

Сверхпроводимость при высоких температурах: реальность и фальсификации. Часть 1. От низкотемпературной до высокотемпературной сверхпроводимости

Виктор Алексеев

В начале апреля 2024 года был опубликован 124-страничный отчёт о судебном процессе Университета Рочестера против Ранга Диаса, в котором подробно описаны факты плагиата и научных фальсификаций этого преподавателя физики, ставшего на три года научной суперзвездой жёлтой прессы. В течение нескольких последних лет Диас публиковал статьи об очередном прорывном достижении, неумолимо приближавшем его к открытию сверхпроводимости при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении. Поскольку сверхпроводимость при нормальных условиях (НУ) способна практически полностью изменить всю существующую науку и технику, то на протяжении уже более сотни лет эта цель является путеводной звездой для многочисленных лабораторий, занимающихся данной проблемой. Однако никому в мире не удалось повторить достижения Диаса. Поскольку основным критерием истинности того или иного открытия в физике является получение одинаковых результатов по одной и той же методике в нескольких независимых лабораториях, то ведущие учёные в разных странах стали сомневаться в результатах экспериментов Диаса. Вывод независимой комиссии о том, что эта история оказалась просто фейком, произвёл эффект разорвавшейся бомбы. Многие учёные и особенно научные чиновники стали сомневаться в том, возможна ли вообще высокотемпературная сверхпроводимость и каковы перспективы развития этого направления. Для того чтобы ответить на этот вопрос, нужно представлять, что такое сверхпроводимость при высоких температурах и каковы неоспоримые достижения в этой области на данный момент. Этому посвящена первая часть статьи.

Во второй части будут рассмотрены примеры нескольких нашумевших фальсификаций результатов измерений сверхпроводимости при «комнатных температурах».

Низкотемпературная сверхпроводимость

Впервые эффект сверхпроводимости в 1911 году открыли голландские ученые Камерлинг Оннес (Kamerlingh Onnes), Корнелис Дорсман (Cornelis Dorsman), Геррит Ян Флим (Gerrit Jan Flim) и Жиль Хольст (Gilles Holst), когда в одном из очередных опытов они обнаружили, что при температуре около 3 градусов Кельвина ($1 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$) металлическая ртуть, охлажденная жидким гелием ($T_{\text{кр}} = 4,2 \text{ K}$), полностью теряет электрическое сопротивление. Это явление получило название «сверхпроводимость – superconductivity – SC», а температуре, при которой оно возникает, был присвоен термин «кри-

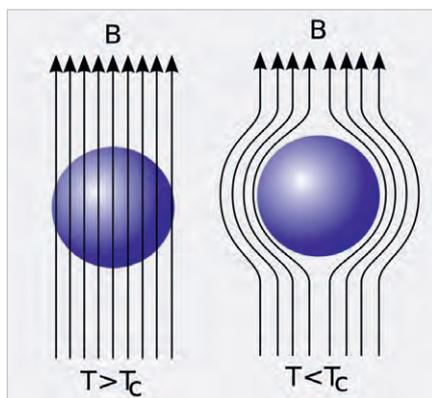


Рис. 1. Эффект Мейснера – благодаря мощному магнитному полю, генерируемому током сверхпроводимости, из объёма сверхпроводника полностью вытесняется внешнее магнитное поле [1]

тическая температура – $T_{\text{кр}}$ » (Critical temperature of superconductivity – T_{cs}).

Другое фундаментальное свойство сверхпроводников было обнаружено в 1933 году немецкими учёными Вальтером Мейснером (Fritz Walther Meissner) и Робертом Оксенфельдом (Robert Ochsenfeld). Оказалось, что, благодаря току сверхпроводимости, возникающему при охлаждении ниже $T_{\text{кр}}$, из объёма сверхпроводника полностью вытесняется внешнее магнитное поле. Схема обтекания внешнего магнитного поля сверхпроводящий ток, показана на рис. 1. Наглядный пример демонстрации эффекта Мейснера показан на рис. 2. Внешнее поле постоянного магнита вытесняется более мощным магнитным полем, возникающим в сверхпроводнике при протекании тока сверхпроводимости, и приподнимает магнит в воздухе [1].

Различают два типа сверхпроводников. Первый тип «type one superconductors», включающий чистые вещества, полностью вытесняет из себя внешнее магнитное поле (как показано на рис. 1). У сплавов и композиционных материалов, как правило, наблюдается так называемый «частичный эффект Мейснера», при котором не происходит полного выталкивания магнитного поля из внутреннего объёма сверхпроводника.

Во внутреннем объёме таких сверхпроводников при температурах ниже $T_{\text{кр}}$ формируются круговые токи, создающие магнитное поле, которое, однако, заполняет не весь объём, а распределено в нём в виде отдельных нитей – «вихрей Абрикосова».

При этом вихри могут удерживаться на микронеоднородностях материала. Этот процесс называется пиннингом (pinning). При сильном вихревом пиннинге возникает «эффект захваченного магнитного потока», заключающийся в сохранении остаточной намагниченности в сверхпроводниках 2-го типа после выключения источника внешнего поля.

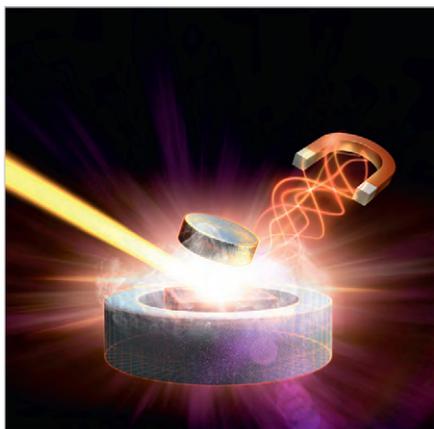


Рис. 2. Демонстрация эффекта Мейснера – левитация магнита над сверхпроводником

Такие сверхпроводники получили название «сверхпроводники второго рода» (type two superconductors – TTSC). Для них вводится понятие «глубины проникновения магнитного поля λ » [2].

История развития сверхпроводимости схематически показана на рис. 3. Заветной целью при этом было и остаётся достижение сверхпроводимости при комнатных температурах и атмосферном давлении (нормальные условия – НУ).

Дальнейшим исследованиям помешали две мировые войны. В период 1911–1945 гг. практически не было никаких публикаций по экспериментам со сверхпроводимостью.

В период с 1911 до конца 1940-х только у Pb, NbC и NbN была обнаружена сверхпроводимость.

Затем, в 1960-х, были открыты и другие сверхпроводники, такие, например, как Nb₃(Al,Ge). Только в начале 2020-х были исследованы сверхпроводники группы железа: LaFeP(O,F), LaFeAs(O,F). Критическая температура для отмеченных сверхпроводников находится в диапазоне от 4,2 до 20 К (температуры кипения жидких гелия и водорода соответственно). Также были открыты и другие сверхпроводники с критической температурой в промежутке от 20 до 77 К (температуры кипения жидких водорода и азота: Nb₃Ge, (LaSr)₂CuO₄, (LaBa)₂CuO₄, Nb₃Ge, MgB₂. В 2010-х была доказана сверхпроводимость у SmFeAs(O,F), NbFePo_{1-y}. Все отмеченные сверхпроводники, имеющие критическую температуру ниже точки кипения жидкого азота (77 К), стали называть низкотемпературными сверхпроводниками. Точные значения критических температур всех известных на сегодня

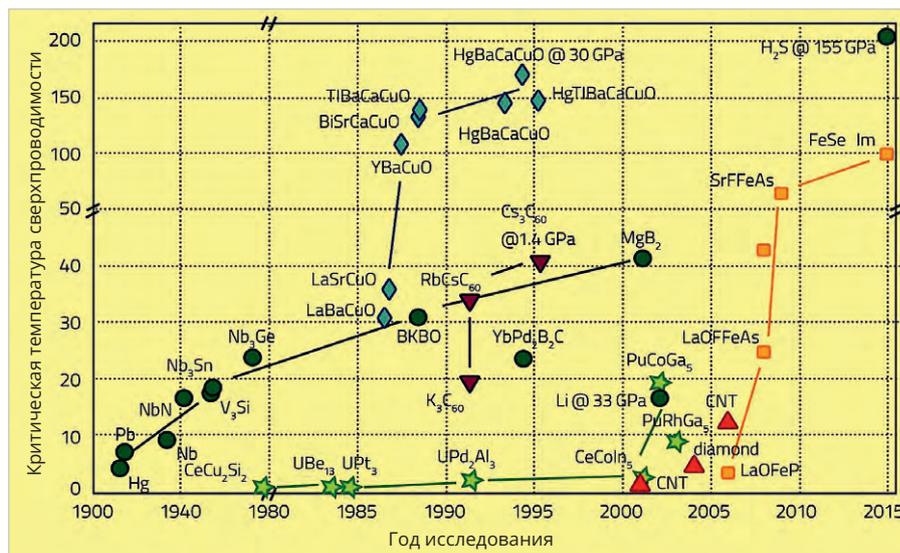


Рис. 3. История развития сверхпроводимости [3]

наш день сверхпроводников можно найти в обзоре [4].

Из перечисленных выше сверхпроводников нужно выделить Nb₃Sn с критической температурой 18 К, полученный ещё в 1954 году [5]. Особенность этого сверхпроводника заключается в том, что на его основе в СССР в 1970-е годы был разработан сверхпроводящий провод из бинарного интерметаллического неорганического соединения ниобия и олова, способный при низких криогенных температурах пропускать ток плотностью до 100 кА/см² в условиях мощного внешнего магнитного поля. Было налажено серийное производство этого провода в рамках проекта ТОКАМАК. Планируется участие российских производителей подобных проводов в проекте ТОКАМАК «International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER», строительство которого началось в 2010 году во Франции. [6]. Окончание строительства намечено на 2025 год (рис. 4).

Направление исследования сверхпроводящих интерметаллидов оказалось настолько успешным, что позволило достаточно быстро внедрить их в производство томографов, транспорта на магнитной подушке, а также подъёмного оборудования со сверхмощными магнитами [7].

Хорошо известный «Джозефсонский переход» (Josephson junction) относится к классу низкотемпературных сверхпроводников на основе технологии с переходами типа SIS-, SNS-, SDS- и др.

Кроме интерметаллидов ниобия в 2000-е были получены сплавы MgB₂ (диборид магния) с критической тем-

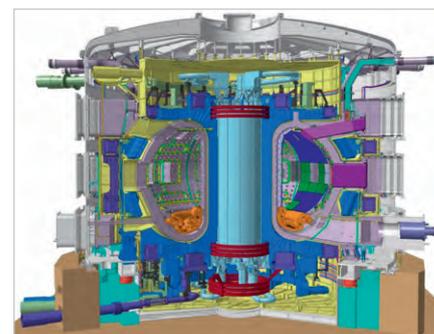


Рис. 4. ТОКАМАК «International Thermonuclear Experimental Reactor – ITER», окончание строительства которого намечено на 2025 год

пературой перехода в сверхпроводящее состояние 40 К [9].

Сверхпроводящие купраты, «водородный период»

Преодолеть барьер температуры кипения жидкого водорода и поднять критическую температуру до 21 К удалось на интерметаллиде Nb₃Ge в 1976 году. Так закончился первый гелиевый этап развития низкотемпературной сверхпроводимости, продолжавшийся с 1911 по 1976 год [10].

Наступил следующий этап исследований с критическими температурами в районе температуры кипения жидкого водорода 20,28 К (минус 252,87°С).

В течение следующих десяти лет не было заметных успехов. Настоящая революция произошла в 1986 году, когда сотрудники научного подразделения корпорации IBM Карл Мюллер (Karl Alexander Müller) и Йоханнес Беднорц (Johannes Georg Bednorz) зафиксировали наступление эффекта сверхпроводимости при критической температуре

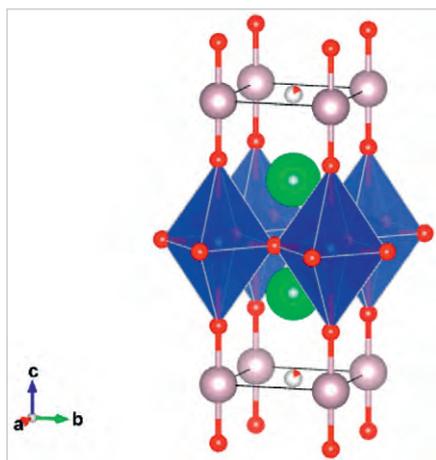


Рис. 5. Кристаллическая структура $HgBa_2CuO_{4+\delta}$ (Hg-1201). Координационные многогранники: Cu – искажённый октаэдр и гантельная форма – Hg

35 К в образце из семейства купратных сверхпроводников, содержащих соединения лантана-бария-меди-кислорода ($La_{2-x}Ba_xCuO_4$) [11]. Термин «купраты» определяет общий класс семейств сложных соединений меди, берущий своё название от латинского «cuprum».

Такое рекордное снижение критической температуры вызвало настоящую научную сенсацию, а Карл Мюллер и Йоханнес Беднорц сразу же в 1987 году были удостоены Нобелевской премии по физике «за важный прорыв, выразившийся в открытии сверхпроводимости в керамических материалах».

С этого момента внимание исследователей сверхпроводимости переключилось на керамические соединения. В основном исследования развивались по двум направлениям.

В первом случае использовался «твёрдофазный синтез», в процессе которого при высоких температуре и давлении смешивались нужные прекурсоры, а затем в процессе химической реакции получалось новое соединение.

Второй, крайне сложный путь, состоял в том, что с помощью методов молекулярно-пучковой эпитаксии в глубоком вакууме на подложку наносились один за другим монослои атомов отдельных элементов [12]. Образующиеся при этом «сверхпроводящие щели» достаточно надёжно определяются, например, с помощью рентгеновской или андреевской спектроскопии [13].

Купратные сверхпроводники имеют довольно сложную слоистую кристаллическую структуру, в которой чередуются слои допированной примеси и меди. При этом основную для сверх-

проводимости роль играют кристаллографические плоскости CuO_2 .

Эксперименты проводились как с однослойными, так и с многослойными щелями. Так, например, было получено соединение лантана, стронция и меди $La_{2-x}Sr_xCuO_4$, для которого критическая температура сверхпроводящего состояния составила 40 К [14].

Высокотемпературная сверхпроводимость, «азотный период»

В марте 1987 года был взят один из ключевых рубежей в температурной битве. Впервые был получен сверхпроводник на основе соединения иттрия, бария, меди и кислорода $Y_{0.8}Ba_{1.2}CuO_y$ с критической температурой $T_{кр} = 92$ К, что значительно превышало температуру кипения жидкого азота (77,4 К) [15].

Закончился десятилетний период «жидкого водорода» и наступил этап «жидкого азота». Нужно особо подчеркнуть, что получение жидкого азота из атмосферного воздуха значительно проще и много дешевле по сравнению с гелием и водородом. Достаточно сказать, что в среднем цена на технический жидкий азот почти в двести раз меньше, чем на жидкий гелий такой же чистоты.

Учитывая этот факт, большое количество малобюджетных университетских лабораторий практически во всём мире получили реальные возможности исследовать новые вещества с эффектом сверхпроводимости.

После того как в 1987 году был преодолён барьер $T_{кр} = 92$ К, сверхпроводники, работающие при критических температурах кипения выше жидкого азота (77 К или минус 196°C), стали называть «высокотемпературными сверхпроводниками – ВТСП» (High temperature superconductor – HTSP). Это событие рассматривают как начало нового этапа развития физики конденсированных сред, получившего название «High temperature superconductivity – HTSC» [16].

Необходимо подчеркнуть, что в научно-популярной литературе некоторые авторы иногда трактуют первую часть этого термина НТ как «Normal Temperature – комнатные температуры», что искажает истинный смысл аббревиатуры [17].

Сверхпроводимость при комнатных температурах (от +15 до +23°C) в английской терминологии имеет другое название: «Flat Band Superconductivity – FBSC» [18].

Необходимо особо подчеркнуть, что при описании результатов измерений эффекта сверхпроводимости необходимо обязательно указывать два параметра, а именно: критическую температуру $T_{кр}$ и критическое давление $P_{кр}$, при которой она была достигнута.

Все появившиеся в последние годы статьи о якобы достигнутой сверхпроводимости при комнатной температуре FBSC оказались фальсификацией. Об этом подробно будет рассказано во второй части данной статьи.

После опубликования подробной методики, которая позволила получить $T_{кр} = 92$ К, сразу несколько научных групп стали экспериментировать с различными вариантами купратных сверхпроводников, среди которых наиболее популярными были такие соединения, как: $YBaCuO$, $BiSrCaCuO$, $TlBaCaCuO$, $HgBaCaCuO$, $HgTlBaCaCuO$, $HgBaCaCuO$.

Аналогичные работы проводились и в РФ. Так, например, физики из МГУ им. М.В. Ломоносова опубликовали результаты испытаний синтезированного ими $HgBa_2CuO_{4+\delta}$ (Hg-1201) с одним слоем CuO_2 на элементарную ячейку, для которого эффект сверхпроводимости был достигнут при температуре ниже 94 К [19]. Кристаллическая структура Hg-1201 показана на рис. 5 [20].

Кристаллические структуры ртути-содержащего ряда сверхпроводящих купратов $HgBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2+\delta}$ можно охарактеризовать как срастающиеся галитоподобные и перовскитоподобные фрагменты. Катионы Hg имеют типичную гантелеобразную форму. В кристаллических структурах соответствующие количества слоёв CuO_2 разделены катионами Ca.

Для композитного соединения $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{1+x}$, содержащего три слоя CuO_2 , в 1993 году была получена $T_{кр} = 133$ К.

Это значение стало максимальной критической температурой сверхпроводимости, достигнутой при нормальном атмосферном давлении для стабильной фазы купратного сверхпроводника [21]. Спустя несколько месяцев, в этом же году, другая группа учёных с композитом $HgBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2+\delta}$ (Hg-1223), состоящим из аналогичных элементов, но с разным допированием и количеством проводящих щелей, получила критическую температуру 153 К при давлении 150 кбар. Как отмечают



Рис. 6. Конструкция высокотемпературного сверхпроводящего кабеля фирмы Nexans

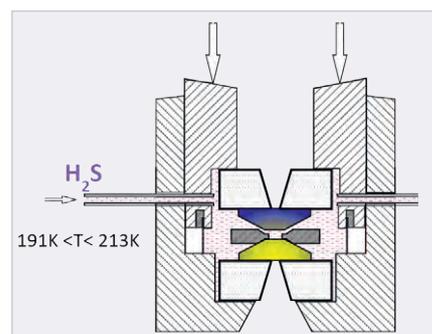


Рис. 7. Структурная схема эксперимента Дроздова – Еремца с H_2S ($T_{кр} = 203\text{ K} (-70^\circ\text{C})$ и $P = 1,58\text{ млн атм.}$)

авторы этой статьи, повышение давления позволяет уплотнить слоистую структуру сверхпроводника и увеличить количество проводящих щелей на единицу объёма [22].

В 1994 году для модифицированного соединения $HgBaCaCuO$ была достигнута критическая температура 164 К при внешнем давлении 45 ГПа [23].

В 2005 году авторский коллектив под руководством Е.В. Антипова опубликовал статью, в которой описывались результаты экспериментов зависимости критической температуры от давления во фторированных образцах керамики $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ (Hg-1223) с различным содержанием F. Эффект сверхпроводимости был обнаружен при критической температуре 166 К, при давлении 23 ГПа, во фторированном образце Hg-1223 с оптимальным уровнем легирования [24].

Обзор всех опубликованных работ, связанных с поиском новых сверхпроводящих материалов на основе купратов, не входит в планы этой статьи. Значительных достижений в преодолении новых температурных барьеров не было.

Тем не менее нужно отметить, что сверхпроводники на базе купратов широко используются в настоящее время в сверхпроводящих проводах, которые, имея нулевое сопротивление, могут передавать электроэнергию с минимальными потерями мощности. Пример конструкции высокотемпературного сверхпроводящего кабеля фирмы Nexans показан на рис. 6 [25].

Керамический ВТСП-сверхпроводник нанесён на несущую металлическую основу. Каждая из магистральных фаз отделена от соседних с помощью сверхнадёжных изоляторов. Стальная герметичная оболочка обеспечивает двухконтурную циркуляцию жидкого азота внутри кабеля.

Такой сверхпроводящий кабель может сочетать небольшой диаметр и исключительную мощность, обеспечивая токи от 3500 А и напряжения до 1500 В постоянного тока.

Линии электропередач со сверхпроводящими кабелями сегодня успешно используются, например, в метрополитене Парижа [26], в экспериментальных воздушных линиях Шанхая [27], в Москве на опытно-промышленной эксплуатационной подстанции 110 кВ «Динамо» [28].

Интересно выглядит китайский проект гибридной линии на основе сверхпроводящего провода, в качестве хладагента в котором используется сжиженный природный газ [29]. При этом конструкция выполняет две функции – газопровода и сверхпроводящей линии.

Более подробную информацию о сверхпроводимости в купратах можно найти в обзорной статье [30].

Отсутствие явных успехов в исследованиях заставило большинство экспертов считать, что идея сверхпроводников на базе купратов, с рассмотренными выше структурами и составом, исчерпала себя, и нужно искать какие-то новые соединения.

Сверхпроводники на основе гидридов

В начале 2000-х было известно, что такие газы, как, например, метан (CH_4), могут металлизироваться при сверхвысоких давлениях и низких температурах [31, 32].

Эти факты натолкнули учёных на мысль о том, что можно попробовать искать эффект сверхпроводимости при высоких температурах, используя различные гидриды.

В 2015 году объединённый коллектив учёных из института Макса Планка (Max-Planck-Institut, Mainz, Germany) и института неорганической и аналитической химии Майнцского университета имени Иоганна Гутенберга (Institute of Inorganic and Analytical Chemistry, Johannes Gutenberg-University Mainz), под руководством Александра Дроздова и Михаила Еремца, обнаружил рекордно высокую критическую температуру сверхпроводимости 203 К при

сжатии образцов гидрида серы до давлений 150 ГПа (около полутора миллионов атмосфер) [33].

Команда Дроздова и Еремец установила, что гидрид серы резко начинает терять электрическое сопротивление при давлении порядка 100 ГПа. Измерения сопротивления и магнитной восприимчивости показали резкий переход из диамагнитного состояния в парамагнитное и выраженный гистерезис, указывающий на сверхпроводимость II рода.

Дальнейшее увеличение давления выявило резкий рост критической температуры, которая достигает своего максимума $T_{кр} = 203,5\text{ K} (-70^\circ\text{C})$ при давлении 150 ГПа. Полученные спектры комбинационного рассеяния при давлениях выше 80 ГПа показали возникновение новой фазы, соответствующей металлическому состоянию гидрида серы, которая сохранялась до 150 ГПа. Важно то, что при этих условиях возникала стабильная фаза соединения серы и водорода, химическая формула которого ближе к H_3S .

В связи с разоблачением фальсификации Диаса, который также экспериментировал в этом направлении, появились сомнения в перспективности исследований сверхпроводимости в гидридах вообще.

Поэтому для того, чтобы понять, как были получены революционные результаты группы Дроздова – Еремца и насколько они справедливы, необходимо немного подробнее остановиться на описании их эксперимента.

Структурная схема установки, используемой в этой работе, показана на рис. 7.

Основу экспериментальной установки составляет так называемая «diamond anvil cell – DAC» (алмазная наковальня – АН), включающая два алмаза конической формы с наконечниками диа-

Таблица 1. Параметры сверхпроводимости гидридов, полученные в разных лабораториях мира при сверхвысоких давлениях

Год	Образец	Давление (ГПа)	T _{кр} (К)	Источник
2015	H ₂ S/H ₃ S	150	203	[33]
2015*	H ₃ S	153	197	[36]
2015	PH ₃	200	100	[37]
2019	LaH ₁₀	188	260	[38]
2019	LaH ₁₀	170	250	[39]
2020	LaH ₁₀	165	250	[40]
2019	YH ₉	201	243	[41]
2019	YH ₈	166	224	[42]
2020	ThH10	170	160	[43]
2021	CaH ₆	180	210	[44]
2022	CaH ₆	172	215	[45]
2022	SnH _x	200	70	[46]
2022	CeH ₉	95	115	[47]
2023	CeH ₁₀	116–125	116	[48]
2024	CeH ₉	118–137	91	[49]
2022	ZrH _x	220	71	[50]
2021	(La, Y)H ₁₀	183	253	[51]
2022	(La, Ce)H ₉	100	176	[52]
2022	(La, Ce)H ₉	110	178	[53]
2022	(La, Nd)H ₁₀	180	148	[54]
2023	TaH _x	197	30	[55]

*Вместо «стандартного» H₂S, который использовала группа Александра Дроздова, в университете Израиля изначально применялось более устойчивое соединение H₃S, в котором сера имеет степень окисления +3. Образцы H₃S с кубической структурой (Im $\bar{3}m$)H₃S были синтезированы из элементарной серы и донора водорода NH₃BH₃.

метром 200–300 мкм, скошенных под углом 7–8 градусов до калетты (острийе огранки кристалла) 40–80 мкм. На остриях АН были напылены четыре титановых электрода, покрытые золотом, обеспечивающие прецизионное измерение сопротивления.

Благодаря исключительной твёрдости алмаза и разности диаметров основания и вершины наконечников были достигнуты давления до нескольких миллионов атмосфер. При этом прозрачность алмазов в широкой области спектра позволила исследовать образец с помощью различных спектроскопических методов.

Газообразный гидрид серы H₂S подавался через капилляр и попадал в замкнутый контур, расположенный вокруг алмазных наковален. При охлаждении до температур в диапазоне от 191 К до 213 К гидрид серы конденсировался и в жидкой фазе подавался в углубление диаметром несколько микрон, расположенное на одном из наконечников АН. После чего давление увеличивалось при сохранении низких температур, предотвращающих разложение гидрида серы.

Толщина образца, измеренная с помощью интерференционных спектров, составляла несколько микрон.

Затем при различных давлениях и температурах измерялись сопротивление, магнитные поля, снимались спектрометрические характеристики, а также определялись другие параметры эксперимента.

Сопротивление измерялось с использованием четырёхзондового сенсора методом Ван дер Пау [34] при токе 10–10 000 мкА.

Температура и магнитное поле надёжно определялись с помощью оборудования PPMS6000 (установка для исследования физических свойств материалов). Для измерений намагниченности образцов использовались АН, оснащённые SQUID (superconducting quantum interference device – сверхпроводящий квантовый интерферометр), конструкции которых были разработаны специально для этого эксперимента. Эффект Мейснера в этих экспериментах оценивался с помощью измерения магнитной восприимчивости, определяемой как отношение намагниченности образца к внешнему полю.

Одна из технических проблем заключалась в том, чтобы подвести внешнее магнитное поле как можно ближе к образцу, при этом не создавая

электромагнитных помех, искажающих результаты измерений. Для этого использовался метод двух катушек. Одна катушка создавала необходимое поле, микрочасть которого с помощью миниатюрного магнитопровода подводилась к образцу. Другая катушка с аналогичными параметрами использовалась для вычитания фона, создаваемого первой катушкой.

Результаты работы группы Дроздова – Еремца стимулировали дальнейшие исследования сверхпроводимости. Появилось множество сообщений об обнаружении сверхпроводимости при комнатных температурах и высоких давлениях для различного типа гидридов.

Эти годы также называют «эпохой сверхпроводящих гидридов». В основном схемы опытов повторяли описанный выше эксперимент. Поэтому нет необходимости подробно рассматривать детали каждой из этих публикаций. В табл. 1 приведены данные параметров сверхпроводимости, опубликованные в статьях, которые не вызвали нареканий у мирового научного сообщества. В таблицу не включены данные, которые были в 2024 году признаны фальсифицированными.

Максимальные критические температуры от 250 до 260 К были получены для гидрида лантана LaH₁₀ при давлениях в диапазоне 260–280 ГПа (2,6 миллиона атмосфер) в трёх разных лабораториях при проведении независимых экспериментов и использовании различных методик [38, 39, 40].

Для того чтобы понять, насколько сложны подобные эксперименты и насколько квалифицированы должны быть их исполнители, стоит привести ещё несколько технических подробностей.

Во-первых, известные на сегодняшний день соединения, для которых доказана сверхпроводимость в районе «высокой температуры» (выше температуры кипения азота), получившие название «высокотемпературные сверхпроводящие проводники – ВТСП», существуют в стабильном состоянии только при высоких давлениях в миллионы атмосфер, когда они переходят в металлическую фазу.

Для того чтобы доказать существование сверхпроводимости ВТСП, необходимо использовать специальное крайне сложное и дорогостоящее оборудование. При этом из-за микронных размеров образцов и огромных

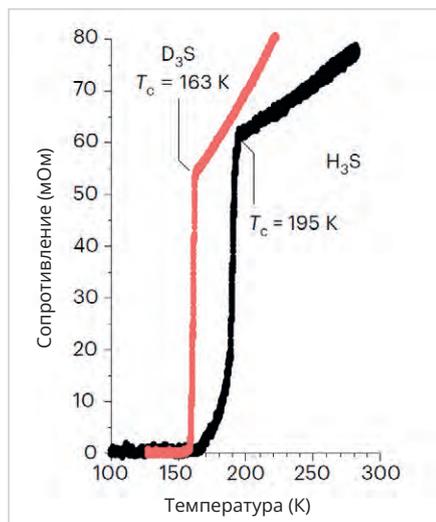


Рис. 8. Зависимость электрического сопротивления H_3S и D_3S от температуры [60]

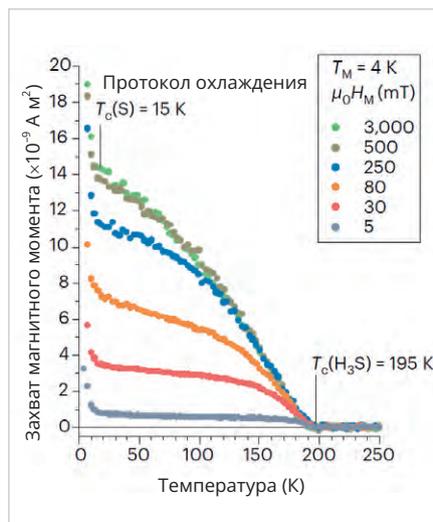


Рис. 9. Температурная зависимость захваченного магнитного момента в сверхпроводящем H_3S при давлении 155 ГПа

давлений невозможно использовать стандартные методы, привычные для обычных университетских физических лабораторий.

Например, такие традиционные методы, как фотоэмиссионная спектроскопия с угловым разрешением или сканирующая туннельная микроскопия, здесь просто не работают.

Наиболее детальную информацию позволяют получить SQUID, которые способны измерять ультранизкие магнитные поля. Хорошие результаты были получены, когда «SQUID – magnetometer» использовался совместно с алмазной наковальней [57, 58].

Кроме измерения электрического сопротивления, для более точной иден-

тификации эффекта сверхпроводимости определялись и другие неотъемлемые параметры сверхпроводимости. Прежде всего это касается измерения характеристик магнитных полей.

Как правило, в современных экспериментах определяются такие значения внешнего магнитного поля, которые приводят к нарушению эффекта сверхпроводимости – «критическое магнитное поле» ($H_{кр}$).

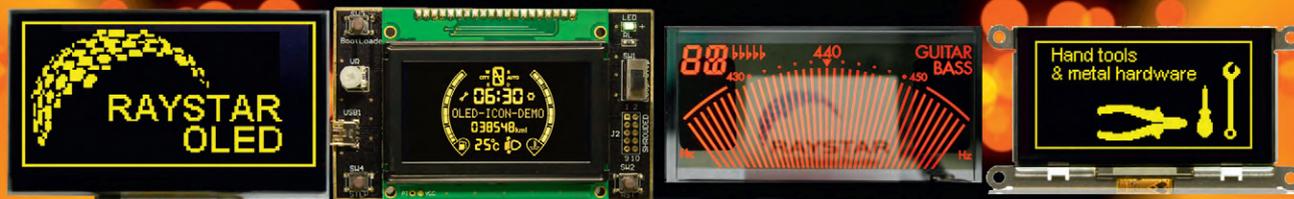
Информативным оказался изотопический эффект, заключающийся в том, что критическая температура сверхпроводимости возрастает при уменьшении атомной массы [59].

На рис. 8 показана зависимость электрического сопротивления H_3S и D_3S от температуры [60].

Данные, приведённые на рис. 8, демонстрируют изотопический эффект, проявляющийся в гидриде серы при замене атомов водорода на атомы дейтерия. Четырёхзондовые измерения электрического сопротивления гидрида водорода H_3S и его дейтерированного аналога D_3S показывают резкое падение сопротивления до нуля Ом как в H_3S при 195 К (141 ГПа), так и в D_3S при 163 К (154 ГПа).



OLED-дисплеи Raystar



Специсполнение по ТЗ заказчика

Прозрачные модели

АВТОМОБИЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА • СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ • ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ • БЫТОВАЯ ТЕХНИКА • МЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ

Характеристики

- Яркость экрана до 150 кд/м² обеспечивает считывание изображения при ярком солнечном свете
- Высокая контрастность 10 000:1
- Широкий угол обзора до ±175°
- Цвет свечения: жёлтый, зелёный, красный, белый, синий
- Формат изображения: 122×32, 128×64, 240×64, 256×64 и 96×64 точки

- Низкая потребляемая мощность 10 мА (схемы управления – токовые)
- Светоэмиссионная схема: не требуется система подсветки
- Короткое время отклика: 10 мкс при температуре +25°C
- Широкий диапазон рабочих температур от –40 до +80°C
- Малая толщина модуля дисплея, небольшой вес
- Срок службы: 50 000 ч для белого и синего цвета; 100 000 ч для жёлтого, зелёного, красного цветов



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 • INFO@PROCHIP.RU • WWW.PROCHIP.RU



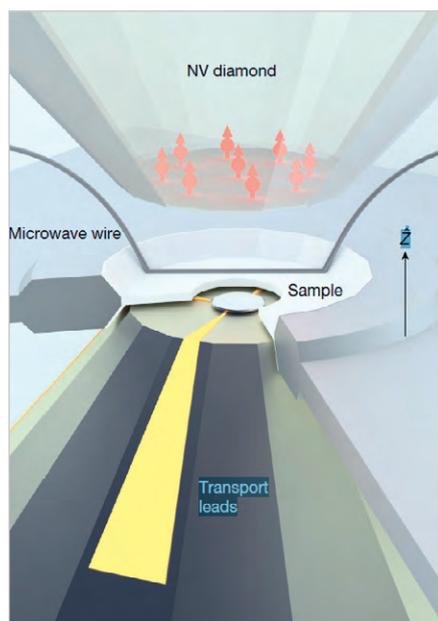


Рис. 10. Схема модернизированной алмазной наковальни с искусственными азотозамещёнными вакансиями в алмазе (NV)

В экспериментах с магнитными полями, прежде всего, оценивают эффект Мейснера. Однако этот эффект очень мало заметен в H_2S и других гидридах с высоким значением вихревого пиннинга. Поэтому для этого рода сверхпроводников дополнительную информацию о наличии эффекта Мейснера можно получать с использованием резонансного ядерного рассеяния. С другой стороны, при сильном пиннинге в сверхпроводниках второго рода ярко выражен эффект захваченного магнитного потока, который наблюдается после выключения магнитного поля. Это явление представляет собой одно из наиболее убедительных доказательств сверхпроводимости.

На рис. 9 показана температурная зависимость захваченного магнитного момента в сверхпроводящем H_2S при давлении 155 ГПа, генерируемом в условиях полевого охлаждения в различных магнитных полях $\mu_0 H_M$ (5–3000 мТ) [61].

Кривые на рис. 9 получены в режиме FC (Field Cooling), при котором измерения намагниченности материала проводились в режиме его охлаждения в присутствии внешнего магнитного поля.

Метод захваченного потока в сочетании с алмазной наковальней, оснащённой микроячейкой SQUID, позволяет значительно уменьшить фоновые шумы.

При исследовании сверхпроводимости в гидридах и других сверхпроводниках второго рода комбинируются

ные измерения захваченного потока, электропроводности и магнитной восприимчивости позволяют получать параметры, которые однозначно идентифицируют эффект сверхпроводимости. Среди этих параметров, в первую очередь, нужно отметить такие, например, как: критическая температура ($T_{кр}$), нижняя граница критического поля ($H_{кр}$), глубина проникновения поля (λ), ползучесть вихря, критическая плотность тока и другие. Кроме того, дополнительная информация может быть получена с помощью ядерного резонансного рассеяния и инфракрасной спектроскопии [60].

В мартовском номере журнала «Nature» (Vol 627, March 2024) была опубликована статья, описывающая новое устройство, которое было специально разработано для прецизионного определения магнитных эффектов, характеризующих сверхпроводимость [62].

Одним из недостатков традиционной конструкции «алмазной наковальни» (АН) в комбинации со SQUID является то, что с помощью стандартного датчика, который усредняет информацию по всей геометрии измерительной микроячейки, расположенной на острие АН, чрезвычайно сложно отобразить геометрию локальных сверхпроводящих участков образца и измерять их конкретные свойства. Тем самым отбрасывается информация, скрытая в локальных пространственных областях сверхпроводника. Предложенная в этой работе конструкция АН даёт возможность выполнять магнитометрию с пространственным разрешением в непосредственной близости к образцам гидрида. При этом обеспечивается повышенная чувствительность к полю при локальных измерениях эффекта Мейснера и захвате потока.

Новая конструкция АН оснащена искусственными азото-замещёнными вакансиями в алмазе (NV – nitrogen-vacancy center). Такие центры образуются при удалении атома углерода из узла решётки и связывании образовавшейся вакансии с атомом азота. Уникальность NV заключается в том, что электронные спины индивидуального центра легко управляются лучом лазера, а также магнитным, электрическим и микроволновым полями. Таким образом, меняя спин NV-центра, можно использовать его как атомный логический элемент [63].

Схема модернизированной алмазной наковальни с искусственными азото-

замещёнными вакансиями в алмазе (NV) показана на рис. 10 [62].

На рис. 10 образец SeH_9 сжимается двумя конусами АН. Верхняя наковальня содержит слой NV-центров, плотностью около 1 ppm, расположенный примерно на 50 нм ниже поверхности калетты (острие огранки алмаза). Для измерений ODMR (оптическое детектирование магнитного резонанса) используется платиновая проволока, размещённая на верхней калетте. С помощью ODMR реализуется оптическая накачка, необходимая для инициализации и считывания спина NV центра.

Важно то, что в конструкции кристалла огранка совместима с внутренней симметрией азотозамещённых вакансий, обеспечивая тем самым функциональность устройства при огромных давлениях. Эта новая конструкция АН была успешно использована для одновременных измерений резкого падения электрического сопротивления практически до нуля, а также для исследования параметров диамагнетизма, характеризующих эффект Мейснера в гидриде церия SeH_9 .

Полученные экспериментальные результаты согласуются с теорией БКШ (BCS – theory Bardeen-Cooper-Schrieffer) и моделью Мигдала-Элиашберга (Migdal-Eliashberg theory) [64]. Судя по этим расчётам, вероятнее всего сверхпроводимость в гидридах возникает преимущественно за счёт лёгких атомов водорода.

Приведённое выше достаточно подробное описание способов и методик изучения явления сверхпроводимости было сделано для того, чтобы показать, что, с одной стороны, за время, прошедшее с момента открытия эффекта сверхпроводимости, наука добилась значительных успехов. На сегодняшний день за исследования сверхпроводимости было присуждено пять различных Нобелевских премий. С другой стороны, современные эксперименты в области сверхпроводимости крайне сложны, требуют уникального дорогостоящего оборудования и под силу только нескольким ведущим лабораториям мира.

В заключение этого раздела необходимо отметить, что огромный вклад в развитие теории сверхпроводимости внесли российские учёные, такие как, например, Лев Ландау, Виталий Гинзбург, Пётр Капица, Лев Шубников, Исаак Кикоин, Давид Киржниц, Евгений Максимов, работы которых были высоко оценены различными международными премиями. Виталий Гинз-

бург в 2003 году получил Нобелевскую премию по физике за вклад в развитие теории сверхпроводимости и сверхтекучести. Нужно отметить, что в СССР придавалось особое значение проблеме сверхпроводимости, и на эти исследования отпускались по тем временам огромные для страны деньги. К сожалению, с распадом СССР этой проблеме стали уделять значительно меньше внимания, и большинство научных центров было репрофилировано. Сегодня работы по сверхпроводимости проводятся в РФ как в рамках целевой программы АН РФ, так и в соответствии с международными грантами. Координирующей организацией по этому направлению является «Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга» [65].

Литература

1. <https://xn--webeducation-dbb.com/superconductivity-and-the-meissner-effect-explained/>
2. <https://www.nature.com/articles/s41467-022-30782-x>
3. <https://aiimpacts.org/historic-trends-in-the-maximum-superconducting-temperature/>
4. www.bit.ly/3xNCMH2
5. <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.95.1435>
6. <https://atomvestnik.ru/2023/03/30/pionery-sverhprovodimosti/>
7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/aa7976>
8. www.electronics.ru/files/article_pdf/4/article_4745_112.pdf
9. <https://en.wikipedia.org/wiki/Niobium%E2%80%93tin>
10. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00657172>
11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453423001624>
12. <https://journals.aps.org/prmaterials/abstract/10.1103/PhysRevMaterials.4.091202>
13. <https://gc.lebedev.ru/lab-andreev/>
14. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.235.4794.1373>
15. <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.26.L327/pdf>
16. <https://www.nature.com/articles/s42254-021-00324-3>
17. www.bit.ly/44821zK
18. www.bit.ly/4aLk1T1
19. <https://www.nature.com/articles/362226a0>
20. <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/7/1862>
21. <https://www.nature.com/articles/363056a0>
22. <https://www.nature.com/articles/365323a0>
23. <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.50.4260>
24. <https://iopscience.iop.org/article/10.1209/epl/i2005-10247-3/pdf>
25. <https://www.nexans.com/>
26. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10267597>
27. <https://interestingengineering.com/innovation/china-inaugurates-35-kv-superconducting>
28. https://www.ruscable.ru/article/Sozдание_intellektualnoj_elektroenergeticheskoy/
29. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222002651>
30. <https://ufn.ru/ru/articles/2008/2/h/>
31. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.21.1748>
32. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.92.187002>
33. <https://www.nature.com/articles/nature14964>
34. https://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Pauw_method
35. <http://surl.li/swfgt>
36. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10552-y>
37. <https://arxiv.org/abs/1508.06224>
38. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.122.027001>
39. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1201-8>
40. <https://cpl.iphy.ac.cn/10.1088/0256-307X/37/10/107401>
41. <https://arxiv.org/abs/1909.10482>
42. <https://arxiv.org/pdf/1908.01534.pdf>
43. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369702119308077>
44. <https://www.nature.com/articles/s41467-022-30454-w>
45. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.128.167001>
46. <https://arxiv.org/abs/2101.02846>
47. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.117001>
48. <https://arxiv.org/abs/2307.11742>
49. <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07026-7>
50. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095927322000779?via%3Dihub>
51. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369702121001309>
52. <https://arxiv.org/abs/2203.14353>
53. <https://arxiv.org/abs/2204.04623>
54. <https://arxiv.org/abs/2203.06500>
55. <https://cpl.iphy.ac.cn/10.1088/0256-307X/40/5/057404#1>
56. <https://jorge.physics.ucsd.edu/blockedarxiv/materialsarxiv.pdf>
57. <http://surl.li/swgdt>
58. <https://www.nature.com/articles/s41467-022-30782-x>
59. <https://home.csulb.edu/~abill/research/articles/reviewIE.pdf>
60. <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01769-w>
61. <http://surl.li/swgdt>
62. <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07026-7>
63. <https://www.nature.com/articles/s41534-023-00724-6>
64. <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.108.1175>
65. <https://gc.lebedev.ru/>



НОВОСТИ МИРА

В России освоили сложный капитальный ремонт авиационных двигателей CFM56, которые используются в самолётах Airbus A320 и Boeing 737

Компания S7 Technics, входящая в S7 Group, освоила сложный капитальный ремонт двигателей CFM56-5B и 7B, которые используются в самолётах Boeing 737 и Airbus A320. Об этом

сообщает газета «Коммерсантъ», ссылаясь на источники в трёх авиакомпаниях. Эта услуга может быть весьма востребованной, поскольку в России насчитывается около 800 двигателей CFM56, установленных на самолётах.

S7 Technics освоила капитальный ремонт модулей турбины низкого давления, компрессора низкого давления и газогенератора (горячей части). По словам Алексея

Синицкого, директора по исследованиям и разработкам компании Infomost Consulting, CFM56 является одним из наиболее распространённых авиадвигателей в мире. Силовая установка характеризуется длительным сроком службы – 40–60 тысяч лётных часов или 10–20 тысяч взлётно-посадочных циклов без снятия с крыла (примерно 8–12 лет).

[industry-hunter.com](https://www.industry-hunter.com)