от дна зоны проводимости объемного материала, E_{v1} — величина энергии первого уровня дырки, отсчитываемой от потолка валентной зоны объемного материала. В связи с тем, что эффективная масса электрона примерно в 30 раз меньше, чем дырок ($0.014m_0$ и $0.43m_0$ соответственно, m_0 — масса свободного электрона), величиной E_{v1} в выражении (2) можно пренебречь.

В связи с тем, что исследуемые КТ имели форму ближе к кубической для InSb и к шаровой для CdSe, для оценки E_{c1} и E_{v1} для КТ InSb использовалась модель кубической формы КТ с ребром a (10–12 нм).

Величина энергии уровней может быть оценена по [32]:

$$E_i = \frac{(\pi\hbar)^2}{2m^*} \frac{1}{a^2} (l^2 + m^2 + n^2), \quad (3)$$

где $l, m, n = 1, 2, 3, \dots$; m^* — эффективная масса электрона объемного материала, a — характерный размер КТ (ребро куба).

Анализ энергетического спектра в соответствии с характерным размером a и формой исследуемых КТ InSb позволил оценить величину энергии кванта света, необходимую для перехода электрона с уровня E_{v1} на E_{c1} , которая составила ~ 1 эВ.

Для оценки E_{c1} и E_{v1} КТ CdSe использовалась модель шаровой формы КТ с радиусом $R = a/2$, где a — диаметр КТ (5–6 нм). Значение энергии уровней оценивалось по [33]:

$$E_i = \frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{k_{nl}^2}{R^2}, \quad (4)$$

где m^* — эффективная масса электрона и дырки объемного материала для расчета E_{c1} и E_{v1} соответственно, значения k_{nl} приведены в таблице [32,33].

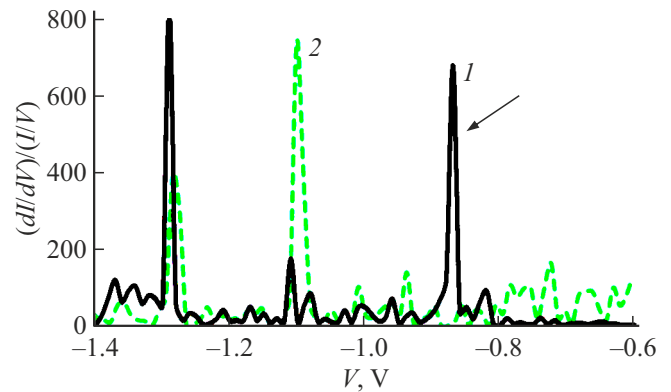


Рис. 5. Нормированные дифференциальные туннельные ВАХ КТ InSb: 1 — без освещения, 2 — с подсветкой зеленым светом. Анализируемые в настоящей работе пики обозначены стрелкой.

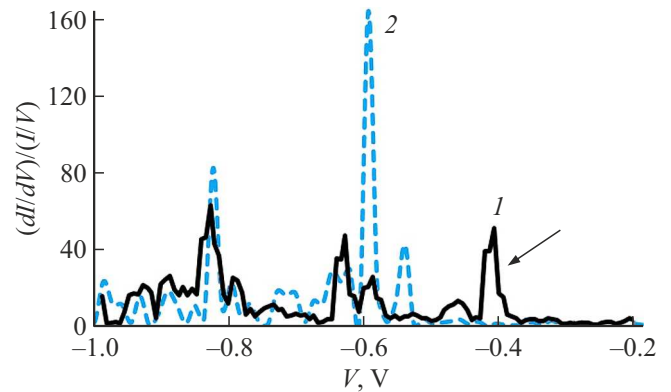


Рис. 6. Нормированные дифференциальные туннельные ВАХ КТ CdSe: 1 — без освещения, 2 — с подсветкой синим светом. Анализируемые в настоящей работе пики обозначены стрелкой.

С учетом характерного размера и формы исследуемых КТ CdSe величина энергии кванта света, необходимая для перехода электрона с уровня E_{v1} на E_{c1} составила ~ 2.5 эВ.

В работе использовалась подсветка от светодиодов зеленого (530 нм — для КТ InSb, (рис. 5)), синего (450 нм — для КТ CdSe (рис. 6)) и красного (640 нм — для КТ CdSe (рис. 7)) света.

Результаты анализа энергетического спектра по методу нормированных дифференциальных туннельных ВАХ для КТ InSb представлены на рис. 5.

Как следует из анализа экспериментальных данных, при подсветке зеленым светом пик, соответствующий на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ первому уровню E_{c1} энергетического спектра КТ InSb (примерно 0.85 В на рис. 5), либо исчезал, либо уменьшался до величины, близкой к погрешности измерений (10–15 %).

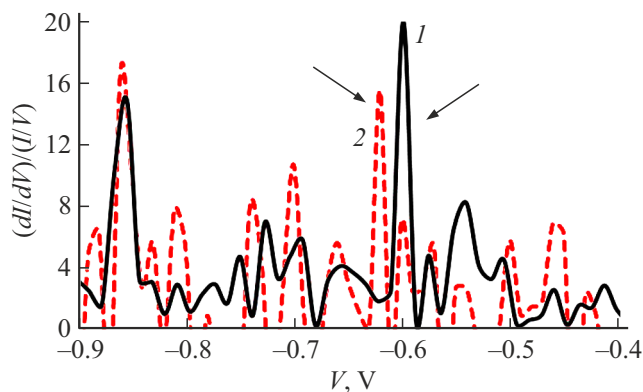


Рис. 7. Нормированные дифференциальные туннельные ВАХ КТ CdSe: 1 — без освещения, 2 — с подсветкой красным светом. Анализируемые в работе пики обозначены стрелками.

Аналогичные результаты были получены для КТ CdSe, наиболее типичные представлены на рис. 6. При подсветке синим светом пик, соответствующий на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ первому уровню E_{c1} электронного энергетического спектра КТ CdSe (примерно 0.4 В на рис. 6), уменьшался до величины погрешности измерений.

Для дополнительного обоснования наблюдаемого эффекта также была проведена серия экспериментов при подсветке красным светом с энергией кванта порядка 1.9 эВ, что больше, чем энергия перехода $E_{c1}-E_{v1}$ для КТ InSb и меньше, чем соответствующая энергия для КТ CdSe (2), в связи с чем, для эксперимента использовались КТ CdSe. Результаты анализа экспериментальных данных (рис. 7) показали, что в этом случае пик, соответствующий первому уровню КТ, не исчезает.

Как было сказано выше, при облучении квантами света с необходимой для фотогенерации электронов энергией (2) появляется дополнительный фототок, не связанный с автоэлектронной эмиссией электронов из металлического электрода.

В этом случае пик на нормированных дифференциальных туннельных ВАХ, обусловленный структурой энергетического спектра КТ и условиями токопереноса при соответствующем смещении, будет сильно размываться или вообще исчезать. При облучении квантами света с энергией, меньшей величины, определяемой выражением (2), этот эффект наблюдаться не будет.

Очевидно, что для исчезновения 1-го пика на дифференциальной туннельной ВАХ при освещении необходимо не только, чтобы квант облучающего света был не менее $E_{hv} = E_{g0} + E_{c1} + E_{v1}$, но и чтобы поток квантов облучающего света был достаточной интенсивности для концентрации фотоэлектронов сравнимой или большей, чем темновая концентрация электронов, эмиссируемых из ИТО на 1-й уровень КТ.

В режиме стационарной подсветки для концентрации электронов, возбуждаемых светом на уровень E_{c1} , мож-

но записать:

$$\Delta n_p = \alpha \beta \tau_l \Phi, \quad (5)$$

где α — коэффициент поглощения $\sim 5 \cdot 10^4$, β — квантовый выход ~ 1 , τ_l — время жизни фотогенерированных электронов в КТ $\sim 2 \cdot 10^{-9}$ с (с учетом оценки τ_l из [34]); Φ — световой поток — 0.034, 0.018 и 0.025 lm для зеленого, синего и красного светодиодов соответственно.

Оценка величины Δn_p для всех трех длин волн облучающего света, применяемого в экспериментах, превосходила концентрацию электронов, эмиссируемых из ИТО на 1-й уровень КТ.

Заключение

Таким образом, в работе проведена оценка влияния освещения на токоперенос в системе зонд туннельного микроскопа—нанометровый зазор—слой КТ соединений A^2B^6 и A^3B^5 —подложка с проводящим электродным слоем ИТО при освещении оптическим излучением разных длин волн. Были экспериментально доказаны предложенные модельные представления, что 1-й пик нормированных дифференциальных туннельных ВАХ, соответствующий первому дискретному уровню электронного энергетического спектра исследуемых КТ, при освещении может исчезать или существенно уменьшаться по величине. Исчезновение или существенное уменьшение величины этого пика, по крайней мере, до величины шумов наблюдается, если энергия квантов и интенсивность облучающего света обеспечивает возбуждение достаточного количества электронов с 1-го уровня валентной квази-зоны на 1-й уровень квази-зоны проводимости исследуемых квантовых точек. Наблюдаемый эффект ранее не был описан в литературе. Его необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных результатов по туннельным ВАХ для исследуемых систем с квантовыми точками, а также при использовании этого метода для характеристики свойств самих квантовых точек. Работа имеет фундаментальное значение, поскольку на основе специально поставленных экспериментов подтверждает основные модельные представления о переносе тока через КТ. Результаты и выводы работы позволяют дополнительно обосновать детали методики характеристики КТ по анализу нормированных дифференциальных туннельных ВАХ. На фоне перспективности и интереса к изучению квантово-размерных эффектов и систем возможность применения полученных в работе результатов при изучении процессов токопереноса в данных объектах представляет особую научную значимость.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-73-20057) и Саратовского государственного университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.П. Драгунов, Д.И. Остертак. *Микро- и наноэлектроника* (Новосибирский гос. тех. ун-т, Новосибирск, 2012)
- [2] А.Н. Игнатов. *Наноэлектроника. Состояние и перспективы развития*: учебное пособие (ФЛИНТА, М., 2012)
- [3] Е.А. Бунтов, А.С. Вохминцев, Т.В. Штанг. *Современные устройства и элементы наноэлектроники* (ФЛИНТА, М., 2020)
- [4] E.H. Ghazi, R.E. Nadir. *Ergonomics Intern. J.*, **8** (1), 1 (2024). DOI: 10.23880/eoj-16000324
- [5] W.A.A. Mohamed, H.A. El-Gawad, S. Mekkey, H. Galal, H. Handal, H. Mousa, A. Labib. *Nanotechnol. Rev.*, **10** (1), 1926 (2021). DOI: 10.1515/ntrev-2021-0118
- [6] В.А. Мошников, О.А. Александрова. *Наночастицы, наносистемы и их применение. Ч. I: Коллоидные квантовые точки* (Аэтерна, Уфа, 2015)
- [7] M. Ballabio, E. Cánovas. *ACS Nanoscience Au*, **2** (5), 367 (2022). DOI: 10.1021/acsnanoscienceau.2c00015
- [8] Q. Li, K. Wu, H. Zhu, Y. Yang, S. He, T. Lian. *Chem. Rev.*, **124** (9), 5695 (2024). DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00742
- [9] L. Máthé, D. Sticlet, L.P. Zârbo. *Phys. Rev. B*, **105**, 155409 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevB.105.155409
- [10] R.A. Bush, E.D. Ochoa, J.K. Perron. *Am. J. Phys.*, **89**, 300 (2021). DOI: 10.1119/10.0002404
- [11] КВ. Рейх. *УФН*, **190**, 1062 (2020). DOI: 10.3367/UFNr.2019.08.038649
- [12] G. Ohkatsu, T. Nishinobo, M. Saruyama, T. Teranishi, Y. Majima. *Nanoscale Adv.*, **6**, 4346 (2024). DOI: 10.1039/D4NA00288A
- [13] J. Duan, J. Wang, L. Hou, P. Ji. *Chem. Record*, **23** (10), e202300120 (2023). DOI: 10.1002/tcr.202300120
- [14] I. Swart, Z. Sun, D.A.M. Vanmaekelbergh, P. Liljeroth. *Nano Lett.*, **10** (5), 1931 (2010). DOI: 10.1021/nl100949a
- [15] В.Ф. Кабанов, А.И. Михайлов, М.В. Гавриков. *ФТП*, **55** (3), 237 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.03.50601.9471
- [16] А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, Е.Г. Глуховской, И.А. Горбачев. *ФТП*, **52** (6), 603 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.06.45923.8443
- [17] А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, М.В. Гавриков. *Квантовые точки полупроводников A^3B^5 и A^2B^6 : физика, получение, методология и результаты исследования* (Саратовский источник, Саратов, 2023)
- [18] V.F. Kabanov, A.I. Mikhailov, M.V. Gavrikov. *Nanosystems: Phys., Chem., Mathem.*, **12** (1), 113 (2021). DOI: 10.17586/2220-8054-2021-12-1-113-117
- [19] W. Liu, J.-S. Lee, D.V. Talapin. *J. Am. Chem. Soc.*, **135** (4), 1349 (2013). DOI: 10.1021/ja308200f
- [20] W. Liu, A.Y. Chang, R.D. Schaller, D.V. Talapin. *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 20258 (2012). DOI: 10.1021/ja309821j
- [21] P. Reiss, M. Protiere, L. Li. *Small*, **5** (2), 154 (2009). DOI: 10.1002/sml.200800841
- [22] E.S. Speranskaya, N.V. Beloglazova, P. Lenain, S. De Saeger, Z. Wang, S. Zhang, Z. Hens, D. Knopp, R. Niessner, D.V. Potapkin, I.Yu. Goryacheva. *Biosensors and Bioelectronics*, **53**, 225 (2014). DOI: 10.1016/j.bios.2013.09.045
- [23] O.N. Oliveira Jr., L. Caseli, K. Ariga. *Chem. Rev.*, **122** (6), 6459 (2022). DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00754
- [24] W. Gu, Q. Li, R. Wang, L. Zhang, Z. Liu, T. Jiao. *Nanomaterials*, **14** (12), 1039 (2024). DOI: 10.3390/nano14121039
- [25] J. Xu, X. Ji, K.M. Gattás-Asfura, C. Wang, R.M. Leblanc. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Engineering Aspects*, **284–285**, 35 (2006). DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.11.046
- [26] A.I. Mikhailov, V.F. Kabanov, M.V. Gavrikov. *Nanosystems: Phys., Chem., Mathem.*, **10**, 720 (2019). DOI: 10.17586/2220-8054-2019-10-6-720-724
- [27] А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов, И.А. Горбачев, А.В. Казак, Н.В. Усольцева, Е.Г. Глуховской. *Известия АН. Сер. физ.*, **81** (12), 1668 (2017). DOI: 10.7868/S0367676517120195
- [28] T. Wang, R. Vaxenburg, W. Liu, S.M. Rupich, E. Lifshitz, A.L. Efros, D.V. Talapin, S.J. Sibener. *ACS Nano*, **9** (1), 725 (2015). DOI: 10.1021/nn5061805
- [29] А.И. Михайлов, В.Ф. Кабанов. *Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы. Сборник научных статей*. 75 (2016).
- [30] Н.В. Егоров, Е.П. Шешин. *Автоэлектронная эмиссия* (Интеллект, М., 2011)
- [31] A.I. Mikhailov, V.F. Kabanov, M.V. Gavrikov. *Nano Hybrids and Composites*, **28**, 130 (2020). DOI: 10.4028/www.scientific.net/NHC.28.130
- [32] В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. *Основы наноэлектроники* (Логос, М., 2006)
- [33] М. Грундман. *Основы физики полупроводников: нанофизика и технические приложения* (Физматлит, М., 2012)
- [34] Д.М. Самосват, В.П. Евтихийев, А.С. Школьник, Г.Г. Зегря. *ФТП*, **47** (1), 24 (2013).