

УДК 538.945.91; 666.3
СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Н.С. Панин¹, Ю.А. Зыкова²

Иркутский государственный технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Произведен обзор по теме «Высокотемпературные сверхпроводящие материалы». Рассказано, что такое явление сверхпроводимости, показана история развития сверхпроводящих материалов. Описана технология производства, современное состояние и перспективы развития высокотемпературных сверхпроводников.

Библиогр. 8 назв.

Ключевые слова: сверхпроводящие материалы; сверхпроводящая керамика; высокотемпературные сверхпроводники.

SUPERCONDUCTING MATERIALS

N. Panin, J. Zyкова

Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, Russia, 664074.

The article presents the literature review on the topic of high-temperature superconducting materials. The authors explain what the phenomenon of superconductivity means and history of development of superconducting materials. The paper describes the technology of production, current state and prospects of development of high-temperature superconductors.

References: 8.

Keywords: superconducting materials; superconducting ceramics; high-temperature superconductors.

Известно, что органические топлива (нефть, газ, уголь) не являются возобновляемыми ресурсами, добыча их становится все более трудоемкой и менее рентабельной. В связи с этим современная энергетика ориентирована на альтернативные источники энергии и на рациональное использование уже добытой электроэнергии. Сверхпроводники по своей природе идеально подходят для этих целей. Ведь жилы новых кабелей, генераторов, трансформаторов не будут нагреваться электрическими токами. Впервые люди смогут сознательно исключить тепловые потери из баланса издержек электротехники. Подсчитано, что сверхпроводящее исполнение крупных электроэнергетических установок принесло бы человечеству миллиардные выгоды [1].

Сверхпроводимость – свойство многих проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже определённой критической температуры T_c , характерной для данного материала. Сверхпроводимость обнаружена более чем у 25 металлических элементов, у большого числа сплавов и интерметаллических соединений, а также у некоторых полупроводников. Рекордно высоким значением T_c (около 23 К) обладает соединение Nb₃Ge. Высокотемпературная сверхпроводимость должна уменьшить потери при транспортировке и передаче токов, стать основой мощных электромагнитов для научных и медицинских исследований, создания новых систем лазеров.

Явление сверхпроводимости было открыто Камерлинг-Оннесом в 1911 г., как полное исчезновение электрического сопротивления ртути при температуре около 4 К (– 269 °С) выше абсолютного нуля (Нобелевская премия 1913 г.). Поскольку сразу стал ясен огромный прикладной потенциал сверхпроводимости, с этого времени в течение более чем 100 лет предпринимаются попытки увеличить критическую температуру сверхпроводящего перехода. Оказалось, что среди чистых металлов наибольшую критическую температуру имеет ниобий (9,26 К), а самую низкую – вольфрам (0,015 К).

¹ Панин Никита Сергеевич, студент 5 курса кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов, e-mail: nikitap91@mail.ru

Panin Nikita, a fifth-year student of Chemical Engineering Refractory Nonmetallic and Silicate Materials Department, e-mail: nikitap91@mail.ru

² Зыкова Юлия Александровна, старший преподаватель кафедры «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов», e-mail: ulya2279@mail.ru

Zykova Julia, Assistant Professor of Chemical Technology Refractory Nonmetallic and Silicate Materials Department, e-mail: ulya2279@mail.ru

Более высокие значения наблюдались в сплавах. Самой высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние обладал сплав Nb_3Ge : 23 К (– 250 °С).

В 1957 г. Бардиным, Купером и Шриффером была создана общепринятая сейчас микроскопическая теория сверхпроводимости – «теория БКШ» (Нобелевская премия 1972 г.). Согласно этой теории, часть обычно отталкивающихся друг от друга свободных электронов благодаря взаимодействию с фононами (квантами колебаний кристаллической решетки) образуют связанное состояние (так называемые «куперовские пары»). Эти пары имеют целый спин и при охлаждении «конденсируются», образуя сверхтекучую электронную жидкость. Сверхтекучесть позволяет конденсированным куперовским парам переносить электрический заряд без неупругих столкновений с кристаллической решеткой и оставшимися электронами, а значит и без диссипации энергии. В том же 1957 г. А. А. Абрикосовым был открыт новый класс сверхпроводников – так называемые сверхпроводники II рода, характеризующиеся отрицательным значением энергии границы нормальной и сверхпроводящих фаз.

В 1986 г. Беднорцем и Мюллером в исследовательском центре корпорации IBM у сложных соединений оксида меди $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ была обнаружена сверхпроводимость при необычно высокой температуре 30 К (– 243 °С) (Нобелевская премия 1987 г.). Эти соединения были названы высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП), а традиционные сверхпроводники стали именоваться низкотемпературными (НТСП).

К 1993 г., исследовав множество близких соединений путем замены атомов лантана и бария другими, ученые нашли целый ряд сверхпроводящих материалов на основе оксидов меди, из которых самыми высокотемпературными оказались соединения с иттрием, барием и ртутью, такие как $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $Bi_2Sr_2Ca_2CuO_{8+x}$, $Tl_2Ba_2Ca_2CuO_{8+x}$, $Hg_2Ba_2Ca_2CuO_{8+x}$. Максимальная температура сверхпроводящего перехода в ВТСП на сегодняшний день достигает 135...160 К в зависимости от давления [4].

2001 г. ознаменовался рядом крупных достижений. Прежде всего надо отметить рекорд критической температуры сверхпроводящего перехода в фуллеритах, установленный учеными из Bell Laboratories (исследовательский центр компании AT&T): расширяя решетку монокристаллов C_{60} , интеркаляцией молекул $CHCl_3$, удалось получить $T_c = 117$ К. В другом кристалле – $CHCl_3/C_{60}$ достигнута $T_c = 80$ К. В 2001 г. сверхпроводимость при нескольких градусах К была найдена в углеродных нанотрубках. В этом же году был обнаружен новый сверхпроводник, имеющий серьезные технологические преимущества перед ВТСП, – диборид магния MgB_2 с критической температурой 39 К

В конце 1986 г. А. Мюллер и Дж. Беднорц открыли новый класс сверхпроводящих материалов — так называемые металлооксидные сверхпроводники, которые представляют собой окислы (точнее, смесь окислов) металлов. Наличие у них сверхпроводящих свойств на первый взгляд тем более удивительно, что в нормальном состоянии, т.е. при температуре выше T_c , подобные окислы довольно плохие проводники (их удельное сопротивление в 100–1000 раз выше сопротивления меди).

Новые материалы получили название высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), поскольку температуры их перехода в сверхпроводящее состояние на порядок выше, чем для «старых» материалов. Революционный характер открытия высокотемпературной сверхпроводимости в том, что оно показало путь к созданию сверхпроводящих проводов, работающих при таких температурах, которые можно получить с помощью жидкого азота – безопасной и дешевой криогенной жидкости (температура кипения при атмосферном давлении 77 К) [4].

Высокотемпературные сверхпроводники изготавливаются по так называемой керамической технологии, с помощью которой люди еще в древние времена создавали изделия из глины, которая представляет собой мелкодисперсную смесь различных минералов. Древний гончар лепил (по-научному – прессовал) из этой смеси посуду, а затем обжигал ее на воздухе при высокой (~1000 °С) температуре. Таким образом, и получалась керамика. Практически та же технология используется и при изготовлении ВТСП-керамик: составляется смесь из исходных металлических окислов (например, окислов BaO , Y_2O_3 и CuO для ВТСП-керамики $YBa_2Cu_3O_7$), затем тщательно перетирается и перемешивается, после чего из полученной «пудры» прессуется образец, который и подвергается обжигу на воздухе (или в кислороде) при температуре 10000С. В результате получается керамический образец поликристалл, который состоит из отдельных сверхпроводящих гранул – кристаллитов (с характерным размером 1–10 мкм), ориентированных случайным образом друг относительно друга. «Слабое место» всех спеченных образцов — контакты между гранулами; именно они определяют величину критического тока такого материала. В первых образцах критическая плотность составляла всего 100–1000 А/см²[1].

При производстве длинных проводов технология несколько модифицируется. Наиболее распространенный сегодня способ изготовления проводов на основе висмутовой керамики $BiPbSrCaCuO$, названный «порошок в трубе», состоит в следующем. Исходная композиция соответствующих окислов (или нитратов) несколько раз обжигается (с размолотом после каждого отжига) и в виде порошка набивается в трубку из серебра (с толщиной стенок ~1 мм и диаметром ~5 мм). Трубка протягивается

в провод диаметром 1 мм, а затем прокатывается в ленту прямоугольного сечения 3×0.1 мм². Наконец, эту «сырую» ленту отжигают и прессуют в горячем состоянии. Описанная механическая обработка приводит к тому, что ориентация и форма монокристаллических сверхпроводящих гранул, из которых состоит материал, уже не случайны — большая их часть (~90 %) представляет собой тонкие пластинки размером $\sim 10 \times 10$ мкм², расположенные почти параллельно плоскости ленты. Такой материал называют текстурированным.

Основу технических сверхпроводящих материалов составляли в то время два НТСП-материала. Первый из них — деформируемый сплав Nb–Ti со следующими параметрами: критическая температура 9,6 К при нулевых магнитном поле и токе, критическое магнитное поле 12 Тл при 4,2 К (температура кипения жидкого гелия при нормальном давлении), нулевом токе и критической плотности тока, равной при 4,2 К и в магнитном поле 5 Тл. Стоимость такого материала не превышает нескольких долларов.

Вторым сверхпроводником, освоенным промышленностью несколько позже, было интерметаллическое соединение Nb₃Sn, которое расширило диапазон рабочих температур и магнитных полей для сверхпроводниковых устройств. Сами технические сверхпроводящие провода представляли собой сложные композитные конструкции из разнородных материалов с ультратонкими (до долей микрона) нитями собственно сверхпроводника.

Наукоёмкая технология их изготовления была освоена СССР, США, Японией, ФРГ и другими индустриально развитыми странами. С середины 1960-х годов, когда начались исследования по прикладной сверхпроводимости, в развитых странах разрабатываются сверхпроводниковые варианты практически всех основных электротехнических устройств, которые генерируют, передают, преобразуют и потребляют электроэнергию в промышленном масштабе. В России в течение последних 20 лет созданы и испытаны представительные модели и опытно-промышленные образцы сверхпроводниковых турбогенераторов мощностью от 1 до 20 МВА, изготовлены турбогенератор мощностью 300 МВА, коллекторные и униполярные двигатели мощностью до 10 МВт, системы движения для морского и железнодорожного транспорта, трансформаторы, токоограничители, гибкие и жесткие линии электропередач, индуктивные накопители энергии.

Это оборудование действительно продемонстрировало выигрыш в КПД и массогабаритных показателях по сравнению с традиционным. И хотя были очевидны пути повышения его надежности до уровня требований энергетических стандартов, промышленного распространения оно не получило. Выйти на коммерческих основаниях за пределы экономических и психологических барьеров смогли три типа сверхпроводниковых устройств гелиевого уровня температур: магниторезонансные томографы со сверхпроводящими магнитами, сверхпроводниковые сепараторы и малые индуктивные накопители энергии.

В 1986 г. были открыты высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) с критическими температурами перехода в сверхпроводящее состояние, быстро достигшими величин, заметно превышающих 77,3 К, т. е. температуру кипения жидкого азота при нормальном давлении. Появилась возможность вместо невозобновляемого и дорогого хладагента — жидкого гелия — использовать жидкий азот. Однако она могла быть реализована, если бы удалось разработать технологию технических ВТСП-материалов с необходимыми эксплуатационными качествами и приемлемой стоимостью. Между тем из-за очень плохих механических свойств ВТСП, являющихся по сути керамикой, создание технологии токонесущих элементов из ВТСП-материалов оказалось неизмеримо более сложной задачей, чем технологии сверхпроводящих обмоточных материалов гелиевого уровня температур.

В настоящее время разрабатываются две конструкции ВТСП-кабелей, принципиально отличающихся друг от друга, — с теплым и с холодным (т. е. находящимся при криогенных температурах) диэлектриком. В конструкции с холодным диэлектриком токонесущий элемент кабеля окружен коаксиальным сверхпроводящим слоем, предназначенным для экранирования магнитного поля. Диэлектрик, «пропитанный» жидким азотом, располагается между токонесущим элементом и внешним экранирующим слоем. Целью такой конструкции является устранение потерь на переменном токе, вызванных воздействием магнитного поля, создаваемого токами в соседних фазах, а также вихревыми токами, наведенными в металлических частях соседнего оборудования.

В настоящий момент технология керамических сверхпроводников все еще находится в стадии становления из-за частичной нестабильности оксидных ВТСП-материалов, их высокой хрупкости и анизотропии. Ленточные провода изготавливаются сейчас преимущественно на основе соединения Bi₂Sr₂CaCu₂O_x в серебряной оболочке (Bi–2212/Ag). Производятся также ленточные провода на основе соединения Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x в серебряной оболочке (Bi–2223/Ag). В настоящее время этот материал активно используется в разработках электротехнического оборудования. По-прежнему остро стоит задача совершенствования технологии материала Bi–2223/Ag в целях улучшения его механических свойств. Начат выпуск массивных материалов на основе соединения YBa₂Cu₃O_{7-x} (или NdBa₂Cu₃O_{7-x}), которые в режиме замороженного поля конкурируют с такими постоянными магнитами, как Nd–Fe–B.

Эти соединения очень перспективны для создания длинномерных токонесущих элементов с высокой плотностью тока ($\sim 10^9 \text{ А}\cdot\text{м}^{-2}$) при 77,3 К в полях до 5 Тл. В промышленности переход от низкотемпературных сверхпроводников к высокотемпературным несет в себе возможность повышения рабочих температур сверхпроводящих устройств вплоть до азотных, замены жидкого гелия на жидкий азот, очевидное упрощение системы криостатирования и сокращение в сотни раз связанных с этим эксплуатационных расходов. Кроме того, ВТСП-устройство более устойчиво к внешним возмущениям, а криогенная система азотного уровня более надежна в эксплуатации.

Сильноточные сверхпроводниковые технологии ныне вышли на уровень, на котором при их использовании возможно создание нового поколения электроэнергетического оборудования, существенно превосходящего оборудование традиционного (резистивного) исполнения. Это достигается за счет более высокой эффективности, уменьшения в два–три раза массогабаритных показателей и соответственно материалоемкости и энергозатрат на изготовление, повышения надежности и срока службы до требований электроэнергетики XXI столетия, качественных характеристик энергосистем, экологической безупречности сверхпроводникового электрооборудования, меньшей капитальной стоимости при массовом производстве и цене сверхпроводника, не превышающей 10...15 долл. за 1 кА Ч м.[2]

К настоящему времени прошли успешное испытание представительные образцы электротехнического оборудования в сверхпроводниковом исполнении, в первую очередь, на базе ВТСП-технологии: электромшины мощностью порядка мегавольт–ампер, трансформаторы мощностью до 1,5 МВ Ч А, участки кабельных линий электропередачи, рассчитанные на мощность до 440МВЧА, и сверхпроводниковые токоограничители мегавольт–амперного диапазона. Объемная текстурированная ВТСП YBCO–керамика со структурой квазимонокристалла является перспективным материалом для использования в магнитных подвесах ряда электромеханических устройств – магнитных подшипниках, маховиковых накопителях энергии, электродвигателях.

Еще до открытия ВТСП, в эру низкотемпературных сверхпроводников, исследования и разработки по сверхпроводниковой электронике успешно развивались. Причина тому – уникальные возможности, которые открыло использование явления сверхпроводимости перед радиоэлектроникой (высокие, близкие к предельным достижимым чувствительность и точность измерительных средств, высокая добротность резонансных систем, миниатюризация многих ответственных устройств радиотехники и электроники), а также низкая материалоемкость этих устройств и скромные требования к мощностям охлаждающих систем. Как у нас в стране, так и за рубежом были разработаны и испытаны сверхчувствительные измерители магнитного потока, тока и напряжения, создан квантовый эталон Вольты, уникальные магнитометры и градиентометры, приемники излучения, превосходящие самые совершенные полупроводниковые устройства. Часть из них, например сверхпроводниковые болометры и стробоскопические приставки к осциллографам, выпускалась малыми партиями преимущественно небольшими фирмами. При этом использовался в основном сверхпроводник Nb/AlOx/Nb.

Широко ведутся сегодня работы, направленные на создание и исследование тонких пленок высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводниковых материалов, необходимых для малошумящих смесительных приемных устройств субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов волн, а также однофотонных детекторов пикосекундного временного разрешения ИК- и дальней ИК-областей, предназначенных соответственно для радиоастрономии, спутникового и наземного дистанционного контроля состояния озонового слоя и загрязнения верхних слоев атмосферы, а также для применения в волоконной оптике, электронике, спектроскопии быстротекущих процессов и исследований свойств вещества. На основе пленок сверхпроводника NbN созданы смесители терагерцового диапазона частот с шумовой температурой 1000 К на частоте гетеродина 1 ТГц и 2000 К на частоте 2,5 ТГц. Полоса преобразования смесителя составила 4,5 ГГц.

Сверхпроводниковую электронику принято подразделять на три подобласти: пассивные сверхпроводящие элементы, СКВИД–электроника (сверхпроводящие квантовые интерферометрические устройства) и цифровая техника с большим количеством, как правило, джозефсоновских переходов.

Смена низкотемпературных сверхпроводников высокотемпературными важна с точки зрения не только рабочих температур пассивных СВЧ-устройств, но и расширения рабочего диапазона частот до сотен гигагерц. При этом использование сверхпроводимости приводит к малым потерям, практическому отсутствию дисперсии сигнала, возможности управлять параметрами устройств за счет изменения реактивных или резистивных свойств под внешним воздействием. Это распространяется на широкий спектр пассивных СВЧ-устройств: линии передач, линии задержек, полосовые фильтры, амплитудные и фазовые модуляторы, переключатели и ограничители СВЧ-мощности, малогабаритные антенны, как приемные, так и передающие, резонаторы и др. Разработаны, успешно испытаны и начали эксплуатироваться сверхпроводниковые спутниковые системы связи, миниатюризированные и с повышенной пропускной способностью; системы связи с подвижными объектами (сотовой

связи) третьего поколения, в которых применяются ВТСП-фильтры СВЧ-диапазона с уникальными характеристиками: шириной полосы пропускания 20 МГц, потерями на проход менее 0,5 дБ, затуханием вне полосы 85 дБ, крутизной склонов частотной характеристики 100 дБ/МГц и рабочей температурой 60 К. Кроме того, созданы системы перестраиваемых ВТСП-фильтров для локационной техники. Здесь уместно отметить, что криостатирование подобных устройств обеспечивается микроохладителями, масса которых – единицы или десятки килограмм, а срок непрерывной работы до 40...50 тыс. ч. Отметим также, что основным рабочим ВТСП-веществом современной сверхпроводниковой электроники является соединение $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В СКВИД-электронике используется непревзойденная чувствительность СКВИДов (10^{-14} Тл/Гц) к изменению магнитного потока. Благодаря этому СКВИДы находят применение в прецизионных приборах, измеряющих предельно малые токи, напряжение и изменение магнитного потока. По этим параметрам можно оценивать многообразные свойства и явления – от перемещения в пространстве до химического превращения. Технология ВТСП-СКВИДов быстро совершенствуется. Из-за проблемы температурных шумов НТСП-СКВИДы, работающие при 4,2 К, будут всегда иметь определенное преимущество перед СКВИДами, функционирующими при азотных температурах, но область использования ВТСП-СКВИДов значительно расширяется за счет упрощения эксплуатационных проблем. В этой связи весьма интересными представляются разработки нового поколения магнитометрических систем неразрушающего контроля, необходимых, в первую очередь, атомной, авиационной и космической промышленности. Весьма перспективно развиваемое в последнее время направление медицинской диагностики – магнитокардиография и магнитоэнцефалография [8].

В области цифровой, или дискретной, сверхпроводниковой электроники происходит постоянный рост числа элементов на одном чипе, и по-прежнему заветной целью является создание устройств с тактовой частотой более 100 ГГц и энерговыделением на один вентиль менее 0,1 мкВт. В наши дни все большее практическое применение находит квантовый стандарт Вольт, получаемый методом интеграции 10^4 джозефсоновских переходов на одном чипе. Он обеспечивает напряжение $V = 10 \pm 10^{-7}$ В. В то же время в космическом эксперименте на спутнике ARGOS, наряду с пассивными сверхпроводниковыми элементами, испытывались сверхпроводниковые цифровые подсистемы, обеспечивающие более чем 100-кратное снижение потребления мощности при 10-кратном увеличении быстродействия и 10-кратном уменьшении массы по сравнению с современными полупроводниковыми системами на основе кремния или арсенида галлия [1].

Низкое поверхностное сопротивление тонких пленок ВТСП позволяет также воплощать миниатюрные пассивные СВЧ-фильтры, создание которых на медных пленках с приемлемыми характеристиками не представляется возможным. Использование ВТСП-фильтров в базовых станциях систем сотовой связи позволяет значительно увеличить чувствительность и избирательность приемных частей и, следовательно, уменьшить мощность излучения мобильных терминалов и увеличить время их работы от автономного источника питания. На основе материала $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ успешно реализован фильтр 4-го порядка с центральной частотой 1,77 ГГц и полосой пропускания 20 МГц. При этом собственная добротность резонансного звена составляла 7000... 10000, а вносимые потери фильтра не превышали 0,5...0,3 дБ при температуре 20 К.

Есть ли предел повышению критической температуры сверхпроводящего перехода? Этот вопрос волнует сегодня всех, кто работает в области материаловедения сверхпроводников.

Важным компонентом успеха является и совершенствование материаловедческих аспектов сверхпроводящих материалов, т. е. технологии их производства и реализации в конкретных изделиях.

Вряд ли процесс широкой интеграции в промышленность нового оборудования, основанного на применении сверхпроводимости, будет взрывным, скорее, он будет эволюционным, но с заметной скоростью нарастания. Широкое применение сверхпроводникового электротехнического оборудования, как при генерации электроэнергии, так и при ее транспортировке и потреблении позволит увеличить эффективность использования электроэнергии на 5...7 %, а, следовательно, практически на эту же величину сократить потребление первичных энергоносителей, которыми преимущественно являются органические топлива. В результате уменьшится выброс парниковых газов в атмосферу, снизится общая нагрузка на окружающую среду. Совершенно очевидно, что преобразующее значение новой технологии не ограничивается экономией первичных энергоносителей. Представляется, что такое преобразование непосредственно коснется всех областей деятельности, где в больших масштабах находит применение электротехническое оборудование, – электроэнергетики, машиностроения, металлургии, горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, наземного, морского и воздушного транспорта, атомной промышленности.

Безусловно, что наиболее ощутимый эффект принесет комплексное использование сверхпроводникового оборудования, например, полностью состоящая из сверхпроводникового оборудования электростанция или распределительная подстанция. Тогда будет более дешевой электроэнергия, более надежная работа оборудования и более благоприятной экологическая ситуация. Но и отдель-

ные виды сверхпроводникового оборудования – трансформаторы, токоограничители и индуктивные накопители – могут значительно улучшить ситуацию в существующих энергосистемах и сетях, увеличив их устойчивость, надежность и пропускную способность.

Дальнейшее развитие сверхпроводниковой техники будет зависеть от получения сверхпроводящих материалов с высокой температурой перехода и высокими эксплуатационными их свойствами, поскольку применение сверхпроводников ограничивается, в основном, их невысокими эксплуатационными свойствами. Поэтому современные сверхпроводники являют собой керамику с высокой степенью хрупкости, невысокой степенью сжатия и модуля кручения. Механические нагрузки на них, например, в электросетях, могут привести к разрушению последних [6].

Библиографический список

1. Сверхпроводимость в электроэнергетике. Будущее за сверхпроводниками. Ч. 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://elektrik.info/main/fakty/446-sverhprovodimost-budushee-sverhprovodniki.html> (дата обращения: 20.02.2014).
2. Дони́на Н. М. Возникновение квантовой электроники. М.: Наука, 1974. 345 с.
3. Василевский А. М. Сверхпроводимость в оптической электронике. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 344 с.
4. Верещагин И. К. Введение в оптоэлектронику. М.: Высш. шк., 1991. 320 с.
5. Клышко Д. Н. Физические основы квантовой электроники. М.: Наука, 1986. 287 с.
6. Новые материалы / под ред Ю. С. Карабасова. М.: Изд-во МИСИС, 2002. 736 с.
7. Химическая энциклопедия: в 5 т. / под ред. И.Л. Кнунянца. М.: Советская энциклопедия, 1990.
8. Мейлихов Е.З. Токи в ВТСП-керамиках: преодоление границ // Природа. 1999. № 3. С. 49–58.