

тые ультрафиолетовым светом. Тогда этот вопрос станет весьма реально на очередь, и количество помещений, в которых можно будет отказаться от окон, а следовательно, и от затрат на отопление, возрастет. Но и по отношению к окнам вопрос об ультрафиолетовом свете не теряет своего значения. Наши оконные стекла его не пропускают, хотя производство стекол прозрачных и для этих лучей стоило бы не так уж дорого. Гигиеническое значение этих стекол громадно.

В настоящей статье я ограничился рассмотрением нескольких энергетических проблем, которые считаю разрешимыми в ближайшее же время. Это — задачи второй пятилетки. Я перечислю еще ряд задач, более отдаленных, но тоже не невозможных. Обратимое окисление угля, которое в три раза повысило бы использование угля для механической и электрической энергий. Газогенераторы и газопроводы, удешевляющие транспорт топлива. Атмосферное электричество, энергия волн, приливов и отливов, внутренняя теплота Земли — все это громадные количества энергии, слишком рассеянной, мало концентрированной для условий современной техники. Первые же успехи в области регулирования погоды, хотя бы выпадения дождей, позволили бы усилить осадки в высоких местностях за счет более низких и таким образом резко усилить запасы водных сил. Меньше всего можно в данное время сказать о возможности использования внутриатомных источников энергии при преобразовании элементов. Мы знаем, насколько велики количества энергии в этих случаях, но совсем не знаем, как ими управлять.

ОТКРЫТИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ*

В 1822—1823 гг. Зеебек описал в «Известиях Прусской Академии наук» явление, которое он определил как появление свободного магнетизма в соединенных между собою двух разнородных проводниках под влиянием разности температур. Из описания произведенных им опытов ясно, что Зеебек открыл термоэлектрические токи, возникающие в замкнутой цепи из разнородных провод-

* Глава I (Введение) из книги: *Иоффе А Ф Полупроводниковые термоэлементы* М.; Л. Изд-во АН СССР, 1956. 103 с.

ников, когда места контактов обладают разными температурами.

Это была эпоха, когда вслед за открытием Эрстедом воздействия электрического тока на магнитную стрелку последовала серия работ Ампера, Био, Савара, Лапласа и других, выяснивших взаимодействие электрических токов и магнитных полей; гипотеза об амперовых молекулярных токах свела источник магнитных явлений к электрическим токам. От понедельника к понедельнику (день заседаний Парижской Академии наук) росло учение об электромагнетизме; в его развитии приняли деятельное участие физики, математики и химики.

Из Парижа это научное направление распространилось в Швейцарию и Германию, а затем в Англию, где Фарадей обогатил его открытием электромагнитной индукции.

Если без предубеждения рассмотреть опыты Зеебека, то не возникнет сомнения, что наблюдаемые им явления вызывались электрическим током (исчезновение магнитных действий, как только ток замыкался введением непроводящей прослойки, количественная связь между магнитным полем тока и наблюдаемыми отклонениями магнитной стрелки и т. п.). Однако Зеебек не только отказался от такого естественного толкования своего открытия, но и активно боролся против него еще на протяжении ряда ближайших лет, обвиняя представителей теории термоэлектрических токов в увлечении «модой», вызванной открытием Эрстеда.

Объяснение столь предубежденного отношения Зеебека к своему открытию можно найти в заключительной части его обширного трактата, где делается попытка связать земной магнетизм с разностью температур между экватором или серией южных вулканов и полярными льдами. Видимо, эта гипотеза была ближе его сердцу, чем открытие еще одного источника возникновения электрического тока.

Ценность статьи Зеебека заключается, конечно, не в этой гипотезе (он же сам показал, что разность температур без замкнутого электрического тока не вызывает никаких магнитных влияний) и не в попытке отрицать электрический ток, а в громадном, накопленном им экспериментальном материале, охватившем самые разнообразные твердые и жидкие металлы, их сплавы, минералы и полупроводники. Заблуждение Зеебека сыграло

положительную роль: чтобы опровергнуть электрическое происхождение термоэлектрических токов, он на самых различных материалах сопоставлял явление электризации (контактный потенциал) или ряд Вольта с воздействием разности температур на магнитную стрелку и показывал различие между ними.

Составленный Зеебеком обширный термоэлектрический ряд представляет интерес и поныне. В современных обозначениях (α — термоэлектродвижущая сила на 1°C и σ — удельная электропроводность) ряд Зеебека определяется произведением $\alpha\sigma$ вместо величины $\alpha^2\sigma/\kappa$ (где κ — удельная теплопроводность), которая, как увидим, характеризует термоэлектрические свойства материала.

Обстоятельность исследований Зеебека иллюстрирует, в частности, тот факт, что в статье Марии Теллес, опубликованной в американском журнале 125 лет спустя, приводится как лучшая пара ZnSb и PbSb , совпадающая с предельными членами ряда Зеебека.

Сопоставляя качественный ряд Зеебека с современными измерениями термоэлектродвижущей силы металлов, можно убедиться в их хорошем согласии. Расхождения ряда Зеебека с рядами Юсти и Мейснера не больше, чем расхождения между последними.

Если бы вслед за своим открытием Зеебек попытался использовать термоэлемент для получения электроэнергии, то с помощью крайних членов своего ряда он мог бы получить кпд порядка 3 %, т. е. столько же, сколько давали лучшие паровые машины того времени.

Нельзя не отметить также, что Зеебек не оставил без внимания явлений, вызванных разностью температур внутри однородного материала, и качественно оценил термоэлектрические силы, которые спустя 30 лет вновь открыл В. Томсон, доказав необходимость их существования исходя из термодинамического рассмотрения термоэлектрических процессов.

Спустя 12 лет после открытия Зеебека часовщик Пельтье опубликовал во французских «Анналах физики и химии» за 1834 г. статью о температурных аномалиях, наблюдаемых вблизи границы двух различных проводников при прохождении через них электрического тока. В действительности явление, впервые наблюдаемое Пельтье и называемое поэтому эффектом Пельтье, заключается в выделении или поглощении (в зависимости

от направления тока) тепла Q на границе двух разных проводников при прохождении тока I , причем

$$Q = \Pi I,$$

где Π — коэффициент Пельтье.

Явление Пельтье теснейшим образом связано с термоэлектричеством, а коэффициент Π — с α (термоэлектродвижущей силой на 1°C)

$$\Pi = \alpha T,$$

где T — абсолютная температура контакта.

Разность температур вызывает в замкнутой цепи из разнородных материалов электрический ток, а ток, протекающий по такой цепи, создает разность температур. Любопытно, что Пельтье не видел этой связи, несмотря на то, что опыты свои он производил с термоэлектрической цепью. Термоэлектричество играло в этих опытах чисто служебную роль — источника слабых токов.

Наблюдаемые Пельтье аномалии оказывались тем сильнее, чем больше были термоэлектродвижущие силы; они особенно резко проявлялись на границе висмут—сурьма. Но Пельтье искал и находил в своих опытах подтверждение предвзятой идеи, что универсальный закон выделения тепла током, закон Джоуля—Ленца, оправдывается только для сильных токов. При слабых же токах, создаваемых термоэлементом, сказываются индивидуальные свойства металлов. Так думал Пельтье. Это ожидание не подтвердилось в основной массе проводников, но на аномалиях в местах контактов сказывалась природа металла и именно термоэлектрические его свойства. Последних Пельтье не заметил. Он искал объяснения в твердости или мягкости металла, в его электропроводности, и если факты не совпадали с его ожиданиями, как, например, в случае висмута, сильные тепловые аномалии которого Пельтье объяснял большой электропроводностью, он отказывался верить измерениям.

Потребовалось несколько лет, в течение которых Беккерель и другие исследователи выясняли истинный смысл явления Пельтье, пока в 1838 г. петербургский академик Ленц простым опытом не положил конец всяким сомнениям. В углубление на стыке стержней из висмута и сурьмы Ленц поместил каплю воды, которая замерзала при прохождении тока в одном направлении и таяла при другом направлении тока. Известно, что замерзание 1 г

воды требует отнятия, а таящие — сообщения 80 кал. Ясно стало, что на стыке двух разнородных проводников электрический ток в зависимости от направления выделяет или поглощает теплоту.

Термоэлектрические явления не привлекали к себе большого внимания физиков. Их затмевала мощная волна электромагнетизма, приведшая Фарадея к открытию электромагнитной индукции. Физика шла к обобщающим законам максвелловской теории; техника — к электрическим машинам. Прошло 30 лет с момента открытия Зеебека, пока не возник с появлением термодипамики интерес ко всем видам превращения энергии, в том числе и к превращениям тепловой и электрической энергии в эффектах Зеебека и Пельтье.

Таков именно и был подход В. Томсона — одного из основателей термодинамики. Термодинамический анализ термоэлектричества и явления Пельтье привел его не только к установлению упомянутой уже связи между этими двумя процессами, но и к открытию третьего эффекта — явления Томсона, заключающегося в выделении или поглощении тепла q при прохождении тока I в одном проводнике, в котором существует градиент температур $\partial T/\partial x$:

$$q = \tau I \frac{\partial T}{\partial x};$$

величина τ получила название коэффициента Томсона; она связана определенным соотношением с коэффициентами α и P .

Мы уже упоминали, что эффект Томсона был экспериментально наблюден и изучен еще Зеебеком.

В 1857 г. Томсон опубликовал теорию термоэлектрических явлений в анизотропных кристаллах, но только в XX в. Бриджмен показал, что изменение направления тока в кристалле связано с появлением или выделением тепла, как и в эффекте Пельтье. Такое внутреннее явление Пельтье получило название эффекта Бриджмена.

Почти через 100 лет после открытия Зеебека, в 1920—1921 гг., Бенедикс сообщил об открытии им еще двух термоэлектрических эффектов, определяемых не разностью температур между концами проводника, а величиной градиента температуры. Если температуры концов проводника равны друг другу, но между ними находится

нагретый или охлажденный участок, то, по Бенедиксу, между концами появится разность потенциалов, если нагретый участок расположен несимметрично — ближе к одному концу. Тщательная проверка эффекта Бенедикса другими исследователями не подтвердила его существования. Можно считать, что если эффект Бенедикса и существует, то он ничтожно мал по сравнению с эффектом Томсона.

Перечисленными явлениями и ограничивается область термоэлектричества, если не считать явлений, возникающих в магнитном поле, которые принято называть термомагнитными.

Термоэлементы давно применяются для измерения температур, но вопрос об их энергетическом использовании возник только тогда, когда появилась растущая потребность в источниках электроэнергии.

В 1885 г. лорд Рэлей поставил задачу о кпд термоэлектрического генератора и вычислил его, впрочем, не вполне правильно.

Задачу о термоэлектрическом генераторе электроэнергии вновь, в основном правильно, поставил в 1909 г. Альтенкирх. В следующем 1910 г. он рассмотрел техническую задачу термоэлектрического охлаждения и нагрева. Однако поскольку единственными известными технике проводниками были металлы, такие приборы оказались экономически невыгодными. Появилось, правда, несколько типов термоэлектрогенераторов (Гюльхера, Кобленца и др.), но они не получили сколько-нибудь значительного распространения, так как их кпд не превышал 0.6 %, а иногда и 0.1 %. Поэтому термоэлектричество снова перешло на задворки курсов физики вместе с люминесценцией, фотоэффектом, пьезоэлектричеством.

Положение на электротехническом фронте, а в связи с этим и в тематике физических исследований существенно изменилось с появлением полупроводников. И весьма показательно для современного этапа связи физики с техникой, что все эти явления вновь привлекают пристальное внимание физиков и широко входят в технику производства на новой основе полупроводников. По отношению к термоэлектричеству пути его использования будут подробно рассмотрены в настоящей книге. По другим направлениям — достаточно известны разработанные в СССР и за рубежом люминесцентные лампы, керамические пьезоэлектрики и вакуумные фотоэлементы.

Перспективы получения значительных кпд термоэлектрогенераторов стали более благоприятными. В связи с задачами индустриализации Советского Союза в начале первой пятилетки, в 1929 г., я указал на преимущества термоэлектрического генератора из полупроводников, подсчитав, что кпд его может достигнуть 2,5—4 % и что дальнейший значительный рост вполне вероятен.

Действительно, в 1940 г. Ю. П. Маслаковец мог сообщить о термоэлементе из сернистого свинца с избытками свинца и серы, который давал кпд порядка 3 %, а в 1947 г. М. Телкес напечатала в «*Journal of Applied Physics*» в США статью, в которой утверждала, что кпд достигал 7 %. Эта последняя оценка, однако, по-видимому, не подтвердилась, так как в 1954 г. кпд подробно ею описанных термоэлементов не превышал 3,3 %.

В 1953 г. Юсти опубликовал в журнале «Холодильная техника», выходящем в ФРГ, расчет термоэлектрического холодильника как из металлических, так и из полупроводниковых материалов. Автор пришел к неправильному заключению о существовании высшего предела для термоэлектрического охлаждения, которое не может будто бы превосходить 25 °С. Ошибочность этого утверждения ясна из того факта, что наши термоэлементы снижают температуру более чем на 50 °С.

В ноябрьском выпуске английского «*Journal of Applied Physics*» за 1953 г. сообщено о холодильнике, снижающем температуру на 26°. Авторы исследования Гольдсмит и Дуглас — сотрудники английской фирмы «*General Electric*».

В теоретической части всех этих работ имеются недочеты. Описанные практические достижения также недостаточны и не указывают путей к их повышению.

Нам представляется, что все энергетические применения термоэлектричества: 1) термоэлектродгенератор, 2) термоэлектродхолодильник и 3) термоэлектрические устройства для подогрева и отопления — не только представляют большой интерес, но и имеют реальные перспективы практического осуществления на основе современного учения о полупроводниках. Сверх того, возникают и непредвиденные ранее задачи, как, например, создание термоэлектрических звукового и ультразвукового генераторов, вакуумного термоэлемента и др.