

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Обзорная статья

УДК 621.3.013.1, 537.611.2

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-4(54)-9-16

СПИНОВЫЕ И ОРБИТАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОТОКИ В ПРОВОДНИКАХ

© 2025 г. И. П. Попов

Курганский государственный университет (Россия, 640020, Курган, ул. Советская, 63/4)

Аннотация. Квант магнитного потока, обусловленный элементарным электрическим током, вызванным движением единственного электрона, является расчетной величиной. Его определил Ф. Лондон на основе предположения, что отдельный электрон может развивать квант кинетического момента \hbar . Позднее Л. Купер ввел представление о двухчастичных квантовых системах электронов в проводниках, корреляции между которыми происходят в результате обмена акустическими квантами (фононами). Эти системы получили известность как куперовские пары. Предположение о том, что куперовская пара может развивать не два, а один квант кинетического момента \hbar приводит к сокращению расчетной величины кванта магнитного потока в два раза. Дальнейшие измерения, выполненные Б.С. Дивером, У.М. Фэрбэнком, Р. Доллом и М. Небауэром, показали, что минимальный магнитный поток меньше кванта Ф. Лондона в два раза. Это послужило основанием для установления этого значения в качестве официальной величины кванта магнитного потока. Цель исследования заключается в переосмыслении указанных обстоятельств и, в частности, определении спинового магнитного потока электрона. Формула классического радиуса электрона не подходит ни для шара, ни для сферы. Поскольку она точно не определена, это дает свободу для допущений при описании спина электрона, в том числе, в виде обращающейся по окружности материальной точки, масса которой равна массе электрона. Это допущение, подкрепленное последующим строгим доказательством, с ним не связанным, позволяет установить, что существуют две величины для кванта магнитного потока: спиновый и орбитальный квант (квант Ф. Лондона).

Ключевые слова: электрон, куперовская пара, квант кинетического момента, квант магнитного потока, квант Ф. Лондона, спин, суперпозиция, квазиквант

Для цитирования: Попов И.П. Спиновые и орбитальные магнитные потоки в проводниках. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2025;4(54):9–16.
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-9-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-9-16)

Review article

SPIN AND ORBITAL MAGNETIC FLUXES IN CONDUCTORS

© 2025 I. P. Popov

Kurgan State University (63/4 Sovetskaja Str., Kurgan, 640020, Russian Federation)

Abstract The quantum of the magnetic flux caused by an elementary electric current caused by the motion of a single electron is a calculated value. He was identified by F. London based on the assumption that a single electron can develop a quantum of kinetic momentum. Later, L. Cooper introduced the idea of two-particle quantum systems of electrons in conductors, correlations between which occur as a result of the exchange of acoustic quanta (phonons). These systems became known as Cooper pairs. The assumption that a Cuper pair can develop not two, but one quantum of kinetic momentum, leads to a reduction in the calculated magnitude of the magnetic flux quantum by half. Further measurements performed by B.S. Deaver, W.M. Fairbank, R. Doll, and M. Nebauer showed that the minimum magnetic flux is two times less than the quantum of light. This served as the basis for establishing this value as the official value of the magnetic flux quantum. The purpose of the study is to

rethink these circumstances and, in particular, to determine the spin magnetic flux of an electron. The formula of the classical electron radius is not suitable for either a ball or a sphere. Since it is not precisely defined, this gives freedom for assumptions when describing the spin of an electron, including in the form of a material point rotating around a circle, the mass of which is equal to the mass of the electron. This assumption, supported by subsequent rigorous proof unrelated to it, allows us to establish that there are two quantities for the magnetic flux quantum, namely, the spin quantum and the orbital quantum (quantum F. London).

Keywords: electron, Cooper pair, quantum of kinetic moment, quantum of magnetic flux, quantum of F. London, spin, superposition, quasiquantum

For citation: Popov I.P. Spin and orbital magnetic fluxes in conductors. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2025; 4(54):9–16. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-9-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-9-16)

Введение

В 1948 г. Ф. Лондон вычислил квант магнитного потока от электрического тока, созданного одним электроном [1; 2]. Ключевым условием вычисления стало приписывание электрону кванта кинетического момента \hbar .

В 1956 г. Л. Купер описал двухчастичные системы коррелированных электронов [3 – 5]. Это так называемые куперовские пары [6 – 9]. Они возникают в проводниках вследствие электрон-фононного взаимодействия [10 – 12]. Приписывание двухчастичной системе кванта кинетического момента \hbar [13 – 15] приводит к уменьшению вычисляемого значения кванта магнитного потока вдвое.

Ни Ф. Лондон, ни Л. Купер не учитывали в своих расчетах магнитные потоки, вызванные спинами электронов [16 – 18].

В 1961 г. Б.С. Дивер и У.М. Фэрбэнк и независимо Р. Долл и М. Небауэр измерили квант магнитного потока [19; 20]. Результат оказался вдвое меньше кванта Ф. Лондона.

С тех пор считается, что квант магнитного потока создается исключительно куперовскими парами, он вдвое меньше кванта Ф. Лондона [21 – 23].

Целью настоящей работы является определение спинового магнитного потока электрона.

Актуальность настоящей работы определяется тем, что спиновый магнитный поток электрона, являющийся основой собственного магнитного поля ферромагнетиков, до сих пор не установлен. Проблема заключается в том, что общепринятое представление о спине электрона [24 – 26] не позволяет его рассчитать. Поэтому возникает необходимость принятия дополнительных временных (рабочих) предположений.

Материалы и методы

Геометрическая форма электрона неизвестна. Однако считается, что это не шар и не сфера. Это следует из формулы его классического радиуса

$$r_e = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e};$$

здесь μ_0 – постоянная магнитная; e – заряд электрона; m_e – масса электрона.

Если бы электрон имел форму шара, формула радиуса имела бы следующий вид:

$$r_e = \frac{3}{5} \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}.$$

Если бы электрон имел форму сферы, формула была бы следующей:

$$r_e = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m_e}.$$

Полная неопределенность формы электрона позволяет непротиворечиво представить его спин в виде момента импульса, образованного материальной точкой с массой электрона, обращающейся по окружности неопределенного радиуса (сколь угодно малого, причем его величина значения не имеет). Этот подход может иметь недостатки, но он имеет и существенное достоинство в виде возможности использовать готовую формулу для магнитного потока, созданного «током» одного электрона [27]:

$$\begin{aligned} E &= \frac{I\Phi}{2}; \\ I &= \frac{e}{T}; \\ T &= \frac{2\pi R}{v}; \\ E &= \frac{m_e v^2}{2}; \\ \Phi &= \frac{2\pi R m_e v}{e}; \\ \Phi &= \frac{2\pi R p}{e}, \end{aligned} \quad (1)$$

где E – энергия; I – ток электронов; T – период вращения электронов; R – радиус лабораторной трубки (в экспериментах Б.С. Дивера, У.М. Фэрбэнка, Р. Долла и М. Небауэра); v – линейная скорость отдельного электрона [28 – 31]; p – импульс отдельного электрона [32 – 34].

Предварительная нестрогая оценка спинового магнитного потока электрона

Спин электрона [35 – 38] определяется по следующему уравнению:

$$L_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar. \quad (2)$$

С учетом формулы (1) квант магнитного потока, обусловленного спином электрона, равен

$$\Phi_{es} = \frac{2\pi Rp}{e} = \frac{2\pi L_{es}}{e} = \frac{2\pi \sqrt{3}}{e} \hbar.$$

Следовательно

$$\Phi_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\hbar}{e}. \quad (3)$$

Классический радиус (r_e) не используется в расчетах настоящей работы и, следовательно, не влияет на результаты. Он упомянут исключительно для иллюстрации неопределенности формы электрона. В формуле (1) нет необходимости выбирать параметр R . Радиус не входит в результирующее уравнение (3) для спинового кванта магнитного потока («растворяется» в спине). Поэтому его величина не имеет значения. Можно предположить, что он достаточно велик, чтобы предотвратить возникновение избыточной энергии.

Экспериментальная верификация спинового кванта магнитного потока

Круговой ток в лабораторной трубке, образованный одним электроном, создает магнитный поток (формула Ф. Лондона):

$$\Phi_L = \frac{2\pi\hbar}{e} = \frac{\hbar}{e}. \quad (4)$$

Спин электрона может иметь лишь две проекции на направление магнитного поля потока (4):

$$L_{esB} = \pm \frac{\hbar}{2}.$$

В силу закона сохранения момента импульса спин противоположен орбитальному моменту:

$$L_{esB} = -\frac{\hbar}{2}.$$

Следовательно, магнитный поток, обусловленный спином электрона, вычитается из потока (4) (его проекция).

В 1961 г. Б.С. Дивер, У.М. Фэрбэнк, Р. Долл и М. Небауэр измерили орбитальный квант магнитного потока одного электрона за вычетом проекции спинового кванта магнитного потока (через торцевые поверхности своих лабораторных трубок):

$$\frac{h}{e} - \frac{h}{2e} = \frac{h}{2e}. \quad (5)$$

Получили квазиквант, а не квант от куперовской пары:

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e}. \quad (6)$$

Совпадение измеренного значения в уравнении (5) с выражением (6) является совершенно случайным. Однако это является надежным экспериментальным подтверждением формул (1), (3) – (5) и принятого допущения о спине электрона.

Строгий вывод формулы для спинового магнитного потока электрона

Как квант магнитного потока Φ . Лондона (4), так и квант от куперовской пары (6) можно представить в следующем виде:

$$\Phi_q = \frac{h}{q} = \frac{2\pi\hbar}{q},$$

Следовательно

$$\Phi_q = \frac{2\pi}{q} L_q, \quad (7)$$

где q – заряд; L_q – квант кинетического момента.

Подстановка заряда электрона и его кинетического момента (спина) (2) в формулу (7) непосредственно дает

$$\Phi_{es} = \frac{2\pi}{q} L_q = \frac{2\pi}{e} \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar.$$

Окончательно получим

$$\Phi_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\hbar}{e}.$$

Полученное выражение совпадает с уравнением (3), что также является надежной верификацией формул (1), (3) – (5) и принятого допущения о спине электрона.

В работах [27; 39; 40] подробно показано, что приписывание куперовской паре электронов кванта \hbar кинетического момента является неприемлемым. Поэтому в такой же степени неприемлемой является связанный с этим формула для кванта магнитного потока от куперовской пары.

Выводы

Установлено, что в действительности существуют квант Ф. Лондона, квант магнитного потока, обусловленный спином электрона, а также их суперпозиция (квазиквант).

В силу аддитивности магнитного потока минимально возможный магнитный поток, который может создавать куперовская пара электронов, в два раза больше кванта Ф. Лондона. А не в два раза меньше, как было принято считать ранее.

Квант момента импульса \hbar , применяемый для многочастичной квантовой системы, должен делиться между частицами системы. Поэтому каждая частица будет обладать моментом импульса меньше кванта, что неприемлемо. Таким образом, наделение куперовской пары электронов квантлом момента импульса \hbar является неправомерным.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что установлен спиновый квант магнитного потока, а именно спины формируют основную часть собственного магнитного поля ферромагнетиков, которые повсеместно используются в магнитных системах электротехнических и энергетических систем.

Представление о спиновом кванте магнитного потока может использоваться при разработке квантовых компьютеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Pavlov V.D. On the electronic quantum structures of conductors. *Physics of Complex Systems*. 2025; 6(1):49–53.
<https://www.doi.org/10.33910/2687-153X-2025-6-1-49-53> EDN MDSAWK
- Избрехт А.Р. О квантовании магнитного потока. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024;2(140):1–11.
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.7>
- Talantsev E.F. Quasi-classical model for real space shape of the Cooper pair probability density. *Superconductivity: Fundamental and Applied Research*. 2024;(2):57–65.
<https://doi.org/10.62539/2949-5644-2024-0-2-57-65>
- Хайдарова О., Сахеров Д. Сверхпроводимость в полупроводниках: перспективы и исследования. *Академическая публицистика*. 2025;(1-1):11–13.
- Cooper L.N., Bear M.F. The BCM theory of synapse modification at 30: Interaction of theory with experiment. *Nature Reviews Neuroscience*. 2012;13:798–810.
<https://doi.org/10.1038/nrn3353>
- Seeger R.L., Forestier G., Gladil O., Leiviskä M., Auffret S., Joumard I., Rubio-Roy M., Baltz V., Gomez C., Buzdin A.I., Houzet M. Penetration depth of cooper pairs in the iron antiferromagnet. *Physical Review B*. 2021;104:054413.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.054413>
- Daido A., Yanase Y. Rectification and nonlinear hall effect by fluctuating finite-momentum cooper pairs. *Physical Review Research*. 2024;6:L022009.
<https://doi.org/10.1103/physrevresearch.6.l022009>
- Chan A.K., Cubukcu M., Montiel X., Komori S., Vanstone A., Thompson J.E., Perkins G.K., Kinane C.J., Caruana A.J., Boldrin D., Blamire M., Robinson J., Eschrig M., Kurebayashi H., Cohen L.F. Controlling spin pumping into superconducting Nb by proximity-induced spin-triplet cooper pairs. *Communications Physics*. 2023;6:287.
<https://doi.org/10.1038/s42005-023-01384-w>
- Furukawa T., Miyagawa K., Matsumoto M., Sasaki T., Kanoda K. Microscopic evidence for preformed cooper pairs in pressure-tuned organic superconductors near the MOTT transition. *Physical Review Research*. 2023;5:023165.
<https://doi.org/10.1103/physrevresearch.5.023165>
- Ishida K., Matsueda H. Two-step dynamics of photoinduced phonon entanglement generation between remote electron-phonon systems. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2021;90:104714.
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.104714>
- Liu Y., Han Ya., Yu Ju., Zhang H., Yin Q., Lei H., Hu J., Zhang D. Visualizing electron-phonon and anharmonic phonon-phonon coupling in the kagome ferrimagnet $G\text{DMN}_6\text{SN}_6$. *Applied Physics Letters*. 2023;122.
<https://doi.org/10.1063/5.0152116>
- Wu Ch., Liu Ch. Effects of phonon bandgap on phonon-phonon scattering in ultrahigh thermal conductivity θ-phase TAN. *Chinese Physics B*. 2023;32(4):046502.
<https://doi.org/10.1088/1674-1056/acb201>
- Попов И.П. Сведение постоянной Планка к классическим фундаментальным константам. *Вестник Удмуртского университета. Физика и химия*. 2014;3:51–54.

14. Popov I.P. Seven Singular Points in Quantum Mechanics. *Technical Physics*. 2024;69:2406–2408.
<https://doi.org/10.1134/S1063784224700427>
15. Жерновой А.И. Квантование магнитного потока, создаваемого наночастицей магнетита. *Научное приборостроение*. 2018;28(2):45–48.
16. Вилков Е.А., Никитов С.А., Бышевский Конопко О.А., Сафин А.Р., Фомин Л.А., Чигарев С.Г. Частота спин-инжекционного излучения в магнитном переходе с учетом спиновой подвижности электронов. *Физика твердого тела*. 2020;9:1507–1513.
<https://doi.org/10.21883/FTT.2020.09.49778.19H>
17. Дериглазов А.А. Неминимальное спин-полевое взаимодействие классического электрона и квантование спина. *Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра»*. 2020;17:755.
18. Мурадян А.Ж., Бадалян Д.А. Спин-зависимое многоканальное туннелирование электрона в квантовой проволоке в продольном магнитном поле. *Известия вузов. Физика*. 2024;67:5–14.
<https://doi.org/10.17223/00213411/67/7/1>
19. Tazhen A.B., Dosbolayev M.K. Measuring the self-generated magnetic field and the velocity of plasma flow in a pulsed plasma accelerator. *Recent Contributions to Physics*. 2021;(2):30–39.
<https://doi.org/10.26577/10.26577/RCPH.2021.v77.i2.04>
20. Сокол-Кутыловский О.Л. Магнитомодуляционные датчики на основе аморфных ферромагнитных сплавов для измерения слабых магнитных полей. *Физические основы приборостроения*. 2022;11(4):45–48.
<https://doi.org/10.25210/jfop-2204-MS>
21. Azar M.El., Bouhlal A., Jellal A. Boosting energy levels in graphene magnetic quantum dots through magnetic flux and inhomogeneous gap. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;685:416005.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416005>
22. Azar M.El., Bouhlal A., Alhaidari A.D., Jellal A. Effect of magnetic flux on scattering in a graphene magnetic quantum dot. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;675:415610.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415610>
23. Bryon Ja., Weiss D.K., You X., Sussman S., Croot X., Huang Z., Koch J., Houck A.A. Time-dependent magnetic flux in devices for circuit quantum electrodynamics. *Physical Review Applied*. 2023;19:034031.
<https://doi.org/10.1103/physrevapplied.19.034031>
24. Лебедев В. Решение парадокса спина электрона. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021;58:37–41.
<https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-58-1-37-41>
25. Кoop И.А., Бедарев Е.В., Отбоев А.В., Шатунов Ю.М. Свободная прецессия спинов как альтернатива методу резонансной деполяризации в будущих электрон-позитронных коллиайдерах. *Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра»*. 2024;21(3):385–392.
26. Бадалян Д.А., Мурадян А.Ж. Спин-зависимое многоканальное рассеяние электрона в квантовой проволоке с точечным дефектом. *Proceedings of the National Academy of Sciences Physics*. 2022;59–69.
<https://doi.org/10.54503/0002-3035-2022-57.1-59>
27. Попов И.П. Магнитные особенности проводников с различной проводимостью. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):9–14.
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-9-14](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-9-14)
28. Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Исследование параметров кристаллической решетки, фазового состава и структуры сплава AK5M2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;1(39): 63–68.
29. Popov I.P. Combined Vectors and Magnetic Charge. *Technical Physics*. 2024;69:2397–2405.
<https://doi.org/10.1134/S1063784224700415>
30. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Аксенова К.В. Изменение механических характеристик технически чистого алюминия в условиях воздействия магнитного поля. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;2:10–16.
31. Посев Г.Л., Ельтищев В.А. Электромагнитные измерения уровня и проводимости цветных металлов. *Вестник Пермского университета. Физика*. 2020;4:63–68.
<https://doi.org/10.17072/1994-3598-2020-4-63-68>
32. Сандалов Е.С., Синицкий С.Л., Аржанников А.В., Павлюченко В.А., Бак П.А., Гинзбург Н.С., Логачев П.В., Мещеряков И.Н., Никифоров Д.А., Песков Н.Ю., Протас Р.В., Рябченко К.К., Сквородин Д.И. Магнитная система субгигаваттного терагерцевого лазера на свободных электронах на основе килоамперного пучка релятивистских электронов. *Известия вузов. Радиофизика*. 2023;66(7-8):538–554.
https://doi.org/10.52452/00213462_2023_66_07_538
33. Зенин А.А. Параметры пучковой плазмы плазменного источника электронов при инъекции низкоэнергетичных электронов.

- Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2021;1-1:212–215.*
34. Бочков Е.И., Бабич Л.П., Куцык И.М. Зависимость частоты наработки электронов высоких энергий в гелии от модели углового рассеяния электронов. *Физика плазмы.* 2021;47(10):935–949.
<https://doi.org/10.31857/S0367292121090018>
35. Поклонский Н.А., Деревяго А.Н., Вырко С.А. Спин-фононный магнитный резонанс электронов проводимости в кристаллах антимонида индия. *Журнал прикладной спектроскопии.* 2020;87(4):595–604.
36. Степанян А.Г. Совместное влияние ограничения акустических фононов и спин-орбитального взаимодействия на скорость потерь энергии горячими электронами в нанопроволоке. *Proceedings of the National Academy of Sciences Earth science.* 2023;87:94.
<https://doi.org/10.54503/0321-1339-2023.123.3-4-87>
37. Корнилович А.А., Литвинов В.Г. Спин-орбитальная связь спаренных двумерных электронов и фактор заполнения уровней ландау в режиме дробного квантового эффекта Холла. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.* 2021;77:130–140.
<https://doi.org/10.21667/1995-4565-2021-77-130-140>
38. Анисимова Г.П., Долматова О.А., Крылов И.Р., Цыганкова Г.А. Прямые матричные элементы оператора энергии взаимодействия спин-чужая орбита в конфигурациях с *p*- и *h*-электронами на внешних оболочках. *Журнал прикладной спектроскопии.* 2023;90(1):5–12.
<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-1-5-12>
39. Павлов В.Д. Расчетный минимальный радиус позитрония. *Инженерная физика.* 2024;2:24–29.
<https://doi.org/10.25791/infizik.2.2024>
40. Павлов В.Д. О корректности размера позитрония. *Вестник Томского государственного университета. Химия.* 2024;33:24–32.
<https://doi.org/10.17223/24135542/33/2>
3. Talantsev E.F. Quasi-classical model for real space shape of the Cooper pair probability density. *Superconductivity: Fundamental and Applied Research.* 2024;(2):57–65.
<https://doi.org/10.62539/2949-5644-2024-0-2-57-65>
4. Khaidarova O., Saherov D. Superconductivity in semiconductors: prospects and research. *Academic journalism.* 2025;(1-1):11–13. (In Russ.).
5. Cooper L.N., Bear M.F. The BCM theory of synapse modification at 30: Interaction of theory with experiment. *Nature Reviews Neuroscience.* 2012;13:798–810.
<https://doi.org/10.1038/nrn3353>
6. Seeger R.L., Forestier G., Gladii O., Leiviskä M., Auffret S., Journard I., Rubio-Roy M., Baltz V., Gomez C., Buzdin A.I., Houzet M. Penetration depth of cooper pairs in the irmn antiferromagnet. *Physical Review B.* 2021;104:054413.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.054413>
7. Daido A., Yanase Y. Rectification and nonlinear hall effect by fluctuating finite-momentum cooper pairs. *Physical Review Research.* 2024;6:L022009.
<https://doi.org/10.1103/physrevresearch.6.l022009>
8. Chan A.K., Cubukcu M., Montiel X., Komori S., Vanstone A., Thompson J.E., Perkins G.K., Kinane C.J., Caruana A.J., Boldrin D., Blamire M., Robinson J., Eschrig M., Kurebayashi H., Cohen L.F. Controlling spin pumping into superconducting Nb by proximity-induced spin-triplet cooper pairs. *Communications Physics.* 2023;6:287.
<https://doi.org/10.1038/s42005-023-01384-w>
9. Furukawa T., Miyagawa K., Matsumoto M., Sasaki T., Kanoda K. Microscopic evidence for preformed cooper pairs in pressure-tuned organic superconductors near the MOTT transition. *Physical Review Research.* 2023;5:023165.
<https://doi.org/10.1103/physrevresearch.5.023165>
10. Ishida K., Matsueda H. Two-step dynamics of photoinduced phonon entanglement generation between remote electron-phonon systems. *Journal of the Physical Society of Japan.* 2021;90:104714.
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.104714>
11. Liu Y., Han Ya., Yu Ju., Zhang H., Yin Q., Lei H., Hu J., Zhang D. Visualizing electron-phonon and anharmonic phonon-phonon coupling in the kagome ferrimagnet G₂Mn₆Sn₆. *Applied Physics Letters.* 2023;122.
<https://doi.org/10.1063/5.0152116>
12. Wu Ch., Liu Ch. Effects of phonon bandgap on phonon-phonon scattering in ultrahigh thermal conductivity θ-phase TAN. *Chinese Physics B.* 2023;32(4):046502.
<https://doi.org/10.1088/1674-1056/acb201>

REFERENCES

- Pavlov V.D. On the electronic quantum structures of conductors. *Physics of Complex Systems.* 2025;6(1):49–53.
<https://www.doi.org/10.33910/2687-153X-2025-6-1-49-53 EDN MDSAWK>
- Izbrekht A.R. On the quantization of magnetic flux. *Mezdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal.* 2024;2(140):1–11. (In Russ.).
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.7>

13. Popov I.P. Reduction of Planck's constant to classical fundamental constants. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Fizika i khimiya.* 2014;3:51–54. (In Russ.).
14. Popov I.P. Seven Singular Points in Quantum Mechanics. *Technical Physics.* 2024;69:2406–2408. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700427>
15. Zhernovoi A.I. Quantization of magnetic flux generated by a magnetite nanoparticle. *Nauchnoe priborostroenie.* 2018; 28 (2):45–48. (In Russ.).
16. Vilkov E.A., Nikitov S.A., Byshevskii-Konopko O.A., Cafin A.R., Fomin L.A., Chigarev S.G. Frequency of spin-injection radiation in a magnetic junction taking into account the spin mobility of electrons. *Fizika tverdogo tela.* 2020;9:1507–1513. (In Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.09.49778.19H>
17. Deriglazov A.A. Non-minimal spin-field interaction of a classical electron and spin quantization. *Pis'ma v zhurnal «Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra».* 2020;17:755. (In Russ.).
18. Muradyan A.Zh., Badalyan D.A. Spin-dependent multichannel electron tunneling in a quantum wire in a longitudinal magnetic field. *Izvestiya vuzov. Fizika.* 2024;67:5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/00213411/67/7/1>
19. Tazhen A.B., Dosbolayev M.K. Measuring the self-generated magnetic field and the velocity of plasma flow in a pulsed plasma accelerator. *Recent Contributions to Physics.* 2021;(2):30–39. <https://doi.org/10.26577/10.26577/RCPH.2021.v77.i2.04>
20. Sokol-Kutylovsky O.L. Magnetomodulation sensors based on amorphous ferromagnetic alloys for measuring weak magnetic fields. *Physical Foundations of Instrumentation.* 2022;11(4):45–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.25210/jfop-2204-MS>
21. Azar M.El., Bouhlal A., Jellal A. Boosting energy levels in graphene magnetic quantum dots through magnetic flux and inhomogeneous gap. *Physica B: Condensed Matter.* 2024;685:416005. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416005>
22. Azar M.El., Bouhlal A., Alhaidari A.D., Jellal A. Effect of magnetic flux on scattering in a graphene magnetic quantum dot. *Physica B: Condensed Matter.* 2024;675:415610 <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415610>
23. Bryon Ja., Weiss D.K., You X., Sussman S., Croot X., Huang Z., Koch J., Houck A.A. Time-dependent magnetic flux in devices for circuit quantum electrodynamics. *Physical Review Applied.* 2023;19:034031. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.19.034031>
24. Lebedev V. Solution to the electron spin paradox. *Norwegian Journal of Development of the International Science.* 2021;58:37–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-58-1-37-41>
25. Koop I.A., Bedarev E.V., Otboev A.V., Shatunov Yu.M. Free spin precession as an alternative to the resonant depolarization method in future electron-positron colliders. *Pis'ma v zhurnal «Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra».* 2024;21(3):385–392. (In Russ.).
26. Badalyan D.A., Muradyan A.Zh. Spin-dependent multichannel scattering of an electron in a quantum wire with a point defect. *Proceedings of the National Academy of Sciences Physics.* 2022;59–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.54503/0002-3035-2022-57.1-59>
27. Popov I.P. Magnetic properties of conductors with different conductivities. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2025;1(51):9–14. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-9-14](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-9-14)
28. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Study of the crystal lattice parameters, phase composition and structure of the AK5M2 alloy after surface modification with titanium and subsequent electron beam irradiation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2022;1(39):63–68. (In Russ.).
29. Popov I.P. Combined Vectors and Magnetic Charge. *Technical Physics.* 2024;69:2397–2405. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700415>
30. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Aksanova K.V. Changes in the mechanical properties of commercially pure aluminum under the influence of a magnetic field. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2022;2:10–16. (In Russ.).
31. Losev G.L., El'tishchev V.A. Electromagnetic measurements of the level and conductivity of non-ferrous metals. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika.* 2020;4:63–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2020-4-63-68>
32. Sandalov E.S., Sinitskii S.L., Arzhannikov A.V., Pavlyuchenko V.A., Bak P.A., Ginzburg N.S., Logachev P.V., Meshcheryakov I.N., Nikiforov D.A., Peskov N.Yu., Protas R.V., Ryabchenko K.K., Skvorodin D.I. Magnetic system of a subgiga-watt terahertz free-electron laser based on a kiloampere beam of relativistic electrons. *Izvestiya vuzov. Radiofizika.* 2023;66(7–8):538–554. (In Russ.). https://doi.org/10.52452/00213462_2023_66_07_538
33. Zenin A.A. Parameters of the beam plasma of a plasma electron source during injection of low-

- energy electrons. *Sbornik izbrannykh statei nauchnoi sessii TUSUR*. 2021;1-1:212–215. (In Russ.).
34. Bochkov E.I., Babich L.P., Kutsyk I.M. Dependence of the high-energy electron production rate in helium on the model of angular electron scattering. *Fizika plazmy*. 2021; 47(10):935–949. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0367292121090018>
35. Poklonskii N.A., Derevyago A.N., Vyrko S.A. Spin-phonon magnetic resonance of conduction electrons in indium antimonide crystals. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*. 2020;87(4):595–604. (In Russ.).
36. Stepanyan A.G. The combined effect of acoustic phonon confinement and spin-orbit interaction on the energy loss rate of hot electrons in a nanowire. *Proceedings of the National Academy of Sciences Earth science*. 2023;87–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.54503/0321-1339-2023.123.3-4-87>
37. Kornilovich A.A., Litvinov V.G. Spin-orbit coupling of paired two-dimensional electrons and the filling factor of Landau levels in the fractional quantum Hall effect regime. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021;77:130–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2021-77-130-140>
38. Anisimova G.P., Dolmatova O.A., Krylov I.R., Tsygankova G.A. Direct matrix elements of the spin-alien orbit interaction energy operator in configurations with p- and h-electrons on the outer shells. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*. 2023;90(1):5–12. (In Russ.).
- <https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-1-5-12>
39. Pavlov V.D. Calculated minimum radius of positronium. *Inzhenernaya fizika*. 2024;2:24–29. (In Russ.).
<https://doi.org/10.25791/infizik.2.2024.1385>
40. Pavlov V.D. On the correctness of the positronium size. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*. 2024;33:24–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/24135542/33/2>

Сведения об авторе:

Игорь Павлович Попов, к.т.н., доцент кафедры теоретической, экспериментальной физики и компьютерных методов физики, Курганский государственный университет
E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru
ORCID: 0000-0001-8683-0387
SPIN-код: 9668-2780

Information about the author:

Igor' P. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical, Experimental Physics and Computer Methods of Physics, Kurgan State University
E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru
ORCID: 0000-0001-8683-0387
SPIN-код: 9668-2780

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 19.05.2025

После доработки 23.06.2025

Принята к публикации 26.06.2025

Received 19.05.2025

Revised 23.06.2025

Accepted 26.06.2025