

Использование искусственного интеллекта и компьютерного моделирования в области сверхпроводимости

И. Абдюханов, к. т. н.¹, М. Терина², И. Савельев³,
А. Цаплева, к. т. н.⁴, М. Алексеев, к. т. н.⁵

УДК 004.9:621.3 | ВАК 2.2.2

В 1911 году было открыто уникальное явление – способность материалов пропускать электрический ток без потерь при очень низких температурах. Впервые такое свойство обнаружено у ртути. В дальнейшем оказалось, что оно характерно для многих металлов, неорганических и органических соединений, число которых неуклонно растет с каждым годом. В настоящее время все чаще для аналитического обеспечения прогнозирования свойств материалов и предсказания возможности «сверхпроводить» электрический ток используются методы компьютерного моделирования и искусственный интеллект (ИИ). В данной работе представлен обзор использования технологий искусственного интеллекта в области сверхпроводимости. Он поможет лучше понять предыдущие этапы разработки этих технологий, а также спрогнозировать дальнейшие перспективы их развития.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

С момента сжижения гелия при температуре 4,2 К [1] и открытия сверхпроводимости у ртути обнаружено множество сверхпроводящих материалов, а также сделан ряд значимых открытий в области сверхпроводимости, за которые были присуждены Нобелевские премии по физике (рис. 1, табл. 1).

В период с 1911 по 1932 год было обнаружено, что некоторые металлы, такие как свинец, ниобий и другие, при низких температурах, сравнимых с температурой жидкого гелия, не имеют сопротивления. Среди них ниобий имел самую высокую температуру перехода в сверхпроводящее состояние – критическую температуру (T_c) 9,2 К. В последующие десятилетия были открыты сплавы и соединения, из которых можно выделить Nb_3Sn (1954 г.) и $Nb-Ti$ (1961 г.) с $T_c \approx 18$ К и 9,5 К, соответственно.

В 1986 году Дж. Беднорц и К. Мюллер открыли сверхпроводимость у $LaBaCuO$ с $T_c = 35$ К [2]. В 1987 году обнаружено,

что сверхпроводимость может существовать при температурах выше температуры жидкого азота (77 К), после открытия сверхпроводников типа $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO или REBCO, где RE = редкоземельный металл) с $T_c = 93$ К [3, 4]. Затем найдены купратные сверхпроводники на основе висмута (BSCCO), в их числе $Bi_2Sr_2Ca-Cu_2O_8$ (Bi-2212) и $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Bi-2223) с T_c вплоть до 110 К [5].

В 2001 году сверхпроводимость при 39 К в MgB_2 была обнаружена группой Акимитцу [6]. Эта температура перехода в так называемой промежуточной области (ниже температуры жидкого азота – 77 К и выше температуры жидкого гелия – 4,2 К) является самой высокой на сегодняшний день для бинарных интерметаллических соединений (рис. 2). В 2008 году интерес в научном сообществе вызвало открытие группой Хоосоно из Токийского технологического института сверхпроводимости в железосодержащих соединениях [7]. В зависимости от химического состава и кристаллической структуры сверхпроводники на основе железа можно разделить на несколько типов (семейств), таких как «1111» (например, $LaFeAsO_{1-x}F_x$ и $SmFeAsO_{1-x}F_x$), «122» (например, $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ и $Sr_{1-x}K_xFe_2As_2$), «111» (например, $LiFeAs$) и «11» (например, $FeSe$ и $FeSe_{1-x}Te_x$). Хотя T_c сверхпроводников на основе железа (например, до 38 К для семейства «122» и 56 К для «1111») не так высока, как у купратных сверхпроводников, анизотропия их свойств заметно ниже.

¹ АО «ВНИИНМ», заместитель генерального директора – директор отделения, IMAbdyukhanov@bochvar.ru.

² АО «ВНИИНМ», инженер, MDTerina@bochvar.ru.

³ АО «ВНИИНМ», научный сотрудник, IISavelyev@bochvar.ru.

⁴ АО «ВНИИНМ», начальник лаборатории, ASTsapleva@bochvar.ru.

⁵ АО «ВНИИНМ», заместитель директора отделения – начальник управления, MaVAlekseev@bochvar.ru.

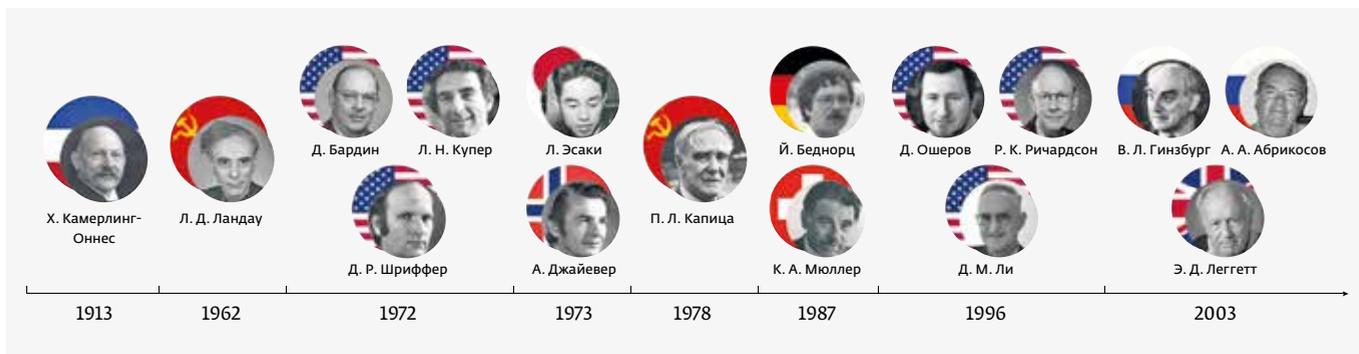


Рис. 1. Нобелевские лауреаты, внесшие свой вклад в исследование сверхпроводимости

Три года назад, в 2020 году [8], в углеродистом гидриде серы CSH_x при экстремально высоком давлении 267 ГПа обнаружена сверхпроводимость при комнатной температуре 287,7 К (~15 °С), о которой мечтали исследователи на протяжении последних ста лет (рис. 3).

Некоторые специалисты [10] при этом высказывают сомнение в существовании сверхпроводимости в гидридах, и указывают на то, что она не может быть описана в рамках известных механизмов электрон-фононного спаривания. Практическое применение таких соединений

сложно, поскольку необходимо в условиях эксплуатации постоянно поддерживать требуемое давление. Тем не менее, полученный результат способствует дальнейшему поиску сверхпроводящих материалов при комнатной температуре и их более глубокому изучению.

С 2005 года прогресс в поиске новых сверхпроводящих соединений связан с достижениями в области компьютерного материаловедения, прогнозирования кристаллических структур и протекания химических процессов в условиях экстремального давления. На данный

Таблица 1. Нобелевские премии по физике в области сверхпроводимости

Год	Лауреат	Обоснование награды
1913	Хейке Камерлинг-Оннес	За исследования свойств вещества при низких температурах, что привело, в числе прочего, к получению жидкого гелия
1962	Лев Давидович Ландау	За пионерские исследования в теории конденсированного состояния, в особенности жидкого гелия
1972	Джон Бардин Леон Нил Купер Джон Роберт Шриффер	За создание теории сверхпроводимости, названной БКШ-теорией
1973	Лео Эсаки Айвар Джайвер	За экспериментальные открытия туннельных явлений в полупроводниках и сверхпроводниках
1978	Пётр Леонидович Капица	За фундаментальные изобретения и открытия в области физики низких температур
1987	Георг Беднорц Карл Мюллер	За важный прорыв в физике, выразившийся в открытии сверхпроводимости в керамических материалах
1996	Дэвид Моррис Ли Дуглас Ошеров Роберт Ричардсон	За открытие сверхтекучести гелия-3
2003	Виталий Лазаревич Гинзбург Алексей Алексеевич Абрикосов Энтони Леггетт	За пионерский вклад в теорию сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей

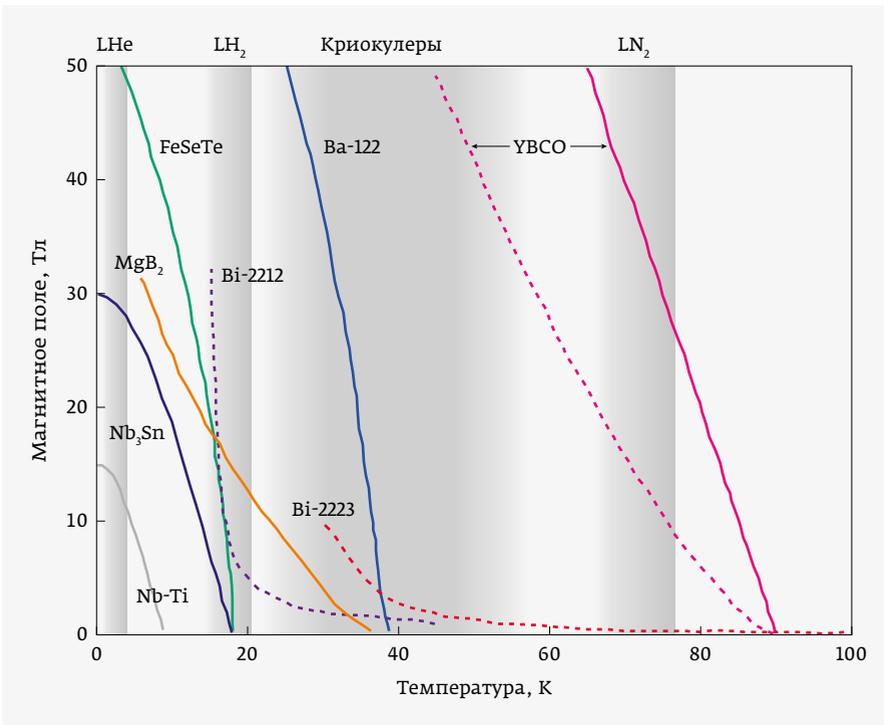


Рис. 2. Фазовая диаграмма «критическое поле – критическая температура» [9].

LHe – жидкий гелий, LH₂ – жидкий водород, LN₂ – жидкий азот

момент используемые алгоритмы достигли довольно высокой точности предсказания кристаллических структур неорганических соединений. Например, существует

около 84–95 К и 251–264 К, соответственно, при давлении 120 ГПа [16]. В 2019 году был осуществлен синтез YH₆ [17]. Оказалось, что у данного гидрида T_c оказалась

метод CALYPSO (разработанный группой китайских специалистов во главе с Ма и Ван [11]) и одноименное программное обеспечение (ПО), позволяющие прогнозировать и анализировать кристаллическую структуру материалов с помощью алгоритма оптимизации роя частиц при заданных внешних условиях (например, давлении). Благодаря применению этого ПО предсказаны кристаллические структуры сверхпроводящих материалов и оценены их критические температуры [12, 13, 14]. На данный момент CALYPSO является одним из основных методов прогнозирования свойств сверхпроводящих соединений на основе водорода [15]. С помощью этого ПО изучены многие гидриды редкоземельных, щелочноземельных, переходных металлов, групп бора, а также гидриды инертных газов. Например, CALYPSO использовался при прогнозировании таких гидридов иттрия, как YH₄ и YH₆ с критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние

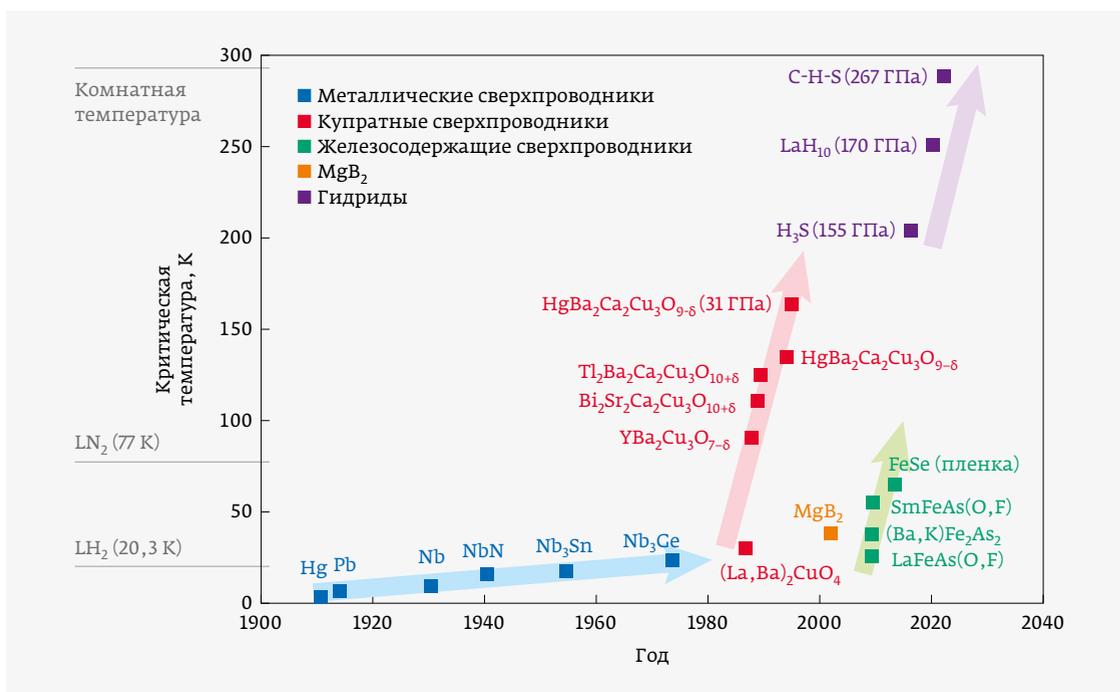


Рис. 3. Хронология открытия высокотемпературной сверхпроводимости [9]

чуть меньше спрогнозированной – порядка 224 К при давлении 166 ГПа. В настоящее время CALYPSO совместим с такими кодами, как Quantum Espresso, CASTEP, VASP, SIESTA, CP2K и GULP.

Наряду с CALYPSO одним из лучших среди методов предсказания кристаллических структур является USPEX, созданный группой специалистов во главе с А. Р. Огановым [18]. В основу кода USPEX заложен созданный группой Оганова эволюционный алгоритм вместе с известными методами случайного поиска, метадинамики, оптимизации роя частиц и др. Достоинством этого алгоритма является учет локальной оптимизации структуры и ее пространственной наследственности, за счет чего можно сфокусировать поиск на наиболее перспективной области пространства. Оценка структур, у которых даже небольшие изменения межатомных расстояний могут привести к сильным изменениям свободной энергии (а стабильные структуры характеризуются наименьшей свободной энергией), является ненадежной. Локальная оптимизация позволяет лучше отобрать среди случайных начальных структур многообещающих кандидатов, которые служат в дальнейшем основой для создания уже новых стабильных структур. Отобранные низкоэнергетические кандидаты выступают в качестве «родителей» для нового поколения, из которого за счет стандартных вариационных операторов пространственной наследственности, софтверной мутации и пермутации можно выявить стабильные кристаллические структуры. Например, с помощью CALYPSO и Quantum Espresso в 2017 году был спрогнозирован бинарный гидрид LaH_{10} , обладающий сверхпроводящими свойствами [19]. В 2018 и 2019 годах успешно осуществлен его синтез [20] и проведено измерение T_c [21]. На тот момент это были рекордные значения (250 К), правда при одном условии – давлении порядка 170–180 ГПа. С помощью USPEX также был спрогнозирован LaH_{10} с T_c равной 259 К при давлении 170 ГПа, но и, кроме того, найден еще один гидрид из ранее неизвестных – LaH_6 с T_c равной 156 К [22]. В настоящее время USPEX совместим с такими кодами, как Quantum Espresso, CASTEP, VASP, SIESTA, CP2K, GULP, LAMMPS, DMACRYS, ATK, MORAC, FHI-aims и Gaussian.

ПРИМЕНЕНИЕ

Низкотемпературные сверхпроводники на основе сплава Nb-Ti и соединения Nb_3Sn

Благодаря своей пластичности сплав Nb-Ti может быть продеформирован в длинные провода из моно- и многоволоконных заготовок с медной матрицей. Сверхпроводящие провода Nb-Ti промышленно внедрены в 1968 году [23, 24] и широко используются в установках науки и техники и по сей день. Сейчас сплав Nb-Ti по-прежнему остается дешевым сверхпроводящим материалом для применения при температуре жидкого гелия.

Из-за хрупкости сверхпроводящей фазы Nb_3Sn , провода на ее основе изготавливаются с применением бронзовой технологии, метода внутреннего источника подпитки оловом (ВИП) или метода «порошок в трубе» (PIT) [25, 26]. Суть этих методов заключается в изготовлении композиционных заготовок, способных выдержать значительную пластическую деформацию для получения из них длиннономерных проводов, а интерметаллическая фаза Nb_3Sn формируется уже в готовом проводе, а часто в готовом изделии, во время длительной термообработки. Из-за возросшей сложности производства промышленный выпуск сверхпроводящих проводов на основе Nb_3Sn начат после 1970 года. Стоимость таких сверхпроводников выше, чем у сверхпроводников на основе сплава Nb-Ti.

Сверхпроводники на основе сплава Nb-Ti обычно используются для изготовления магнитов, генерирующих магнитные поля до 9 Тл при температуре 4,2 К или 11 Тл при температуре 1,8 К. В настоящее время такие провода используют в конструкции систем магниторезонансных томографов (МРТ), сверхпроводящих магнитов для лабораторий, поездов на магнитной подушке и проч., их потребление составляет около нескольких тысяч тонн в год. Что касается сверхпроводников на основе Nb_3Sn , их ниша на рынке – это магниты с сильным полем в диапазоне до ~23 Тл. Важными областями применения сверхпроводников на основе Nb_3Sn являются системы МРТ, устройства ядерного магнитного резонанса (ЯМР), магнитные системы ускорителей частиц и токамаков, магниты с сильным полем для научных исследований. Например, в области термоядерного синтеза с 2008 по 2015 год было закуплено более 500 тонн сверхпроводящей проволоки на основе Nb_3Sn для международного проекта термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР), что привело к десятикратному увеличению международных производственных мощностей [27]. Для дальнейшего увеличения токонесущей способности этого типа сверхпроводников используют легирование различными металлами, например Hf и Zr – для получения тройных сплавов Nb-Ta-Hf и Nb-Ta-Zr, что в сочетании с внутренним окислением способствует формированию наночастиц оксидов и измельчению зеренной структуры интерметаллида Nb_3Sn [28, 29]. Промышленное производство сплава Nb-Ta-Hf со средним размером зерна менее 50 мкм освоено компанией ATI [30].

ВТСП

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) имеют T_c выше температуры жидкого азота (77 К) и, в ряде случаев, даже температуры сжиженного природного газа (СПГ) (113 К). Стоимость охлаждения сверхпроводящих технических систем жидким азотом намного ниже по сравнению с жидким гелием, что делает возможным их крупномасштабное промышленное применение.

От момента получения первых образцов ВТСП типа Bi-2223, Bi-2212 до практически применимых длинномерных проводов прошло всего несколько лет, а вот для ВТСП типа REBCO путь от открытия сверхпроводимости до получения первых практически пригодных длинномерных ленточных сверхпроводников занял более 10 лет интенсивных исследований и разработок.

1990-е годы были активным периодом в разработке проводов на основе Bi-2223 и Bi-2212, в то время как большинство результатов в изучении проводников с покрытием REBCO достигнуто в 2000-х годах [31].

Для изготовления проводов и лент BSCCO используется метод «порошок в трубе». Суть этого метода заключается в том, что исходные порошки, такие как оксиды и карбонаты, смешивают и прокаливают для получения прекурсоров, затем их упаковывают в металлическую оболочку, которую деформируют с получением проволоки или ленты. В качестве материала оболочки используют Ag или сплав на основе Ag, поскольку Ag почти не реагирует с порошковым прекурсором и обеспечивает диффузию кислорода в него при термической обработке. Установлено, что для достижения высокой токонесущей способности финальный отжиг таких сверхпроводников требуется проводить при повышенном давлении [32–35].

Промышленные провода и ленты ВТСП типа Bi-2223 километровой и более длины производили такие компании, как American Superconductor (AMSC), Sumitomo (Япония), Bruker (Германия) и Innova Superconductor Technology (Китай). Ленты Bi-2223 использовались во многих демонстрационных проектах силовых кабелей, двигателей, генераторов, трансформаторов и ограничителей тока короткого замыкания по всему миру [36]. В 2012 году первая в мире высокотемпературная электроподстанция, в состав которой вошли сверхпроводящий магнитный накопитель энергии, сверхпроводящий ограничитель тока короткого замыкания, сверхпроводящий трансформатор и сверхпроводящий кабель передачи переменного тока, разработанная Институтом электротехники Китайской академии наук (IEECAS), официально введена в эксплуатацию в энергосистеме города Байинь (провинция Ганьсу, Китай) [37].

Сверхпроводящий магнит, генерирующий магнитное поле напряженностью 24,6 Тл из сверхпроводников на основе Nb_3Sn со вставкой из ВТСП типа Bi-2223 создан в Университете Тохоку (Сендай, Япония) [38].

В настоящее время использование соединения Bi-2223 постепенно сокращается. Фирма Sumitomo сейчас является единственным производителем, выпускающим провода километровой класса с критическим током $I_c > 200$ А и/или провода длиной несколько сотен метров с $I_c > 250$ А [39].

В отличие от лент на основе Bi-2223, характеризующихся высокой анизотропией, круглые сверхпроводники на

основе Bi-2212 считаются перспективными для применения в магнитных катушках ЯМР-установок, в качестве кабелей Резерфорда для магнитов ускорителей частиц или обмотки катушек в магнитных системах установок термоядерного синтеза. В 2014 году с использованием проводов на основе Bi-2212 [40] Национальная лаборатория Беркли и Национальная лаборатория Брукхейвена в США разработали конструкцию дипольных магнитов для ускорителей элементарных частиц. В Китае рассматривали возможность использования сверхпроводников типа Bi-2212 в составе токонесущего элемента магнитной системы для китайского термоядерного экспериментального реактора токамак (CFETR) [41, 42].

В последние годы ВТСП типа REBCO считаются кандидатами на широкое промышленное применение.

К настоящему времени несколькими компаниями созданы сверхпроводники REBCO большой длины (>1000 м) с критическим током более 300 А/см ширины при температуре 77 К в собственном поле. В 2008 году компания SuperPower в США разработала первую в мире ленту REBCO километровой класса [43]. В 2016 году SuNAM разработала ленту REBCO длиной ~1000 м и шириной 12 мм с $I_c > 800$ А [44]. Длинномерные ВТСП типа REBCO производили компании США (AMSC, SuperPower, STI), Японии (SWCC, Fujikura, Sumitomo), Кореи (SuNAM), Германии (THEVA, Deutsche Nanoschicht GmbH, Bruker), России («СуперОкс») и Китая (Shanghai Superconductor, Samri, SCSC) [45]. В настоящее время исследования по повышению их токопроводящей способности сосредоточены на введении искусственных центров пиннинга (ИЦП) в сверхпроводящий слой и увеличении его толщины [46, 47].

С использованием сверхпроводников типа REBCO появилось множество демонстрационных проектов на их основе для сверхпроводящих электрических силовых устройств, таких как силовые кабели, двигатели, генераторы, трансформаторы и токоограничители [48]. Например, в 2019 году Korea Electric Power Corporation полностью профинансировала и завершила первый коммерческий проект силовых кабелей HTS в реальной сети, названный проектом Shingal, для соединения двух подстанций кабелем HTS 23 кВ на расстоянии 1 км [49].

Активно используются ВТСП-сверхпроводники такого типа и для создания сильнополевых сверхпроводящих магнитов [50–54].

MgB₂

В отличие от купратного ВТСП, транспортный ток в MgB₂ не зависит от ориентировки зерен [55], поэтому это соединение перспективно для изготовления проводов с высокими эксплуатационными характеристиками. Из-за слабой способности закрепления потока критическая плотность тока в дибориде магния падает с увеличением

приложенного магнитного поля, что ограничивает его применение в сильных магнитных полях. Принято считать, что сверхпроводящие материалы на основе MgB_2 обладают техническими и стоимостными преимуществами при применении в сверхпроводящих магнитах в системах МРТ в областях 1–2 Тл и 10–20 К.

В настоящее время в нескольких лабораториях получены провода MgB_2 100-метрового класса на основе метода IMD [56], в то время как Hyper Tech в США, Hitachi в Японии, Sam Dong в Южной Корее и Western Superconducting Technologies в Китае обладают производственными мощностями по промышленному выпуску проводов на основе MgB_2 километровой длины ($J_c = 1\text{--}2 \cdot 10^5$ А/см² при 4,2 К и 4 Тл) по методу PIT. Среди них провода MgB_2 , произведенные Hyper Tech и Columbus, успешно используются в таких устройствах, как МРТ, сверхпроводящие ограничители тока короткого замыкания и сверхпроводящие кабели. В 2006 году Columbus разработал первую в мире открытую систему МРТ на основе MgB_2 . Система, которая использует холодильник для охлаждения и может генерировать магнитное поле 0,5–0,6 Тл при 20 К, была использована для сканирования человеческого мозга [57]. На данный момент они произвели более 20 комплектов вышеупомянутой системы МРТ. Можно ожидать, что рабочая напряженность поля будет увеличена до 1–2 Тл за счет использования проводов на основе MgB_2 с более высокими характеристиками J_c в будущем для проведения различных видов медицинской диагностики. В последнее время применение сверхпроводника на основе MgB_2 в двигателях ветроэнергетики получило значительный импульс. Компания Hyper Tech разработала ветрогенераторы мощностью 8–20 МВт со сверхпроводящими статором и ротором с проводами на основе MgB_2 и с малыми потерями переменного тока.

Железосодержащие сверхпроводники (iron-based superconductors, IBS)

Исследования особенностей протекания тока по сверхпроводящей фазе железосодержащих сверхпроводников (пниктидов) показали, что метод «порошок в трубе» может быть использован для их производства [58]. В настоящее время в качестве материала оболочки для проводов из пниктидов железа, таких как $Sr_{1-x}K_xFeAs$ (Sr-122) и $Ba_{1-x}K_xFeAs$ (Ba-122), широко используется серебро, так как оно практически не вступает во взаимодействие со сверхпроводящей сердцевиной. Кроме того, возможно использовать композитную оболочку, состоящую из других дешевых и жестких металлов в качестве внешней оболочки и серебра в качестве внутренней оболочки.

В 2014 году группа IEECAS изготовила первую 11-метровую ленту 122-IBS с помощью масштабируемого процесса плоской прокатки. После тщательной оптимизации процесса изготовления длинномерных проводов

для достижения более высокого уровня равномерности деформации той же группой была произведена первая в мире лента IBS 100-метрового класса [59]. Эта лента из семи волокон с Sr-122 длиной 115 м характеризуется равномерным J_c по всей ленте с минимальным значением J_c , равным $1,2 \cdot 10^4$ А/см² (4,2 К, 10 Тл). Совсем недавно за счет усовершенствования технологии изготовления была получена 100-метровая 7-волоконная лента с Ba-122 с J_c выше $5,0 \cdot 10^4$ А/см² (4,2 К, 10 Тл).

В 2018 году впервые изготовлена одинарная плоская катушка IBS со сверхпроводящими лентами Ba-122 и испытана в магнитном поле 24 Тл [60], затем разработаны еще одна одинарная и двойная плоские катушки, которые были испытаны в магнитном поле 30 Тл [61] и продемонстрировали слабую зависимость критических токов от магнитного поля. В 2020 году с использованием 100-метровых лент Ba-122 с семью волокнами, предоставленных IEECAS, в Институте физики высоких энергий Китайской академии наук (IHEP-CAS) впервые изготовлены катушки с IBS и испытаны в дипольном магните, который обеспечивал максимальное магнитное поле 10 Тл при температуре 4,2 К. Одна из катушек IBS при 4,2 К и 10 Тл показала рабочий ток 65 А, что составляет 86,7% от I_c коротких образцов при 10 Тл [62]. Эти результаты показывают, что проводник IBS является многообещающим кандидатом для применения в магнитах с сильным полем, особенно для будущих ускорителей высоких энергий.

В настоящее время проводится исследование концептуального дизайна дипольных магнитов мощностью 12 Тл с использованием технологии IBS для удовлетворения требований и потребностей в крупномасштабном сверхпроводящем ускорителе, предложенном IHEP-CAS [63].

Для расширения областей применения и увеличения практического использования сверхпроводников необходимо повысить экономические характеристики сверхпроводящих устройств и снизить затраты на их эксплуатацию [64].

Одним из радикальных способов решения этой задачи является повышение критической температуры сверхпроводников и/или открытие новых сверхпроводящих материалов с высоким критическим током по сравнению с используемыми в настоящее время.

Для решения такой задачи сейчас открываются возможности, которых не было еще несколько лет назад – это использование технологий искусственного интеллекта для открытия новых сверхпроводящих соединений.

Также технологии ИИ могут применяться для создания как самих электротехнических систем, изначально разработанных с условием получения максимального эффекта от использования сверхпроводников, так и более эффективных криогенных систем. Такие задачи являются сложными, многофакторными, их решение отнимает

много времени и требует чрезвычайно высокопроизводительной вычислительной техники и совершенных алгоритмов поиска оптимальных решений.

Следует отметить актуальность создания «цифровых» двойников электротехнических систем. Анализ работы таких систем в штатном режиме, моделирование нештатных и аварийных ситуаций с использованием возможностей ИИ позволяют создавать сверхпроводящие электротехнические системы с максимальной эффективностью и надежностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гинзбург В. Л., Андрюшин Е. А.** Сверхпроводимость. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Альфа-М, 2006. 110 с.
2. **Bednorz J. C., Müller K. A.** Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O system // *Zeitschrift für Physik B. Condensed Matter*. 1986. V. 64. PP. 189–193.
3. **Zhao Z. X., Chen L. Q., Yang Q. S. et al.** Superconductivity above liquid nitrogen temperature in new oxide system // *Sci. Bull.*, 1987. V. 32. PP. 1098–1102.
4. **Wu M. K., Ashburn J. R., Torng C. J., Hor P. H., Meng R. L., Gao L., Huang Z. J., Wang Y. Q., Chu C. W.** Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure // *Phys. Rev. Lett.*, 1987. V. 58. PP. 908–910.
5. **Michel C., Hervieu M., Borel M. M., Grandin A., Deslandes F., Provost J., Raveau B.** Superconductivity in the Bi-Sr-Cu-O system // *Zeitschrift für Physik B. Condensed Matter.*, 1987. V. 68. PP. 421–423.
6. **Nagamatsu J., Nakagawa N., Muranaka T., Zenitani Y., Akimitsu J.** Superconductivity at 39 K in Magnesium diboride // *Nature*. 2001. V. 410. PP. 63–64.
7. **Kamihara Y., Watanabe T., Hirano M., Hosono H.** Iron-based layered superconductor $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ($x = 0.05\text{--}0.12$) with $T_c = 26$ K // *J. Am. Chem. Soc.* 2008. V. 130. PP. 3296–3297.
8. **Snider E., Dasenbrock-Gammon N., McBride R., Debessai M., Vindana H., Vencatasamy K., Lawler K. V., Salamat A., Dias R. P.** Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride // *Nature*. 2020. V. 586. PP. 373–377.
9. **Chao Yao, Yanwei Ma.** Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications // *iScience*. 2021. V. 24. Issue 6. 102541.
10. **Hirsch J. E., Marsiglio F.** Nonstandard superconductivity or no superconductivity in hydrides under high pressure // *Phys. Rev. B*. 2021. V. 103. 134505.
11. **Yanchao Wang, Jian Lv, Li Zhu and Yanming Ma.** Crystal structure prediction via particle-swarm optimization // *Phys. Rev. B*. 2010. V. 82. 094116.
12. **Yan L., Bo T., Liu P.-F., Zhou L., Zhang J., Tang M.-H., Xiao Y.-G. and Wang B.-T.** Superconductivity in predicted two dimensional XB_6 ($X = \text{Ga}, \text{In}$) // *J. Mater. Chem. C*. 2020. V. 8. PP. 1704–1714.
13. **Liu Y., Sun Y. and Gao P.** The superconductivity of N–Si–H compounds at high pressure // *Solid State Commun.* 2021. V. 329. 114260.
14. **Matsumoto R., Hou Z., Adachi S., Yamamoto S., Tanaka H., Takeya H., Irifune T., Terakura K. and Takano Y.** Experimental observation of pressure-induced superconductivity in layered transition-metal chalcogenides (Zr, Hf) GeTe_4 explored by a data-driven approach // *Chem. Mater.* 2021. V. 33. PP. 3602–3610.
15. **Wang Y., Miao M., Lv J., Zhu L., Yin K., Liu H. and Ma Y.** An effective structure prediction method for layered materials based on 2D particle swarm optimization algorithm // *J. Chem. Phys.* 2012. V. 137. 224108.
16. **Li Y. et al.** Pressure-stabilized superconductive yttrium hydrides // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. PP. 1–8.
17. **Troyan I. A. et al.** Anomalous high-temperature superconductivity in YH_6 // *Advanced Materials*. 2021. V. 33. Issue 15. 2006832.
18. **Oganov A. R., Lyakhov A. O., Valle M.** How Evolutionary Crystal Structure Prediction Works – and Why // *Acc. Chem. Res.* 2011. V. 44. PP. 227–237.
19. **Liu H. et al.** Potential high- T_c superconducting lanthanum and yttrium hydrides at high pressure // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. V. 114 (27). PP. 6990–6995.
20. **Geballe Z. M. et al.** Synthesis and stability of lanthanum superhydrides // *Ang. Chem.* 2018. V. 57. Issue 3. PP. 688–692.
21. **Somayazulu M. et al.** Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 122. 027001.
22. **Kruglov I. A. et al.** Superconductivity of LaH_{10} and LaH_{16} polyhydrides // *Physical Review B*. 2020. V. 101. 024508.
23. **Smith P. F., Wilson M. N., Walters C. R. and Lewin J. D.** Intrinsically Stable Conductors. – Proc. 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators. BNL. P. 913.
24. The Proceedings of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators, June 10 – July 19, 1968, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, has been archived at: <https://wpw.bnl.gov/rgupta/1968-summer>.
25. **Дергунова Е. А., Курилкин М. О., Алиев Р. Т., Коновалова Н. В.** Материаловедение сверхпроводников на основе соединений А-15: учебное пособие. М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019. 96 с.
26. **Цаплева А. С., Абдюханов И. М., Панцырный В. И., Алексеев М. В., Раков Д. Н.** Материаловедение современных технических сверхпроводящих материалов // *Физика металлов и металловедение*. 2022. Т. 123. № 9. С. 897–928.
27. **Xu X.** A review and prospects for Nb_3Sn superconductor development // *Supercond. Sci. Technol.* 2017. V. 30. 093001.
28. **Xu X., Sumption M. D., Peng X.** Internally oxidized Nb_3Sn superconductor with very fine grain size and high critical current density // *Adv. Mater.*, 2015. V. 27. PP. 1346–1350.
29. **Balachandran S., Tarantini C., Lee P. J., Kametani F., Su Y.-F., Walker B., Starch W. L., Larbalestier D. C.**

- Beneficial influence of Hf and Zr additions to Nb₄at%Ta on the vortex pinning of Nb₃Sn with and without an O source // *Supercond. Sci. Technol.* 2019. V. 32. 044006.
30. **Balachandran S., Tarantini C., Starch W. L., Paudel N., Lee P. J., Larbalestier D. C.** 60 years on – A new alloy for better Nb₃Sn. – Presentaion at Applied Superconductivity Conference (virtual) (presentation ID: Wk2P3–1). 2020. https://snf.ieeeesc.org/files/ieeeesc/slides/Shreyas%20Balachandran_11052020_Wk2P3–1.pdf.
 31. **Uglietti D.** A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors // *Supercond. Sci. Technol.* 2019. V. 32. 053001.
 32. **Kobayashi S., Yamazaki K., Kato T., Ohkura K., Ueno E., Fujino K., Fujikami J., Ayal N., Kikuchi M., Hayashi K., et al.** Controlled over-pressure sintering process of Bi2223 wires // *Physica C.* 2005. V. 426. PP. 1132–1137.
 33. **Kametani F., Shen T., Jiang J., Scheuerlein C., Malagoli A., Di Michiel M., Huang Y., Miao H., Parrell J. A., Hellstrom E. E., Larbalestier D. C.** Bubble formation within filaments of melt-processed Bi2212 wires and its strongly negative effect on the critical current density // *Supercond. Sci. Technol.* 2011. V. 24, 075009.
 34. **Jiang J., Starch W. L., Hannion M., Kametani F., Trociewitz U. P., Hellstrom E. E., Larbalestier D. C.** Doubled critical current density in Bi-2212 round wires by reduction of the residual bubble density // *Supercond. Sci. Technol.* 2011. V. 24. 082001.
 35. **Jiang J., Bradford G., Hossain S. I., Brown M. D., Cooper J., Miller E., Huang Y., Miao H., Parrell J. A., White M., et al.** High-performance Bi-2212 round wires made with recent powders // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2019. V. 29. 6400405.
 36. **Sato K., Kobayashi S., Nakashima T.** Present status and future perspective of bismuth-based high-temperature superconducting wires realizing application systems // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2012. V. 51. 010006.
 37. **Xiao L. Y., Dai S. T., Lin L. Z., Zhang J. Y., Guo W. Y., Zhang D., Gao Z. Y., Song N. H., Teng Y. P., Zhu Z. Q., et al.** Development of the world's first HTS power substation // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2012. V. 22. 5000104.
 38. **Awaji S., Watanabe K., Oguro H., Miyazaki H., Hanai S., Tosaka T., Ioka S.** First performance test of a 25 T cryogen-free superconducting magnet // *Supercond. Sci. Technol.*, 2017. V. 30. 065001.
 39. **Nakashima T., Kobayashi S., Kagiya T., Yamazaki K., Kikuchi M., Yamade S., Hayashi K., Sato K., Osabe G., Fujikami J.** Overview of the recent performance of DI-BSCCO wire // *Cryogenics.* 2012. V. 52. PP. 713–718.
 40. **Larbalestier D. C., Jiang J., Trociewitz U. P., Kametani F., Scheuerlein C., Dalban-Canassy M., Matras M., Chen P., Craig N. C., Lee P. J., Hellstrom E. E.** Isotropic round-wire multifilament cuprate superconductor for generation of magnetic fields above 30 T // *Nat. Mater.* 2014. V. 13. PP. 375–381.
 41. **Zhang J., Song Y. T., Liu X. F., Li J. G., Wan Y. X., Ye M. Y., Ding K. Z., Wu S. T., Xu W. W., Wei J. H.** Concept design of hybrid superconducting magnet for CFETR Tokamak reactor. 2013 IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE) (2013), PP. 1–6.
 42. **Qin J. G., Wu Y., Li J. G., Dai C., Liu F., Liu H. J., Liu P. H., Li C. S., Hao Q. B., Zhou C., Liu S.** Manufacture and test of Bi-2212 cable-in-conduit conductor // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2017. V. 27. 4801205.
 43. **Shiohara Y., Taneda T., Yoshizumi M.** Overview of materials and power applications of coated conductors project // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2012. V. 51. 010007.
 44. **Moon S. H., Lee J.-H., Lee H.** Recent progress on SuNAM's coated conductor development; performance, price & utilizing ways. – Presentation at Coated Conductors for Applications, Aspen, USA (presentation ID: IO-16). 2016. https://snf.ieeeesc.org/files/ieeeesc/slides/STP528_Moon.pdf.
 45. **Senatore C., Alessandrini M., Lucarelli A., Tediosi R., Uglietti D., Iwasa Y.** Progresses and challenges in the development of high-field solenoidal magnets based on RE123 coated conductors // *Supercond. Sci. Technol.* 2014. V. 27. 103001.
 46. **Tsuchiya K. et al.** Superconducting properties of commercial REBCO-coated conductors with artificial pinning centers // *Supercond. Sci. Technol.* 2021. V. 34. No. 10. 105005.
 47. **Dürschnabel M., Aabdin Z., Bauer M., Semerad R., Prusseit W., Eibl O.** DyBa₂Cu₃O_{7-x} superconducting coated conductors with critical currents exceeding 1000 Acm-1 // *Supercond. Sci. Technol.* 2012. V. 25. 10500.
 48. **Obradors X., Puig T.** Coated conductors for power applications: materials challenges // *Supercond. Sci. Technol.* 2014. V. 27. 044003.
 49. **Lee C., Son H., Won Y., Kim Y., Ryu C., Park M., Iwakuma M.** Progress of the first commercial project of

ООО
СМП



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН

www.SMD.ru

электронные КОМПОНЕНТЫ
 для ПОВЕРХНОСТНОГО
 МОНТАЖА

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Катушки индуктивности на токи до 10 А
- U.FL разъемы и pigtail со SMA

Москва, Ленинградский пр. 80 к. 32, e-mail: sale@smd.ru
 Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

- high-temperature superconducting cables by KEPSCO in Korea // Supercond. Sci. Technol. 2020. V. 33. 044006.
50. **Hahn S., Kim K., Kim K., Hu X. B., Painter T., Dixon I., Kim S., Bhattarai K. R., Noguchi S., Jaroszynski J., Larbalestier D. C.** 45.5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet // Nature. 2019. V. 570. PP. 496–499.
 51. **Yanagisawa Y., Kajita K., Iguchi S., Xu Y., Nawa M., Piao R., Takao T., Nakagome H., Hamada M., Noguchi T., et al.** 27.6 T generation using Bi-2223/REBCO superconducting coils. – IEEE/CSC & ESAS Supercond. News Forum, 10 (2016). P. STH42. <https://snf.ieeecsc.org/media/276-t-generation-using-bi-2223rebco-superconducting-coils>.
 52. **Berrospe-Juarez E., Zermeno V. M.R., Trillaud F., Gavrilin A. V., Grilli F., Abraimov D. V., Hilton D. K., Weijers H. W.** Estimation of losses in the (RE)BCO two-coil insert of the NHMFL 32 T all-superconducting magnet // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2018. V. 28, 4602005.
 53. **Liu J. H., Wang Q. L., Qin L., Zhou B. Z., Wang K. S., Wang Y. H., Zhang Z. L., Dai Y. M., Liu H., Hu X. N., et al.** World record 32.35 tesla direct-current magnetic field generated with an all-superconducting magnet // Supercond. Sci. Technol., 2020. V. 33. 03LT01.
 54. **Yoon S., Kim J., Cheon K., Lee H., Hahn S., Moon S.-H.** 26 T 35 mm all-GdBa₂Cu₃O_{7-x} multi-width no-insulation superconducting magnet // Supercond. Sci. Technol. 2016. V. 29. 04LT04.
 55. **Larbalestier D. C., Cooley L. D., Rikel M. O., Polyanskii A. A., Jiang J., Patnaik S., Cai X. Y., Feldmann D. M., Gurevich A., Squitieri A. A., et al.** Strongly linked current flow in polycrystalline forms of the superconductor MgB₂ // Nature. 2001. V. 410. PP. 186–189.
 56. **Ye S., Kumakura H.** The development of MgB₂ superconducting wires fabricated with an internal Mg diffusion (IMD) process // Supercond. Sci. Technol. 2016. V. 29. Article 113004.
 57. **Flukiger R.** Advances in MgB₂ conductors. Presentation at Applied Superconductivity Conference, Charlotte, USA (presentation ID: 3PLA-02). 2014. https://snf.ieeecsc.org/files/ieeecsc/slides/CRP46_Fluc%3BCKigerR_3PLA-02_Adv-MgB2-Cond_091814v2.pdf.
 58. **Katase T., Ishimaru Y., Tsukamoto A., Hiramatsu H., Kamiya T., Tanabe K., Hosono H.** Advantageous grain boundaries in iron pnictide superconductors // Nat. Commun. 2011. V. 2, 409.
 59. **Zhang X. P., Oguro H., Yao C., Dong C. H., Xu Z. T., Wang D. L., Awaji S., Watanabe K., Ma Y. W.** Superconducting properties of 100-m class Sr_{0.6}K_{0.4}Fe₂As₂ tape and pancake coils // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2017. V. 27. 7300705.
 60. **Wang D. L., Zhang Z., Zhang X. P., Jiang D. H., Dong C. H., Huang H., Chen W. G., Xu Q. J., Ma Y. W.** First performance test of a 30 mm iron-based superconductor single pancake coil under a 24 T background field // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32. 04LT01.
 61. **Qian X., Jiang S. L., Ding H. W., Huang P. C., Zou G. H., Jiang D. H., Zhang X. P., Ma Y. W., Chen W. G.** Performance testing of the iron-based superconductor inserted coils under high magnetic field // Physica C. 2021. V. 580. 1353787.
 62. **Zhang Z., Wang D. L., Wei S. Q., Wang Y. Z., Wang C. T., Zhang Z., Yao H. L., Zhang X. P., Liu F., Liu H. J., Ma Y. W., et al.** First performance test of the iron-based superconducting racetrack coils at 10 T // Supercond. Sci. Technol. 2021. V. 34. 035021.
 63. The CEPC Study Group. CEPC Conceptual Design Report. Volume I – Accelerator. – Institute of High Energy Physics (IHEP). 2018. http://cepc.ihep.ac.cn/CDR_v6_201808.pdf
 64. **Yazdani-Asrami M., Seyyedbarzegar S. M., Zhang M. and Yuan W.** Insulation materials and systems for superconducting powertrain devices in future cryo-electrified aircraft: part I – material challenges and specifications, and device-level application // IEEE Electr. Insul. Mag. 2022. V. 38. PP. 23–36.

ООО “Руднев-Шиляев”

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

Инструментальные решения задач заказчика!

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35
www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru
 тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

К50-15, К50-17, К50-27, К50-29, К50-37,
К50-68, К50-77, К50-80, К50-81, К50-83,
К50-84, К50-85, К50-86, К50-87, К50-88,
К50-89, К50-90, К50-91, К50-92, К50-93,
К50-94, К50-95(чип), К50-96, К50-97(чип),
К50-98, К50-99, К50-100, К50-101(чип),
К50-102, К50-103, К50-104, К50-105, К50-106



объемно-пористые танталовые конденсаторы

К52-1, К52-1М, К52-1БМ, К52-1Б, К52-9,
К52-11, К52-17, К52-18, К52-19, К52-20,
К52-21, К52-24, К52-26(чип), К52-27(чип),
К52-28, К52-29, К52-30



оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

К53-1А, К53-7, К53-65(чип), К53-66,
К53-68(чип), К53-69(чип), К53-71(чип),
К53-72(чип), К53-74(чип), К53-77(чип),
К53-78(чип), К53-82



суперконденсаторы (ионисторы)

К58-26, К58-27, К58-28,
К58-29, К58-30, К58-31



накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов

НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ



Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001

