

Исследования по спинкалоритронике на кафедре физики низких температур Харьковского национального университета в 2017-2019 годах

В.А. Шкловский

*Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразіна, пл. Свободы 4, Харьков 61022, Украина
shklovskij@univer.kharkov.ua*

ORCID: 0000-0001-9235-9309

DOI: 10.26565/2222-5617-2019-31-02

В этой статье представлен краткий обзор исследований по спинкалоритронике, проведенных на кафедре физики низких температур Харьковского национального университета в 2017-2019 годах. Во введении обсуждаются несколько новых направлений в магнитоэлектронике – спинтроники, спинкалоритроники и магноники, возникших с целью уменьшения величины диссипации, наблюдаемой в обычной полупроводниковой микроэлектронике. Спинтроника предлагает большие скорости переключения, меньшее потребление энергии, более высокую плотность устройств памяти и меньшую генерацию тепла на переключающий элемент. Это достигается путем использования спина электрона вместо (или в дополнение) его заряда, так как спин соответствует дополнительному квантовомеханическому свойству электрона, которым является его внутренний угловой момент. Реализация туннельного магнитосопротивления в спинтронике при комнатной температуре способствовала появлению твердотельной памяти нового типа, и быстро программирующихся логических схем. В спинкалоритронике, которая является дополнительной ветвью уже сформированных спинтроники и термоэлектричества, изучается спин – зависящий электронный и тепловой транспорт в веществе с помощью неравновесных электронов, магнонов и фононов. Магноника – область спинтроники, или в более общем смысле электроника, изучающая физические свойства магнитных микро- и наноструктур, свойства распространяющихся спиновых волн, а также возможностей применения последних для построения элементной базы приборов на наноуровне для обработки, передачи и хранения информации на основе новых физических принципов.

В следующем разделе статьи кратко обсуждены основные результаты, полученные в 4-х статьях кафедры и опубликованных в Physical Review B: 1) нелинейная релаксация между магнонами и фононами в ферродиелектрике 2) роль магнонов и размерный эффект в передаче тепла через границу между диэлектриком и ферродиелектриком 3) спин Зеебек эффект и передача тепла фононами в гетероструктурах, содержащих слои нормального металла и ферродиелектрика 4) температурная зависимость времени магнон-фононной релаксации в ферродиелектрике.

Ключевые слова: спинкалоритроника, спинтроника, магноника, ферродиелектрик, фонон.

Research on spin caloritronics at the Department of Low Temperature Physics of Kharkov National University in 2017-2019

V.A. Shklovskij

V. N. Karazin Kharkiv National University, Faculty of Physics, 4 Svobody Sq., Kharkiv 61022, Ukraine

In this paper is presented a short review of results about spin caloritronics obtained on the low temperature physics chair of the Kharkiv National University from 2017 till 2019 years. In introduction several new directions in magnetoelectronics are discussed- spintronics, spin caloritronics and magnonics- which emerged with the aim to reduce the energy dissipation in devices of usual semiconductor microelectronics. Spintronic devices hold the promise of faster switching speeds, less total energy consumption, and higher density of circuit elements, lowering the heat production per switching element. This could be achieved by employing the spin of the electrons instead of (or in addition to) the charge. The spin corresponds to the additional quantum mechanical property of an electron that can be described as an intrinsic angular momentum. Realization of the existence of the tunneling magnetoresistance effect observed at room temperature is paving the way for the evolution of solid state memory devices, new type of the memory, and fast programmable logic circuits. In spin caloritronics, which is included as an additional complementary branch to the established

field of spintronics and thermoelectricity, the transport of charge, magnetization (spin), or heat, occurs when the corresponding particles (electrons, magnons, or phonons) are driven out of thermodynamic equilibrium. Magnonics is the part of spintronics, or in a more general sense is electronics, studying physical properties of magnetic micro- and nanostructures, properties of propagating spin waves and also the possibilities of their application for construction of the elemental base of devices at nanolevel for processing, transmission and memory of the information on the basis of new physical principles. In next section the main results of the four papers, published in Physical Review B are discussed: 1) nonlinear relaxation between magnons and phonons in insulating ferromagnets 2) role of magnons and the size effect in heat transport through an insulating ferromagnet-insulator interface 3) spin Seebeck effect and phonon energy transfer in heterostructures containing layers of normal metal and ferroinsulator 4) temperature dependence of the magnon-phonon energy relaxation time in a ferromagnet insulator.

Keywords: spinalloritronics, spintronics, magnonics, ferroelectric, phonon.

Дослідження по спінкалоритроніці на кафедрі фізики низьких температур Харківського національного університету в 2017-2019 роках

В.А. Шкловський

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Свободи 4, 61022, Харків, Україна

У статті викладено стислий огляд досліджень у галузі спінкалоритроніки, виконаних на кафедрі фізики низьких температур Харківського національного університету у 2017-2019 роках. У вступі обговорюється кілька нових напрямків у магнітоелектроніці -спінтроніки, спінкалоритроніки та магнітоніки, які виникли із метою зменшення дисипації у звичайній напівпровідниковій мікроелектроніці. Спінтроніка пропонує великі швидкості перемикавання, менше енергоспоживання, більш високу густину пристроїв пам'яті, та меншу генерацію теплоти на перемикаючий елемент. Це досягається шляхом використання спіна електрона замість (або в доповнення) його заряду, тому що спин відповідає додатковій квантовомеханічній властивості електрона, якою є його внутрішній кутовий момент. Реалізація тунельного магнітоопору при кімнатній температурі сприяло появі нової твердотіЛЬНОЇ пам'яті та швидко програмуючих логічних схем. У спінкалоритроніці, яка є додатковою вже сформованою галуззю спінтроніки та термоелектрики, вивчається спин-залежний електронний та тепловий транспорт у речовинах із допомогою нерівноважних електронів, магнітонів та фононів. Магнітоніка є галузь спінтроніки, у більш загальному смислі електроніка, яка вивчає фізичні властивості магнітних мікро- та наноструктур, властивості поширюваних спінових хвиль, а також можливостей використання останніх для побудови елементної бази устаткування на нанорівні для обробки, передачі та зберігання інформації на основі нових фізичних принципів.

У наступному розділі статті стисло викладені головні результати чотирьох статей кафедри, які були опубліковані у Physical Review B: 1) нелінійна релаксація між магнітонами та фононами у ферродіелектрику 2) роль магнітонів та ефект розміру в теплопередачі через межу між діелектриком і ферродіелектриком 3) спин Зеебек ефект і фононна теплопередача у гетероструктурах які містять шари нормального металу та ферродіелектрика 4) температурна залежність часу магніто-фононної релаксації у ферродіелектрику.

Ключові слова: спінкалоритроніка, спінтроніка, магнітоніка, ферродіелектрик, фонон

Введение

Наша современная повседневная жизнь является эпохой развитых информационных и социальных контактов. Они обеспечены появлением за последние десятилетия высокопроизводительных компьютеров и мобильных устройств, позволяющих генерировать, сохранять и передавать огромное количество информации. В 1980-х годах память компьютера была порядка сотен килобайт, тогда как в настоящее время большинство обычных компьютеров имеют память порядка 10 гигабайт. Цена хранения одного гигабайта на жестком диске уменьшилась с 2×10^5 \$ в 1982 г. до 0,06 \$ в 2012 г.

Фундаментальным вопросом сейчас является то, каким образом можно продолжать прогресс электронных устройств в их размерах, скорости

работы и уменьшения стоимости эффективности хранения при дальнейшем росте новой накопленной и непрерывно увеличивающейся информации. Непрерывное уменьшение размеров электронных устройств, связанные с увеличением плотностей тока, неизбежно связано с ростом диссипации в соединительных контактах, ограничивая улучшение устройств электроники. Поэтому разработка новых технологий для замены электроники на основе движения зарядов являются актуальными как для исследователей, так и для промышленности. Одной из таких новых технологий является спинтроника, которая предлагает большие скорости переключения, меньшее потребление энергии, более высокую плотность устройств памяти и меньшую генерацию тепла на переключающий элемент. Это может быть

достигнуто путем использования спина электрона вместо (или в дополнение) его заряда. Спин соответствует дополнительному квантовомеханическому свойству электрона, которым является его внутренний угловой момент.

Выдающийся прорыв в области спинтроники связан с открытием, так называемого, эффекта гигантского магнитосопротивления (GMR), который ввел спин – зависящий, транспорт как новое физическое приближение, сравнимое с известным ранее обычным магнетосопротивлением. GMR было исследовано независимо двумя нобелевскими лауреатами А. Fert и Р. Grünberg в 1988 г. с публикациями о спин – зависящем транспорте в слоистых структурах, состоящих из магнитных и немагнитных металлических слоев. Когда векторы намагниченности M двух ферромагнитных слоев параллельны, электроны со спинами параллельными намагниченности рассеиваются реже, приводя к меньшему поперечному электросопротивлению. При антипараллельной ориентации электроны обеих ориентаций спинов испытывают значительное рассеяние, что приводит к большому электросопротивлению. Реализация туннельного магнитосопротивления (TMR) при комнатной температуре в трехслойниках типа $M|I|M$ (где I – изолятор) способствовало появлению твердотельной памяти нового типа, и быстро программирующихся логических схем.

Несмотря, однако, на этот прогресс, энергопотребление устройств растет и, с прикладной точки зрения, представляет основное препятствие в развитии новых информационных технологий. Технологии взаимопревращения различных форм энергии обеспечивают превращение входящей энергии (например, тепла) в более желательную и употребительную форму (например, в электрическую), что может быть использовано для превращения отработанного тепла и контроля за температурой. Спин – зависящий электронный и тепловой транспорт в веществе изучается спинкалоритроникой, которая является дополнительной ветвью уже сформированных спинтроники и термоэлектричества. Транспорт заряда, намагниченности (спина) или тепла реализуется, когда соответствующие частицы или квазичастицы (электроны, магноны или фононы) становятся неравновесными. Электроны проводимости могут быть использованы для спинового транспорта различными способами, а так же для транспорта тепловой энергии за счет закона Видемана-Франца. Магноны являются бозевскими

квазичастицами и участвуют в транспорте тепла и спина путем возмущения локализованных в кристаллической решетке магнитных атомов. Фононы, с одной стороны, являясь похожими бозевскими квазичастицами, переносят тепло путем возмущения положений атомов решетки и магнитных включений в нее, а с другой стороны, способны рассеиваться и увлекать электроны проводимости и магноны, выводя эти квазичастицы из теплового равновесия под действием внешних сил, например, градиента температур.

В области спинтроники и спинкалоритроники большое количество работ сосредоточено на экспериментальном и теоретическом исследовании спинового транспорта в двухслойниках нормальный и ферромагнитный металл (NM/ФМ), где поведение спинового тока является основным объектом изучения. Генерация, передача и детектирование спин–поляризованных токов в таких системах является тем направлением, которое в перспективе приводит к реализации следующего поколения устройств спинтроники. Исследование основного эффекта в спинкалоритронике, которым является спин Зеебек эффект (SSE), не только в металлических бислоях, но и в ферромагнитных изоляторах (т.е. диэлектриках) позволяет генерировать электрическое напряжение без тепловых потерь, связанных с движущимися электрическими зарядами.

Итак, спинтроника – это, фактически, электроника, в которой, (в частности), используются процессы переноса магнитного момента или спина электрическим током в структурах, содержащих магнитные материалы. Перенос спина может осуществляться с помощью магнонов, или квантов спиновых волн в магнитных металлах и ферродиэлектриках.

В связи с этим возникло (еще одно) новое научное направление – магноника – область спинтроники, или в более общем смысле электроника, изучающая физические свойства магнитных микро- и наноструктур, свойства распространяющихся спиновых волн, а также возможностей применения последних для построения элементной базы приборов на наноуровне для обработки, передачи и хранения информации на основе новых физических принципов. В частности, в магнонике изучаются вопросы распространения спиновых волн в распределенных магнетонных периодических структурах, так называемых магонных кристаллах. В многих аспектах спиновые волны могут рассматриваться как магнитный аналог звуковых и электромагнитных волн. Однако, спиновые волны, в отличие от

последних, имеют более разнообразные дисперсионные характеристики. Они могут варьироваться в более широком диапазоне параметров, включая выбор магнитного материала (магнитные металлы, полупроводники и диэлектрики), форму образца, ориентацию и величину приложенного постоянного магнитного поля. Комбинация как разнообразных линейных спин – волновых эффектов, так и ярко выраженных нелинейных эффектов делают спин – волновые системы интересным объектом для изучения общих вопросов динамики волн в различных системах.

Результаты, опубликованные в *Physical Review B* (4 статьи)

За период 2017 – 2019 гг. на кафедре физики низких температур (КФНТ) в рамках участия в проекте MagIC (Magnonics, Interactions and Complexity: multifunctional aspects of spin wave dynamics) проф. Шкловским В.А. было начато выполнение теоретических работ в области спинкалоритроники и за последнее время было опубликовано 4 статьи в *Physical Review B* [1 - 4]. На основе двух из этих статей [1,2] две студентки группы ФО43 – Котвицкая Л.А. и Набойченко О.С. выполнили свои бакалаврские работы, которые планируется позднее опубликовать в Scopus изданиях. Подводя итог своей работы по анализу современной научной литературы по спинтронике и магноники, проф. Шкловский В.А. планирует в следующем учебном году подготовить к изданию новое методическое пособие «Спин – поляризованный транспорт» и начать преподавание нового специального курса на КФНТ по современным методам в магноники, спинтронике и спинкалоритронике. Перейдем теперь к краткому описанию основных результатов, полученных в работах [1 - 4].

В работе [1] теоретически исследована нелинейная релаксация между магнонами и фононами в ферромагнитном диэлектрике, которая раньше изучалась теоретически только в линейном приближении. В этом отношении работа [1] наиболее тесно связана по постановке задачи и схеме ее решения с хорошо известной задачей о нелинейной релаксации электронов на фононах, рассмотренной Кагановым, Лифшицем и Танатаровым (КЛТ) еще в 1956 г. [5]. В этой работе, которая до сих пор является основной моделью для анализа экспериментов по релаксации энергии возбужденных электронов в металлах (см., например, обзорную статью [6]), нелинейный тепловой поток Q_e от горячих электронов при температуре T_e к холодным фононам

при температуре T_r был вычислен в рамках двухтемпературной модели, когда T_e и T_r были много меньше дебаевской температуры металла θ_D . Нелинейное выражение для потока тепла в этом пределе имело вид $Q_e = A (T_e^5 - T_r^5)$, где A – постоянная, зависящая только от величины электрон – фононного взаимодействия в металле. Полученные в [5] результаты позволили в дальнейшем [6] проанализировать различные аспекты зависящей от времени теории горячих электронов в тонких металлических пленках при низких температурах ($T \ll \theta_D$).

В то же время ранее аналогичная проблема релаксации магнонов на фононах в ферромагнитных диэлектриках рассматривалась только в линейном приближении, когда $Q_m \sim (T_m - T_r)$, где Q_m – тепловой поток от магнонов с температурой T_m к фононам с температурой T_r . Здесь существенно отметить, что в настоящее время переход к изучению интенсивных спиновых токов в ферромагнетиках является одним из основных направлений в спинтронике и спинкалоритронике. Так, например, измерения спинового эффекта Зеебека (см. также [3]), выполняемые обычно на двуслойниках из YIG и Pt, предполагают наличие большой разницы между температурами T_m и T_e для регистрации потока тепла через границу. В этом случае тепловое сопротивление Капицы [7] интерфейса становится наибольшим при низких температурах, что изменяет проведенные в линейном приближении фононные, электронные и магнонные температурные профили, полученные в эксперименте при комнатной температуре. В частности, в линейном приближении по температуре T можно считать, что тепловой поток следует соотношению Ньютона $Q \approx [R^{-1}(T)]\Delta T$, где $\Delta T = T_m - T_e$ и $R(T)$ есть аналог сопротивления Капицы, которое пропорционально $1/T^3$. Таким образом $R(T)$ увеличивается на три порядка по величине, если температура изменяется от 300К до 30К, и его рост достигает шести порядков в низкотемпературном эксперименте при 3К. Отсюда ясно, что даже небольшая разница между T_m и T_e существенно влияет на величину потока Q_m при низких температурах, что обуславливает необходимость теоретического исследования нелинейных режимов. С учетом этого в работе [1] рассматривается случай нелинейной релаксации между магнонами с температурой T_m и фононами с температурой T_r и получены формулы для потока тепла Q_m от магнонов к фононам для ферродиэлектрика. Эта задача рассматривается для случая, когда $T_m \ll \theta_D$, что оправдано при низких температурах. В заключение по этой статье хотелось бы подчеркнуть, что выражение

для потока Q_M в статье [1] гораздо более сложное, чем для потока Q_e . Это физически связано с тем, что излучение фононов магнонами возможно лишь для таких магнонов, энергия которых больше, чем $\theta_D^2/4\theta_c$, где θ_c – температура Кюри ферродиелектрика. В металлах, по КЛТ, любой электрон вблизи поверхности Ферми может поглотить и излучить фонон, так как скорость звука в обычных металлах много меньше фермиевской скорости электрона.

Перейдем теперь к анализу результатов работы [2], которая посвящена выяснению роли магнонов в формировании размерного эффекта в переносе тепла через интерфейс между ферродиелектриком F толщиной d и массивными диэлектрическими обкладками D с высокой теплопроводностью. Здесь микроскопически получено выражение для теплового потока от магнонов в ферродиелектрике $Q(T_M)$, где T_M – температура магнонов, при произвольном значении параметра $\varepsilon \sim d/l(T_M)$ для эффективной акустической прозрачности границ F/D , где $l(T_M)$ – средняя длина свободного пробега фонона при рассеянии на магнонах с температурой T_M . Из полученных для $Q(T_M)$ формул следует, что в зависимости от соотношения между толщиной d для F образца и длиной $l(T_M)$ (т.е. от величины ε) существует два качественно различных режима теплоотвода от F образца в диэлектрики D . Если $\varepsilon \gg 1$, то это обычный «джоулев» нагрев F образца, который ранее интенсивно исследовался во многих экспериментальных работах по изучению теплового сопротивления между двумя различными веществами. Теоретически величина теплового потока $Q(T_1, T_2)$ в этом случае была вычислена Литтлом [8], где он показал, что величина Q зависит только от акустической прозрачности интерфейса, которая зависит только от плотностей и скоростей звука граничащих сред. Если же $\varepsilon \ll 1$, то есть $d \ll l(T_S)$, то для таких толщин ферродиелектрика должен наблюдаться режим перегрева магнонов, при котором возможно баллистическое распространение фононов из ферродиелектрика через F/D интерфейсы. В этом режиме величина теплового потока Q и нелинейные по температуре T_M результаты определяются только свойствами магнитно – фононного взаимодействия в ферродиелектрике и совершенно не зависят от акустической прозрачности F/D интерфейса. Предсказанный при $\varepsilon \ll 1$ режим перегрева магнонов должен наблюдаться в гибридных структурах с тонкими ферромагнитными слоями и границами с хорошей акустической прозрачностью. В общем плане, рассмотренные в работе [2] результаты могут

быть использованы для анализа возможно новой постановки опытов по спин Зеебек эффекту в гибридных наноструктурах и созданию новых устройств спинкалоритроники.

Перейдем теперь к описанию основных результатов работ [3, 4], в которых были использованы полученные в предыдущих статьях результаты [1, 2] по анализу поведения теплового потока в нелинейных по температуре магнонов T_M режимах.

В работе [3] исследуется спин Зеебек эффект (SSE) и перенос тепла в гетероструктурах, содержащих слои нормального металла (N) и ферромагнитного диэлектрика (F). Подобно обычному Зеебек эффекту, в котором появляется электрический ток под действием градиента температуры, в случае SSE температурный градиент приводит к появлению спинового тока. Для детектирования последнего используется двуслойная (F/N) структура. В такой структуре спиновый ток из F -слоя интегрируется в N металл, где за счет сильной спин–орбитальной связи появляется экспериментально наблюдаемое напряжение, возникающее в результате обратного спин Холл эффекта (ISHE). Большинство SSE экспериментов выполняются в продольной геометрии (LSSE), когда ∇T и спиновый ток J_s параллельны и ориентированы перпендикулярно F/N границе.

В статье [3] рассматриваются два реализуемых экспериментально способа создания ∇T . Первый способ – нагрев N металла в F/N бислое электрическим током, и тогда N слой, используемый для детектирования LSSE одновременно используется и как резистивный нагреватель и как термометр. Другой способ создания ∇T – путем использования двух термостатов с разными температурами. В экспериментальных работах по LSSE было показано, что толщина F образца (YIG) и состояние границы бислоя F/N влияют на низкотемпературный рост электрического сигнала в N слое. При сравнении наших теоретических результатов с экспериментом надо иметь в виду, что существует два различных механизма генерации спинового тока потоком тепла. Первый из них связан с различием между температурами электронов T_e и магнонов T_M на N/F интерфейсе. Второй механизм связан с возможным наличием градиента температуры магнонов в F слое. Если температура диэлектрика T_D , на котором расположен бислой, значительно меньше дебаевской температуры θ_D , то первый механизм будет доминировать из-за двух причин: 1) роста теплового сопротивления N/F границы как $1/T_B^3$ и 2) значительного роста теплопроводности F слоя. Обе

эти причины обсуждались в статьях [1, 2]. Последняя причина позволяет рассматривать температуру магнов T_m постоянной, то есть пренебречь ∇T_m при $T_m \ll \theta_D$.

Итак, в работе [3] представлен теоретический расчет кинетики передачи тепла в N/F и $D_1|N|F|D_2$ гиперструктурах в LSSE режиме. Целью вычисления является определение разницы температур электронов T_e и магнов T_m на N/F границе, так как при низких температурах $\Delta T = T_e - T_m$ определяет напряжение V_{ISHE} в N слое. Проведенный расчет зависимостей ΔT и V_{ISHE} от T_m показал, что они различны для двух экспериментальных ситуаций. Если N/F слой расположен между двумя диэлектриками D_1 и D_2 с разными температурами, то V_{ISHE} (T_m) монотонно возрастает с увеличением T_m . Если же N/F|D гетероструктура нагревается током в N-слое, то V_{ISHE} (T_m) является убывающей функцией. Эти теоретические результаты статьи [3] соответствуют низкотемпературному эксперименту.

При высоких температурах теоретические предсказания статьи [3] отличаются от результатов экспериментов и это отличие можно связать с тем вкладом в спиновый ток, который создается градиентом температуры магнов и которым в нашей теории пренебрегалось. Анализ N/F|D гетероструктуры в случае джоулева нагрева также предполагает, что с ростом толщины F слоя напряжение V_{ISHE} уменьшается. В работе [3] показано, что такое поведение определяется отношением толщины F слоя к длине фонон – магнонных столкновений, так как в толстом F слое магны нагреваются благодаря взаимодействию с неравновесными фононами.

В работе [4] использовалось кинетическое уравнение Больцмана для анализа времен релаксации спиновой системы ферродиэлектрика F, расположенного на массивной подложке из диэлектрика с высокой теплопроводностью. При слабом периодическом нагреве системы спинов релаксация зависит от толщины F слоя и от частоты теплового нагрева ω . Если толщина F слоя много больше, чем длина свободного пробега рассеяния фононов на магнонах l_{pm} , зависимость температуры магнов от частоты ω имеет две особенности, связанные с характерными временами системы спинов. Одна из них определяет среднее время релаксации фононов из F слоя в положку τ_{em} в низкочастотном режиме. В то же время, как в случае высоких частот оно определяется временем магнон – фононных столкновений τ_{mp} , с помощью которого по принципу детального равновесия можно определить время фонон–магнонных столкновений τ_{pm} . Напротив,

отклик эффективно тонких F слоев характеризуется только одной особенностью, которая определяется временем τ_{mp} . Таким образом, времена τ_{em} , τ_{mp} , τ_{pm} могут быть найдены из экспериментов по параметрическому возбуждению спиновых волн электромагнитным излучением, модулированным на частоте ω .

References

1. V. A. Shklovskij, V. V. Mezinova, and O. V. Dobrovolskiy, Phys. Rev. B 98, 104405–1-7 (2018)
2. V.A.Shklovskij, V. V. Kruglyak, V. V. Vovk, and O. V. Dobrovolskiy, Phys.Rev.B 98, 224403-1-10 (2018),
3. A.I.Bezuglyj, V.A.Shklovskij, V.V.Kruglyak, V.V.Vovk, Phys.Rev.B 99, 134428-1-10 (2018)
4. A.I.Bezuglyj, V.A.Shklovskij, V.V.Kruglyak, V.V.Vovk, Phys. Rev. B 100,1-8(2019)
5. M.I. Kaganov, I.M. Lifshitz, and L.V. Tanatarov, JETP 31, 232 (1956)
6. A.I.Bezuglyj and V.A.Shklovskij, Low Temp. Phys.42, 636 (2016)
7. P.L.Kapitza, J. Phys. 4,181(1941)
8. W.A. Little, Canad. J. Phys. 37, 334 (1959)