

КЛЮЧЕВЫЕ РАБОТЫ И ГОРИЗОНТЫ (“BAKER’S DOZEN”)

Е.Л. Ивченко

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26*

Представлено краткое изложение доклада автора на Советании по теории полупроводников (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 19-21 апреля 2016 г.)^{}.*

1. Ключевые работы (Baker’s dozen)

Моя первая публикация [1] появилась в 1969 г., я учился тогда на 6-ом курсе Ленинградского Политехнического института (ныне Политехнический университет Петра Великого). Отобрать ключевые из списка почти трехсот статей было очень трудно, в процессе выбора к объективным активно подмешивались субъективные критерии. Тем не менее, отказавшись от длительной процедуры, я в течение часа волевым усилием составил следующие 13 тематик своих ключевых работ:

1. Прецессионный механизм спиновой релаксации в магнитном поле. [2]
2. Спиновый эффект Фарадея в режиме “накачка — зондирование”. [3]
3. Циркулярный фотогальванический эффект. [4]
4. Особенность при многократном упругом рассеянии назад. [5]
5. Интерфейсное смешивание состояний тяжелых и легких дырок. [6]
6. Резонансная брэгговская структура. [7]
7. Анизотропия электронного g -фактора в квантовой яме. [8]
8. Линейно-циркулярный двухфотонный дихроизм. [9]
9. Сдвиговый механизм фотогальванических эффектов. [10]
10. Естественная оптическая активность полупроводников. [11]
11. Тонкая структура низкоразмерных экситонов. [12]
12. Спиновый шум в полупроводниках. [13]
13. Ориентация спинов электрическим током. [14]

По каждой теме опубликовано несколько или ряд статей, здесь указана только первая из каждого цикла. Отобранные статьи опубликованы до достижения мною пятидесяти лет. Более поздние публикации могут быть включены в итоговые отчеты моих молодых соавторов. Поэтому вместо перечисления результатов, полученных за последние двадцать лет, я перечислю сотрудников нашего Сектора: Леонид Голуб, Александр Поддубный, два Сергея: Гупалов и Тарасенко, четыре Михаила: Нестоклон, Воронов, Глазов и Дурнев, – а также аспиранты Гриша Будкин, Саша Пошакинский и Дима Смирнов. Единственная область, в изучение которой не вовлечены другие сотрудники Сектора, – это спин-зависимая рекомбинация через глубокие центры в полупроводниках. О ней я поговорю чуть позже.

Приведу предельно кратко результаты по каждому из 13-ти указанных пунктов.

1. Изучено влияние на спиновую релаксацию Дьяконова–Переля циклотронного движения электрона в продольном магнитном поле.
2. Предложено исследовать оптическую ориентацию электронных спинов методом двух лучей, луча накачки и зондирующего луча.
3. Предсказан циркулярный фотогальванический эффект в гиротропных средах.
4. Заложены основы теории слабой локализации в физике твердого тела.
5. Предсказаны и исследованы эффекты, обусловленные анизотропией химических связей на интерфейсах.
6. Предложен новый нанобъект – резонансная брэгговская структура с квантовыми ямами, период

^{*} Редакция с любезного согласия члена-корреспондента Российской академии наук Е.Л. Ивченко сочла целесообразным представить читателям стенографическое изложение его доклада на Советании по теории полупроводников, приуроченном к юбилейным датам известных физиков-теоретиков – Ясиевич И.Н., Ивченко Е.Л., Аверкиева Н.С.

которой равен половине длины световой волны на частоте двумерного экситонного резонанса. 7. Предсказана сильная анизотропия электронного g -фактора в наногетероструктурах. 8. Предсказан и исследован двухфотонный линейно-циркулярный дихроизм в кристаллах кубической симметрии. 9. Выведено выражение для элементарного сдвига блоховского электрона в \mathbf{r} -пространстве при квантовом переходе. 10. Построена теория естественной оптической активности полупроводников. 11. Создана теория тонкой структуры низкоразмерных экситонов. 12. Положено начало изучению спинового шума в газе свободных электронов. 13. Предсказано явление гиротропии, индуцированной электрическим током.

Перечислив результаты работ, я не переоцениваю своего вклада. Этот вклад полезен, но он является малой толикой в грандиозном процессе изучения физического мира. Физика многообразна, интересна и увлекательна. Однако она не оторвана от других наук. Выступая здесь с юбилейным докладом, я хочу обсудить влияние, оказываемое философией и математикой на меня, физика-теоретика. Результат моего труда – знание, физическое знание. Я добываю физическое знание. При работе я пользуюсь, так или иначе, результатами труда математиков и философов. Для иллюстрации я обращусь к истории возникновения комплексных чисел.

2. Математика и физика

По-видимому, впервые мнимые величины были упомянуты в труде “Великое искусство, или об алгебраических правилах” Джероламо Кардано (1545). Возможность использования мнимых величин при решении кубического уравнения впервые описал Рафаэль Бомбелли (1572). Рассмотрим уравнение третьего порядка $x^3 = 15x + 4$, проанализированное Бомбелли. Согласно формуле Кардано решение уравнения третьего порядка

$$x^3 = kx + b$$

можно представить в виде

$$x = \sqrt[3]{\frac{b}{2} + \sqrt{\Phi}} + \sqrt[3]{\frac{b}{2} - \sqrt{\Phi}},$$

где

$$\Phi = \left(\frac{b}{2}\right)^2 - \left(\frac{k}{3}\right)^3. \quad (1)$$

Для примера Бомбелли неожиданно имеем $\Phi = -121$ и корень принимает вид

$$x = \sqrt[3]{2 + \sqrt{-121}} + \sqrt[3]{2 - \sqrt{-121}}.$$

Используя тождества

$$\sqrt[3]{2 + \sqrt{-121}} = 2 + \sqrt{-1}, \quad \sqrt[3]{2 - \sqrt{-121}} = 2 - \sqrt{-1},$$

находим $x = 4$. Бомбелли впервые описал правила сложения, вычитания, умножения и деления комплексных чисел, однако всё равно считал их бесполезной и хитроумной “выдумкой”.

Предубеждение перед корнем квадратным из отрицательного числа существовало очень долго. Например, Лейбниц писал, см. [16]: “Дух божий нашел тончайшую отдушину в этом чуде анализа, уроде из мира идей, двойственной сущности, находящейся между бытием и небытием, которую мы называем мнимым корнем из отрицательной единицы”. Символ i для обозначения мнимой единицы предложил Леонард Эйлер (1777, опубликовано 1794), взявший для этого первую букву латинского слова *imaginarius* – мнимый. До него мнимый корень рассматривался как “трюк”, хотя и применялся с успехом, пока получение Эйлером знаменитой формулы

$$e^{i\phi} = \cos\phi + i \sin\phi \quad (2)$$

не открыло комплексным числам дорогу в самые различные области математики и ее приложений.

В волновой квантовой механике состояния системы описываются волновой функцией, которая является комплексной величиной. При этом комплексный характер волновой функции является решающим фактором: на самом деле, в то время, как модуль представляет собой квадратный корень из плотности вероятности, фаза также несет физическую информацию. Например, она связана со средним значением оператора импульса и порождает эффекты интерференции. Оперирование с матрицей плотности, более общим объектом по сравнению с волновой функцией, также не может обойтись без комплексных чисел.

Рассмотрим на простом примере, как работает формула Кардано. Ею можно воспользоваться при расчете концентраций фотоэлектронов (n) и фотодырок (p), генерируемых при междузонном оптическом возбуждении и рекомбинирующих через глубокие центры в полупроводнике (рекомбинация Шокли–Рида–Холла). Уравнения сохранения частиц и их кинетики при стационарном возбуждении неполяризованным светом имеют вид

$$c_n n N_1 = G, \quad c_p p N_2 = G, \quad N_1 + N_2 = N_c, \quad p = n + N_2. \quad (3)$$

Здесь G – скорость генерации электронов или дырок, N_c – концентрация глубоких центров, N_1 и N_2 – концентрация этих центров с одним и двумя связанными электронами, c_n и c_p – рекомбинационные коэффициенты.

Перейдем к безразмерным величинам

$$X = \frac{N_2}{N_c} = \frac{N_c - N_1}{N_c}, \quad Y = \frac{n}{N_c}, \quad g = \frac{G}{c_p N_c^2}, \quad \bar{X} = X - \frac{1}{3}.$$

Величина \bar{X} удовлетворяет кубическому уравнению

$$\bar{X}^3 = k\bar{X} + b$$

с коэффициентами

$$k = \frac{1}{3} + (1+a)g, \quad b = \frac{2}{27} - \frac{2-a}{3}g, \quad a = \frac{c_p}{c_n}.$$

Вспомогательная величина (1) принимает вид

$$\Phi = \left(\frac{b}{2}\right)^2 - \left(\frac{k}{3}\right)^3 \rightarrow \frac{1}{4} \left(\frac{2}{27} - \frac{2-a}{3}g\right)^2 - \frac{1}{27} \left[\frac{1}{3} + (1+a)g\right]^3.$$

Три корня кубического уравнения находятся по формулам Кардано

$$\bar{X}_1 = \alpha + \beta, \quad \bar{X}_{2,3} = -\frac{\alpha + \beta}{2} \pm i \frac{\alpha - \beta}{2} \sqrt{3}, \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{b}{2} + \sqrt{\Phi}}, \quad \beta = \sqrt[3]{\frac{b}{2} - \sqrt{\Phi}}, \quad \beta = \frac{k}{3\alpha}.$$

При очень малой мощности накачки имеем

$$\alpha \approx \frac{1}{3} + iC\sqrt{g}, \quad \beta \approx \frac{1}{3} - iC\sqrt{g},$$

откуда следует, что

$$\bar{X}_3 = -\frac{1}{3} + C\sqrt{3g}, \quad X = C\sqrt{3g} \rightarrow N_2, \quad p \propto \sqrt{g}.$$

Два других решения \bar{X}_1 и \bar{X}_2 являются нефизическими. Формулы (4) позволяют записать решение и при произвольной мощности накачки.

При междузонном возбуждении циркулярно поляризованным светом происходит оптическая ориентация спинов свободных фотоэлектронов в зоне проводимости и электронов, связанных на глубоких центрах, и описание усложняется. Сотрудничая с

группой Калевича в ФТИ, французскими экспериментаторами из Тулузы и японскими экспериментаторами из Цукубы, я разработал теорию спин-зависимой рекомбинации и учел сверхтонкое взаимодействие электрона с ядром дефекта, на котором этот электрон связан [19-23]. В конце доклада я кратко скажу о наших самых последних находках в этой области.

Завершая тему “Математика и физика”, замечу, что мое общение с математиками показало, как сильно мы различаемся. Сформулировать основную причину этого различия помогло знакомство со школой Пифагора так, как это изложено в книге Роберта Брамбо “Философы древней Греции” [15]. Он пишет: “Специфические для пифагорейцев философские идеи можно свести к двум фразам: «Числа – это вещи» и «Вещи – это числа.»” Первая из этих заповедей говорит о том, что пифагорейская школа открыла чистую математику. Вторая заповедь выражает открытие пифагорейцев о том, что математические формулы можно использовать для объяснения физического мира. Сославшись на пифагорейцев, я тем самым перешел к рассмотрению философского горизонта.

3. Физика и философия

Многие физики считают постановку философских, метафизических, вопросов [17] излишней и стараются избежать их обсуждения, а если нельзя избежать, то по возможности побыстрее свернуть разговор на эту тему. Да, не стоит преувеличивать значение метафизических вопросов о физике: очевидно, физика может вполне устойчиво развиваться и без вопрошания сверх сущего. Известна шуточная фраза Блеза Паскаля: «Философия не стоит и часа труда». Думаю, что Паскаль лукавил, так как он известен не только как математик, механик, физик, литератор, но и как выдающийся философ.

Мне было полезно осознать различие между физикой и философией, прежде всего постмодернистской философией. Постмодернистская философия постулирует наличие в реальной действительности “множественности порядков”, между которыми невозможно установление какой-либо иерархии. Такой подход распространяется на теории, парадигмы, концепции или интерпретации того или иного “порядка”. Каждая из них является одной из возможных и допустимых, их познавательные достоинства в равной мере являются относительными. Короче говоря, постмодернизм весьма скептически относится к понятию истины и пересматривает прежнее понимание знания и познания. В отличие от постмодернистской философии в физике иерархия и истина признаются. Вот заповеди, принимаемые физиками: “Наука есть теория действительного” [18], “Действительно то, что поддается измерению (Only measurable things exist)” (Макс Планк). Если зашла речь о теории, а это слово содержится в названии нашего Совещания, то полезно напомнить, что теория в старом, греческом, смысле (*θεωρία*, *феория*) есть почтительное внимание к непотаенности присутствующего (оберегающее внимание к истине). Имеется и древнегреческая богиня истины Алетея (*Αληθεια*), символ непотаенности (Веритас у древних римлян). В современной науке греческая “феория” оказывается рассмотрением (прослеживанием, обзреванием) действительного в его причинно–следственных взаимосвязях. В этом суть моей профессии физика-теоретика.

Как бы я ни относился к философии, время от времени меня удивляют и воодушевляют, во-первых, познаваемость физического мира, во-вторых, возможность теоретического описания физических явлений и, в-третьих, простота теоретического описания.

4. Проблемы современной физики

Каждая эпоха характеризуется определенным набором глобальных проблем в физике. Физики обсуждают их, некоторые из них публикуют специальные обзорные статьи. Как правило, предлагаемые списки проблем не претендуют на полноту и отражают научные интересы автора, см. напр. [24]. К докладу я составил свой список нерешенных проблем: (I) сверхпроводимость при комнатной температуре, (II) квантовый (спиновый) компьютер, (III)

управляемый ядерный синтез, (IV) 3D наностроительство по плану, (V) темная материя и темная энергия. Ниже приводится разъяснение в виде одной-двух фраз по каждому из этих пунктов.

1. “Наука не знает, например, можно ли получить сверхпроводимость при комнатной температуре, а теория не дает ответа на этот вопрос. Когда-нибудь даст”. (В.Л. Гинзбург, интервью от 26.11.2000).
2. Проблема потери квантовой когерентности – одна из главных проблем на пути построения практически полезного квантового компьютера.
3. Управляемый термоядерный синтез – синтез более тяжелых ядер из более легких с целью получения энергии, который носит управляемый характер, в отличие от взрывного термоядерного синтеза.
4. В заключении к книге [25] четвертая проблема сформулирована следующим образом: “...to fabricate by design the three-dimensional complicated nanoobjects by using atoms, molecules, clusters, nanoparticles, superlattices, quantum wells, wires, dots, rings, nanotubes, nanomagnets etc. as building blocks” (перевод: изготовить по дизайну трехмерные сложные нанообъекты, используя в качестве строительных блоков атомы, молекулы, кластеры, наночастицы, сверхрешетки, квантовые ямы, провода, точки, кольца, нанотрубки, наномангнетики и т.д.).
5. “Темная энергия – пожалуй, главная загадка современного естествознания” (В. Рубаков [26]). “Темную материю видят пока только по ее гравитационному взаимодействию, никаких других “твердых” проявлений нет” (проф. Александр Долгов, интервью от 29.12.2015).

Почитав публикации по темной материи, я понял, что это богатая область для фантазий. Вот, например, список работ А.Б. Балакина с соавторами из Института физики Казанского университета. Пять из них опубликованы в журнале *Physical Review D*, одна – в журнале *Gravitation Cosmology*. В этих работах в качестве кандидатов на роль темной материи выбраны аксионы, гипотетические нейтральные псевдоскалярные элементарные частицы-бозоны. В частности, действие для электромагнитного поля записывается в виде [32]

$$S_{(EM)} = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{1}{4} F_{mn} F^{mn} + \frac{1}{4} \phi F_{mn}^* F^{mn} \right), \quad (5)$$

где g – определитель, составленный из метрического тензора, F_{mn} и F^{mn} – ковариантный и контравариантный тензоры электромагнитного поля, ϕ – псевдоскалярное аксионное поле,

$$F^{*kl} = \frac{E^{klmn}}{\sqrt{-g}} F_{mn}, \quad E^{0123} = 1.$$

Поле ϕ индуцирует поворот плоскости поляризации света, распространяющегося в этом поле. По аналогичной схеме в работе [32] рассмотрено, как изменяется направление спина электрона при его движении в неоднородном аксионном поле. В качестве примера проведен расчет для сферически симметричной, статической аксионной звезды с метрикой

$$ds^2 = B(r)dt^2 - A(r)dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2).$$

5. Язык теоретической физики

Мне кажется, никто не оспаривает роль языка как важнейшего инструмента человеческого взаимодействия и общения. Вот только несколько цитат на эту тему: «Человек живет не в стране, он живет внутри языка» (Эмиль Мишель Чоран, Emil Michel Cioran); «Настоящая родина – это язык» (Вильгельм фон Гумбольдт, филолог, философ, языковед, старший брат Александра фон Гумбольдта); «Моя родина – французский язык» (А. Камю).

Язык теоретической физики – математические формулы. Для примера я привожу замечательную формулу

$$E = \hbar \omega,$$

связывающую энергию фотона с частотой света, формулу золотого правила Ферми для квантовых переходов:

$$W_{f \leftarrow i} = \frac{2\pi}{h} |V_{fi}|^2 \delta(E_f - E_i),$$

и формулу для расталкивания двух квантовых уровней

$$E_{\pm} = \frac{E_1 + E_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{E_1 - E_2}{2}\right)^2 + |V_{21}|^2}.$$

Теперь я проиллюстрирую язык теоретической физики на примере своих работ и приведу формулы

$$j_{\lambda} = I \gamma_{\lambda\mu} i (\vec{e} \times \vec{e}^*)_{\mu}$$

для циркулярного фотогальванического эффекта [4],

$$\vec{j} = -e N_e \tau_p \nabla_{\mathbf{k}} \left(\vec{\Omega}_k^{(1)} \cdot \vec{S} \right)$$

для спин-гальванического эффекта [33],

$$r_N = \frac{iN\Gamma_0}{\omega_0 - \omega - i(\Gamma + N\Gamma_0)}$$

для амплитудного коэффициента отражения света от резонансной брэгговской структуры с N квантовыми ямами [7],

$$\frac{1}{\tau_s(B_{II})} = \left(\frac{\beta}{\hbar}\right)^2 \left\langle \frac{k^2 \tau_p}{1 + (\Omega_c \tau_p)^2} \right\rangle$$

для времени спиновой релаксации электрона в продольном магнитном поле [34],

$$\varphi_j^A = \varphi_j^B, \quad \nabla_z^j \varphi_j^A = \nabla_z^j \varphi_j^B + \frac{2}{\sqrt{3}} t_{l-h} \{J_x J_y\}_{jj'} \varphi_j^B$$

для граничных условий на интерфейсе для огибающих тяжелых и легких дырок [6],

$$\vec{R}_s(\vec{k}_2, \vec{k}_1) = - \left(\frac{\partial}{\partial k_1} + \frac{\partial}{\partial k_2} \right) \hat{O}_s(\vec{k}_2, \vec{k}_1) + \vec{\Omega}_s(\vec{k}_2) - \vec{\Omega}_s(\vec{k}_1)$$

для смещения блоховского электрона в \mathbf{r} -пространстве при квантовом переходе $\vec{k}_1 \rightarrow \vec{k}_2$ [10],

$$g_{\perp} - g_{\parallel} = \frac{2|p_{cv}|^2}{m_0} \left(\frac{1}{E_g + E_{e1} + E_{hh1}} - \frac{1}{E_g + E_{e1} + E_{lh1}} \right)$$

для анизотропии g -фактора [8]. Обозначения поясняются в цитируемых статьях и здесь не расшифрованы.

6. Работы 2016 года

Из шести новых работ [23,35-39] одна опубликована в февральском номере Physical Review B, одна будет опубликована в 8-ом выпуске журнала ФТТ, три выставлены в CondMat, шестая готовится к печати. В статье [35] представлены наши новые результаты по эффекту электронного храповика в графене; эта большая работа потребовала от нас с **Леонидом** Голубом больших усилий, вывод главных теоретических результатов вынесен в Приложение. В статье [23] публикуются результаты совместной работы с группой Калевича по спин-зависимой рекомбинации в наклонном магнитном поле, эксперимент выполнен коллегами на новой физтеховской установке. В двух совместных работах с коллегами из Тулузы и Цукубы [36, 37] изучены уникальные свойства квантовых точек, выращенных в направлении [111] и характеризующихся точечной симметрией C_{3v} . В работе [38] **исследуется** тонкая структура экситона в новом двумерном объекте – макроскопическом дефекте упаковки в объемном GaAs. В работе [39] изучено явление, которое представляет

собой гибрид спин-гальванического эффекта и эффекта электронного “дрожания” (Zitterbewegung).

7. Спин-зависимая рекомбинация в режиме “накачка-зондирование”

С разрешения коллег сообщу последние новости о спин-зависимой рекомбинации. В Тулузе (INSA) выполнены первые эксперименты по изучению этого явления двухлучевым методом: 1) импульс циркулярно поляризованной накачки рождает поляризованные по спине фотоэлектроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне (дырки быстро теряют направленный спин, их можно считать неполяризованными), 2) зондирующий импульс, поляризованный линейно или циркулярно, приходит с задержкой t_0 , 3) измеряется проинтегрированная во времени интенсивность междузонной фотолюминесценции, инициируемой зондирующим импульсом, 4) строится зависимость отношения сигнала спин-зависимой рекомбинации (SDR)

$$SDR(+,+) = \frac{\int dt I(t; \sigma_+, \sigma_+)}{\int dt I(t; \sigma_+, lin)}$$

при циркулярно поляризованной накачке к сигналу SDR

$$SDR(\times,+) = \frac{\int dt I(t; lin, \sigma_+)}{\int dt I(t; lin, lin)}$$

при линейно поляризованной накачке.

И эксперимент тулузских коллег S. Azaizia, A. Balocchi, T. Amand, и численный расчет, выполненный С. Sandoval-Santana, V.G. Ibarra-Sierra, A. Kunold из Мехико (Universidad Autonoma Metropolitana–Azcapotzalco), показывает наличие осциллирующего вклада в отношение $SDR(+,+)/SDR(\times,+)$. Мы вывели аналитическую формулу для этого отношения

$$\frac{SDR(+,+)}{SDR(\times,+)} = 1 + P_i \frac{\delta N}{N_c} F(t_0) (f_1 \cos \Omega_1 t_0 + f_2 \cos \Omega_2 t_0), \quad (6)$$

где P_i – степень спиновой поляризации фотоэлектронов в момент генерации в зоне проводимости,

$$\delta N = \frac{5}{8} (n_+^{(pump)} - n_-^{(pump)}),$$

$n_+^{(pump)}$ и $n_-^{(pump)}$ – концентрации фотоэлектронов со спином $\pm 1/2$, созданных импульсом накачки, $F(t_0)$ – экспоненциально затухающая функция с коэффициентом затухания, определяемым временами электронной и ядерной спиновой релаксации на глубоком центре в состоянии с одним электроном, $f_i (i=1,2)$ – доля изотопов ^{69}Ga и ^{71}Ga (с ядерным моментом $I=3/2$) $\hbar\Omega_i = 2A_i$ – сверхтонкое расщепление электронно-ядерной спиновой подсистемы на отдельном дефекте. Из формулы (6) видно, что измерение зависимости отношения $SDR(+,+)/SDR(\times,+)$ от времени задержки t_0 позволяет прямым способом определять константу сверхтонкого взаимодействия.

8. Заключение

Таким образом, в своем докладе я перечислил 13 ключевых работ, выполненных до середины 90-ых годов прошлого столетия, высказал свое понимание отличия физика-теоретика от математика и философа, обсудил нерешенные проблемы в современной физике, коснулся интересного вопроса о языке теоретической физики и проинформировал о работе, которая ведется в настоящее время.

9. Список литературы

- [1] А.Г. Аронов, Е.Л. Ивченко, ЖЭТФ, 57, 247 (1969).
- [2] Е.Л. Ивченко, Спиновая релаксация свободных носителей в полупроводниках без центра инверсии в продольном магнитном поле, ФТТ 15, 1566 (1973).
- [3] А.Г. Аронов, Е.Л. Ивченко, Дихроизм и оптическая анизотропия в среде с ориентированными спинами свободных электронов, ФТТ 15, 231 (1973).
- [4] Е.Л. Ивченко, Г.Е. Пикус, Новый фотогальванический эффект в гиротропных кристаллах, Письма в ЖЭТФ 27, 640 (1978).
- [5] Е.Л. Ивченко, Г.Е. Пикус, Б.С. Разбирин, А.Н. Старухин, Оптическая ориентация и выстраивание свободных экситонов в GaSe при резонансном возбуждении. Теория, ЖЭТФ 72, 2230 (1977).
- [6] И.Л. Алейнер, Е.Л. Ивченко, Природа анизотропного обменного расщепления в сверхрешетках GaAs/AlAs типа II, Письма в ЖЭТФ 55, 662 (1992).
- [7] Е.Л. Ивченко, А.И. Несвижский, С. Йорда, Брэгговское отражение света от структур с квантовыми ямами, ФТТ 36, 2118 (1994).
- [8] Е.Л. Ивченко, А.А. Киселев, Электронный g-фактор в квантовых ямах и сверхрешетках, ФТП 26, 1471 (1992).
- [9] Е.Л. Ивченко, Двухфотонное поглощение и оптическая ориентация свободных носителей в кубических кристаллах, ФТТ 14, 3489 (1972).
- [10] В.И. Белиничер, Е.Л. Ивченко, Б.И. Стурман, Кинетическая теория сдвигового фотогальванического эффекта в пьезоэлектриках, ЖЭТФ 83, 649 (1982).
- [11] Е.Л. Ивченко, Г.Е. Пикус, Естественная оптическая активность полупроводников (теллур), ФТТ, 16, 1933 (1974).
- [12] E.L. Ivchenko, V.P. Kochereshko, A.Yu. Naumov, I.N. Uraltsev, P. Lavallard, Magnetic-field-effects on photoluminescence polarization in type II GaAs/AlAs superlattices, Superlatt. Microstruct. 10, 497 (1991).
- [13] Е.Л. Ивченко, К вопросу о флуктуациях спиновой поляризации свободных носителей в полупроводниках, ФТП 7, 1489 (1973).
- [14] Л.В. Воробьев, Е.Л. Ивченко, Г.Е. Пикус, И.И. Фарбштейн, В.А.Шальгин, А.В.Штурбин, Оптическая активность в теллуре, индуцированная током, Письма в ЖЭТФ 29, 485 (1979).
- [15] Р. Брамбо, Философы древней Греции, М., Центрполиграф, 2010, 347 с.
- [16] М. Клайн, Математика. Утрата определенности, М., Мир, 1984, 446 с.
- [17] Метафизика – это вопрошание сверх сущего, за его пределы. Выступление за пределы сущего называется трансценденцией.
- [18] М. Хайдеггер, Время и бытие: Статьи и выступления, СПб, Наука, 2007, 621 с.
- [19] В.К. Калевич, Е.Л. Ивченко, М.М. Афанасьев, А.Ю. Ширяев, А.Ю. Егоров, В.М. Устинов, Б. Пал, Я. Масумото, Письма в ЖЭТФ 82, 509 (2005).
- [20] V.K. Kalevich, A.Yu. Shiryaev, E.L. Ivchenko, A.Yu. Egorov, L. Lombez, D. Lagarde, X. Marie, T. Amand, Письма в ЖЭТФ 85, 208 (2007).
- [21] E.L. Ivchenko, V.K. Kalevich, A.Yu. Shiryaev, M.M. Afanasiev, Y. Masumoto, J. Phys.: Condens. Matter 22, 465804 (2010).
- [22] E.L. Ivchenko, L.A. Bakaleinikov, V.K. Kalevich, Phys. Rev. B 91, 205202 (2015).
- [23] Е.Л. Ивченко, Л.А. Бакалейников, М.М. Афанасьев, В.К. Калевич, Спин-зависимая рекомбинация в твердых растворах GaAs_{1-x}N_x в наклонном магнитном поле, arXiv:1602.04162; ФТТ. 58, 1490 (2016).
- [24] И.Ф. Гинзбург, Нерешенные проблемы фундаментальной физики, УФН 179, 525 (2009).
- [25] E.L. Ivchenko, Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures, Alpha Science International, Harrow, UK, 2005.
- [26] В. Рубаков, Темная энергия во Вселенной, Квант, N5, сент.-окт. 2010, стр. 8.
- [27] A.V. Balakin, V.V. Bochkarev, Archimedean-type force in a cosmic dark fluid. I. Exact solutions for the late-time accelerated expansion, Phys. Rev. D 83, 024035 (2011).
- [28] A.V. Balakin, V.V. Bochkarev, Archimedean-type force in a cosmic dark fluid. II. Qualitative and numerical study of a multistage universe expansion, Phys. Rev. D 83, 024036 (2011).
- [29] A.V. Balakin, N.O.Tarasova, Extended axion electrodynamics: Optical activity induced by nonstationary dark matter, Gravitation Cosmol. 18, 54 (2012).
- [30] A.V. Balakin, V.V. Bochkarev, Archimedean-type force in a cosmic dark fluid. III. Big rip, little rip, and cyclic solutions, Phys. Rev. D 87, 024006 (2013).
- [31] A.V. Balakin, N.N. Dolbilova, Electrodynamical phenomena induced by a dark fluid: Analogs of pyromagnetic, piezoelectric, and striction effects, Phys. Rev. D 89, 104012 (2014).
- [32] A.V. Balakin, V.A. Popov, Spin-axion coupling, Phys. Rev. D 92, 105025 (2015).
- [33] Е.Л. Ивченко, Ю.Б. Лянда-Геллер, Г.Е. Пикус, ЖЭТФ 98, 989 (1990).
- [34] Е.Л. Ивченко, П.С. Копьев, В.П. Кочерешко, И.Н. Уральцев, Д.И. Яковлев, Письма в ЖЭТФ 47, 407 (1988).

- [35] P. Olbrich, J. Kamann, M. Konig, J. Munzert, L. Tutsch, J. Eroms, D. Weiss, Ming-Hao Liu, L.E. Golub, E.L. Ivchenko, V.V. Popov, D.V. Fateev, K.V. Mashinsky, F. Fromm, Th. Seyller, S.D. Ganichev, Terahertz ratchet effects in graphene with a lateral superlattice, *Phys. Rev. B* 93, 075422 (2016).
- [36] M.V. Durnev, M. Vidal, L. Bouet, T. Amand, M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, P. Zhou, G. Wang, T. Mano, N. Ha, T. Kuroda, X. Marie, K. Sakoda, B. Urbaszek, Magneto-spectroscopy of excited states in charge-tunable GaAs/AlGaAs [111] quantum dots, arXiv:1511.08196.
- [37] M. Vidal, M. V. Durnev, L. Bouet, T. Amand, M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, P. Zhou, G. Wang, T. Mano, T. Kuroda, X. Marie, K. Sakoda, B. Urbaszek, Hyperfine coupling of hole and nuclear spins in symmetric GaAs quantum dots, arXiv:1603.02909.
- [38] Todd Karin, Xiayu Linpeng, M.M. Glazov, M.V. Durnev, E.L. Ivchenko, S. Harvey, A.K. Rai, A. Ludwig, A.D. Wieck, Kai-Mei C. Fu, Fundamental properties of 2D excitons bound to single stacking faults in GaAs, arXiv:1601.03991.
- [39] I. Stepanov, M. Ersfeld, A.V. Poshakinskiy, M. Lepsa, E.L. Ivchenko, S.A. Tarasenko, B. Beschoten, Coherent Electron Zitterbewegung, submitted.