

Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана
Калужский филиал

А. П. Коржавый, В. И. Капустин, Г. В. Козьмин

**МЕТОДЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ
В ИЗБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
ЗАЩИТЫ ПРИРОДЫ И ЧЕЛОВЕКА**

Под редакцией проф. *А. П. Коржавого*



Москва 2012

УДК 533.9.01; 538.975; 502 (631.95)

ББК 32.85

К66

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *Н. П. Есаулов*;

д-р техн. наук *В. В. Прасицкий*;

д-р техн. наук, проф. *С. И. Черняев*

Коржавый А. П.

К66 Методы экспериментальной физики в избранных технологиях защиты природы и человека / А. П. Коржавый, В. И. Капустин, Г. В. Козьмин; Под ред. А. П. Коржавого. — М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — 352 с.

ISBN 978-5-7038-3627-9

В книге изложены избранные методы экспериментальной физики, созданные на основе вакуумных СВЧ-, газоразрядных лазеров и приборов отпаянного типа для защиты окружающей природной среды и человека: показана исключительная роль методологии разработки отпаянного прибора, когда эмиттирующий заряженные частицы источник (катод, электрод), размещенный внутри его полости, есть основной элемент единой замкнутой системы; приведены особенности использования такой системы в устройствах обеспечения жизнедеятельности и сохранения здоровья человека.

Для бакалавров, магистров и аспирантов, научных работников и специалистов, работающих в сфере прикладной физики для техносферной безопасности.

УДК 533.9.01; 538.975; 502 (631.95)

ББК 32.85

© Коржавый А. П.,
Капустин В. И.,
Козьмин Г. В., 2012

© Издательство МГТУ
им. Н. Э. Баумана, 2012

ISBN 978-5-7038-3627-9

*Когда у меня рождается идея,
я сразу в воображении начинаю
строить прибор...
Я утверждаю, что воплощение
на практике сырой идеи, как это
обычно делается, является не чем
иным, как потерей энергии,
денег и времени.*

/Никола Тесла. Мои изобретения/

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

На пороге своего семидесятилетия уверен в том, что коллективный научный труд более объективен по сравнению с типовой монографией, тем более по проблеме, которой посвящена данная книга. Методология построения её материала и подход к редактированию складывался не без влияния учителей, с которыми мне в жизни просто везло.

После опустошительной для нашей страны Второй мировой войны мое поколение росло в особой обстановке: отцы навечно остались на полях сражений, а нашим матерям и их родителям пришлось очень много работать. Вокруг сел и деревень все прилегающие пространства были буквально нашпигованы различным оружием. Частично оно было собрано, но в глухих лесных массивах и оврагах его потом утилизировала сама природа. Однако еще долго после окончания войны гремели взрывы и гибли мы — любознательные мальчишки.

Нашими первыми учителями стали однорукие, одноногие, а то и вовсе обезноженные молодые парни, возвратившиеся с войны инвалидами. Они как-то потом незаметно исчезли из жизни, но успели убедительно объяснить нам, что красиво раскрашенные зажигательные снаряды и изящно исполненные мины и гранаты — это смерть. Мне повезло, и я уцелел. Дошкольное образование я получал за высоким забором деревенской усадьбы: бабушка укрощала мое любопытство розгами, а дедушка обучил немецкому языку (он

сам знал его в совершенстве, поскольку провел много лет в австрийском плену). Средняя школа в то время давала разносторонние знания. В лабораториях физики и химии, и особенно на уроках УПК, где в старших классах мы разбирали и собирали двигатели автомобиля и трактора, по-настоящему была удовлетворена моя тяга к технике и экспериментированию. Потом, в Харьковском университете [1], с этим было еще лучше. В техникуме (не помню его названия) по дисциплине УТП мы обучались токарному, фрезерному и слесарному делу. Зачет принимал мастер, когда ему предъявлялся молоток, полностью изготовленный своими руками. После третьего курса на практику, и затем, до завершения выпускных работ, мы направлялись в Украинский физико-технический институт (УФТИ) в Пятихатках (ныне туда переместился и университетский физико-технический факультет).

Блестящее поколение академиков учило нас физике: И. М. Лифшиц (теоретическая физика), А. И. Ахиезер (механика и молекулярная физика), А. Г. Ситенко (атомная физика), В. Г. Барьяхтар (элементы квантовой теории металлов). В. Е. Иванов (материалы реакторостроения) читал нам курс на английском языке. Являясь зам. директора УФТИ (а затем и его директором) и по совместительству заведующим кафедрой в университете, он создавал нам, студентам, все условия для выполнения дипломных работ в лабораториях института под руководством блестящих экспериментаторов.

Я гордился тем, что прошел такую школу, а также и тем, что после окончания университета, в новом НИИ в г. Калуге, начал работать в тех же творческих условиях: его директор Ф. И. Бусол, главный инженер А. М. Гончаренко и руководители направлений — С. И. Файфер, И. С. Болгов, В. В. Лебедев, В. И. Стрелов и др. — прибыли для работы в институт именно оттуда. Институт только создавался, и эти профессионалы нам, молодым специалистам, определили лишь направление деятельности, не ограничивая деталями. Хотя на ежеквартальных заседаниях НТС отчет каждого был обязательным. Это была хорошая школа.

Техника получения образцов и методы исследования [2–4], структуры с оксидами (планарные многокомпонентные и композиционные) в электрических и магнитных полях, в вакууме и газовом разряде и стали целью первых моих поисковых исследований [5].

Было ясно, что экспериментальные макеты, моделирующие физико-химические процессы, происходящие в реальных приборах, — первый и необходимый предмет для всестороннего изучения свойств создаваемых эмиттирующих объектов. Важно смоделировать хотя бы основные условия, в которых будут эксплуатироваться новые источники эмиссии. И зарубежные коллеги [6], и мы, понимая это, создали прежде всего технологии герметизации с целью получения надежных экспериментальных приборов [7, 8]. Методология создания таких макетов должна предусматривать адекватность форсированных режимов испытаний в них, наблюдаемым в реальных приборах. Поэтому эмиттирующие композиции для вторично-электронных, термоэлектронных, ионно-электронных катодов и электродов, их параметры и конструкции разрабатывались и реализовывались в творческом взаимодействии с главными конструкторами и основными специалистами, создающими новые сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы, газоразрядные лазеры и лампы, а также системы на их основе (Г. И. Артюх, Н. П. Есаулов, В. П. Марин, В. Н. Ильин — НИИ «Титан», г. Москва; В. А. Степанов, Л. И. Киселева, А. В. Горелик, В. Н. Дронов — НИИ газоразрядных приборов, г. Рязань; В. А. Варенцов, В. А. Гриневич, Д. П. Проценко — СКБ «Арсенал», г. Киев; А. В. Мельников, М. М. Назаренко, Ю. Д. Голяев, Э. П. Пролейко, Г. А. Чистяков — НИИ «Полнос», г. Москва; Б. З. Нейман, А. А. Анашкин, В. Д. Котов, М. А. Фурсаев — ОКБ «Тантал», г. Саратов; А. В. Рожанец, А. В. Евтеев — Дятьковский завод газоразрядных приборов, г. Дятьково; Б. В. Ефимов, Е. А. Измайлов — Московский институт электромеханики и автоматики, г. Москва; И. П. Мазанько — НПО «Астрофизика»; Б. П. Ремизов — НИИП, г. Москва; Е. П. Остапченко — СКБ завода «Полярон», г. Львов; В. П. Тычинский, Б. Ч. Дюбуа — НИИ «Исток», г. Фрязино и др.). Совместно создавались как приборы, так и ряд систем на их основе.

Новые сведения об источниках заряженных частиц и приборах на их основе публиковались в различных журналах и научно-технических сборниках. К сожалению, в определенный исторический период в подавляющем большинстве эти издания канули в неизвестность вместе с исчезнувшими или реформированными НИИ и КБ, и если что-то осталось, то, возможно, в секретных изобретениях.

Судьба открытых публикаций по фундаментальным исследованиям свойств создаваемых композиций, выполненным совместно с коллегами из университетов, оказалась иной. Для вышеприведенных целей требуются особые методы исследований, оригинальное аналитическое оборудование и изыскания в области альтернативных технологий. Это стратегия мировой науки.

Они проводились с участием коллег из различных университетов и институтов (А. И. Бажин, С. В. Теплов, В. А. Ступак — ДонГУ, г. Донецк; Е. Т. Кучеренко, В. З. Шаповал — Киевский госуниверситет им. Т. Г. Шевченко; Г. Г. Бондаренко, А. А. Шмыков, А. Н. Тихонов — МИЭМ, г. Москва; А. А. Фомичев, Е. П. Шешин — МИФИ, г. Долгопрудный; А. С. Сигов, В. И. Капустин — МИРЭА, г. Москва; К. Г. Никифоров, Д. К. Никифоров — КГУ им. К. Э. Циолковского, г. Калуга; В. В. Андреев, А. А. Столяров, В. Г. Барышев, В. В. Бобрецов — КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана; Г. В. Козьмин — ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, г. Обнинск; В. С. Хмелевская — ИАТЭ, г. Обнинск; Э. М. Соколов, Л. Э. Шейнкман — ТулГУ, г. Тула и др.). Совместные наши публикации широко известны, но научное сотрудничество продолжается до настоящего времени [9–21].

Прикладные исследования и разработка технологий различных типов источников электронов осуществлялась коллегами и учениками в Калуге — в Институте материалов электронной техники и в КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана. Их результаты, имена основных соавторов — ученых, инженеров и специалистов — приведены частично в работах [22–39]. Некоторые теоретические и экспериментальные результаты, полученные в составе этих трех авторских коллективов, и положены в основу настоящей книги.

Столь пространные рассуждения о составе и деятельности творческих коллективов специалистов, работавших над идеей создания управляемых потоков электронов, эмитированных с холодных и горячих поверхностей, преследуют лишь одну цель: без высоконадежных и долговечных источников электронов не были бы достигнуты уникальные параметры отечественных вакуумных СВЧ-приборов, газоразрядных лазеров и ламп — основы систем радиолокации, навигации и освещения. Суть самой идеи заключается в том, что прибор и источник электронов — замкнутая система,

функционирующая как единое целое. Вынесенное в эпиграф утверждение Николы Теслы совершенно верно — идея по созданию того или иного прибора не будет сырой, если предварительно будут четко изучены и установлены механизмы взаимодействия внутри этой системы. Недостаточно иметь источник электронов с определенными свойствами, как это было сделано, например, для резисторов и конденсаторов, а надо изучить и понять суть всех физико-химических процессов, происходящих в данной замкнутой системе, чтобы, варьируя материалом, формой и конструкцией источника электронов, обеспечить нужные параметры прибора. Причем воспроизводимость свойств источников электронов, сохранение стабильности их параметров, обеспечение минимального разброса свойств от партии к партии требуют разработки методов и аналитической аппаратуры такого уровня, чтобы их качество гарантировало получение достоверных результатов анализа, удовлетворяющих и разработчиков источников электронов, и создателей приборов, и конструкторов систем на их основе.

Эта важная проблема экспериментальной физики, решаемая целым поколением ученых и инженеров, так и не была должным образом обобщена и оценена, за исключением, возможно, работ [40–45]. По-видимому, это произошло потому, что конечной целью всегда были приборы и системы, а всё остальное — досадным промежуточным барьером. Хотел бы надеяться, что мне при решении этой проблемы удалось в какой-то степени привить большому коллективу любовь к тонкому экспериментированию и коллективному творчеству, характерному для УФТИ.

Данная книга частично восполняет пробел, который авторы пытались проиллюстрировать на примере создания отечественных магнетронов и некоторых газоразрядных лазеров и ламп. Основной же её целью является освещение проблемы разработки и применения, на основе вышеназванных приборов, новых методов в сфере защиты природы, сохранения здоровья и жизни человека. Выбор методов и технологий для данной книги принадлежит редактору, и он в полной мере несет ответственность за него. Авторы редактируемой книги с начала 90-х годов прошлого века занимались исследованиями по созданию методов экспериментальной физики для природоохранных целей и защиты окружающей среды. Значи-

тельная помощь в оформлении рукописи данной книги оказана её авторам Н. С. Сапроновой, за что я от их имени выражаю ей самую искреннюю признательность.

ЛИТЕРАТУРА К ПРЕДИСЛОВИЮ

1. Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна за 200 років / В. С. Бакіров, В. М. Духопельников, Б. П. Зайцев та ін. — Харків : Фоліо, 2004. — 750 с.
2. Мюллер К. Исследование процессов окисления дисилицида вольфрама / В кн.: Новые материалы, получаемые методами порошковой металлургии. Пер. с немецкого Г. Г. Кефера. — М. : Металлургия, 1966. — С. 98–104.
3. Влияние условий получения силицидных слоев на молибдене на некоторые их свойства / Е. П. Нечипоренко, А. Д. Осипов, А. П. Коржавый, Н. С. Полтавцев. В кн.: Температуроустойчивые защитные покрытия. — Л. : Наука, 1968. — С. 68–74.
4. Хауффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности / Пер. с немецкого А. Б. Шектера. — М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. Часть 2. — 275 с.
5. Файфер С. И., Кофтелев В. Т., Коржавый А. П. Об электропроводящих керметах для подогревателей катодов // Электронная техника. Материалы. — 1969. — Вып. 6. — С. 3–10.
6. Hochuli U., Haldemann P. Indium Sealing Techniques // Rev. Sci. Instr. — 1972. — V. 43. — P. 1088.
7. Файфер С. И., Кофтелев В. Т., Коржавый А. П. Высокотемпературное диффузионное соединение молибдена и тантала с электропроводящими керметами на основе окиси алюминия / В кн.: Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. — М. : Изд-во ПНИЛДСВ, 1970. — С. 111–119.
8. Варенцов В. А., Коржавый А. П., Бритун В. Ф. Исследование границы электроадгезионных соединений некоторых материалов электронной техники // Электронная техника. Материалы. — 1983. — Вып. 12 (085). — С. 36–39.
9. Исследование и разработка методов контроля активного слоя вторичных электронных эмиттеров / А. И. Бажин, В. П. Шестов, А. П. Коржавый и др. — М. : ВИНТИ, 1983. — 110 с.

10. Восходящая диффузия примесных атомов замещения в приповерхностном слое кристалла / *А. И. Бажин, С. В. Теплов, А. П. Коржавый* // Украинский физический журнал. — 1987. — Т. 32, № 1. — С. 116–119.
11. *Евдокимов О. И., Коржавый А. П., Шаповал В. З.* Влияние параметров газовой смеси и конструкций разрядного промежутка на генерацию и мощность излучения гелий-неонового лазера // *Электронная техника. Материалы.* — 1986. — Вып. 4 (215). — С. 74–76.
12. Изменение термоэмиссионных свойств катодов типа металл-оксиды ШМ и ШЗМ под влиянием электронной бомбардировки / *К. П. Редёга, А. П. Коржавый, А. А. Шмыков, И. А. Тищенко* // *Электронная техника. Материалы.* — 1985. — Вып. 6 (205). — С. 11–14.
13. *Бондаренко Г. Г., Коржавый А. П.* Ионно-плазменное напыление алюминиевых и бериллиевых покрытий на внутренние поверхности полых цилиндрических катодов // *Известия РАН. Металлы.* — 1995. — № 4. — С. 167–171.
14. *Бондаренко Г. Г., Коржавый А. П.* Эффективные эмиттеры на основе никеля, палладия и платины // *Известия РАН. Металлы.* — 2000. — № 4. — С. 114–117.
15. Патент РФ № 2175804. Газовый лазер на тлеющем разряде (по заявке № 2000112332 от 18.05.00) / *Г. М. Калистратова, А. П. Коржавый, А. А. Фомичев и др.* — 2001. — Б. И. № 31.
16. *Коржавый А. П., Марин В. П., Сигов А. С.* Некоторые аспекты создания технологий и конструкций изделий квантовой электроники // *Наукоёмкие технологии.* — 2002. — Т. 3, № 4. — С. 20–31.
17. *Никифоров Д. К., Коржавый А. П., Никифоров К. Г.* Влияние диэлектрического нанослоя на эмиссионные свойства структур Al–Al₂O₃ и Be–BeO // *Известия РГПУ им. А. И. Герцена. Естественные и точные науки. Физика.* — 2009. — № 11 (79). — С. 153–159.
18. А.с. СССР № 1101924. Металлопористый катод прямого накала / *В. Д. Чигринец, В. В. Бобрецов, А. П. Коржавый и др.* — 1984. — Б. И. № 25.
19. *Капустин В. И., Коржавый А. П.* Новая безреагентная технология для очистки питьевой воды и осадков сточных вод / В кн. :

- Состояние и охрана окружающей среды в Калуге. — Калуга : Изд-во «Экоаналитика», 2009. — С. 31–33.
20. Основы ведения сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения : учебное пособие / *Г. В. Козьмин, С. В. Круглов, Б. И. Яцало* и др.; Под общ. ред. *А. П. Коржавого*. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 184 с.
 21. Влияние электромагнитного излучения на изменение концентрации металлов в модельных растворах / *Э. М. Соколов, А. П. Коржавый, Л. Э. Шейнкман, Н. Н. Лапа* // Известия Тульского государственного университета. Экология и рациональное природопользование. — Москва–Тула : Изд-во ТулГУ, 2006. — Вып. 1. — С. 21–29.
 22. *Коржавый А. П., Писачев Н. Е., Редёга К. П.* Исследование влияния неоднородности плазмы на работоспособность полового холодного катода // Электронная техника. Материалы. — 1977. — Вып. 10. — С. 16–22.
 23. Влияние некоторых факторов на образование газовых включений в многослойных материалах / *А. П. Коржавый, Г. Ф. Лоренц, Э. А. Нарусевич, В. М. Соболев* // Электронная техника. Материалы. — 1979. — Вып. 4. — С. 8–15.
 24. Эффективные катодные материалы / *В. Ф. Арцыхович, Ф. И. Бузол, А. П. Коржавый* и др. // Электронная промышленность. — 1984. — Вып. 5. — С. 50–52.
 25. *Коржавый А. П., Корчагина Е. Е., Прасицкий В. В.* Малогабаритный холодный катод гелий-неонового лазера // Электронная техника. Лазерная техника и оптоэлектроника. — 1986. — Вып. 4 (238). — С. 4–5.
 26. Протяженные импрегнированные катоды / *Б. Ю. Адамяк, А. П. Коржавый, В. И. Сень* и др. // Электронная техника. Электрорадиотехнические и газоразрядные приборы. — 1986. — Вып. 3 (114). — С. 33–34.
 27. О возможности управления свойствами вторично-эмиссионного катода / *К. П. Редёга, В. И. Звонецкий, А. П. Коржавый, А. Н. Прозоров* // Электронная техника. Материалы. — 1987. — Вып. 6. — С. 17–21.
 28. *Мороков В. И., Коржавый А. П., Савранская Е. С.* Технологические пути повышения качества электродов для источников

- оптического излучения // Электронная техника. Материалы. — 1988. — Вып. 7. — С. 7–10.
29. Установка определения качества холодных катодов газоразрядных приборов / *А. К. Ерохов, А. П. Коржавый, С. Н. Петрунько и др.* // Электронная промышленность. — 1989. — Вып. 5. — С. 32.
 30. *Korzhavyi A. P., Kristya V. I.* On the calculation of cold cathodes lifetime for helium-neon lasers // *Journ. Appl. Phys.* — 1991. — V. 70, № 9. — P. 5117–5119.
 31. *Коржавый А. П., Кристя В. И.* О распределении потенциала в катодном слое тлеющего разряда // Журнал технической физики. — 1993. — Т. 63, Вып. 2. — С. 200–202.
 32. *Bolgov I. S., Korzhavyi A. P.* Promising directions of development of tape metallic materials for electronics // *Journ. of Advanced Mater.* — 1994. — V. 1 (4). — P. 350–352.
 33. *Аитов Р. Д., Коржавый А. П., Кристя В. И.* Влияние зарядки поверхности на коэффициент вторичной электронной эмиссии композиционных катодов // Радиотехника и электроника. — 1995. — Т. 40, № 11. — С. 1692–1695.
 34. Определение потенциала поверхности диэлектрического слоя на мишени, бомбардируемой ионным пучком / *Р. Д. Аитов, А. П. Коржавый, В. И. Кристя* и др. // Журнал технической физики. — 1998. — Т. 68, № 9. — С. 126–128.
 35. А.с. СССР № 320851. Материал для вторичноэлектронных эмиттеров / *С. И. Файфер, С. М. Жданов, А. П. Коржавый* и др. — 1971. — Б. И. № 34.
 36. А.с. СССР № 375709. Способ изготовления холодных металлических катодов / *А. П. Коржавый, С. И. Файфер, С. М. Жданов* и др. — 1973. — Б. И. № 16.
 37. А.с. СССР № 1119102. Материал для электродов импульсных источников света / *В. И. Мороков, А. П. Коржавый, В. И. Ионов* и др. — 1984. — Б. И. № 38.
 38. А.с. СССР № 1355032. Способ изготовления протяженного прямоканального металлопористого катода / *В. П. Арсенюк, В. Е. Каменцев, А. П. Коржавый* и др. — 1987. — Б. И. № 43.
 39. Патент РФ № 2119218. Газовый моноблочный лазер / *Ю. В. Демиденков, Ю. Ю. Колбас, А. П. Коржавый* и др. — 1998. — Б. И. № 26.

40. Дефекты и физические свойства многокомпонентных электронных материалов / *К. Г. Никифоров, А. П. Коржавый, В. В. Горбачев* и др.; Ред. *К. Г. Никифоров*. — Калуга : Изд-во КГПУ им. К. Э. Циолковского, 1999. — 215 с.
41. *Киселев А. Б.* Металлооксидные катоды электронных приборов. — М. : Изд-во МФТИ, 2001. — 240 с.
42. *Никифоров Д. К., Коржавый А. П., Никифоров К. Г.* Эмиттирующие наноструктуры «металл–оксид металла»: физика и применение : монография / Под ред. *А. П. Коржавого*. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 156 с.
43. *Карышев А. К., Егунов Н. Д.* Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана: 50 лет (1959–2009) : юбилейное издание. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 280 с.
44. *Бусол Ф. И.* Калужский центр электронного материаловедения. История развития ВНИИМЭТа и Правобережья / В кн.: Калужские вехи временных лет; Отв. ред. *К. Г. Никифоров*. — Калуга : Изд-во Гриф, 2004. — С. 393–418.
45. *Ли И. П.* Магнетроны импульсного действия — всё дело в катоды // *Электроника. НТБ*. — 2012. — № 5. — С. 84–87.

ВВЕДЕНИЕ

Уильям Шокли в 1947 г. изобрел транзистор, и электронные лампы относительно быстро были заменены полупроводниками. Миниатюризация электронной аппаратуры как раз и привела к развитию современных нанотехнологий. Постепенно появлялись и компьютеры, и сеть «Интернет», и мобильная связь, а теперь и 3D-телевидение [1].

Однако твердотельная электроника пока не смогла вытеснить вакуумные СВЧ-приборы, газоразрядные лазеры и лампы из ряда важных областей применения: локация, навигация, освещение. Возможно, дело здесь только во времени, хотя уникальные свойства перечисленных приборов пока не перекрыты ни новыми твердотельными СВЧ-устройствами, ни светодиодными светильниками, ни волоконными и полупроводниковыми лазерами [2, 3]. Только в настоящее время опубликованы сведения об итогах развития и применения отечественных вакуумных приборов, газоразрядных лазеров и ламп [4].

В целом утверждение о том, что развитие отечественной науки с начала 70-х и до 90-х годов XX в. осуществлялось в изолированных от внешнего мира условиях [1, 4], справедливо. Подтверждением может служить пример того, как заявленное в 1972 г. отечественное изобретение на газовый лазер с холодным катодом на основе наноструктуры металл–оксид металла [5] было открыто лишь 10 лет спустя, когда за рубежом уже появились публикации с аналогичными техническими решениями [6]. Однако мировая наука интернациональна, и наши эксперты, ученые, даже при отсутствии в то время сети Интернет, в данном случае через издание «Обзоры по электронной технике» [7–18], анализировали зарубежные открытые публикации и, по возможности, сравнивали с ними собственные результаты исследований. Поэтому оригинальные технические решения зарубежных ученых и специалистов в области создания источников электронов и приборов на их основе [19–23] нам, в принципе, были известны.

Сложно судить о том, создавались ли эти изделия по методологии «источник электронов как единая замкнутая система прибора», поскольку о технике эксперимента в зарубежных работах подробно не сообщалось. Нет в них также и сведений об испытаниях источников электронов и приборов в условиях термоциклических, виброударных и акустических воздействий. По крайней мере отечественные катоды — и отдельно, и в составе приборов — подвергались в рабочих режимах таким воздействиям по существующим требованиям [24].

В отличие от источников электронов, источники ионов, эмиттируемые с поверхности, достаточно подробно описаны и обобщены, как и принципы создания вакуумных СВЧ-приборов, газоразрядных лазеров и ламп. В настоящее время существуют учебники по этим вопросам, написанные известными специалистами [25, 26]. Поэтому в данной книге мы не будем подробно обсуждать устройство и принцип действия таких приборов. Применение этих приборов в различных системах, в том числе и специального назначения, также в последние годы достаточно подробно описано и изложено в работах [4, 27–32].

Опубликованные работы по отдельным направлениям разработки методов мониторинга окружающей среды [33–37], разработке и применению низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ), получаемого от полупроводниковых лазеров, в медицине и сельском хозяйстве, в данной книге не рассматриваются.

Целью настоящей книги является обобщение применения магнетронов, газоразрядных лазеров и приборов в методах защиты природы и человека. Авторы более 10 лет вели собственные исследования и разработки в данном направлении. Эти исследования проводились параллельно с работами зарубежных и отечественных специалистов в областях эмиссионной, плазменной и квантовой электроники. Цель таких исследований понятна: здоровье людей напрямую зависит от воздуха, которым они дышат, натуральной пищи и чистой воды.

В первой главе обобщены исследования по теоретическим и практическим аспектам создания источников электронов (катодов и электродов) в процессе разработки магнетронов, газоразрядных лазеров и приборов как единой замкнутой системы.

Вторая глава демонстрирует, каким образом накопленные знания о механизмах работы источников, эмиттирующих заряженные частицы, можно использовать для разработки принципиально новых приборов и устройств, например для обнаружения наркотических, взрывчатых и физиологически опасных веществ.

В третьей главе описаны некоторые технологии защиты природы и человека, основанные на использовании магнетронов различного типа.

Четвертая глава посвящена анализу методов экспериментальной физики, разработанных на основе различных типов газоразрядных лазеров и приборов, и особенностям применения их для сохранения здоровья человека и обеспечения продовольственной безопасности.

В. И. Капустин, профессор Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики, г. Москва;

Г. В. Козьмин, ведущий научный сотрудник ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, г. Обнинск;

А. П. Коржавый, зав. кафедрой промышленной экологии и химии Калужского филиала Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, г. Калуга

ЛИТЕРАТУРА К ВВЕДЕНИЮ

1. Очерки истории российской электроники. Вып 1. 60 лет отечественному транзистору / Под ред. *В. М. Пролейко*. — М. : Техносфера, 2009. — 336 с.
2. *Викулов И., Кичаева Н.* Вакуумная СВЧ-электроника в США. Состояние и тенденции развития // Электроника: НТБ. — 2007. — № 5. — С. 66–71.
3. Фотоника. Научно-технический журнал. — 2008. — № 4 (10). — 39 с.
4. Динамика радиоэлектроники-2 / Под общей ред. *Ю. И. Борисова*. — М. : Техносфера, 2008. — 376 с.

5. А.с. СССР № 421308. Газовый оптический квантовый генератор с холодным катодом / *С. И. Файфер, С. М. Жданов, А. П. Коржавый и др.* — Заявка № 1738698/26-25 от 14.01.72. Оpubл. 1983 г.
6. *Fein M. E., Salisbury Ch. W.* Integrated construction of low-cost gas lasers // *Appl. Optics.* — 1977. — V. 16, № 8. — P. 2308–2314.
7. *Савичева Э. А.* Газовые оптические квантовые генераторы за рубежом // *Обзоры по электронной технике. Газоразрядные приборы.* — 1971. — Вып. 2 (280). — 42 с.
8. *Дойников А. С.* Спектральные характеристики излучения трубчатых ксеноновых импульсных и дуговых ламп // *Обзоры по электронной технике. Электровакуумные и газоразрядные приборы.* — 1973. — Вып. 11 (154). — 35 с.
9. *Терехина З. Н.* Миниатюризация электровакуумных приборов СВЧ // *Обзоры по электронной технике. Электровакуумные и газоразрядные приборы.* — 1973. — Вып. 14 (170). — 32 с.
10. *Ивлев А. М.* Накаленные катоды с развитой рабочей поверхностью // *Обзоры по электронной технике. Электровакуумные и газоразрядные приборы.* — 1976. — Вып. 7 (386). — 47 с.
11. *Одолевская О. А.* Катоды для приборов М-типа // *Обзоры по электронной технике. Электроника СВЧ.* — 1978. — Вып. 13 (563). — 47 с.
12. *Семенова В. Б., Коржавый А. П.* Методы разработки и конструктивные особенности электродных систем современных газовых лазеров // *Лазерная техника и оптоэлектроника.* — 1982. — Вып. 3 (900). — 71 с.
13. *Светцов В. И.* Особенности распыления различных материалов при разряде в химически активных газах // *Обзоры по электронной технике. Электровакуумные и газоразрядные приборы.* — 1983. — Вып. 5 (979). — 39 с.
14. *Козлов В. И.* Эмиссионные свойства и долговечность металлопористых катодов для СВЧ-приборов // *Обзоры по электронной технике. Электроника СВЧ.* — 1983. — Вып. 6 (941). — 54 с.
15. *Коржавый А. П.* Вторично-эмиссионные материалы: методы исследования и прогнозирования их свойств // *Обзоры по электронной технике. Материалы.* — 1984. — Вып. 11 (1059). — 56 с.

16. *Ашкинази Л. А., Коржавый А. П.* Термоэлектронные и вторично-электронные катоды для ЭВП // *Обзоры по электронной технике. Материалы.* — 1986. — Вып. 8 (1234). — 42 с.
17. *Коржавый А. П., Редёга К. П.* Материалы для катодов с низкими значениями первого критического потенциала // *Обзоры по электронной технике. Материалы.* — 1987. — Вып. 2 (1269). — 39 с.
18. *Аитов Р. Д., Коржавый А. П., Крестя В. И.* Эмиссионные свойства холодных катодов с оксидной пленкой на поверхности для газоразрядных приборов // *Обзоры по электронной технике. Материалы.* — 1991. — Вып. 6. — 47 с.
19. Patent № 3860310 United States. Method of fabrication a gas lasers / *Urs Hochuli, Paul R. Haldemann.* — 1971.
20. *Hochuli U., Sciacca T.* Cold cathodes for sealed of CO₂ lasers // *IEEE. USA Conf. Laser Eng. And Appl.* — Washington, 1973. By Dig. Techn. Pap. New York. 1973. — № 4. — P. 78.
21. Patent № 1378478 Japan. Method of forming a carbide layer / *Kabushiki Kaisha.* — 1974.
22. *Garald F. Dionne.* Origin of secondary — electron — emission yield — curve parameters // *Journ. Appl. Phys.* — 1975. — V. 46, № 6. — P. 3347–3351.
23. European patent application № 012463. Gas discharge device / *Ford Carol M.* — 1986.
24. *Цай П. И.* Механические и климатические испытания // 100 лекций по повышению квалификации ИТР. — М. : НПП Исток, 2004. — Т. 1, Ч. 2. — С. 224–239.
25. Базовые лекции по электронике. Электровacuумная, плазменная и квантовая электроника. Т. 1 / Под общ. ред. *В. М. Пролейко.* — М. : Техносфера, 2009. — 480 с.
26. Базовые лекции по электронике. Твердотельная электроника. Т. 2 / Под общ. ред. *В. М. Пролейко.* — М. : Техносфера, 2009. — 608 с.
27. *Динамика радиоэлектроники / Под общ. ред. Ю. И. Борисова.* — М. : Техносфера, 2007. — 400 с.
28. *Привалов В. Е.* Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. 2-е изд. — Л. : Судостроение, 1989. — 264 с.
29. *Григорьянц А. Г.* Основы лазерной обработки материалов. — М. : Машиностроение, 1989. — 304 с.

30. *Матвеев В. А.* Гироскоп — это просто. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — 192 с.
31. *Бесараб М. А., Кравченко В. Ф., Матвеев В. А.* Методы моделирования и цифровая обработка сигналов в гироскопии. — М. : Физматлит, 2008. — 248 с.
32. *Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А.* Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 344 с.
33. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды : учебное пособие для вузов / *В. И. Козинцев* и др.; Под ред. *В. Н. Рождествина*. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 528 с.
34. Лазерный оптико-акустический анализ многокомпонентных газовых смесей / *В. И. Козинцев, М. Л. Белов, В. А. Городничев* и др. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — 352 с.
35. *Морозов А. Н., Светличный С. И.* Основы Фурье-спектрорадиометрии. — М. : Наука, 2006. — 275 с.
36. *Ефанов О. И.* Магнитолазерная терапия : учебно-методическое пособие. — М. : Изд-во ММСУ, 2002. — 92 с.
37. Современные возможности лазерной медицины и биологии // Материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции. — Великий Новгород : Изд-во НГУ им. Я. Мудрого, 2009. — 176 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моему поколению ученых и специалистов выпала непростая, но важная роль — быть участниками процесса разработки отечественных вакуумных СВЧ- и газоразрядных приборов, а также создания многообразных устройств на их основе. Изложенные в настоящей книге принципы их разработки, заключающиеся в том, что источник эмиссии заряженных частиц является неотъемлемым элементом замкнутой системы любого отпаянного прибора, во многом обеспечили требуемые параметры, и прежде всего долговечность и надежность магнетронов, газоразрядных лазеров и ламп. Правомочность такой методологии и должен был подтвердить материал, изложенный и отредактированный в данной книге. Её объем позволил изложить лишь избранные методы экспериментальной физики в защите природы и человека, основанные именно на таких приборах.

Однако все эти приборы и устройства функционируют на основе электрической энергии. Поэтому данная книга оказалась бы незавершенной, если бы мы, вкратце, не коснулись вопросов современной электроэнергетики. Тем более, что перспективы широкого использования экологически чистых электромобилей во всех странах мира широко разрекламированы. Поэтому возникает вопрос о том, насколько же безопасны для окружающей среды и человека способы выработки электроэнергии, которая обеспечивает питание упомянутых приборов, устройств, современных производств, и каковы возможности методов экспериментальной физики, направленные на обеспечение всего хозяйственного комплекса достаточным количеством электроэнергии экологически безопасными способами.

Нобелевский лауреат, академик П. Л. Капица на основе закона сохранения энергии предсказал грядущий энергетический кризис [1]. Современные исследования подтверждают, что разведанных запасов органического топлива при нынешних темпах энергопотребления хватит человечеству не более чем на 100 лет. В этот период на

Земле предполагается вырабатывать 1% энергии от той, которую она получает от Солнца ($1,5 \cdot 10^{24}$ Дж/год). Превышение этого предела приведет к экологической катастрофе: растают полярные льды со всеми вытекающими из этого последствиями. Самым перспективным путем от теплового загрязнения планеты, считал П. Л. Капица, является движение в направлении получения энергии методом термоядерного синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития. В настоящее время ядерный синтез уже освоен человеком в земных условиях в достаточных масштабах, но не для промышленного производства энергии.

Учитывая, что запасы топлива для термоядерной энергетики огромны, работы по созданию термоядерных реакторов ведутся совместными усилиями ученых ряда стран. Спроектирован и строится первый термоядерный реактор типа «Токамак», в котором участвуют Евросоюз, США, Россия и Япония. Однако для создания и построения коммерческого реактора необходимо провести еще серию физических исследований, разработать ряд материалов и специальных технологий. На это потребуется еще 30–40 лет.

Более близкими к коммерческому использованию, по мнению Марка Якобсона (Стэнфордский университет), проводившего исследования в рамках атмосферной и энергетической программы, являются альтернативные (нетрадиционные) источники энергии: ветровая, солнечная, геотермальная, энергия приливов, волновая и др. Необходимость преобразования этих видов энергии в электрическую, удобную для практического использования, приведет к революционному развитию технологий и методов экспериментальной физики, химии и биологии, наукоемких технологий электроники, радиоэлектроники, электротехники.

Нетрадиционные источники энергии необходимо выбирать таким образом, чтобы при преобразовании их в электрическую энергию не наносился вред здоровью человека, природе и землепользованию, как это случилось при освоении современных ископаемых видов топлива, в том числе и биотоплива.

Из многочисленных источников энергии рассмотрим лишь те, преобразование которых в электричество не наносит значительного вреда окружающей среде, и те, использование и потребление которых не приводит к истощению природных ресурсов.

Сравним на сегодняшний день стоимость 1 кВт·ч электрической энергии от различных источников (в центах США): от атомной станции — 1,5; от ветроэлектростанций — 10; от солнечной электростанции — до 100. Стоимость электрической энергии от нетрадиционных источников пока высока по сравнению с полученной по широко применяемым технологиям [2].

Термоэлектрические источники. Устройства по прямому преобразованию тепловой энергии в электрическую уже находятся на стадии широкого экспериментального обследования. В основе термоэлектрической генерации лежит термоэлектрический эффект, заключающийся в возникновении термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) при нагреве контакта двух разнородных металлов или полупроводников (термопары). С целью увеличения электрической мощности термопары соединяют последовательно, создавая термобатарею. Благодаря работам А. Ф. Иоффе уже давно известны термоэлектрические полупроводниковые генераторы (ТЭГ). В ТЭГ, созданных для газо- и нефтедобывающей промышленности, используется тепло от сжигания природного газа с целью получения из этого тепла электрической энергии [3]. Компанией «Криотерм» выпускается линейка генераторов, которая обеспечивает получение электрической мощности 6–80 Вт от одного генератора. Такие термоэлектрические модули (ТЭМ) выпускаются компанией «Криотерм» для солнечных концентраторов тепловой энергии.

Солнечные концентраторы и энергетические станции. Термодинамические установки, преобразующие энергию Солнца сначала в тепловую, затем в механическую, а затем в электричество, образуют солнечную энергетическую станцию [4]. Они содержат солнечный котел, турбину и генератор, а также требуют наличия аккумулирующего устройства для исключения сбоев при производстве преобразованной солнечной энергии во времени. Поскольку солнечное излучение, падающее на Землю, характеризуется низкой плотностью потока энергии, суточной и сезонной цикличностью, зависимостью от погодных условий, термодинамические солнечные станции должны строиться на территориях, где наблюдаются максимумы солнечных дней и благоприятные метеорологические факторы. Это же касается и солнечных станций, преобразующих солнечную энергию в электрическую фотоэлектрическим методом.

Солнечные фотоэлектрические станции. Для фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии в электрическую применяют фотоэлектрические преобразователи — солнечные элементы (СЭ), непосредственно преобразующие энергию световых квантов в электроэнергию. Классическое преобразование солнечного излучения в электричество производится СЭ на основе пластины из монокристаллического кремния. На некоторой глубине от поверхности пластины p -типа формируют p - n -переход с тонким металлическим контактом, а на тыльную её сторону наносят уже сплошной металлический контакт. При освещении СЭ поглощенные фотоны генерируют неравновесные электрон-дырочные пары. Электроны, генерируемые в p -слое вблизи p - n -перехода, подходят к нему и с помощью существующего в p - n -переходе электрического поля выносятся в n -область полупроводника. Избыточные дырки, созданные в n -слое, переносятся в p -слой. В этом случае n -слой приобретает дополнительный отрицательный заряд, в то время как p -слой получает положительный. Тогда первоначальная контактная разность потенциалов между p - и n -слоями полупроводника снижается, а во внешней цепи появляется напряжение. Отрицательному полюсу такого источника тока соответствует n -слой, а положительному — p -слой. Эффективность современных СЭ весьма высока: коэффициент полезного действия порядка 40%.

Градиент-температурная энергетика. Воды океанов на Земле занимают 70% её поверхности, поглощая также около 70% солнечной энергии, падающей на Землю. Перепад температур между холодной водой на глубине нескольких сотен метров и теплыми водами на поверхности весьма существенный. Способ добычи энергии, основанный на разности температур, позволяет получать электрическую энергию (или другой необходимый вид энергии) при умеренной её стоимости. Этот источник энергии оценивается в 20–40 тыс. ТВт [4].

Геотермальная энергетика. Этот способ получения электроэнергии основан на преобразовании внутреннего тепла Земли (в том числе и пароводяных источников) в электрическую энергию. Известно, что температура пород с глубиной растёт и на расстоянии 2–3 км от поверхности Земли превышает 100°C. Существует несколько схем получения электроэнергии на геотермальной электростан-

ции. При использовании пароводяных источников природный пар направляется по трубам в турбины, соединенные с электрогенераторами. Пар может подаваться в турбины без обработки, с предварительной очисткой или по смешанной схеме. Стоимость самой электростанции и рабочего вещества при этом невелики, так как отсутствуют система нагрева, котельная установка и дымовая труба.

Волновая энергетика — способ получения электрической энергии путем преобразования потенциальной энергии волн в кинетическую энергию пульсаций, а затем в однонаправленное усилие, вращающее вал электрогенератора. По сравнению с ветровой и солнечной энергией энергия волн обладает гораздо большей удельной мощностью. Средняя мощность волнения морей и океанов, как правило, превышает 15 кВт/м. При высоте волн в 2 м мощность достигает 80 кВт/м. То есть при освоении поверхности океанов не может быть нехватки энергии. Только часть мощности волнения можно преобразовать в механическую и электрическую энергию, но для воды коэффициент преобразования выше, чем для воздуха, и приближается к 85%.

Электростанции на энергии прилива. Приливная энергетика является локальной. Для выработки электроэнергии электростанции такого типа используют энергию прилива. Для устройства простейшей приливной электростанции требуется лишь бассейн, перекрытый плотиной. В плотине имеются водопропускные отверстия и установлены гидротурбины, которые вращают генератор. Во время прилива вода поступает в бассейн. Когда уровни воды в бассейне (или в море) сравняются, затворы водопропускных отверстий закрываются. С наступлением отлива уровень воды в море понижается, и когда напор становится достаточным, турбины и соединенные с ними электрогенераторы начинают работать, а вода из бассейна вытекает. Специалисты считают, что целесообразно строительство приливных электростанций в районах с приливыми колебаниями уровня моря не менее 4 м. Мощность приливной электростанции зависит от характера прилива в районе строительства станции, от объема и площади приливого бассейна, от числа турбин, установленных в теле плотины.

Биомассовая энергетика. При гниении биомассы (навоз, умершие организмы, растения) выделяется биогаз с высоким содержа-

нием метана, который используется для выработки электроэнергии и т. п. Существуют предприятия (свинарники, коровники и др.), которые сами обеспечивают себя электроэнергией и теплом за счет того, что имеют несколько больших «чанов», куда сбрасывают большие массы навоза от животных. В этих герметичных баках навоз гниет, а выделившийся газ идет на нужды фермы [4]. Еще одним преимуществом этого вида энергетики является то, что в результате использования влажного навоза для получения энергии остается сухой остаток, являющийся прекрасным удобрением. В качестве биотоплива рекомендуют быстрорастущие водоросли и некоторые виды органических отходов (стебли кукурузы, тростника).

Энергия на эффекте запоминания формы. Это физическое явление было обнаружено Г. В. Курдюмовым и Л. Г. Хандросом и наблюдается в особых сплавах. Эффект заключается в том, что детали из этих сплавов при тепловом воздействии восстанавливают после деформации свою начальную форму. При восстановлении первоначальной формы совершается работа, значительно превосходящая ту, которая была затрачена на деформацию в холодном состоянии. Таким образом, при восстановлении первоначальной формы сплавы вырабатывают значительное количество тепла (энергии). КПД такого источника электроэнергии составляет 5–6%.

Обобщая приведенные данные, можно констатировать, что экологически чистые возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и солнечного света, гидро- и геотермальная энергия, наиболее привлекательны. Растущий интерес к ним вызван экологическими соображениями и ограниченностью традиционных земных ресурсов.

Особое место среди нетрадиционных источников энергии занимают фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии и ветрогенераторы. На них следует остановиться более подробно.

Фотоэлектрические преобразователи. Постоянно растущие потребности в энергии можно обеспечить за счет использования высокоэффективных методов преобразования солнечной энергии.

Совокупная мощность всех солнечных батарей, произведенных к настоящему времени для преобразования солнечной энергии, достигнет к 2013 г. 12–15 ГВт в год [5]. Это сравнительно малая доля в общем предполагаемом объеме производства электроэнергии (порядка 50 000 ГВт).

СЭ на кремнии в настоящее время обеспечивают около 95% мирового производства солнечной энергетики. Основными производителями СЭ являются США. Компании *Sunovia* и *EPIR Technologies* используют в одном модуле теллурид кадмия и кремний. Компании *First Solar* и *AVA Solar* выпускают СЭ на CdTe (с КПД соответственно 9–10% и 11–13%). Компания *EPIR Technologies* создала СЭ с КПД свыше 26%. Рынок СЭ на CdTe бурно растет и в 2012 г. составит 1,4–1,6 ГВт. Созданы СЭ на аморфном кремнии и на основе наноструктур [6].

Ученые, работающие в сфере фотовольтаники, занимаются повышением эффективности СЭ, а инженеры оптимизируют конструкции и технологии сооружения солнечных электростанций [6]. Особенно заметны успехи французских специалистов в направлении практического использования солнечной энергии. Солнечная электростанция, построенная на склоне французских Альп, размещена на площади 36 га и включает 79 000 солнечных батарей [7]. Общая мощность электростанции на СЭ составляет 18,2 МВт. Проектом предусматривается расширить площадь электростанции до 200 га и довести её мощность до 100 МВт. Проект реализуется успешно, несмотря на то что во Франции стоимость 1 кВт электрической энергии от СЭ в 7–10 раз дороже по сравнению со стоимостью традиционной электроэнергетики.

В Тунисе сооружается солнечная электростанция «Тунар» мощностью в несколько ГВт. Возможности солнечной электроэнергетики эффективно рекламируются демонстрацией передвижных и переносных устройств. Так, в городе Сан-Диего (США) перед новогодними праздниками передвижная солнечная батарея демонстрировалась широкому кругу потребителей. Смонтированная на автомобиле электростанция обслуживала работу электропил для всех желающих [7].

К сожалению, в ночное время СЭ не функционируют, а в солнечные и пасмурные дни работают с разной эффективностью. В космосе, при работе на Луне или Марсе они также будут работать с ночными перерывами, а в закрытых от света областях, таких как кратеры, глубокие ущелья и пещеры, не будут работать вообще. Ветроэлектростанции в этих условиях имеют преимущества.

Ветряные электростанции. Эта отрасль энергетики, как уже отмечалось, дает сравнительно недорогую электроэнергию. Ветря-

ная электростанция — это установка, преобразующая кинетическую энергию ветра в электрическую. Она состоит из ветродвигателя, генератора электрического тока, автоматического устройства для управления работой ветродвигателя и генератора, сооружений для их установки и обслуживания. Для использования энергии ветра применяют разные конструкции: многолопастные «ромашки», винты типа самолетных пропеллеров, вертикальные роторы и др. Мощность ветряных электростанций постоянно увеличивается, однако пока низка. Работа таких электростанций зависит от погоды, к тому же они очень шумны. Помимо этого ветряные электростанции создают помехи, в том числе для радиоволн. Применение ветряных электростанций вызывает локальное ослабление силы воздушных потоков, мешающее проветриванию промышленных районов. Для использования ветряных электростанций необходимы огромные площади, много больше, чем для других типов электрогенераторов. Поэтому часто их размещают в море.

Ветроэнергетика весьма широко развита в зарубежных высокоиндустриальных странах, где разработан целый ряд ветроагрегатов и ветроэлектростанций (ВЭС) наземного и морского базирования. В 2008 г. в ЕС принята директива, в которой поставлена задача по достижению 20%-ной доли ветроэнергетики в энергобалансе Евросоюза еще до 2020 г. [8]. Тогда же на мировом рынке средняя цена 1 МВт установленной мощности составляла 1,04 млн. евро. Ведущими производителями ветроагрегатов являются зарубежные фирмы: *Siemens, GE, Area Wind, Bard Engineering, Clipper Windpower, Britannia*, а также немецкий «Энеркон» и китайская «Голдвинг».

Как морские, так и континентальные ветрогенераторы работают нестабильно при слабом ветре, нет надежных накопителей, чтобы запастись энергией на время, когда они не работают или когда снижается энергопотребление.

Если говорить об отечественных перспективах применения ветрогенераторов, то они тоже позитивны. На территории РФ уже существует несколько ВЭС: станция «Куликово» (5,1 МВт) в Калининградской области, ветропарк «Заполярный» (2,5 МВт), станция «Тюпкильды» в Башкортостане (2,2 МВт), Ростовская ВЭС (0,3 МВт), Белгородская (100 кВт) [8]. Недостаточно эффективно для строительства ветроэнергетических установок в РФ используются побе-

режье Арктики и Дальнего Востока, степные районы Поволжья и Урала, а также Северный Кавказ. Существуют и перспективные проекты. Так, в Приютненском районе Калмыкии завершается монтаж первой на юге РФ крупной ВЭС, где предусмотрено сооружение 126 ВЭУ мощностью 1,2 МВт каждая (инвестор — чешская компания *Faikon Capital*). Строительство первой очереди (50 МВт) планируется завершить в ближайшее время. Всего в Калмыцкую ВЭС будет инвестировано более 266 млн. евро. Начато сооружение «Морского ветропарка» в Калининградской области мощностью 50 МВт. Кроме того, компания «РусГидро» в кооперации с «Ростехнологиями» намерены создать в Волгоградской области ВЭС общей мощностью 1 ГВт и стоимостью 2,5 млрд. долларов США [2].

Чтобы картина в области ветроэнергетики была полной, замечу, что калужский изобретатель А. П. Подрезов получил патент [9] и построил ветрогенератор, перемещаемый на легковом автомобиле.

В настоящее время передвижные электростанции разрабатываются достаточно активно. Норвежские ученые разработали оффшорный ветрогенератор, который не требует фундамента [6]. По данным исследований ученых Германии [6], передвижные устройства («воздушные змеи») дадут возможность извлекать энергию из воздушных потоков на больших высотах, например из верхней части тропосферы (на высоте 7–16 км), где скорость высотных струйных течений порядка 90 км/ч. Легкие парусообразные конструкции будут «выписывать восьмерки» на этих высотах и передавать кинетическую энергию воздушных потоков расположенным внизу (на земле или воде) генераторам электричества. Предлагаются и другие конструкции [6], однако общим их достоинством является то, что стоимость 1 кВт·ч (при диаметре энергоустановки 1 км) составит 0,04 доллара США, при стоимости 1 кВт·ч, выработанного современными ВЭС, 0,15–0,24 доллара США. Важно и то, что новая ветряная станция мощностью 1 МВт будет занимать площадь 5–6 км², а ВЭС среднего размера сегодня занимает 250–300 км².

Таким образом, можно констатировать, что солнечная и ветровая электроэнергетика — это будущее человечества. Постоянное совершенствование электростанций на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии — ветре и Солнце — даст импульс к созданию новых технологий и материалов.

Согласно энергетической стратегии России до 2030 г., доля возобновляемых источников энергии уже к 2020 г. должна составлять 4,5%. Для достижения намеченных объемов производства необходим ввод таких генерирующих объектов как ветроэлектрические станции, приливные электростанции, геотермальные электростанции и прочие виды электроустановок с суммарной установленной мощностью до 25 ГВт [2].

Такие направления развития электроэнергетики приведут к разработке новых материалов и технологий в области электроники, радиоэлектроники и электротехники.

Начнем с электротехники. Лучшие системы современных электрических аккумуляторов для хранения избыточной электроэнергии, полученной от ветра и Солнца, обеспечивают эффективность 80–90% и имеют высокую стоимость (до 4 тыс. долларов США на 1 кВт мощности). По-видимому, в ближайшей перспективе будут созданы более дешевые накопители: например, недавно английские ученые разработали способ применения избытка электроэнергии для получения жидкого воздуха, который, при необходимости, можно нагреть и под большим давлением направить на турбину для её вращения.

Несомненно, что будут создаваться новые материалы, а на их основе — и устройства для преобразования солнечной и ветряной энергии. Так, недавно в Институте фотонных технологий (г. Йена, Германия) на кремниевые диски нанесли плотную «щетку» из серебряных нанопроволок, толщиной в 10 тысяч раз тоньше человеческого волоса. Покрытая такими микропроводами зеркальная поверхность кремния эффективно поглощает свет в диапазоне длин волн 300–1100 нм, что резко увеличивает КПД кремниевых солнечных элементов [6, 10].

Технологии будущего в значительной мере будут зависеть от надежности, стоимости и экологической безопасности альтернативной электроэнергетики. Отметим некоторые современные подходы к созданию новых технологий для развития нетрадиционной электроэнергетики.

Материалы и технологии для совершенствования СЭ. Производство структур на основе монокристаллического кремния — процесс технологически сложный и дорогостоящий. Поэтому всё большее внимание обращается на такие материалы, как сплавы на

основе аморфного кремния (a-Si:H), арсенид галлия и поликристаллические полупроводники [4, 6].

Технологии получения СЭ на аморфном кремнии считают перспективными, так как оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического. Поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки a-Si:H толщиной 0,5–1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых 300-мкм пластин. Кроме того, существующие технологии получения тонких пленок аморфного кремния большой площади не требуют операций резки, шлифовки и полировки, необходимых для СЭ на основе монокристаллического кремния. По сравнению с поликристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе a-Si:H производят при более низких температурах (300°C), т. е. можно использовать дешевые стеклянные подложки, что сократит расход кремния в 20 раз. Совершенствование технологии получения СЭ на основе a-Si:H увеличит КПД с 12% (сейчас) до теоретического потолка — 16%.

Наиболее простые конструкции СЭ из a-Si:H были созданы на основе структуры металл–полупроводник (диод Шоттки), но сегодня чаще всего их формируют на ленте из нержавеющей стали или на стеклянных подложках, покрытых проводящим слоем.

При использовании стеклянных подложек на них наносят прозрачную для света проводящую оксидную пленку из SnO_2 , In_2O_3 или $\text{SnO}_2 + \text{In}_2\text{O}_3$, что позволяет освещать активный элемент через стекло.

Новые технологии будут созданы при разработке СЭ с более высокой эффективностью на основе аморфного кремния с *p-i-n*-структурой. Перспективной является технология с использованием *p-i-n*-структур на основе a-Si:H с подложкой из металлической фольги, в частности из нержавеющей стали.

Не менее перспективным материалом для создания высокоэффективных СЭ является арсенид галлия (GaAs). У него наблюдается почти идеальная для однопереходных СЭ ширина запрещенной зоны 1,43 эВ. Главное достоинство арсенида галлия и сплавов на его основе — широкий диапазон возможностей для конструкции СЭ. Фотоэлемент на основе GaAs может состоять из нескольких слоев различного состава. Это позволяет разработчику с большой точностью управлять генерацией носителей заряда, что в кремниевых

СЭ ограничено допустимым уровнем легирования. Типичный СЭ на основе GaAs содержит очень тонкий слой AlGaAs в качестве окна.

Создаваемые новые технологии должны устранить основной недостаток арсенида галлия — высокую стоимость. С этой целью предлагают формировать СЭ на более дешевых подложках: выращивать слои GaAs на удаляемых подложках или подложках многократного использования.

Создание промышленных технологий позволит применять для изготовления СЭ поликристаллические тонкие пленки на основе других материалов: диселенида меди и индия, теллурида кадмия и др.

Не отработаны к настоящему времени и технологии изготовления СЭ и батарей, использующих органические материалы. В частности, КПД СЭ на основе диоксида титана (TiO_2), покрытого органическим красителем, — порядка 11%. Немаловажно, что подложками в таких элементах могут выступать полимерные пленки.

Фуллерены (углерод C60) также весьма перспективны для органических солнечных батарей на основе гетероструктур C60/p-Si в связи с их способностью к сильному поглощению в коротковолновой области солнечного спектра. Поликристаллический фуллерен C60 толщиной порядка 1 мкм осаждают на кремниевую подложку в глубоком вакууме. Далее на слой C60 наносят алюминиевые контакты. В качестве заднего контакта используется сплав Ga_xIn_y на позолоченной подложке. Технологии производства таких СЭ требуют дальнейших исследований.

Основное направление исследований в области технологий каскадных СЭ связано с использованием арсенида галлия, что обеспечивает эффективность преобразования в подобных СЭ до 35%. Кроме того, в каскадных элементах широко применяются аморфный кремний, сплавы на его основе. Однако для серийного производства таких СЭ необходимо разрешить ряд технологических задач. Организация серийного производства солнечных электростанций и снижение стоимости 1 кВт·ч электроэнергии потребуют разработки эффективной электронной компонентной базы для изготовления солнечных батарей, хотя в этом направлении достигнуты весьма значительные успехи [10]. Поскольку элементная база солнечных батарей развивается параллельно аналогичной для персональных

компьютеров, технологии их производства направлены и на решение проблем энергосбережения [11].

Направления совершенствования ветроэнергетики. Технологии развития устройств ветроэнергетики также будут сопряжены с созданием новых направлений в электротехнике и приборостроении: силовая электроника, источники питания, аккумуляторы, многофазные трансформаторы, выпрямители, преобразователи, кабельные материалы и т. д. Причем создание Евразийского таможенного союза намного упростит создание новых технологий в этом направлении, поскольку в Белоруссии, Казахстане и России сосредоточены большие материальные и интеллектуальные ресурсы как в сфере сырья, так и в сфере сохранившихся базовых производств.

Важно, что в отечественной практике ведутся разработки, в частности в ГНУ ВИЭСХ, очень важных для устройств ветроэнергетики блоков бесперебойного питания [8]. Такой блок состоит из инвертора, переключающего выходное напряжение от дизельного генератора или другого устройства, стабилизатора и обратного зарядного устройства. Инвертор в этой разработке выполнен таким образом, что может, функционируя от дизель-генератора или от сети, выполнять несколько функций. Ими могут быть одновременно формирование сигнала переменного синусоидального напряжения для работы на нагрузку, осуществление генерации этого напряжения в сеть и зарядки аккумуляторной батареи. Такие технические решения очень актуальны для мобильных ветрогенераторов.

Для мощных базовых ВЭС также необходимы новые материалы и технологии изготовления постоянных магнитов с высокой коррозионной стойкостью для магнитных подшипников, разъемов и кабельной продукции нового типа.

Таким образом, ветро- и солнечная энергетика в настоящее время являются самыми перспективными видами нетрадиционных источников электроэнергии для коммерческого использования. Повышение энергоэффективности таких станций потребует создания и совершенствования наукоемких технологий в сфере электроники, радиотехники, приборостроения и электротехники [12]. В России к настоящему времени особо перспективно развитие ветроэнергетики.

Эффективность изложенных в данной книге избранных методов защиты природы и человека будет обеспечена лишь в комплексе

с достижениями экспериментальной физики при реализации технологий нетрадиционной электроэнергетики.

ЛИТЕРАТУРА К ЗАКЛЮЧЕНИЮ

1. *Капица П. Л.* Эксперимент. Теория. Практика. — М. : Наука, 1977. — 351 с.
2. *Воробьев А. С.* О современном состоянии ветроэнергетики в мире // Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе : материалы Всероссийской научно-технической конференции. Т. 1. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — С. 109–110.
3. *Шостаковский П.* Термоэлектрические источники альтернативного электропитания // Компоненты и технологии. — 2010. — № 12. — С. 131–138.
4. <http://elettracompany.com/node/81>.
5. *Наумов А. В., Плеханов С. И.* О некоторых аспектах развития солнечной энергетики на основе теллурида кадмия // Экология и промышленность России. — 2010. — № 12. — С. 30–33.
6. <http://science.compulenta.ru>.
7. Электростанция в горах // Наука и жизнь. — 2011. — № 12.
8. *Харитонов В. П.* Основы ветроэнергетики. — М. : Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2010. — 230 с.
9. Патент РФ № 2109166. Ветроколесо с регулятором частоты вращения / *А. П. Подрезов*. — 1996.
10. *Овсиенко О.* Опыт будущего от компании *NXP*: когда рождается новое качество // Электроника НТБ. — 2010. — № 7. — С. 58–64.
11. *Пошманн Х.* Технические решения для снижения энергопотребления при активной эксплуатации в режиме ожидания // Технологии в электронной промышленности. — 2010. — № 1. — С. 51–55.
12. *Коржавый А. П.* Проблемы зарубежной и отечественной нетрадиционной электроэнергетики // Научные технологии. — 2012. — Т. 13, № 2. — С. 73–78.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА	3
ЛИТЕРАТУРА К ПРЕДИСЛОВИЮ	8
ВВЕДЕНИЕ	13
ЛИТЕРАТУРА К ВВЕДЕНИЮ	15
ГЛАВА 1. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ КАК ОСНОВНОЙ ЭЛЕМЕНТ ЕДИНОЙ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ОТПАЯННЫХ ВАКУУМНЫХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ	19
1.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ СВЧ- И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРАХ	19
1.2. МАТЕРИАЛЫ КАТОДОВ МОЩНЫХ И МАЛОГАБАРИТНЫХ МАГНЕТРОНОВ	28
1.2.1. Физико-химический механизм работы оксидсодержащих катодных материалов	28
1.2.2. Физико-химические пути получения новых катодных материалов	45
1.2.3. Кинетика изменения эмиссионных свойств некоторых катодных материалов	51
1.2.4. Некоторые особенности контроля качества катодных материалов для вакуумных приборов	59
1.3. МЕТАЛЛООКСИДНЫЕ ПЛАНАРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ КАТОДЫ ДЛЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ	72
1.3.1. Общие сведения о физических процессах, наблюдаемых в газоразрядных приборах	72
1.3.2. Экспериментальное исследование устойчивости катодов к бомбардировке в разряде	82
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 1	92
ГЛАВА 2. НОВЫЕ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРКОТИЧЕСКИХ, ВЗРЫВЧАТЫХ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ	97
2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ	102
2.1.1. Классическая модель поверхностной ионизации	102
2.1.2. Элементы теории абсолютных скоростей реакций	105
2.1.3. Физико-химическая модель поверхностной ионизации органических соединений из классов НВ и ФОВ	110
2.1.4. Физико-химическая модель поверхностной ионизации органических соединений из класса ВВ	115

2.1.5.	Активные центры ионизации на поверхности оксидов переходных металлов	117
2.1.6.	Модифицированная физико-химическая модель поверхностной ионизации соединений из классов НВ и ФОВ	130
2.2.	КОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТНО-ИОНИЗАЦИОННЫХ ДРЕЙФ-СПЕКТРОМЕТРОВ	135
2.2.1.	Конструкция и технология термоэмиттеров ионов органических соединений	135
2.2.2.	Конструкция и технология дрейф-спектрометров	138
2.3.	ТЕОРИЯ ПОВЕРХНОСТНО-ИОНИЗАЦИОННОЙ ДРЕЙФ-СПЕКТРОМЕТРИИ	141
2.3.1.	Влияние объемного заряда на движение ионов	141
2.3.2.	Формирование дрейф-спектров органических соединений	149
2.3.3.	Термодесорбционная спектрометрия	152
2.4.	МАТЕРИАЛЫ ПОВЕРХНОСТНО-ИОНИЗАЦИОННЫХ ТЕРМОЭМИТТЕРОВ ИОНОВ	155
2.4.1.	Кинетика окисления микролегированных сплавов молибдена	155
2.4.2.	Поверхностно-ионизационные свойства микролегированных сплавов молибдена	166
2.4.3.	Поверхностно-ионизационные свойства оксидных бронз щелочного металла	170
2.5.	АКТИВНЫЕ ЦЕНТРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ОКИСЛЕННЫХ СПЛАВОВ МОЛИБДЕНА	178
2.5.1.	Физико-химические параметры активных центров	178
2.5.2.	Кинетика формирования активных центров	184
2.6.	ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	187
2.6.1.	Органические соединения азота	189
2.6.2.	Имитаторы физиологически опасных веществ	194
2.6.3.	Органические соединения из класса взрывчатых веществ	201
2.6.4.	Масс-спектрометрия состава ионного тока с поверхности термоэмиттеров ионов	204
2.7.	ПАРАМЕТРЫ ДРЕЙФОВОЙ ПОДВИЖНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	212
2.8.	ПАРАМЕТРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСОРБЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	217
2.9.	ДРЕЙФ-СПЕКТРОМЕТРИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	220

2.9.1. Аналоговая дрейф-спектрометрия органических соединений из классов НВ и ФОВ	220
2.9.2. Цифровая дрейф-спектрометрия высокого разрешения	227
2.10. ПРИБОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНО-ИОНИЗАЦИОННОЙ ДРЕЙФ-СПЕКТРОМЕТРИИ	243
2.10.1. Принцип многопараметрического распознавания органических соединений	243
2.10.2. Приборы с определением трех физико-химических параметров органических соединений	244
2.10.3. Приборы с определением шести физико-химических параметров органических соединений	249
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 2	254
ГЛАВА 3. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ЧЕЛОВЕКА, ОСНОВАННЫЕ НА МАГНЕТРОННЫХ ПРИБОРАХ	263
3.1. МАГНЕТРОНЫ В ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА	263
3.2. МЕТОДЫ ПОИСКА ПРОТИВОПЕХОТНЫХ МИН С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ-ЭНЕРГИИ	271
3.3. СВЧ-ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ОПАСНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ, ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И ВОДЫ	276
3.4. ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА	286
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 3	294
ГЛАВА 4. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАЗЕРЫ И ПРИБОРЫ В МЕТОДАХ СОХРАНЕНИЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	297
4.1. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НЕТЕПЛОВОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ	297
4.2. ПРИМЕНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАЗЕРОВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ	299
4.3. СОХРАНЕНИЕ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УСТРОЙСТВАМИ НА ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМПАХ	315
ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 4	330
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	335
ЛИТЕРАТУРА К ЗАКЛЮЧЕНИЮ	348

**Алексей Пантелеевич Коржавый
Владимир Иванович Капустин
Геннадий Васильевич Козьмин**

**МЕТОДЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ
В ИЗБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
ЗАЩИТЫ ПРИРОДЫ И ЧЕЛОВЕКА**

Научное издание

Редактор *С. Н. Капанов*
Корректор *Т. В. Тимофеева*
Технический редактор *А. Л. Репкин*

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана
совместно с Издательским домом «Манускрипт».
Тел. 8–4842–57–31–87

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 77.99.60.953.Д.003961.04.08 от 22.04.2008 г.

Подписано в печать 05.10.2012.
Формат 60×84/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 22. Усл. п. л. 20,46. Тираж 500 экз.
Заказ №

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных диапозитивов
в ОАО «Можайский полиграфический комбинат».
143200, г. Можайск, ул. Мира, 93