

С.Я. ПЛОТКИН

Институт естественных наук АН СССР

Москва, СССР

Эволюция представлений о роли материалов в научно-техническом прогрессе (на примере материалов, применяемых в электронике)

В истории техники целые эпохи характеризовались, как известно, именно тем материалом, который преимущественно использовался для изготовления орудий труда. Изобретение металлических орудий и их применение произвело революцию в жизни общества и отразилось на специальном прогрессе человечества. Первые государства возникли именно в эпоху раннего металла – в начале II тысячелетия до н.э. Главные доисторические периоды развития человечества определяются по материалам того времени – камню, меди, бронзе, железу – знаменитой триаде веков, предложенной в 30-х годах прошлого века Л. Томсоном. Металл превратился в основу технического и культурного развития, стал основным всеобщим эквивалентом ценности. С устройством металлов из обихода людей было уничтожено введение цивилизованного образа жизни, – отмечал Г. Агрикола.

Рассматривая пути практического освоения материалов, обращает на себя внимание то, что механические свойства /прочность, твердость, упругость, ковкость и т.д./ во многих случаях были основными критериями при отборе материала, благодаря чему они прочно вошли в историю материальной культуры. Но по мере расширения круга используемых свойств появилась тенденция перехода от преимущественного использования механических свойств материала к использованию его различных физических, физико-химических и других свойств. Эта тенденция, наблюдаемая для техники в целом, характерна также и для материалов, применяемых в электротехнике. Следует отметить важное обстоятельство: каждый материал, обладая

* Статья представлена в Международной летней школе по электронным материалам /г.

Делфт-Норв 1976.

различными свойствами, приобретает и новые области применения и практическое использование каждого вновь открытого свойства уже существующего материала нередко приносит в технику не менее важные изменения, чем новый вид материалов. Так на примере известно, что использование новых свойств материала содействовало изобретению ламп накаливания, электрических машин, систем передачи электроэнергии и коммутации.

Постепенно появились новые требования к материалам. Так, если материалы для изготовления машин и механизмов XVIII - начало XIX в. должны были отвечать главным образом требованиям прочности, иметь определенные механические характеристики и должны были подвергаться обработке механическими методами, то уже материалы для электротехники должны были отвечать, кроме того, и физическим требованиям, обладать определенными электрическими, магнитными и термическими свойствами. Это в свою очередь ускорило развитие технической физики, создание начальных элементов теории твердого тела, некоторых разделов химии и новые области металлургии.

История энергетической техники - это история постепенного практического овладения и использования материалов, свойства которых обеспечивают эффективные действия того или иного устройства. Конец XIX века связан с использованием в электротехнике многих видов материалов - проводников тока, изоляторов, магнитных материалов, позже - полупроводников, ферромагнитников и др. При этом, каждый вид применяемого материала имеет свою историю. Так стимулом к изучению электрических свойств материалов послужил случай, когда в 1857 г., было обнаружено, что электропроводность некоторых сортов меди составляет 14% электропроводности лучших сортов меди. Последующие измерения электрического сопротивления стали одним из основных принципиальных методов изучения любых типов материалов.

Электрические проводники были обнаружены еще в то время, когда электричество получали путем трения. Ими оказались общеизвестные металлы, однако, потребовались века, прежде чем были получены материалы, стойкие против окислению. Они были необходимы для нужд высокотемпературной электротехники. В дальнейшем эмпи-

рические открытия фотопроводимости селена, первые детекторные радиоприемники, и, наконец, создание радиолокационных установок, выявили свойства полупроводников.

Современный метод порошковой металлургии, забытый после его открытия /1826/ на несколько десятилетий, получил свое второе рождение и вновь стал применяться прежде всего в электротехнике в первой четверти XX в. при изготовлении электрических ламп накаливания с металлической /вольфрамовой/ нитью. С тех пор дальнейший прогресс электротехники тесно связан с использованием метода порошковой металлургии.

Применение метода порошковой металлургии позволило изготавливать, например, медно-графитные щетки для динамомашин и электроламп накаливания с металлической /вольфрамовой/ нитью. С тех пор дальнейший прогресс электротехники тесно связан с использованием метода порошковой металлургии.

Применение метода порошковой металлургии позволило изготавливать, например, медно-графитные щетки для динамомашин и электромоторов, обладающие одновременно контактными и антифрикционными свойствами.

Металлокерамические материалы и детали из тугоплавких металлов и неметаллических материалов, обладающие широким диапазоном свойств стали применяться и в различных электронных и электротехнических устройствах - газоосветительных и катодных лампах, рентгеновских трубках, выпрямителях, высокотемпературных нагревателях и т.д.

Формирование современной электротехнической промышленности связано с разработкой процессов получения и применения большой серии новых или более усовершенствованных материалов со специальными свойствами - электроконтактов, электрокерамики, диэлектриков, ферритов, сверхпроводниковых и полупроводниковых материалов и т.п., созданием самостоятельного научного направления - электротехнического материаловедения.

Научно-технический прогресс, как известно, тесно связан с быстрым развитием электроники, которая возникла на прочной базе электротехники. Ныне она проникла почти во все отрасли современ-

ной науки и техники /автоматика, телемеханика, проводная связь, атомная и ракетная техника, металлургия, астрономия, минералогия, геофизика, медицина, биология и др./.

Развитие электроники в значительной степени объясняется развитием радиотехники. Обе эти области техники развиваются в тесной взаимной связи /их часто объединяют и называют радиоэлектроникой/.

Фундамент возникновения электроники был заложен работами физиков XVIII-XIX веков. Особенно важное значение имела электронная теория, разработанная в конце XIX - начале XX веков. Достижения физики твердого тела легли в основу принципов, позволивших перейти к конструированию новых материалов с требуемыми свойствами.

Учение о твердом теле, теория которого была развита в третьем десятилетии XX в. во многом определяет достижение техники в области микроэлектроники. Но до создания этой теории существовал диалектический неизбежный период развития многих представлений и накопления знаний в области естественных наук. На раннем периоде это были - кристаллография и химия, на более позднем - квантовая теория.

Первые научные исследования электрических и магнитных явлений были начаты Гильбертом /XVIII в./, которому и принадлежит термин "электричество". Электрическими опытами занимались Ньютон /1675/ и другие члены Лондонского королевского общества: Вольт, Грей, открывший электропроводность тел. Используя опыты своих предшественников, французский естествоиспытатель Дюфе создал теорию электрических явлений. Исследования электрических разрядов в воздухе впервые были осуществлены Ломоносовым и Рихманом и, независимо от них, Франклином. Эпинус открыл поляризацию диэлектриков. Выдающиеся экспериментальные и теоретические исследования /взаимодействие электрических зарядов и магнитных полюсов, закон кручения и др./ принадлежит Кевиндигу, Кулону, Вольту, Амперу и др. Важным событием явилось открытие электрической дуги /Петров, 1802 г./. С середины XIX в. многие исследователи изучали процесс прохождения электрического тока в разряженных газах.

Прогресс электротехники и создание электроники связывается со следующими основными открытиями и изобретениями: электромагнитные волны /Максвелл, 1873 г./, электровакуумный прибор - лампа накаливания /Лодыгин, 1873 г./, явление фотоэлектрического эффекта /Герц, 1874/, термоэлектронные эмиссии /Эдиссон, 1884/, основные законы фотоэффекта, положившие начало для изобретения телевизионной трубки /Столетов, 1888 г./, полупроводниковые элементы /Ульянин, 1888 г./, электродуговые трубки /Браун, 1897 г./, повышение электронной эмиссии проволок /Венельтон, 1904 г./, объяснение фотоэффекта на основе теории квантов /Эйнштейн, 1905 г./, газонаполнительный диод - газотрона /Хелл, 1905 г./, триод /Ли де Форест, 1906 г./, электродуговые трубки для телевизионных изображений /Розинг, 1907 г./, четырехкатодные лампы /Коваленков, Ленгмюр, 1912 г./ и др. Крупнейшие выдающиеся открытия и изобретения в разнообразных областях электротехники, а том числе и радиотехники сделаны Н. Тесла /1900-1930 гг./

Все эти открытия и изобретения связаны с разработкой и применением новых материалов.

Начало современной электронной техники относится до времени изобретения триода. Способность триода генерировать электромагнитные колебания /Мейснер, 1913 г./, позволили применять лампы генераторы. Исследования распространения ультракоротких волн содействовало созданию в 30-х годах XX в. первых радиолокационных станций, а затем освоению диапазона ультракоротких волн и появлению новых типов электронных ламп. Важным этапом, определившим возможность использования электромагнитных волн для целей беспроводной связи - это впервые сконструированный радиоприемник Поповым. Первые опыты по передаче и приему электромагнитных волн проводились на расстоянии до 60 м ...

Герц не предвидел возможность применения электромагнитных волн в технике. Естественно, трудно было установить в слабых искорках, которые Герц рассматривал в лупу, будущее средство связи, перекрывающее ныне космические расстояния до Венеры и позволяющие управлять аппаратом на луне ...

Вообще в истории науки нередко между принципиальными открытиями и техническим применением лежит огромное расстояние. Эйнштейн, например, не предвидел в обозримом будущем возможные пути реализации соотношения $E = mc^2$. Резерфорд, обесмертивший свое имя в исследовании строения атома, считал фантазией использование атомной энергии. Более 50 лет потребовалось для практической реализации научных идей телефона, 35 лет радиовещания, 14 лет телевидения.

Характерная черта нашей эпохи - это быстрое сокращение сроков реализации научных открытий. Так, идея кибернетических устройств была реализована в 10 лет, создание транзистора потребовало всего 5 лет и т.д.

Более 20 лет прошло после получения титана в чистом виде /1925 г./ и только в 1948 году он стал применяться в промышленности быстрыми темпами. Сейчас потребление титана превышает потребление хрома в 20 раз, никеля в 30 раз, вольфрама и молибдена - в 100 раз. Цирконий долгие годы использовался только в виде соединений в огнеупорах; в чистом виде был получен в 1908 году и был тогда лабораторной редкостью. После же применение циркония в новых отраслях техники, в частности, в электронике, его производство необычайно возросло. Берилий, неодим, тантал, открытые много времени назад, начали широко использоваться накануне второй мировой войны /1939-1945 гг./

В 50-60-х годах в связи с быстрым развитием новых отраслей техники в круг используемых материалов включены почти все элементы периодической системы, и, в первую очередь, редкие, особенно, тугоплавкие металлы и сплавы. Многие из них в свободном состоянии, а также в форме различных соединений нашли широкое применение в электронике.

x x x

Развитие электроники после изобретения разделяется на три этапа: радиотелеграфный, радиотехнический и собственно электроника. Переход от одного этапа к другому стал возможным благодаря успехам в изучении свойств материалов.

Переход от длинных волн к средним и коротким, создание электронных устройств, потребовало создания не только новых конструкций и схем, но и новых материалов, либо использования иных свойств прежних материалов.

К ним, прежде всего, относятся полупроводниковые материалы, которые, наряду с полимерами, представляют основные материалы XX в. Полупроводники – это круг материалов, которые позволяют, благодаря гибкому управлению электронной проводимостью, обеспечить разнообразный и широкий диапазон их качеств. Это дает возможность создать новые классы радиоэлектронных приборов.

Производство высококачественных полупроводниковых материалов – сложный процесс, представляющий собой сочетание химических, металлургических и механических процессов.

Известно, что полупроводники были давно известны как материалы с рядом особых свойств, которые, однако, широко используются только теперь. В трудах ряда авторов начала XIX в. при исследовании ими свойств различных материалов можно встретить упоминание о материалах и их свойствах ныне называемых полупроводниками. Так, Ленц, изучая свойства сурьмы и висмута, показал, что воду можно превратить в лед при помощи эффекта Шельте. Тогда же, в составленной Зеебеком таблице термоэлектрической эдс различных материалов фигурировали полупроводниковые материалы – сернистый свинец и сурьмистый цинк. Вскоре после открытия фотоэффекта /конец XIX в./ было обнаружено, что селен обладает фоточувствительностью, как было ранее замечено, в первых радиотехнических устройствах детекторы изготовлялись из полупроводниковых материалов. В 20-х годах нашего столетия впервые на основе полупроводников были созданы усилители и генераторы.

С начала 30-х годов полупроводники привлекли особое внимание исследователей. Предсказав огромное значение полупроводниковых материалов для технического прогресса и проанализировав их различные конкретные применения, советский физик А.Ф. Иоффе тогда же впервые высказал мнение, что полупроводниковые термопары могут эффективно использоваться для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.

Период до середины 40-х годов следует рассмотреть как время подготовки интенсивного развития полупроводниковой техники и широкого внедрения её в практику. Следующий этап /1946-1950 гг./ связан с созданием полупроводникового усилителя /германиевый, точечный триод - транзистор и разработка теории этого типа прибора /Шокли и др./.

В полупроводниковой технике сейчас используются главным образом следующие материалы: кремний, германий, карбид кремния, соединения П, Ш, У и VI групп таблицы Менделеева; продолжается интенсивный поиск новых материалов с полупроводниковыми свойствами.

Создание первого полупроводникового прибора оказало сильный толчок развитию полупроводниковой техники. С этого времени началось триумфальное шествие электроники. Электронные устройства стали быстро распространяться не только в радиотехнике, но и в других областях современной техники. Создание электронно-вычислительных машин /ЭВМ/ /середина 50-х годов/ явилось замечательным достижением человеческой мысли.

Выдающаяся роль в развитии электроники, как и во многих других областях техники играют магнитные материалы. Применение этих материалов наглядно иллюстрирует, как порою практические достижения в какой-либо области опережают теоретические представления используемого явления. Особые свойства магнитов стали известны в древности - с тех пор, когда впервые были открыты рудные залежи. Но причина магнитных свойств некоторых материалов долгое время не была изучена. Только в наши же дни теория магнетизма разработана полностью и магнитные материалы получили широкое применение.

Первые изобретения в области применения электрического тока - телеграф, телефон, электродвигатель, электрогенератор и др. основывались на применении ферромагнетиков. Изобретение радио и развитие дальней связи, телевидения, электронных счетно-решающих устройств, объединенных в большой самостоятельный раздел называемый ныне электрокибернетикой, еще более повысило значение ферромагнитных материалов.

Потребовались годы труда многих исследователей разных стран, чтобы сделать возможным использование ферритов в современной технике. Впервые они были применены в 30-х годах в качестве сердечников колебательных контуров радиоприемников; такие сердечники,

спрессованные из порошка натурального магнетита, имели в то время широкое распространение. К концу 40-х годов были разработаны двойные ферриты. Обладая уникальными свойствами, они стали применяться в электронных приборах.

К е р а м и к а - один из древнейших неорганических твердых материалов, который был структурно видоизменен человеком. До конца XIX в. керамические изделия основывались на использовании сырья - глины, каолина. В настоящее время представление о керамическом производстве значительно расширилось. Сейчас - это широкий спектр твердых тел: от бытовых керамических изделий и кончая искусственными рубинами и сапфирами, от огнеупоров до тончайших деталей электронных приборов. Кроме традиционных изделий, - это в первую очередь новые синтетические материалы в виде радиофарфора, магнитно-керамических изделий, сегнетозлектриков, полупроводниковой керамики, керамики для радиоэлектроники, исходных продуктов для выращивания монокристаллов используемых в квантовых генераторах. Важное значение имеют изделия из чистых окислов /оксидная керамика/ и керамико-металлических композиции /керметы/, приобретающие в результате взаимодействия исходных компонентов новые специфические свойства. Созданы и в возрастающем количестве применяются радиопрозрачные материалы, пропускающие радиоволны без поглощения. Специальные окисные материалы, обладающие энергетической и термической стабильностью, находят применение в радиотехнике, а также в ракетно-реакторостроении и, по-видимому, найдут применение в устройствах по прямому преобразованию тепловой и химической энергии в электрическую.

В последние десятилетия применяется так называемая стеатитовая керамика, предназначенная для изделий, используемых в высокочастотной аппаратуре. Эти изделия обладают высокой механической прочностью и небольшими диэлектрическими потерями.

Широкое применение стекла, как конструктивного материала, в электронной технике обуславливается тем, что изменением состава

ва стекла можно в достаточно широких пределах менять его свойства. Стекло – является представителем материалов, технологическая обработка которых в значительной степени определяет свойства вырабатываемых из них деталей, например, радио и электроизоляторов.

Стеклокристаллические материалы, занимающие промежуточное положение между стеклом и керамикой /ситаллы, стеклокерамы/ – это материалы гетерогенной макрокристаллической структуры, которые можно менять в зависимости от химического состава и степени условий кристаллизации. Они характеризуются малыми диэлектрической постоянной.

Проблема синтеза новых материалов, определяющих технический прогресс электронной техники тесно связан с получением чистых и сверхчистых веществ. Строгая дозировка электроактивных примесей и их локализация в кристаллической решетке является одним из важных процессов при синтезе полупроводниковых материалов. Изобретение транзистора ускорило развитие современной теории твердого тела, а также и теории и практики глубокой очистки вещества.

Представление о чистом веществе не является статичным. Оно изменяется по мере углубления и развития знаний о веществе, появления новых идей и методов исследований. Примерно 100 лет назад впервые было получено небольшое количество очень чистого серебра, что позволило уточнить его атомный вес. Полученный металл служил в качестве международного эталона.

Другие металлы /например, платина/ также были очищены до довольно высокой степени чистоты. Тогда же было установлено, что по мере повышения чистоты металлов, выявляются их новые качества, завуалированные влиянием даже очень малых количеств примесей.

На протяжении нашего века стандарты чистоты некоторых металлов сильно изменилось. Например, в 1900 году чистота цинка определялась 98%, свинца – 98,7%, никеля – 98%. Далее происходит постоянное повышение требований к чистоте металла. В 60-е годы нашего столетия чистота этих металлов соответствовала: 99,99999%; 99,9999%; 99,999%. В наши дни требования к очистке материалов

исключительно возросли, содержание примесей в некоторых случаях ограничивается одним атомом на миллионы и даже миллиарды атомов основного вещества. Полупроводниковые свойства, например: германия, кремния удалось обнаружить только для ультрачистых образцов этих элементов.

Пожалуй, ни в одной области техники не наблюдалось столь быстрая эволюция новых методов, как в технологии получения сверхчистых веществ. В корне изменилось понятие о химически чистом веществе. Понятие "чистое вещество" в традиционном химическом смысле уже недостаточно для полной характеристики материала. Помимо содержания примесей, необходимо учитывать еще и стехиометрию, чистоту поверхности, плотность кристалло-графических дефектов, и т.п. Именно здесь ярко проявлено использование достижения ряда фундаментальных наук, вызванное потребностью практики, прежде всего электронной техники.

В 50-60-е годы стали разрабатываться и широко применяться новые физические и физико-химические методы анализа микропримесей, был создан комплекс средств получения чистых веществ - ионообменная хроматография, иодидный метод, дуговая электроннолучевая, плазменная и лазерная плавки, ректификация, вакуумная кристаллизация, зонное рафинирование с различными источниками нагрева и т.д. Была решена проблема выращивания монокристаллов тугоплавких и редких металлов, в том числе и самого тугоплавкого металла - вольфрама.

Широкая миниатюризация электронной техники - важная тенденция современного научно-технического прогресса. Ее следующий этап - микроатюризация электронных приборов и устройств. Возникновение микроэлектроники, создание печатных схем, повышение надежности аппаратуры, появление сверхбыстродействующих приборов и т.д. - все это сопровождалось и было обусловлено созданием и подбором соответствующих материалов и улучшением их основных физико-технических и технологических характеристик. Специалисты, занятые созданием микроэлектронной аппаратуры и материалов, оказались вовлеченными в сферу новых идей и технических решений.

М и к р о э л е к т р о н и к а – это более широкое понятие чем просто размещение большого числа компонентов в малом объеме. Это качественно новая ступень материаловедения, технологии изготовления изделий и устройств, их надежности, универсальности и практической значимости.

Прогресс микроэлектроники протекает быстрыми темпами и он связан с разработкой новых материалов. Весьма перспективным направлением микроэлектроники является функциональная электроника, которая в свою очередь вызвала развитие оптоэлектроники, акустоэлектроники.

Новые магнитные материалы /слабые ферромагнетики и магнитные полупроводники/ привели к созданию магнитоэлектроники.

Интересными материалами с еще не вполне раскрытыми перспективами использования их в микроэлектронике являются органические полупроводники.

Следует также сказать, что явления живой природы, в частности на молекулярном уровне, позволяют использовать принципы хранения и обработки информации в живых системах. Решается сложная проблема эффективной связи "человек-машина". Это явление, основано, прежде всего, на использовании усовершенствованных материалов. Оно открывает новое направление – биоэлектронику.

Итак, микроэлектроника как новое направление техники, имеет ряд особенностей не только в решении технических проблем создания интегральных микросхем, но и в разработке новых материалов.

С развитием микроэлектроники создается, по существу, новый раздел металлургии, тесно связанный с электроникой, все чаще называемый микрометаллургией или прецизионно металлургией.

История миниатюризации современной электроники начинается с конца 40-х годов XX в., когда она становится предметом научных исследований; в то время был создан транзистор, заменивший громоздкую аппаратуру и быстро нагревающую хрупкую электронную лампу. Однако искусство изготовления миниатюрных изделий привлекало людей уже много столетия назад.

Мастера Востока и Запада создавали устройства столь малых размеров, что их детали можно было рассмотреть только при увеличении. Известны модели кораблей с пушками размером 2-3 см, шарикоподшипники - не больше часового камня.

Идеи миниатюризации встречаются в исследованиях ученых конца прошлого века. Усовершенствуя опыты Герца по электромагнитной теории света русский физик, почетный член Королевского общества в Лондоне - Лебедев уже в эпоху зарождения радиотехники стремился к миниатюризации приборов для изучения и исследования электромагнитных волн, наметив современное направление конструкторской мысли в этой области. Генератор Лебедева состоял из двух платиновых цилиндров, каждый по 1,3 мм длиной и 0,5 мм в диаметре; высота зеркал - 20 мм и азбонитной плазмы - 18 мм, вес - менее 2 г /призма Герца весила 60 кг/. Столь же малы были дву-преломляющие призмы из ромбической серы. Приборы Лебедева были крайне малы, и как заметил итальянский физик Риги /разработавший в 1894 г. метод получения коротких волн/, лебедевские приборы можно носить в жилетном кармане ...

С начала 50-х годов миниатюризация развивается настолько быстро, что понимание самого термина непрерывно менялось: микроминиатюризация, субминиатюризация, ультраминиатюризация и др.

х х х

В заключении нашего обзора, отметим следующее:

1. Роль материалов в ходе научно-технического прогресса подтверждается большими поворотами в истории материальной культуры, определяемыми использованием известных и неизвестных ранее веществ. Материалы оказывают существенное влияние на развитие производственных сил и являются одной из основ цивилизации.

2. Пытаясь проследить нити, связывающие прошлое с настоящим, раскрыть в современном учении о материалах следы прошлого, отметим, что в XX в., особенно, в наши дни, постоянно стираются строгие границы между наукой и техникой, происходит процесс технизации науки, заметно исчезают различия в стиле, мышлении и приемах работы науки и техники.

3. Общим условием создания принципиально новых видов техники является новый шаг в освоении использовании материалов.

Развитие энергетической техники – это история постепенного овладения новыми видами энергии, каждый этап которого связан с использованием новых материалов. Именно поэтому, в частности, электроника получила столь быстрое развитие, заняла ведущее положение в современной технике и прогресс её определяет не только создание и совершенствование новых областей техники и производства, но и оказывает существенное влияние в различных сферах духовной жизни, например, в общественных, гуманитарных науках /лингвистика, статистика, демография, экономические, исторические, юридические и др./.

4. По мере развития техники и производства увеличивается общее число используемых материалов и их полезных качеств, увеличиваются и расширяются требования к их физико-техническим параметрам. Взаимосвязь и взаимозависимость материалов определяет качественное изменение в производстве.

5. В результате ассимиляции эмпирических данных о материалах, а также достижений химии, физики, физической химии, кристаллографии, химии и физики твердого тела и других дисциплин, сформировалось самостоятельная наука о материалах – материаловедение – это пограничная область знаний между естественными техническими, теоретическими и прикладными науками и как крупный её раздел – электроматериаловедение.

6. На примере эволюции представления о материалах, /в частности применяемых в электронике/, видно, что в период современной научно-технической революции поток идей от естествознания через технические науки к технике все более превышает обратный поток, идущий от производства, Наука о материалах – материаловедение прокладывает важнейшие пути технического прогресса и открывает новые возможности его осуществления; в то же время технический прогресс, актуальные проблемы практики, производства служат как бы стимулом дальнейших революционных изменений в науке.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В.: Материалы в радиоэлектронике, Москва-Ленинград, Госэнергоиздат, 1961
2. Новые материалы в технике, Москва, Гостоптехиздат, 1962
3. Дроздов Н.П., Никулин Н.В.: Электроматериаловедение, Москва-Ленинград, Энергия, 1963
4. Ферриты. Перевод с японского под ред. Т.Такаси, Москва, Прогресс, 1964
5. Новые материалы в технике и науке /прошлое, настоящее, будущее/, Москва, Наука, 1966 /общие вопросы, полупроводники/
6. Сверхчистые металлы, Москва, Металлургия, 1966
7. Лебединский М.А.: Электровакуумные материалы, Москва-Ленинград, Энергия, 1966
8. Гальперин Б.С.: Непроволочные резисторы, Ленинград, Энергия, 1968
9. Будников П.П.: Неорганические материалы, Москва, Наука, 1968
10. Бруштейн В.Ш., Будкин И.А., Израйлович С.Г.: Автоматизация горячего литья радиокерамики, Ленинград, Энергия, 1969
11. Будников П.П., Пивинский Ю.Е.: Новые керамические материалы, Москва, Знание, 1968 /серия Химия, вып. 10/
12. Кривокурова Р.В.: Филосовский камень XX в., Москва, Наука, 1969
13. Современные материалы. Сборн. под ред. Кардонского В.М., Москва, Мир, 1970
14. Черных Е.Н.: Металл, человек, время, Москва, Наука, 1972
15. Савицкий Е.М., Бурхалов Г.С.: Перспективы развития металлостроения, Москва, Наука, 1972
16. Савицкий Е.М.: Перспективы развития металлостроения, Москва, Наука, 1972
17. Дубинин Г.Н., Авраамов Ю.С.: Конструкционные, проводниковые и магнитные материалы, Москва, Машиностроение, 1973
18. Жеребцов И.П.: Основы электроники, Москва, Энергия, 1974
19. Плоткин С.Я., Самсонов Г.В.: Аспекты истории науки о материалах, Варшава, Квартальник истории науки и техники, 4, 1974
20. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г.: Материаловедение, Москва, Прогресс, 1975