

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СПИНОВЫЕ И МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

**Тезисы докладов молодежной конференции
по физике полупроводников
«Зимняя школа 2023»**

2023

Санкт-Петербург (г. Зеленогорск)
2–6 марта 2023 года

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СПИНОВЫЕ И МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Тезисы докладов молодежной конференции
по физике полупроводников
«Зимняя школа 2023»

Санкт-Петербург (г. Зеленогорск)
2–6 марта 2023 года



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2023

Спиновые и магнитные явления в конденсированных средах: тезисы докладов молодежной конференции по физике полупроводников «Зимняя школа 2023», С.-Петербург–Зеленогорск, 2–6 марта 2023 г. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 89 с.

Сборник содержит тезисы докладов-лекций ведущих специалистов и тезисы докладов молодых ученых-физиков по материалам собственных оригинальных работ, представленных на молодежной конференции по физике полупроводников «Зимняя школа 2023» (2–6 марта 2023 г.). ФТИ им. А. Ф. Иоффе ежегодно проводит «Зимнюю школу» по физике полупроводников для аспирантов, молодых ученых и студентов старших курсов. В 2023 году основная тематика программы — спиновые и магнитные явления в конденсированных средах. Традиционно включена лекция, посвященная Нобелевской премии по физике.

Издание рассчитано на широкий круг молодых исследователей, преподавателей соответствующих специальностей вузов, научных работников и инженеров, специализирующихся в области физики полупроводников.

Редактор *Е. В. Куницына*

® Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе
Российской академии наук, 2023

® Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2023

Релятивистский электрический потенциал одномерных проводников со стационарным током

Н.А. Поклонский

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Исследование свойств одномерных систем [1] как проводников электричества [2,3] и тепла [4] позволяет расширить область их применения в качестве элементов приборных структур [5].

В лекции представлен теоретический расчет и предложена схема изменения концентрации электронов c -зоны (дырок v -зоны) в квазиодномерных прямолинейных полупроводниках с постоянным баллистическим током в отсутствие инъекции в них из контактов избыточных электронов и/или дырок под действием внешнего электрического поля.

Из классической теории электромагнетизма следует (и это экспериментально установлено), что стационарный электрический ток является источником стационарного магнитного поля [6]. Согласно уравнениям Максвелла, электрическая цепь с линейно растущим (или линейно убывающим) во времени током является источником стационарного электрического потенциала (см., например, [7,8]). Ясно, что время существования такого источника потенциала принципиально ограничено.

В работе [9] показано, что в неподвижном однородном проводнике из нормального (несверхпроводящего) металла со стационарным дрейфовым током объемный электрический заряд не равен нулю. Это следует из уравнения Пуассона, связывающего электрический потенциал с объемной плотностью нескомпенсированного электрического заряда в некоторой точке проводника, уравнения непрерывности для плотности тока и закона Ома при учете действия силы Лоренца (от магнитного поля, порожденного этим же током) на электроны проводимости. Отрицательный объемный заряд возникает из-за ухода части электронов в глубь проводника под действием магнитного поля тока. В приповерхностной области проводника с током остается положительный заряд нескомпенсированных электронами ионных остовов [10]. Это перераспределение зарядов по поперечному сечению металла — суть пинч-эффекта [11]. Экспериментально наблюдалась конфигурационная ЭДС, обусловленная изменением плотности стационарного дрейфового тока вдоль однородного проводника электричества из-за изменения площади поперечно-

го сечения проводника (эффект Бернулли в несжимаемой электронной жидкости; см. [12] и цитируемую там литературу).

В рамках специальной теории относительности показано [13–15], что прямолинейный одномерный проводник электричества с возбужденным в нем стационарным током порождает наряду со стационарным магнитным полем стационарное электрическое поле вблизи проводника. Это чисто релятивистский эффект. Вывод формулы для релятивистского электрического потенциала φ_{rel} основан на формуле для скалярного потенциала Лиенара–Вихерта [16–19]. Электрический потенциал, создаваемый элементом тока, интегрируется по квазиодномерному проводнику (тонкой проволоке) конечной длины. В каждой точке проволоки задается баллистическая скорость v бесстолкновительного движения электронов между электродами (от катода к аноду) во внешнем электрическом поле и их концентрация; проволока предполагается локально и в целом электрически нейтральной. Пусть прямая проволока длиной L в виде сплошного цилиндра с площадью поперечного сечения S размещена в среде с относительной диэлектрической проницаемостью ε_r . Согласно [13,14], на расстоянии $d > (S/\pi)^{1/2}$ от центра проволоки со стационарным током релятивистский электрический потенциал:

$$\varphi_{\text{rel}} = -\frac{(I/c)^2}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 enS} \left(1 + \frac{4d^2}{L^2}\right)^{-1/2} < 0$$

где I — сила тока, $c = (\varepsilon_0\mu_0)^{-1/2}$ — скорость света в вакууме, ε_0 — электрическая постоянная, μ_0 — магнитная постоянная, e — элементарный заряд, n — трехмерная (объемная) концентрация баллистически движущихся в проволоке электронов.

Оценим величину потенциала φ_{rel} , создаваемого находящейся в жидком азоте ($\varepsilon_r = 1.4$) проволокой из кристаллического n -InSb ($L = 15 \mu\text{m}$, $S = 30 \mu\text{m}^2$, $n = 10^{15} \text{cm}^{-3}$) с симметричными омическими контактами (электродами) и постоянным электрическим током $I = 0.3 \text{mA}$; плотность тока $I/S = 10 \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$. На расстоянии $d = 5 \mu\text{m}$ от центра проволоки в перпендикулярном току направлении имеем $\varphi_{\text{rel}} \approx -1.1 \mu\text{V}$.

Измеряя величину φ_{rel} вблизи проволоки с известным значением S при $I = \text{const}$, находим концентрацию баллистически движущихся электронов n , которую экспериментально установить в рамках классического эффекта Холла для тонкой проволоки практически невозможно (см., например, обзор [20]).

Из формулы для φ_{rel} (полученной при условии $v \ll c$) следует, что потенциал φ_{rel} не зависит от направления тока. При прочих равных условиях абсолютная величина релятивистского потенциала $|\varphi_{\text{rel}}|$ тем больше, чем

меньшей концентрацией электронов обеспечивается поддержание в проволоке заданной силы тока I , т.е. чем больше баллистическая скорость пролета электронов от катода к аноду. Дрейфовая скорость электронов в электродах (неограниченных резервуарах электронов) много меньше, чем баллистическая скорость электронов в проволоке. Поэтому при переходе электронов из катода в проволоку происходит их ускорение, а при переходе из проволоки в анод — торможение (из-за эффекта Бернулли в изотермических условиях). Согласно [15], области с ускорением и торможением электронов дают противоположные по знаку вклады в потенциал φ_{rel} , так что регистрацию релятивистского электрического потенциала необходимо проводить порознь для двух направлений стационарного тока в проволоке.

Итак, релятивистский эффект [21,22] может быть зарегистрирован не только оптическими методами [23,24], но и электрическими измерениями на постоянном токе.

В заключение обозначаются перспективы исследований по тематике лекции и принципиальные электрические схемы измерения релятивистского потенциала.

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № Ф23РНФ-049).

Литература

- [1] *Fundamental Properties of Semiconductor Nanowires*, ed. by N. Fukata, R. Rurali, Springer, Singapore, (2021).
- [2] S. Datta, *Lessons from Nanoelectronics. A New Perspective on Transport. Part A. Basic Concepts*, World Scientific, Singapore, (2017).
- [3] S. Datta, *Lessons from Nanoelectronics. A New Perspective on Transport. Part B. Quantum Transport*, World Scientific, Singapore, (2018).
- [4] K. Schwab, E.A. Henriksen, J.M. Worlock, M.L. Roukes, *Nature*, **404**, 974–977 (2000).
- [5] N.I. Goktas, P. Wilson, A. Ghukasyan, D. Wagner, S. McNamee, R.R. LaPierre, *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 041305 (2018).
- [6] И.Е. Тамм, *Основы теории электричества* (Физматлит, М., 2003).
- [7] М.А. Миллер, *УФН*, **142**, 147–158 (1984).
- [8] М.А. Миллер, *Изв. вузов. Радиофизика*, **29**, 991–1007 (1986).
- [9] М.Л. Мартинсон, А.В. Недоспасов, *УФН*, **163**, 91–92 (1993).
- [10] Г.Н. Гайдуков, А.А. Абрамов, *УФН*, **178**, 171–174 (2008).
- [11] M.S. Kushwaha, *Mod. Phys. Lett. B*, **30**, 1630002 (2016).
- [12] Т.М. Лифшиц, О.Ю. Полянский, В.В. Романцев, *Письма в ЖЭТФ*, **18**, 421–424 (1973).
- [13] В.В. Митянок, Н.А. Поклонский, *ЖТФ*, **63**, 189–191 (1993).
- [14] N.A. Poklonski, I.A. Halimski, S.A. Vyrko, A.T. Vlassov, N.N. Hieu, *Journal of the Belarusian State University. Physics*, ? 1, 20–25 (2021).

- [15] Н.А. Поклонский, И.А. Галимский, А.Т. Власов, С.А. Вyrко, *Материалы и структуры современной электроники: матер. X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г.* (БГУ, Минск, 2022) с. 509–514.
- [16] D.J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, (2017).
- [17] А.Н. Фурс, *Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика*, № 1, 43–51 (2017).
- [18] Н.Т. Жанг, И.Д. Феранчук, *Изв. вузов. Физика*, № 9, 66–70 (1990).
- [19] А.О. Barut, *Electrodynamics and Classical Theory of Fields and Particles* Dover, New York, (1980).
- [20] А.Ф. Барабанов, Ю.М. Каган, Л.А. Максимов, А.В. Михеенков, Т.В. Хабарова, *УФН*, **185**, 479–488 (2015).
- [21] Е.Л. Фейнберг, *УФН*, **167**, 455–457 (1997).
- [22] С.-Б. Хуан, *УФН*, **181**, 553–556 (2011).
- [23] D. Hils, J.L. Hall, *Phys. Rev. Lett.*, **64**, 1697–1700 (1990).
- [24] Е.Б. Александров, П.А. Александров, В.С. Запасский, В.Н. Корчуганов, А.И. Стирин, *УФН*, **181**, 1345–1351 (2011).

Источники неразличимых фотонов и фотонных кластеров на квантовых точках

А.А. Торопов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия

Использование источников фотонов на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) является одним из наиболее перспективных подходов к реализации устройств квантовых вычислений на основе эффекта квантовой интерференции в системе линейных оптических элементов — светоделителей, линий задержки и фазовращателей [1]. В настоящее время коммерчески доступны источники одиночных фотонов на основе микрорезонаторов с КТ InAs/GaAs, обеспечивающие при импульсной оптической накачке достижение беспрецедентно хороших значений двух критически важных параметров: «чистоты» однофотонного излучения (более 95%) и степени неразличимости излученных фотонов (более 90%) [2]. Тем не менее, пока недостижимым является значение третьего важного параметра — яркости источника, определяемой как вероятность генерации фотона на один импульс накачки, которое бы позволило масштабировать подобные фотонные устройства до размеров, представляющих практический интерес. Альтернативный подход к разработке масштабируемых фотонных квантовых процессоров основан на использовании фотонных кластерных состояний — цепочек фотонов, характеризующихся