



Н.Д. Гаврилова,
М.Н. Данилычева,
В.К. Новик

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

5/1989

Издается ежемесячно с 1967 г.

Н. Д. Гаврилова,
М. Н. Данилычева,
В. К. Новик

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСТВО



Издательство «Знание» Москва 1989

Авторы: ГАВРИЛОВА Надежда Дмитриевна — кандидат физико-математических наук;

НОВИК Виталий Константинович — доктор физико-математических наук, сотрудники физического института МГУ им. М. В. Ломоносова;

ДАНИЛЫЧЕВА Марина Николаевна — кандидат физико-математических наук, доцент Московского института радиотехники, электроники и автоматики.

Гаврилова Н. Д., Данилычева М. Н. Новик В. К.
Г 12 Пироэлектричество. — М.: Знание, 1989. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 5).

ISBN № 5-07-000164-7

15 к.

В брошюре рассматриваются свойства пироэлектрических кристаллов и их применение. Читатель познакомится с основными типами пироэлектрических сенсорных устройств, рабочими телами которых являются полярные диэлектрические материалы.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся достижениями и проблемами современной физики.

1604010000

ББК 22.3

ISBN 5-07-000164-7

© Издательство «Знание», 1989 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Открыв очередную брошюру этой серии, читатель задает себе вопрос: оправдает ли воспринятая информация очевидные трудности приобщения к незнакомой теме?

Авторы полностью разделяют такой подход к популярным изданиям и сразу же сообщают читателю, что в брошюре он найдет сведения об электрическом явлении в твердых телах, хорошо известном человечеству с древнейших времен — пироэлектрическом эффекте и его приложениях.

Практическая значимость любого физического явления определяется свойствами преобразователей, основанных на этом явлении. Поскольку преобразователи одного функционального назначения могут быть построены на основе разных явлений, важно оценить конкурентоспособность физических эффектов. В брошюре рассматриваются некоторые общие вопросы этой проблемы, их приложение к пироэлектрическому эффекту и соответственно причины конкурентоспособности пироэлектрических преобразователей в различных сферах измерительно-информационной техники. Читатель познакомится с основными типами пироэлектрических устройств (приемников и преобразователей инфракрасного излучения, пиротермометров, химико-аналитических датчиков и т. п.) и с их характеристиками.

Краткое ознакомление с этой уже сложившейся областью материаловедения даст возможность читателю составить представление о некоторых специфических методах и технологиях, используемых в этой области на современном этапе. Из заключительной части брошюры читатель сможет понять, почему природа создала множественные рецепторы (чувствительные элементы) живых организмов, в том числе и человека, на основе полярной диэлектрической среды с использованием, в частности, и пироэлектрических свойств этой среды.

КРАТКО ОБ ИСТОРИИ НАБЛЮДЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Явление пирoeлектричества (электризации некоторых кристаллических диэлектриков при нагревании) известно человечеству почти так же давно (Диокль из Кариста, IV в. до н. э.), как и электризация трением (Фалес из Милета, VI в. до н. э.). Наблюдения притяжения легких тел нагретыми камнями (монокристаллами) нашли отражение в греческих, римских и средневековых источниках. Изучение этого явления привело к открытию электрического диполя (Эпинус, XVIII в.), электрической природы связей в молекуле (Швайгер, Берцелиус, Ампер, начало XIX в.), соотношений симметрии и свойств кристаллов (Гаюи, Нейман, Кюри, Фохт, XIX в.), пьезоэлектричества (Гаюи, Кюри, Ханкель, XIX в.), электретов (Хевисайд, XIX в.), сегнетоэлектричества (Валашек, Курчатов, XX в.).

Исследования пироелектричества связаны с именами Линнея, Эпинуса, Франклина, Эйлера, Гаюи, Био, Брюстера, Пастера, Томсона (Кельвина), Фохта, Рентгена, Шредингера, Эйнштейна, Борна, Богуславского, Курчатова, Гинзбурга и других известных ученых. В яркой и красочной истории пироелектричества, тесно сплетенной с историей ювелирного мастерства и драгоценных камней (см. рисунки на обложке), присутствуют индийские религиозные мистерии, королевы и каравеллы, гаремы турецких пашей и чинные геттингенские профессора.

В некоторые периоды пироелектричество становилось объектом пристального внимания ученых, потом на долгие десятилетия о нем забывали. Его пытались использовать для практических целей и объявляли непригодным для технических нужд. Очередное возрождение интереса к пироелектрическому эффекту произошло в середине 50-х годов нашего века. Это внимание объяснялось рядом принципиальных преимуществ одного из видов пироелектрических преобразователей (приемников излучения), продемонстрированных на новых в то время материалах — монокристаллических сегнетоэлектриках. Несколько позднее вошли в практику и другие виды пироелектрических преобразователей, показавших высокую конкурентоспособность в некоторых областях автоматики.

Сформировавшаяся таким образом новая область

электронной техники — пироэлектрическое приборостроение — настойчиво стимулировала развитие пироэлектрического материаловедения, что, в свою очередь, обусловило интенсивные исследования физики явления.

ФИЗИКА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Пироэлектричество относится к широкому классу термоэлектрических явлений в диэлектриках, внешне проявляющихся как электризация при изменении температуры. Среди других термоэлектрических явлений пироэлектрический эффект выделяется тем, что причина электризации связана с особенностью кристаллической структуры диэлектрика, демонстрирующего этот эффект. Эта особенность состоит в следующем.

Среди многочисленных твердых диэлектриков известна группа монокристаллов, у которых центры тяжести положительных и отрицательных ионов в решетке взаимно смещены, так что каждая элементарная ячейка кристалла представляет собой электрический диполь даже в отсутствие внешних электрических и механических полей. В направлении ориентации этих элементарных диполей кристалл обнаруживает электрические полюса, откуда и произошло название этих кристаллов — полярные диэлектрики. Поскольку величина электрической поляризации полярных диэлектриков зависит от температуры, то их называют еще и пироэлектриками (от греческого слова ΠΥΡΩ — огонь; термин «пироэлектричество» был введен Д. Брюстером в 1824 г.).

Насколько же сильным и общим является пироэлектрический эффект? Для лучших пироэлектриков величина напряжения, возникающего на кристалле при изменении температуры на 1° , достигает 10 кВ. Общее число известных веществ-пироэлектриков приближается к 10^6 , из них большую часть составляют органические соединения. И именно эти причины (уровень и распространенность явления) обусловили столь давнее знакомство человека с пироэлектрическим эффектом.

Рассмотрим образование полярного состояния в структуре двух основных групп полярных диэлектриков — линейных пироэлектриков и сегнетоэлектриков. Несколько упрощенно различие полярных состояний

этих групп можно охарактеризовать следующим образом:

в линейных пирозлектриках элементарные диполи направлены одинаково по всему объему кристалла, и это направление не может быть изменено внешним электрическим полем;

в сегнетоэлектриках элементарные диполи в общем случае имеют различную ориентацию по объему кристалла, и их направление может быть изменено внешним электрическим полем.

На рис. 1, а показано образование элементарного диполя в линейном пирозлектрике со структурой вюрцита, характерной для соединений типа $A^{II}B^{VI}$, где А — ионы Zn, Cd, Be, В — ионы О, S, Se. Ионы А — положительные, ионы В — отрицательны. В структуре вюрцита ионы А и В создают взаимное тетраэдрическое окружение. На рис. 2, а эта структура представлена тетраэдрами, внутри которых находится ион А. Из-за искажения тетраэдра ион А располагается ниже его геометрического центра (точки суммирования отрицательных зарядов), вследствие чего тетраэдр приобретает элементарный дипольный момент. Односторонняя направленность тетраэдров формирует по оси ячейки вюрцита (шестигранная призма, изображенная штрихпунктирной линией) электрический диполь (на рисунке вынесен влево).

Описанный принцип образования элементарных диполей остается общим и для более сложных структур, содержащих десятки атомов в элементарной ячейке. И в этом случае заряды всех ионов участвуют в создании диполя.

В сегнетоэлектрических кристаллах * ситуация качественно отлична. Заряды большей части ионов взаимно компенсируют друг друга (электронейтральный каркас), а поляризованное состояние элементарной ячейки создается небольшой группой ионов, взаимное пространственное расположение которых и формирует элементарный диполь. Эта дипольная группа обычно слабо связана с каркасом и может занимать в нем несколько (два и более) положений локализации, допускаемых симметрией кристалла.

В элементарной ячейке триглицинсульфата (ТГС)

* Ограничимся случаем собственных сегнетоэлектриков с фазовым переходом II рода типа «порядок — беспорядок».

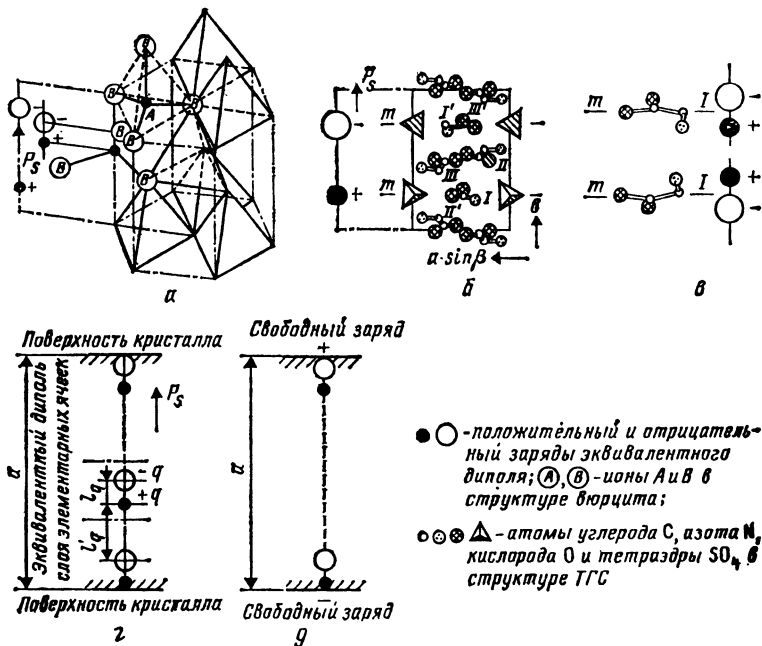


Рис. 1. Образование эквивалентных диполей в линейном пьезоэлектрике (а) и сегнетоэлектрике триглицинсульфате (б); в — положения молекул глицина I относительно плоскости m , соответствующие противоположным направлениям вектора спонтанной поляризации в сегнетоэлектрике ТГС; г — цепочечная модель пьезоэлектрического кристалла; д — компенсация связанных зарядов спонтанной поляризации свободными зарядами проводимости и ионами воздуха. В стационарном состоянии пьезоэлектрик электронейтрален. m — псевдодзеркальная плоскость, перпендикулярная плоскости чертежа. Водородные связи в структуре ТГС не показаны

$(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{OON})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ — сегнетоэлектрика, широко используемого в пьезоэлектрических преобразователях (рис. 1, б), — содержащей две формульные единицы этого соединения, элементарный диполь создается только молекулами глицинов I и I'. Монокристаллы ТГС принадлежат к классу симметрии C_2 . Идентичные молекулы, принадлежащие различным формульным единицам, располагаются в ячейке соответственно винтовой оси симметрии второго порядка, совпадающей с кристаллическим направлением b (рис. 1, б). Симметрия кристалла разрешает глицинам I и I' два положения ло-

кализации (рис. 1, в) относительно псевдозеркальной плоскости m . Переброс из одного положения в другое может быть осуществлен внешним электрическим полем, приложенным по оси z . Нетрудно видеть (рис. 1, в), что при этом изменяется направление элементарных диполей по и против оси z . Отметим совпадение «центра тяжести» электрических зарядов остальных (помимо глицинов I и I') структурных единиц (молекул глицинов II, II' и III, III', тетраэдров SO_4), создающих в данной ячейке электронейтральный каркас (рис. 1, б).

Расположение элементарных диполей, цепочками пронизывающих пространство монокристалла (рис. 1, г), создает поляризацию всего объема. Количественной мерой этого состояния принято считать спонтанную поляризацию P_s пирозлектрика, равную его дипольному моменту M , отнесенному к объему V пирозлектрика. Применительно к цепочечной модели (рис. 1, г) дипольный момент $M = N_{\text{я}}ql$, где $N_{\text{я}} = a/(l+l')$ — число ячеек вдоль полярного направления кристалла, a — размер кристалла в направлении спонтанной поляризации P_s , q — заряд элементарного диполя, l и l' — расстояния между зарядами; $V = aS$, где S — площадь поперечного сечения пирозлектрика. Тогда

$$P_s = \frac{M}{a} \cdot \frac{1}{S} = Q \cdot S^{-1} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}.$$

Здесь Q — связанный заряд на поверхности пирозлектрика.

Таким образом, физическое проявление спонтанной поляризации состоит в существовании связанного заряда плотности $|P_s|$ на поверхности пирозлектрика.

Типичный уровень спонтанной поляризации близок к величине $10^{-5} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$. Диэлектрическую проницаемость пирозлектриков можно принять равной $2 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} \cdot \text{см}^{-1}$. При $S = 1 \text{ см}^2$, $a = 1 \text{ см}$ нетрудно оценить величину напряжения на таком «конденсаторе» единичной геометрии: $U \simeq 10^6 \text{ В}$. Естественно, что в реальных условиях пирозлектрический конденсатор не может оставаться источником электрического напряжения сколь угодно долго. Создающие это напряжение связанные заряды спонтанной поляризации через некоторое время будут нейтрализованы свободными зарядами проводимости или ионами воздуха, движущимися под действием этого же

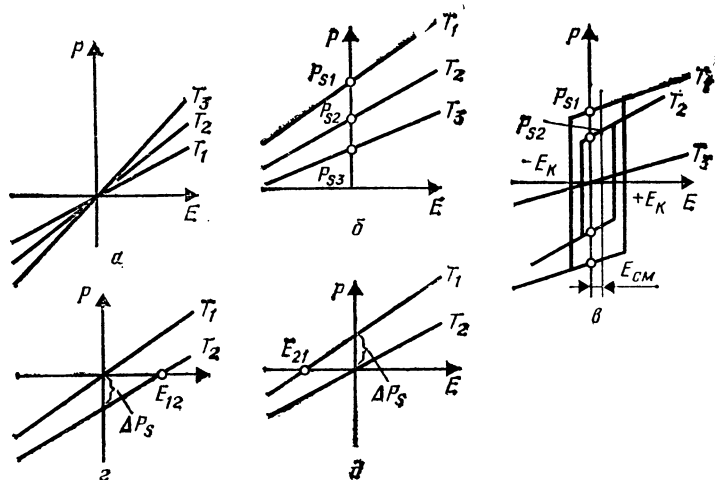


Рис. 2. Зависимость поляризации от электрического поля (а, б, в) для различных типов диэлектриков и иллюстрация возникновения электрического поля при изменении температуры пироэлектрика (г, д)

напряжения. Время нейтрализации, очевидно, зависит от скорости поступления свободных зарядов. В стационарном состоянии пироэлектрик электрически нейтрален, поскольку связанные заряды спонтанной поляризации скомпенсированы свободными зарядами (рис. 1, д).

Спонтанная поляризация и диэлектрическая проницаемость пироэлектриков зависят от температуры: с ростом температуры первая обычно падает, а вторая растет. Реакция пироэлектрика на изменение температуры видна из поляризационных (вольт-кулоновских) характеристик (рис. 2), т. е. зависимостей плотности зарядов на обкладках конденсатора с данным типом диэлектрика от внешнего электрического поля.

У обычного линейного диэлектрика (слюда, полистирол, фторопласт и т. п.) зависимость $P(E)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат с углом наклона, соответствующим диэлектрической проницаемости диэлектрика при данной температуре (рис. 2, а). Для гипотетического случая линейного пироэлектрика, на поверхности которого отсутствуют свободные заряды, зависимость $P(E)$ имеет вид, пока-

занный на рис. 2, б. При $E=0$ значение P равно спонтанной поляризации для данной температуры.

Как уже говорилось, направление спонтанной поляризации сегнетоэлектриков может быть изменено на обратное внешним полем. Это свойство находит отражение в своеобразных поляризационных характеристиках, имеющих вид гистерезисных петель. Основными параметрами петли являются спонтанная поляризация, величина коэрцитивного поля E_k , величина поля смещения $E_{см}$, определяемая как смещение оси петли относительно оси ординат (рис. 2, в). Участок насыщения петли близок к прямой с углом наклона, пропорциональным диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика при температуре проведения эксперимента. Остальные параметры петли также зависят от температуры. Нетрудно видеть, что в полях $E < |E_k|$ зависимости $P(E)$ для линейных пьезоэлектриков и сегнетоэлектриков подобны.

Ограничиваясь областью $E=0$, используем участки зависимостей $P(E)$, чтобы показать, как при изменении температуры на пьезоэлектрике возникает электрическое напряжение. Напомним, что в стационарном состоянии связанные заряды спонтанной поляризации полностью нейтрализуются свободными зарядами. Лишь при изменении температуры пьезоэлектрика и соответственно изменении спонтанной поляризации между его поверхностями, перпендикулярными полярной оси, возникает электрическое поле, убывающее со скоростью, зависящей от поступления (или оттока) нейтрализующих зарядов. Для свободного кристалла это время исчезновения поля может измеряться часами, для замкнутого на сопротивление порядка десятков ом — пикосекундами. Следовательно, если пьезоэлектрик был выдержан при температуре T_1 (рис. 2, г), а потом быстро (сравнительно со скоростью транспорта свободных зарядов) приобрел температуру T_2 , то в первоначальный момент избыток (или дефицит) свободных зарядов $\Delta P_s = P_{s1} - P_{s2}$ создает поле E_{12} , которое будет уменьшаться во времени по мере убывания (натекания) нейтрализующих зарядов.

Если после выдержки при T_2 (рис. 2, д) температуру пьезоэлектрика вернуть к значению T_1 , на нем возникнет поле E_{21} . По знаку E_{12} противоположно E_{21} и, вообще говоря, не равно ему по амплитуде, так как диэлектриче-

ская проницаемость ϵ изменяется при изменении температуры. Однако для ΔT , малых по сравнению с температурой эксперимента, $\epsilon(T_1) \simeq \epsilon(T_2)$, и тогда для пироэлектрика единичных размеров $E_{12} = -E_{21} = \Delta P_s / \epsilon$.

Это соотношение позволяет обосновать приведенное ранее значение напряжений, сопутствующих изменению температуры пироэлектрика. Для монокристаллов ТГС при $\Delta T = \pm 1 \text{ К}$ и $T = 300 \text{ К}$ $\Delta P_s = 3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$ и $\epsilon = 2 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} \cdot \text{см}^{-1}$. Нетрудно определить, что для единичной геометрии $U \simeq \pm 1,5 \text{ кВ}$. И хотя энергия этого электростатического сигнала невелика ($\simeq 10^{-5} \text{ Дж}$), современные электрометрические средства позволяют использовать эту исключительно высокую чувствительность пироэлектриков к изменению температуры в ряде приборов.

Из рис. 2, г, д легко увидеть, что реакция пироэлектрика на изменение температуры будет тем сильнее, чем большее изменение спонтанной поляризации ΔP_s соответствует одному и тому же приращению температуры ΔT . Поэтому общепринятой мерой пироактивности полярных диэлектриков принято считать пироэлектрический коэффициент γ , равный отношению $\Delta P_s / \Delta T \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ при $\Delta T \rightarrow 0$. Здесь и далее пирокоэффициент определяется при постоянном механическом напряжении, т. е. в отсутствие каких-либо механических связей, препятствующих свободному расширению пироэлектрика.

Перепишем предыдущее выражение в виде $E_{12} - E_{21} = \frac{\gamma \Delta T}{\epsilon}$ для того, чтобы обратить внимание читателя

на принципиальную особенность пироэлектриков: электрическое напряжение на пироэлектрике пропорционально амплитуде и знаку приращения температуры, а не ее абсолютной величине. Эта особенность и выделяет пироэлектрические преобразователи среди других термоэлектрических преобразователей.

Итак, причиной возникновения пироэлектричества является зависимость спонтанной поляризации от температуры. Обсудим природу этой зависимости.

На рис. 3 представлены типичные температурные зависимости спонтанной поляризации линейного пироэлектрика (кривая 1) и сегнетоэлектрика (кривая 2). В линейном пироэлектрике спонтанная поляризация

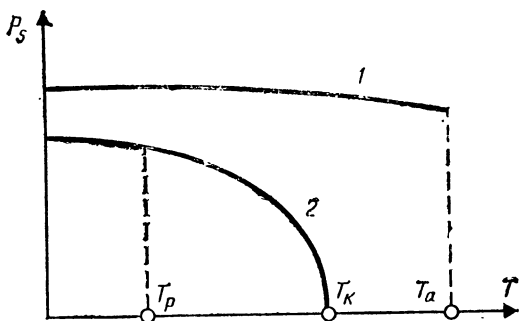


Рис. 3. Температурные зависимости спонтанной поляризации P_s линейного пьезоэлектрика (кривая 1) и сегнетоэлектрика (кривая 2). T_a — температура изменения агрегатного состояния (плавления, сублимации, дегидратации) полярного диэлектрика. T_k — температура фазового перехода сегнетоэлектрика. T_p — температура завершения упорядочения или начала разупорядочения дипольных элементов структуры сегнетоэлектрика

сохраняется вплоть до температуры изменения агрегатного состояния кристалла T_a (температура плавления, дегидратации, сублимации и т. д.). Во всем температурном интервале от 0 К до T_a изменение спонтанной поляризации не превышает нескольких процентов от ее значения при 0 К.

В сегнетоэлектриках спонтанная поляризация существует лишь при температурах ниже температуры фазового перехода T_k , выше которой кристалл, сохраняя целостность, претерпевает изменение структуры, теряя полярные свойства.

Вернемся к рис. 1, а и 1, г и найдем ответ на вопрос: какая из величин, входящих в выражение для дипольного момента M , зависит от температуры. Наиболее сильной должна быть такая зависимость для расстояний между зарядами l , менее всего изменение температуры сказывается на самих зарядах, а потому примем, что $q(T) = \text{const}$. При этом следует помнить, что в многоатомных линейных пьезоэлектриках и l , и q — это эквивалентные, эффективные величины, отражающие сложное пространственное распределение ионов и их зарядов.

На первый взгляд теория, которая могла бы описать с общих позиций зависимость l и соответственно γ от температуры, должна быть чрезвычайно сложной. Однако эта проблема была просто и изящно решена в работах русского физика С. Богуславского и известного немецкого теоретика М. Борна еще в начале нашего века. Они несколько лет вместе работали в Геттингенском университете, были близкими друзьями и придерживались преемственности в тематике и методах научных исследований.

Основной посылкой этих работ была идея (впоследствии экспериментально подтвержденная) о несимметричности колебаний иона в кристаллической решетке и как следствие этого — наличии усредненного во времени отклонения иона от положения равновесия. Изменение $l(T)$ для одного иона принималось равным приращению этого среднего отклонения с возрастанием (понижением) температуры. На первом этапе построения теории было сделано допущение, что все ионы колеблются с одной частотой, которая остается неизменной при всех температурах. Фундаментальным и общим выводом С. Богуславского было установление пропорциональности среднего отклонения иона энергии его колебаний.

Следующим шагом в теории должно было быть определение отклонения, усредненного на этот раз уже по всем однотипным ионам решетки, и таким образом, вычисление изменения Δl и приращения дипольного момента (напомним, что $q = \text{const}$). Но каким же образом можно найти усредненное смещение, если энергия колебаний ионов различна?

С. Богуславский использовал идею квантования энергии механических осцилляторов, высказанную несколько ранее А. Эйнштейном и с успехом примененную им для расчета температурной зависимости удельной теплоемкости твердых тел. Установив таким образом усредненную по всем однотипным ионам энергию колебаний, С. Богуславский нашел усредненное смещение, изменение дипольного момента и приращение спонтанной поляризации. Температурная производная последней и дала зависимость γ от T .

Внимательный читатель уже понял: поскольку приращение спонтанной поляризации пропорционально усредненной энергии колебаний ионов, то пьезоэлектриче-

ский коэффициент в такой упрощенной модели должен быть пропорционален производной этой энергии, т. е. удельной теплоемкости C , обусловленной этими одночастотными (оптическими) колебаниями, $\gamma(T) \sim C_e(T)$.

Но реальный кристалл — линейный пирозлектрик — имеет огромное число частот колебаний, $\sim 10^{23}$. И практически все они вносят вклад в изменение дипольного момента. Большая часть этих частот принадлежит продольным и поперечным колебаниям атомных цепочек, плоскостей и слоев, т. е. так называемым акустическим колебаниям. Несмотря на огромное число этих колебаний, сливающихся в непрерывный спектр и обладающих различной энергией, механизм их связи с изменением дипольного момента остается тем же самым, что и для одночастотной модели — усредненное во времени отклонение от положения равновесия теперь уже не отдельного иона, а колеблющейся структурной группы (ангармонизм колебаний). Заряд, связываемый с этим отклонением, соответствует, естественно, эффективному заряду группы (атомной цепочки, плоскости, слоя и т. п.).

Развивая эту мысль С. Богуславского, М. Борн в 1928 г. в довольно громоздкой, но стройной теории показал, что изменение дипольного момента кристалла в данном случае пропорционально общей энергии акустических колебаний и заряда, усредненного по всем ионам решетки. Нетрудно догадаться, что температурная зависимость пирозлектрического коэффициента $\gamma(T)$ должна быть аналогична температурной зависимости удельной теплоемкости, обусловленной акустическими колебаниями, $C_p(T)$.

Итак, в линейных пирозлектриках температурное изменение спонтанной поляризации обусловлено как акустическими, так и оптическими колебаниями решетки, а физический механизм этого изменения — ангармонизм колебаний. Заметим, что таков же физический механизм линейного расширения твердых тел. И в том и в другом случае удельное относительное изменение величин (спонтанной поляризации и длины) одного порядка и очень мало ($\sim 10^{-5} \text{K}^{-1}$). Этим и объясняется незначительное изменение P_s в интервале температур от 0 до T_a для этого типа пирозлектриков (рис. 3, кривая 1).

В сегнетоэлектриках (рис. 3, кривая 2) спонтанная поляризация становится равной нулю при превышении температуры фазового перехода. Естественно, что столь

отличное поведение спонтанной поляризации в этих веществах имеет своей причиной другой, более эффективный физический механизм температурного изменения P_s . Каков же он?

При обсуждении рис. 1, б уже говорилось, что каркас сегнетоэлектрика электрически нейтрален, т. е. теперь уже в терминах динамики кристаллической решетки мы можем сказать, что акустические колебания не участвуют в изменении P_s . Спонтанная поляризация создается дипольными группами отдельных атомов (на рис. 1, б — полярной молекулой глицина), свободно меняющих ориентацию на обратную относительно каркаса. И общее температурное изменение дипольного момента сегнетоэлектрика происходит вследствие изменения: а) дипольного момента этих групп; б) вероятности антипараллельной ориентации дипольной группы — разупорядочения.

Температурное изменение собственного дипольного момента группы связано с ангармонизмом колебаний группы. Эффективным обычно оказывается вклад лишь немногих колебаний, у которых ангармоническое смещение атомов имеет суммирующуюся с одним знаком проекцию на полярное направление. Ангармонизм колебаний дипольной группы остается основной причиной изменения γ в интервале от ОК вплоть до $T_p \simeq T_k$ — (30—150) К — температуры начала дипольного разупорядочения.

Представление о дипольном порядке (упорядочении или разупорядочении), несмотря на известное упрощение, позволяет легко понять как формирование полярного состояния, так и температурную зависимость P_s в интервале T_p — T_k . Напомним опять-таки, что речь будет идти только о сегнетоэлектриках с фазовым переходом типа «порядок — беспорядок», к которым относится триглицинсульфат (рис. 1, б). Сегнетоэлектрики этого типа содержат дипольные элементы структуры (в нашем случае — молекулы глицина) как в полярной ($T < T_k$), так и в неполярной ($T > T_k$) структурной фазе. Структурные фазы различаются только одним — вероятностью локализации дипольного элемента структуры в одной из позиций, разрешенных симметрией кристалла.

Рис. 4 поясняет процесс дипольного разупорядочения (или упорядочения в зависимости от направления движения по температурной оси) в сегнетоэлектрике

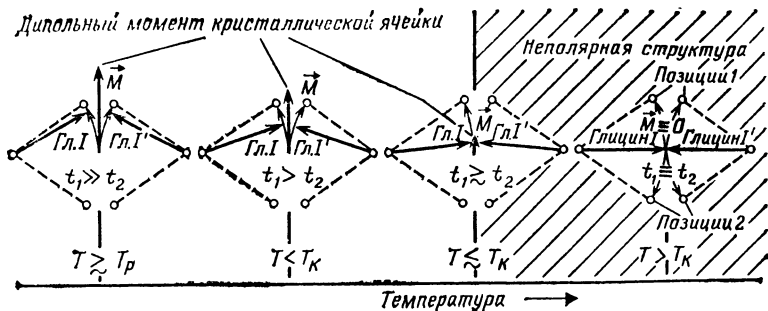


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая процесс образования и температурного изменения дипольного момента кристаллической ячейки ТГС в интервале $T_p - T_k$

ТГС. Стрелки с индексами «Гл. I», «Гл. I'» показывают среднее во времени положение дипольного момента молекул глицинов I и I'. Штриховыми линиями даны предельные позиции 1 и 2 пространственного движения вектора дипольного момента глицинов. M — дипольный момент элементарной кристаллической ячейки ТГС.

Выше температуры фазового перехода T_k характер колебаний молекул глицинов таков, что они одинаковое время пребывают в позициях 1 и 2, т. е. $t_1 \approx t_2$. И в этом случае средние во времени положения векторов дипольного момента глицинов I и I' не дают какого-либо дипольного вклада в направлении полярной оси $M = 0$. Структура сегнетоэлектрика остается неполярной и сохраняет такое состояние при любой температуре до тех пор, пока она не понизится до температуры фазового перехода T_k . Теперь уже времена t_1 и t_2 начинают несколько отличаться, смещается среднее положение векторов дипольных моментов глицинов, и элементарная кристаллическая ячейка приобретает дипольный момент M . С понижением температуры дипольный момент растет и достигает своего, естественного для рассматриваемого физического механизма максимального предела при $t_1 \gg t_2$. Температура T_p , при которой завершается упорядочение при охлаждении или начинается разупорядочение при нагревании, обычно соответствует отношению $t_1/t_2 \approx 3 \cdot 10^2$. От 0 K до T_p изменение спонтанной поляризации происходит только вследствие изменения собственных дипольных моментов полярных элементов

структуры (на рис. 4 этот факт можно было бы изобразить как изменение длин векторов Гл. I и Гл. I').

Прежде чем сравнивать масштабы температурного изменения P_s , обусловленные ангармонизмом колебаний и разупорядочением, постараемся ответить на два вопроса, которые неизбежно возникают у читателя: 1) какие причины вызывают структурный фазовый переход в сегнетоэлектрике; 2) почему при обсуждении последовательности изменения M на рис. 4 авторы рассматривали увеличение t_1 , а не t_2 ?

Кратким и общим ответом на первый вопрос будет следующий: возникновение спонтанной поляризации является для сегнетоэлектриков главным условием сохранения минимума свободной энергии кристалла. Сама постановка второго вопроса по своей сути направлена на выяснение числа возможных ориентаций M в элементарной кристаллической ячейке сегнетоэлектрика. Ведь при увеличении t_2 (см. рис. 4) только изменится ориентация M на обратную, и ни одна из ориентаций не сможет рассматриваться как более вероятная. Так оно и есть. В сегнетоэлектриках в зависимости от структуры неполярной фазы возможна множественная (до шести) ориентация M в кристаллической ячейке (в ТГС — две).

В каждой отдельно взятой ячейке эта ориентация одна из возможных, но в соседних ячейках ориентации могут быть разными. Совокупности ячеек с одинаковой ориентацией M образуют области, называемые сегнетоэлектрическими доменами. Размеры доменов могут быть самыми разными — площадью от квадратных микрометров до квадратных сантиметров. При некоторых условиях внешним электрическим полем можно ориентировать M в одном направлении по всему объему кристалла. Такой кристалл называют однодоменным. Именно однодоменные кристаллы используются в пироэлектрических преобразователях.

Вернемся, однако, к характеристике и сравнению температурного изменения P_s вследствие ангармонизма колебаний и разупорядочения дипольных групп, т. е. к оценке уровней пирокоэффициента. Как уже говорилось ранее, ангармонизм колебаний вызывает удельные изменения спонтанной поляризации порядка коэффициента линейного расширения, т. е. $\simeq 10^{-5} P_s / K$.

Разупорядочение снижает поляризацию несравненно

более интенсивно. При $T \geq T_p$ удельные изменения P_s имеют порядок $10^{-3} P_s / K$, а в области температур от $T_k - 30$ К до T_k это соотношение достигает уровня $10^{-2} P_s / K$, стремясь к бесконечности в точке Кюри. Соотношения пироккоэффициентов имеют, естественно, тот же порядок.

Приведенные оценки показывают, что наиболее эффективными в практических применениях должны быть сегнетоэлектрические материалы, используемые выше температуры разупорядочения. И действительно основой всех пирозлектрических преобразователей, уже используемых, выпускаемых и разрабатываемых в настоящее время, являются сегнетоэлектрики.

В последние годы, однако, найден новый физический механизм температурного изменения P_s , оказавшийся более эффективным, чем процесс упорядочения-разупорядочения. Завершение этих исследований уже на стадии понимания вторичных и сопутствующих эффектов должно привести к созданию качественно новых пирозлектрических материалов.

В настоящее время разработана широкая гамма пирозлектрических материалов, оптимизированных для применения на различных участках температурного интервала от 1 до 900 К. Номенклатура материалов содержит три типа пирозлектриков: монокристаллические, поликристаллические и органические полимерные.

Монокристаллические материалы обладают наиболее ярко выраженными пирозлектрическими свойствами и наиболее эффективны. Формирование свойств таких материалов завершается, как правило, на стадии роста монокристаллов, после чего эти свойства остаются стабильными во времени и практически неизменными при эксплуатационных воздействиях. Возможности гибкого управления свойствами этих материалов, например электрическим полем, крайне ограничены. Основная форма рабочих элементов — пластина, вырезанная перпендикулярно полярной оси. Площадь пластины обычно не превышает нескольких квадратных сантиметров. Наибольшее применение находят монокристаллы $LiTaO_3$, $LiNbO_3$ и ТГС, выпускаемые отечественной промышленностью в широких масштабах.

Поликристаллические материалы представляют собой «спеченные» по керамической технологии массивы

сегнетоэлектрических микрокристаллов с размерами от 0,2 до 10 мкм. В полученном массиве (сегнетоэлектрической керамике) кристаллографические оси микрокристаллов ориентированы случайным образом и спонтанная поляризация в целом равна нулю. Воссоздать полярное состояние в керамике можно, приложив сильное, $\sim 10^4 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$, электрическое поле, которое ориентирует спонтанную поляризацию микрокристаллов в направлении, близком к собственному. После такой технологической операции, получившей название «поляризация керамики», керамика приобретает спонтанную поляризацию, абсолютное значение которой несколько меньше P_s монокристалла.

По своим пьезоэлектрическим свойствам и эффективности поликристаллические материалы приближаются к соответствующим монокристаллам. Они допускают широкое варьирование свойств изменением химического состава и режимов поляризации. Сегнетоэлектрические керамики, подобно глиняным керамическим изделиям, можно изготавливать самых разных форм, в том числе в виде открытых и замкнутых полостей. Это придает пьезоэлектрическим преобразователям существенно новые свойства: приемники излучения могут изготавливаться в виде поглощающих все длины волн абсолютно черных тел, в термометрах, имеющих форму чашек и ампул, могут непосредственно размещаться исследуемые объекты и т. д. Площадь поверхности керамических поликристаллических материалов может достигать сотен квадратных сантиметров.

Сегнетоэлектрические материалы для пиро- и пьезоэлектрических применений выпускаются промышленностью. Наибольшее распространение получила керамика на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца. К этой группе относятся материалы типа ЦТС, ПКД, ПКР, ЦТБС, ЛЦТС, подразделяющиеся, в свою очередь, на многочисленные марки соответственно конкретным составам. Для применения в области комнатных температур лучшей является керамика ПКР-3.

Органические полимерные «пироэлектрики» представляют собой соединения, у которых составляющие элементы полимерной цепи обладают электрическим дипольным моментом. В объеме полимера эти элементы ориентированы хаотически, и он не полярен. Для получения устойчивого полярного состояния пленки этих сое-

дишней раскатываются до толщины 5—15 мкм, после чего поляризуются при температурах 120 — 140°C в поле $\simeq 10^6 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ и в поле же охлаждаются. Полярное состояние полимера, обработанного таким образом, принципиально отличается от полярного состояния в пироэлектрике.

В первом это случайно расположенные, насильственно ориентированные и «замороженные» в таком положении диполи. Во втором — идеально упорядоченные дипольные группы периодической кристаллической решетки. И хотя внешняя реакция поляризованного полимера на изменение температуры такая же, как у пироэлектрика, по устойчивости полярного состояния они резко различаются. Уже при 55°C «замороженная», или электретная, поляризация полимера начинает необратимо деградировать. Для восстановления поляризации необходим повторный цикл электротермической обработки.

Поскольку при увеличении толщины материала пироэлектрические свойства полимерного электрета ухудшаются, оптимальной формой его существования является именно пленка. При названных толщинах ее площадь может достигать нескольких десятков квадратных сантиметров.

Наиболее активными полимерными электретами и в настоящее время остаются поливинилфторид (ПВФ) и поливинилиденфторид (ПВДФ), предложенные в качестве пироэлектрических материалов еще в конце 60-х годов. Основное преимущество этих материалов — крайне низкая стоимость, и они нашли применение в бытовых пироэлектрических преобразователях — пироприемниках для открывания дверей при приближении человека, системах внутренней охраны помещений, игрушках и т. п.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СОПУТСТВУЮЩИЕ ПОЛЯРНОМУ СОСТОЯНИЮ

Сам факт существования спонтанной поляризации и, естественно, ее температурные изменения обуславливают целый ряд сопутствующих эффектов, с которыми поневоле приходится считаться и находить способы управления ими, выступают ли они как полезные или как вредные, дестабилизирующие, маскирующие. Пренебреже-

ние этими эффектами оборачивается в лучшем случае неопределенностью поведения рабочих тел в пироэлектрических преобразователях, в худшем — отказами этих преобразователей.

Для пластины преобразователя, вырезанной перпендикулярно полярной оси, пространственную локализацию сопутствующих явлений можно несколько условно связать с объемом пироэлектрика, с приповерхностными областями и с собственно поверхностью.

Уникальные свойства привносит полярное состояние в объем диэлектрика: 1) электропроводность пироэлектрика существенно отличается для случаев наложения внешнего поля вдоль и против направления спонтанной поляризации, т. е. вольт-амперная характеристика его подобна характеристике диода (униполярная электропроводность); 2) освещение кристалла белым светом или более коротковолновым излучением создает постоянное, очень высокое, $\sim 1 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, поле на электродах полярного среза пироэлектрика (фотовольтаический эффект).

Обратим внимание читателя, что оба эти эффекта имеют место в высокосовершенных кристаллах, т. е. их проявление обусловлено фундаментальными причинами, а не присутствием различного рода дефектов. Уровень обоих этих эффектов столь велик, что они были открыты еще в последней четверти XIX в. на естественных образцах пироэлектрических минералов. В статье С. Томпсона и О. Лоджа, опубликованной в 1879 г., где описывалась униполярная электропроводность турмалина, были приведены описания экспериментов, свидетельствующих и об отличии приблизительно на 20% униполярной теплопроводности по направлению спонтанной поляризации и против нее.

Фотовольтаический эффект был впервые описан В. Ханкелем в 1881 г. и назван им актиноэлектричеством.

Все эти явления уже в наше время были воспроизведены, изучены и объяснены, причем наиболее полно — именно униполярная электропроводность и фотовольтаический эффект, физика которых и изложена ниже.

В диэлектриках ионную проводимость обычно рассматривают как результат перескоков ионов, находящихся в минимумах эффективного периодического потенциала решетки, в соседние эквивалентные положе-

ния. Для того чтобы ион переместился по координате из начального положения в соседнее, он должен преодолеть потенциальный барьер. В обычных кристаллических диэлектриках периодический потенциал решетки по координате описывается функцией, симметричной относительно оси ординат, проведенной через точку минимума. В полярных диэлектриках по оси P_s периодический потенциал асимметричен, т. е. расстояния от минимума потенциала до правого и левого максимумов существенно различны. В связи с этим понижение потенциального барьера в максимуме, наиболее удаленном от минимума потенциала, будет пропорционально больше при одинаковых внешних приложенных электрических полях. Направления полей, понижающих правый и левый максимумы, естественно, противоположны.

Асимметрия электропроводности обусловлена неравенством расстояний от минимума до правого и левого соседних максимумов и соответственно различием по величине токов, протекающих при одинаковых значениях внешних полей различных знаков. В монокристаллах ниобата лития и ниобата стронция токи по и против направления P_s отличаются более чем на порядок. Среднее значение удельного сопротивления обычно $\simeq 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Итак, читатель получил общее представление о высокоомном «выпрямляющем» эффекте в однородной (без p — n -перехода) кристаллической матрице, отличительной особенностью которой является полярное состояние.

Почему же при стационарном освещении полярной матрицы она становится источником постоянного тока по направлению P_s (для внешних сопротивлений, меньших собственного сопротивления пироэлектрика), пропорционального удельной мощности засветки? Для монокристаллов LiNbO_3 с примесью Fe^{2+} , например, при мощности падающего света $\simeq 0,3 \text{ Вт}$ и $\lambda = 0,473 \text{ мкм}$ стационарное значение тока $\simeq 10^{-8} \text{ А}$, что на кристалле единичных размеров создает напряжение $\simeq 10 \text{ кВ}$.

Каким же образом свет создает носители заряда в диэлектрике, чем обусловлено поле, заставляющее эти заряды двигаться в направлении полярной оси? Сразу оговоримся, что эффект имеет место при строго равномерной засветке кристалла и что в направлении, перпендикулярном полярной оси, этот эффект отсутствует.

К настоящему времени разработано несколько моделей, объясняющих появление носителей и электрического поля. В модели, с наибольшим успехом объясняющей как сам факт, так и побочные явления, предполагается, что электроны, возбужденные светом, переходят со своих уровней в зону проводимости. При этом одни электроны остаются свободными, другие захватываются в ловушки, локализуются и таким образом создают локальное изменение поляризации ΔP , а также, соответственно и локальное электрическое поле $E = \Delta P / \epsilon$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость. Величина ΔP переменна как во времени, так и в пространстве по величине, но всегда имеет одно и то же направление.

Именно поле E движет свободные электроны в зоне проводимости. Постоянные составляющие E и тока и представляют собой фотовольтаическое поле и ток, возбуждаемые при освещении пироэлектриков.

Полярная среда реагирует на внешние воздействия всеми присущими ей свойствами. И поэтому если на пироэлектрик одновременно воздействовать изменением и температуры, и освещенности, то фотовольтаическое напряжение будет складываться с пироэлектрическим. В стационарном температурном состоянии на электродах пироэлектрика сохраняется только фотовольтаическое напряжение.

Интереснейший эффект в пироэлектриках связан с приповерхностной (приэлектродной) областью кристалла. Проявление этого эффекта казалось в свое время столь загадочным, что сам факт его существования был поставлен под сомнение, так как этот факт «противоречил» законам сохранения. В самом деле, можно ли иначе (во всяком случае, с первого взгляда) воспринять сообщение о том, что совершенный, бездефектный пироэлектрический кристалл, находящийся при строго стационарной температуре, в темноте, в отсутствие каких-либо внешних воздействий, в течение длительного срока, порой месяцами, является источником постоянного тока $\simeq 10^{-12} A$, протекающего через внешнее сопротивление, имеющее ту же температуру? Откуда взяла заряд эта «диэлектрическая батарея» (если никто ее специально не заряжал) и почему она так долго разряжается?

Исчерпывающие ответы были получены после того,

как было развито представление об особой разновидности электретного состояния в пьезоэлектриках. Электретом принято называть твердотельный (в том числе аморфный и полимерный) неполярный диэлектрик, в объеме которого посредством воздействия сильных внешних электрических полей создается полярное состояние, фиксируемое тем или иным способом (см. выше о полимерных «пьезоэлектриках» на пленках поливинилфторида и поливинилиденфторида).

Индукцированная и зафиксированная поляризация электрета в силу фундаментальных причин непрерывно уменьшается по величине. В качественно приготовленных электретах, например для пленочных микрофонов, этот процесс очень замедлен, и полный распад поляризации наступает через много лет. Длительная, многомесячная живучесть электретного состояния на стеклах отмечалась еще в XVIII в. Непрерывное уменьшение поляризации электретного конденсатора обуславливает постоянный отток свободных электрических зарядов, компенсирующих поляризацию, или, другими словами, ток в цепи, замыкающей электроды электрета. Величина тока во временных интервалах порядка суток остается практически неизменной.

Нетрудно видеть, что внешние проявления непонятного поведения пьезоэлектриков повторяют поведение электретов. И если допустить, что в пьезоэлектрике наряду со спонтанной существует электретная компонента поляризации, то надо объяснить, как она формируется, и в первую очередь установить источник электрического поля. Таким источником является пьезоэлектрическое напряжение, достигающее при случайных изменениях температуры весьма значительных величин в том случае, если компенсирующим свободным зарядам затруднен доступ к поверхности кристалла. Причиной такой ситуации может быть или отсутствие электрода на пьезоэлектрике, или наличие диэлектрической прослойки (адсорбированные слои, масла и т. п.) между нанесенным электродом и собственно поверхностью пьезоэлектрика. В последнем случае даже при замкнутых накоротко электродах пьезоэлектрик остается практически электрически разомкнутым.

Что же будет происходить при случайном монотонном изменении температуры? Возрастающее пьезоэлектрическое напряжение вызовет электрический пробой

воздуха между поверхностями полярного среза или несколько реже при отсутствии электродов — самого пироэлектрика. При наличии электродов и диэлектрической прослойки возникает пробой этой прослойки.

Вследствие пробоя (чаще всего — темнового) заряженные частицы (электроны и ионы) инжектируются в приповерхностную область пироэлектрика. Локализация частиц в кристаллической решетке создает объемный заряд и несколько деформирует исходное пространственное положение дипольных элементов полярной матрицы. Эти изменения электрического состояния приповерхностного слоя и есть новая, электретная компонента поляризации пироэлектрика. Процесс распада этой компоненты обусловлен миграцией заряженных частиц к поверхности и постепенным возвратом ориентации дипольных элементов структуры в первоначальное положение.

Из сказанного нетрудно понять, в чем состоит своеобразие формирования электретного состояния в пироэлектриках. Это состояние создается самопроизвольно, спонтанно. Причины его образования predetermined существованием спонтанной поляризации.

Наконец, хотя бы несколькими словами охарактеризуем еще один тип полярного состояния, использование которого позволяет сообщить пироэлектрическим преобразователям ранее не характерное для них свойство — управляемость характеристик.

Если с такой точки зрения оценить свойства линейных пиро- и сегнетоэлектриков, то приходится признать, что не существует реальной возможности сколько-нибудь существенно и обратимо изменять отношение γ/ϵ , характеризующее преобразовательные свойства этих сред.

Возможность управления характеристиками становится реальной и целесообразной при использовании иного типа полярной среды — антисегнетоэлектрика.

Антисегнетоэлектрик — это кристалл со спонтанно поляризованными цепочками ионов, которые расположены таким образом, что соседние цепочки ионов одного сорта поляризованы в противоположных направлениях. Поэтому в антисегнетоэлектриках отсутствует дипольный момент элементарной ячейки. Но, подобно сегнетоэлектрикам, они обладают высокой диэлектрической проницаемостью и испытывают фазовый переход из па-

разэлектрической в антисегнетоэлектрическую фазу. Антисегнетоэлектрики выращиваются в виде монокристаллов в лабораторных условиях и выпускаются промышленностью в виде керамики (спеченных поликристаллов) для изготовления малогабаритных конденсаторов большой емкости.

Если такую керамику поместить в сильное электрическое поле, то в ней формируется полярное состояние, причем уровень поляризации и ее температурная зависимость однозначно связаны с приложенным полем. Иными словами, величиной пирокoeffициента такой полярной среды можно управлять с помощью внешнего электрического поля, изменяя ее от нуля до максимального значения.

Добавим, что если кроме электрического поля на такую полярную среду воздействовать еще и изменением температуры, то кроме пирокoeffициента будет изменяться еще и ее диэлектрическая проницаемость. Управляемое комбинирование двух компонент выходного сигнала, которые могут различаться и по знаку, позволяет создавать воистину уникальные пироэлектрические преобразователи, которые не меняют своих характеристик в интервале от 10 до 70°C с точностью до 0,5%. Основная область применения этих преобразователей — метрология лучистых потоков.

О КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ И О ТОМ, КАК БЫЛ РЕАНИМИРОВАН ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Любой ученый, работающий в естественнонаучной сфере, обязательно проходит (и не один раз) через мучительную полосу выбора тематики. С возрастом (ближе к пятидесяти) эта проблема становится крайне острой, поскольку накопленный опыт позволяет уже безошибочно соизмерять значимость и уровень темы, возможности (интеллектуальные, материальные, организационные), весомость конечного и промежуточных результатов. И за всеми этими сомнениями и раздумьями стоит вполне понятное желание, чтобы фундаментальные исследования завершались установлением общих закономерностей, а прикладные — промышленными разработками и внедрением.

Годы труда, обернувшиеся творческим бесплодием, хотя бы и по объективным причинам (как чаще всего и бывает), никому еще не прибавили ни энтузиазма, ни здоровья. Острая болезненность этой темы неоднократно выплескивала на страницы газет самые разнородные и выстраданные мнения (см., например, «Литературную газету» от 29.9.1982 г.). «Если во времена Фарадея в мире более половины научных исследований оказывались результативными, то во времена Эдисона таковых уже было намного меньше половины, а в конце 40-х годов нашего века они составляли менее 10%... сейчас ситуация еще более обострилась. Вопрос заключается в том, имеем ли мы дело с объективным процессом снижения эффективности науки или же... в науке преобладают «пустоцветы». Мне представляются неизбежными безрезультатные эксперименты (именно безрезультатные, а не с отрицательным результатом, который бывает очень информативным)» — так писал один из участников дискуссии, доктор наук, лауреат Ленинской премии.

Можно принять это мнение или не соглашаться с ним, но оно отражает плоды раздумий ученого, вне сомнений, работающего плодотворно. И можно лишь сочувствовать ученым, которые волею обстоятельств отдаю годы «неизбежным безрезультатным экспериментам». В большинстве случаев это действительно — воля обстоятельств, а не следствие качеств ученого.

Почему же столь результативна была наука XIX в.? Не погрешив против истины, можно утверждать, что физические исследования XIX в. являются основой современной технической цивилизации, поскольку значительная их часть породила ведущие отрасли промышленности. Вряд ли ответ на поставленный вопрос может быть единственным и исчерпывающим. Но при ответах, исходящих из разнообразных мнений, принципов и посылок, необходимо привлечь самое, на наш взгляд, существенное — физика XIX в. имела дело с сильными, общими эффектами, воспроизводившимися в простейших, практически бытовых, экспериментальных условиях и на образцах, преподнесенных самой Природой.

Экспериментатор изучал эффекты, которые зримо реализованы в природе и легко воспроизводимы в своих проявлениях. Природа сама выкладывала эффект на стол экспериментатора, и ему оставалось лишь «препа-

ризовать» его и понять. Причем на переднем плане оказывались эффекты, которые Природа наделила минимумом сопутствующих помех и маскирующих явлений. Именно поэтому даже малочувствительная техника XIX в. позволила сделать так много. Вспомним работы по термодинамике, электромагнетизму, открытие радиоактивности, рентгеновских лучей и т. д. Нелишне напомнить, что диодная характеристика впервые была измерена на паре «медь — закись меди» еще в начале 70-х годов прошлого столетия. Ныне p — n -переход — основа микроэлектроники и всех сопутствующих отраслей техники.

Научные журналы XIX в. (особенно второй его половины) буквально переполнены сообщениями о добросовестно выполненных исследованиях, аномальные результаты которых до сих пор не объяснены. Сами по себе эти результаты отнюдь не колеблют наших фундаментальных представлений, но дают примеры исключительно любопытных проявлений, реализованных Природой в силу каких-то причин.

Приведем лишь один пример. Известно, что в настоящее время реализовано непосредственное усиление всех классических видов сигналов — электрических, магнитных, акустических, механических, оптических и т. д. — всех, кроме теплового. Вместе с тем, учитывая универсальность этого сигнала и масштабы тепловой энергетики, весьма привлекательно синтезировать тепловой усилитель, т. е. создать тепловую схему, в которой малая тепловая мощность управляла бы прохождением большой. Принципы такого синтеза понятны, но они должны опираться на физически реализуемую нелинейность теплового параметра среды — теплоемкости или теплопроводности. Так вот, «диодная» характеристика теплопроводности турмалинов по полярной оси была открыта еще в 1879 г., а это означает, что Природа показала принципиальную реализуемость нелинейных тепловых цепей.

Исследования нашего времени — это уже далеко не наука «палочек и веревочек». Современный уровень экспериментальной техники позволяет извлекать эффекты, предсказанные теоретиками, из гуши сопутствующих и маскирующих явлений и таким образом утверждать торжество человеческой мысли. Можно приветствовать это торжество, но, странное дело, эти эффекты в значитель-

ной своей части оказываются крайне неустойчивыми, крайне чувствительными к минимальным отклонениям в условиях их проявления. Не мудрено, что конечная практическая эффективность таких исследований весьма мала, хотя фундаментальная значимость их может оставаться принципиальной.

Отсюда понятна необходимость формулирования каких-то критериев, разграничивающих направленность исследований («мы поняли механизм этого явления, и далее его изучать нецелесообразно, а вот в этот эффект мы вложим силы и время»). Рассмотрение этих критериев выходит за рамки нашей темы, но об одном из них скажем.

Если в условиях земной реальности Природа выделила как сильный (сравнительно с уровнем сопутствующих явлений) и тиражировала какой-либо эффект, существует очень большая вероятность, что этот эффект найдет практическое применение. Сказанное следует рассматривать как довод в пользу «раскопок в интеллектуальных могильниках прошлого» в научных публикациях XIX и даже XVIII в. В XIX в., кстати, уже существовали реферативные издания. Естественно, запас кладов в этих «могильниках» не бесконечен, но ведь и отдельные перлы — отнюдь не безделица. Вот только один пример.

Нет нужды обосновывать тот факт, что изобретение ксерокопирования буквально революционизировало информационную технику и столь ненавистный документооборот. Ксерокопировальный аппарат содержит мощные специальные светильники, согласованные по спектру с характеристикой светочувствительного полупроводникового барабана, специализированные объективы, использует особые электризуемые красящие вещества и т. д., т. е. этот аппарат — сгусток технических достижений второй половины XX в. Но еще в XVII в. английская разведка в течение двух десятилетий использовала для быстрого (в течение 2—5 мин) получения копий перлюстрированной дипломатической корреспонденции некий простой способ воспроизведения штриховых оригиналов. Отметим, что этот способ гарантировал отсутствие следов работы с оригиналом, был пригоден для непрозрачной бумаги, исписанной с двух сторон, а самым мощным источником света тех времен в туманной Англии был факел. Если бы удалось понять физический ме-

ханизм этого способа и реализовать его на современных материалах, мы получили бы средство копирования, несравненно более простое и дешевое, чем ксерокс.

Однако зададимся вопросом: всякий ли сильный эффект найдет практическое применение? На этот вопрос (очень важный для фундаментальной науки, поскольку новые эффекты — это ее «товар») можно ответить достаточно определенно. Сильный эффект найдет применение только в том случае, если практически важные функции могут выполняться посредством этого эффекта более эффективно, экономично и устойчиво (стабильно), чем посредством других эффектов. Отсюда вытекает потребность в оценке взаимной конкурентоспособности эффектов применительно к конкретным сферам практических приложений, и причина этого состоит в том, что количество известных эффектов значительно превосходит число потенциальных применений.

И вот тут мы подошли к каверзным вопросам. А сколько же всего эффектов известно человечеству? Как возможно подсчитать число потенциальных применений?

Вопросы эти неприятны тем, что требуют строгого определения понятий «эффект» или «явление». Понимая неизбежную дискуссионность любой редакции этого определения, согласимся с официальной формулировкой, регламентирующей подачу заявок на открытия. Близкое к этой формулировке понятие было положено в основу «Кадастра физических эффектов», составленного одним из основателей отечественной автоматики Б. С. Сотсковым. Авторам известна лишь эта единственная попытка систематизированного собрания такого рода, к сожалению, не завершенная и не продолжаемая.

Отталкиваясь от этого собрания и экстраполируя во внешний мир известную скорость нарастания числа открытий, регистрируемых в СССР, общее число известных физических эффектов можно оценить цифрой 15—20 тысяч. Реальное применение находит лишь один из 30—40. В энциклопедии «Автоматизация производства и промышленная электроника» (М., 1965. — Т. 4) отображено среди известных и перечислено около 40 эффектов, пригодных для создания устройств для измерения температуры. Широкое применение нашли лишь несколько эффектов: объемное температурное расширение, термоэлектричество, температурная зависимость электропроводности и тепловое излучение.

История пирозлектрического эффекта представляет собой наглядную иллюстрацию высказанного мнения о судьбе сильных и общих эффектов. Как только обозначаются области применения, в которых эффект оказывается вне конкуренции, сразу же резко ускоряется динамика материаловедческих, схмотехнических и конструкторских работ, а также собственно физических исследований, ориентированных уже не только на главный эффект, но и на сопутствующие явления, с основной целью — управления явлением.

Первые работы по практическому применению пирозэффекта были проведены в СССР в конце 20-х — начале 30-х годов. Инженеры легендарного Остехбюро в Ленинграде с успехом применили это явление для создания тепlopеленгации самолетов. В 1935 г. в связи с реорганизацией Остехбюро эти работы были прекращены.

Любопытно, что в «Технической энциклопедии», вышедшей в это же время, в 1932 г., будущий академик АН СССР Н. Н. Андреев характеризовал пирозлектрический эффект таким образом: «Технических применений пирозлектрический эффект не имеет, т. к. мал и непостоянен по величине...»

Будущее показало, сколь опрометчивыми могут оказаться такие категорические заключения. В послевоенное время потребности ракетной, космической, ядерной и несколько позже лазерной техники вызвали насущную необходимость в быстродействующих приемниках излучения, и уже в 1960 г. пирозлектрические приемники стали обычным прибором на ракетных полигонах.

Разносторонний опыт, накопленный при разработке и эксплуатации пироприемников, стал основой для создания других типов пирозлектрических преобразователей (преобразователей инфракрасного изображения, теплотметрических преобразователей, преобразователей тепловой энергии в электрическую и т. п.), обладающих высокой конкурентоспособностью даже в устоявшихся сферах элементов автоматики.

Основные причины таких успехов объясняются фундаментальной особенностью преобразования сигналов, осуществляемого посредством пирозлектрического эффекта: приращение средней по объему пирозлектрика температуры ΔT приводит к приращению спонтанной поляризации ΔP , этого объема.

Чем замечательно преобразование, характеризую-

щееся такой парой параметров? Прежде всего универсальностью, ибо приращение температуры (а не ее абсолютная величина) является наиболее информативной мерой любых взаимодействий — физических, химических, биологических и т. д. К приращению температуры наиболее просто приводятся многочисленные первичные величины, подлежащие измерениям или индикации. Реакция на приращение температуры — это также и автоматическое исключение избыточности информации в выходном сигнале (типичное соотношение $T=300\text{ К}$, $\Delta T \sim \sim 10^{-7}\text{ К}$), которого в противном случае пришлось бы добиваться схмотехническими средствами. Такая реакция на приращение входного воздействия характерна только для электростатических преобразователей, к которым относятся и пироэлектрические.

Носителем выходного сигнала пироэлектрика является связанный электрический заряд ($Q_{\text{вых}} \sim \Delta P_s$). Функциональное свойство пироэлектрика состоит в простейшем одноступенчатом преобразовании наиболее универсального параметра в электрический сигнал, самый удобный для обработки.

Насколько же это свойство устойчиво к внешним воздействиям (климатическим, старению, электрическим и механическим полям, проникающей радиации)?

Воспроизводимость свойств и устойчивость преобразования к внешним воздействиям определяется физическим механизмом формирования выходного сигнала, в пироэлектрике — температурными подвижками структурных элементов кристаллической решетки. В отличие от эффектов, связанных с электронной подсистемой или объемным зарядом, решеточные эффекты характеризуются высокой стабильностью и во многих случаях положены в основу метрологических эталонов. Ни старение, ни вхождение примесей не сказываются на этом явлении, о чем свидетельствует наблюдение эффекта на образцах минералов, выращенных Природой миллионы лет назад.

Любое преобразование имеет свой верхний частотный предел, определяемый физическим механизмом преобразования. В пироэлектрике этот предел ограничивается собственными временами релаксации решетки ($\sim 10^{-12}\text{ с}$), что позволяет фиксировать импульсные процессы длительностью $\sim 10\text{ пс}$.

Эти многообещающие особенности пироэлектрического преобразования были осознаны в середине 60-х годов, вслед за чем произошло как бы второе рождение пироэффекта: время сделало его практически важным. При чем надо сказать, что пироэффект — отнюдь не единственное свойство полярного диэлектрика, которое можно использовать для создания преобразователей. Известно, что все пироэлектрики обладают значительным пьезоэффектом, а сегнетоэлектрики характеризуются сильной зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры и электрического поля. Этот комплекс свойств дает уникальную возможность: построить на одном рабочем теле — полярной среде — преобразователь тепловых, механических и электрических воздействий. Природа не могла пройти мимо такой возможности и использовала полярную среду для создания чувствительных рецепторов бесконечного множества живых организмов, в том числе и *Homo sapiens*.

ЧТО МОГУТ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ?

Пироэлектрик реагирует на приращение собственной температуры, и, рассматривая его возможную роль в простейших тепловых цепях, нетрудно представить его в качестве индикатора всех трех величин, характеризующих тепловую цепь:

1) **теплового потока**, обусловленного непосредственным конвективным или контактным теплообменом с внешним источником или источником тепла на поверхности пироэлектрика. К потоку тепла посредством использования соответствующих поглотителей приводятся также потоки энергии самой разнообразной природы — электромагнитного излучения, потоков частиц, акустических и ударных волн. Накопление теплового потока за некоторый интервал времени позволяет определить энергию потока за этот период;

2) **теплового сопротивления**. В собственно тепловой цепи это теплопроводность и теплоемкость среды, определяющей тепловой поток между тепловым источником и стоком. Энергетическим эквивалентом теплового сопротивления являются свойства среды распространения этих потоков;

3) температуры.

Итак, пироэлектрик позволяет получить информацию о параметрах тепловой цепи и соответственно о многочисленных первичных величинах, трансформированных в ее параметры.

Но этим не ограничиваются полезные возможности пироэлектриков. Тепловое воздействие на пироэлектрик может использоваться для получения информации об изменении состояния самого пироэлектрика под какими-либо другими воздействиями и таким опосредованным способом — для определения типа и уровня этих воздействий. Тепловое воздействие в данном случае выступает как вспомогательное, зондирующее. Оно призвано определить изменение свойств пироэлектрика, участвующего в преобразовании. Действие теплового зонда полностью аналогично функции напряжения, приложенного к мостовой схеме. Посредством этого напряжения определяется, скажем, сопротивление терморезистора и в конечном итоге значение температуры — первичного параметра, воздействующего на терморезистор.

Теперь можно обобщенно охарактеризовать два класса пироэлектрических преобразователей: 1) генераторные, в которых выходной электрический сигнал дает информацию о тепловом воздействии и о связанной с ним измеряемой величине; 2) параметрические, в которых выходной электрический сигнал дает информацию о воздействии, изменившем свойства (параметры) пироэлектрика, участвующие в формировании электрического сигнала.

Поясним эти определения.

В генераторных преобразователях обеспечивается постоянство собственных параметров пироэлектрика γ и ϵ , а выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ несет информацию о причинах изменения средней по объему температуры пироэлектрика, отражающего внешнее тепловое воздействие на него.

В параметрических же преобразователях материал пироэлектрика подбирается по максимальной чувствительности параметров γ или ϵ (а также и других) к информативному воздействию. Значение $\Delta T_{\text{ср}}(t)$, обычно периодической величины, поддерживается заданным. Информативным воздействием может быть накопленная доза проникающей радиации, координата точки нагрева пироэлектрика, механическая деформация, абсолютная

температура, переключение доменной структуры внешним электрическим полем и т. д. При этих условиях выходное напряжение уже несет информацию только о перечисленных воздействиях. Очевидно, что применение параметрических преобразователей целесообразно лишь в тех случаях, когда оправдано (или естественно имеет место) использование теплового воздействия как зондирующего. Только в этом случае вообще можно говорить о какой-либо потенциальной конкурентоспособности этих преобразователей.

Из-за малой мощности выходных электрических сигналов пироэлектриков основная сфера их применений охватывает датчики различных типов и в меньшей степени элементы автоматики другого назначения: преобразователи энергии, запоминающие устройства и т. п.

Рассмотрим теперь в рамках представлений о тепловых цепях многочисленные первичные величины, которые могут быть измерены (или детектированы) с помощью генераторных пироэлектрических преобразователей.

С конвективным теплообменом связаны проблемы измерения направлений и скоростей потоков газов и жидкостей (анемометрия), параметров дыхания человека и животных, теплообмена ударной волны с космическим аппаратом при его входе в атмосферу и т. д. Контактный теплообмен — это универсальный метод количественного анализа химических веществ по теплоте каталитических реакций и других теплот поверхностных взаимодействий (теплота абсорбции, микрокапельного испарения, фазовых переходов и т. п.).

Нанесение на пироэлектрик поглощающего покрытия позволяет использовать его нагрев для измерения потока электромагнитного излучения и потоков частиц. Таким способом пироэлектрик может быть применен для измерения всех параметров одиночного луча (мощность, спектр модуляции мощности, спектр излучения, пространственные координаты, поляризация) при длинах волн излучения от жесткого электромагнитного до дециметрового диапазона или для воспроизведения пространственного распределения мощности, т. е. получения изображений.

По параметрам воспринятого излучения можно характеризовать источник, т. е. применительно, в частности, к тепловому инфракрасному излучению получать

информацию о температуре точечного источника или о тепловой картине в целом. Приборы такого назначения получили название пироприемников и пироэлектрических преобразователей изображения. Те же функции они выполняют при взаимодействии с потоками частиц — электронов, протонов, нейтронов, ионов и нейтральных атомов.

Потоки акустической энергии при частотах колебаний от 10^{-2} до 10^8 Гц также измеряются специализированными пироприемниками с индикацией направленности и мощности этих потоков.

Встречаются ситуации одновременного воздействия на объект двух разнородных потоков энергии. Так, например, ударная волна воздействует на обтекаемое тело не только конвективным, но и лучевым теплообменом. Пироэлектрические преобразователи позволяют в таких случаях измерить как общее воздействие, так и его компоненты.

Использование пироэлектриков для измерения теплового сопротивления среды существенно расширяет диапазон их практических приложений. В этом направлении пироэлектрики позволяют не только измерять удельную теплоемкость и теплопроводность твердых, жидких и газообразных тел, но и, что особенно важно, по этим характеристикам идентифицировать компоненты жидких и газообразных смесей. Катарометрическая ячейка, выполняющая эту функцию, в настоящее время является самым ответственным элементом наиболее распространенных средств химического анализа — хроматографов.

Энергетическим аналогом теплового сопротивления является среда распространения названных выше энергетических потоков, изменяющая первоначальные их параметры. Пироэлектрические приемники, воспринимающие прошедший поток, позволяют получать информацию о свойствах среды, в частности, для атмосферы — о ее газовом составе и влажности, для твердых тел — о химическом составе, структурных фазах, наличии дефектов и их локализации, в простейших случаях — о линейных размерах объектов.

Если пироэлектрик контактно сопряжен с объектом измерения таким образом, что переходное тепловое сопротивление может быть принято равным нулю и нет отвода тепла от пироэлектрика, то его выходной сигнал

пропорционален переменной составляющей температуры объекта или, как будет показано ниже, скорости изменения температуры. Это уникальное свойство — измерение или приращения температуры, или скорости ее изменения — присуще только пироэлектрическим термометрам. Они измеряют температурные импульсы длительностью порядка единиц наносекунд, позволяют определять коэффициенты поглощения практически непрозрачных сред (фотопироэлектрическая спектроскопия), реализовать линейные развертки температуры (сканирующие калориметры) со скоростью от 10^{-7} до $10^{-2} \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$, изучать предельно малые тепловыделения при контактном взаимодействии твердых тел, а также теплоты фотохромных реакций в объеме пироэлектрика.

Потенциальные сферы применения параметрических пиропреобразователей еще более многообразны, чем генераторных. Мы, однако, в дальнейшем обсуждении конкретных характеристик преобразователей ограничимся примерами лишь таких приборов, которые доказали свою конкурентоспособность. А теперь познакомим читателя с основными типами пироэлектрических преобразователей. Начнем с наиболее распространенных — приемников излучения.

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Когда в 1766 г. шведский академик И. К. Вилке опубликовал историю исследований пироэлектричества и иллюстрировал ее рисунками, он не мог предположить, что один из них (рис. 5) представляет собой первую в истории человечества схему искусственного приемника излучения с электрическим выходом.

В настоящее время пироприемники стали основным типом тепловых приемников излучения и выпускаются в широком ассортименте и в Советском Союзе, и за рубежом.

Принципиальная схема пироприемника очень проста (рис. 6). Тонкая пластинка полярного среза пироэлектрика 1 (рис. 6, а) с нанесенными на нее металлическими электродами 2 нагревается излучением $F(t)$, поглощаемым специальным покрытием 3 одного из электродов. К электродам подключено сопротивление нагрузки

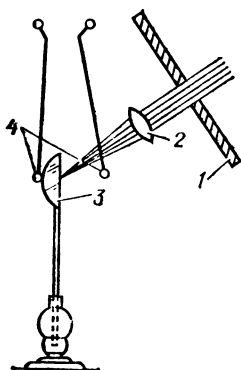


Рис. 5. Схема опытов И. К. Вилке: 1 — доска с отверстием (диафрагма); 2 — линза (оптическая система); 3 — кристалл турмалина (чувствительный элемент); 4 — бузиновые шарики электрометра (индикаторное устройство)

R_n , напряжение на котором усиливается микросхемой и передается для дальнейшей обработки.

Из эквивалентной схемы контура «пироэлектрик — нагрузочное сопротивление» (рис. 6, б) нетрудно понять, что вследствие емкостного внутреннего сопротивления пироэлектрика R_n соотношение $U_{\text{вых}} = f(E)$ будет зависеть от частоты, и характер этой зависимости определится величиной R_n , поскольку всегда $R_n \ll R_n$. Если $R_n \rightarrow \infty$, то $U_{\text{вых}} \sim E$. Если же $R_n \rightarrow 0$, то $U_{\text{вых}} \sim \sim \partial E / \partial t$, так как в этом случае собственная емкость пироэлектрика и сопротивление нагрузки образуют обычную дифференцирующую цепь.

Теперь найдем связь между потоком излучения $F(t)$ и изменением средней температуры пироэлектрика $\Delta T_{\text{ср}}(t)$. Вид функции, связывающей эти величины, может быть установлен простым рассуждением. Известно, что тела, находящиеся в воздушной среде, можно значительно быстрее нагреть, чем охладить. Объясняется это высоким тепловым сопротивлением неподвижного воздуха, препятствующего отдаче тепла от нагретых тел. Даже для тонких пластин (20—100 мкм) постоянная времени процесса охлаждения (тепловая постоянная времени пластины) измеряется десятками секунд. По этой причине для тепловых потоков, модулированных частотами ≥ 1 Гц, пластина является интегратором,

$$\Delta T_{\text{ср}}(t) = \frac{1}{C} \int F(t) dt,$$

где C — теплоемкость пироэлектрической пластины.

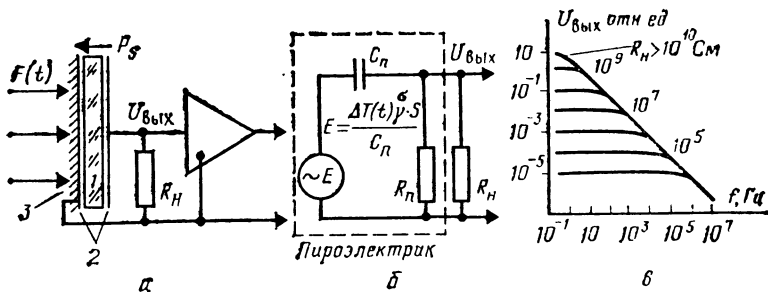


Рис. 6. Устройство пироприемника излучения (а), его эквивалентная схема (б) и частотные характеристики при различных сопротивлениях нагрузки (в). 1 — пирозелектрик; 2 — электроды пирозелектрика; 3 — поглощающее покрытие (чернь). C_p и R_n — собственная емкость и сопротивление пирозелектрика

Тогда

$$\text{для } R_n \rightarrow \infty \quad U_{\text{вых}} = \frac{\gamma}{C_p} \int F(t) dt,$$

$$\text{для } R_n \rightarrow 0 \quad U_{\text{вых}} = \gamma C_p^{-1} R_n F(t),$$

т. е. при больших сопротивлениях нагрузки выходное напряжение пироприемника соответствует временному изменению энергии потока излучения, а при малых — мощности.

Соответствующие частотные характеристики даны на рис. 7, в.

Приведенных рассуждений достаточно для дальнейшего обсуждения свойств пироприемников самого различного назначения.

Пироприемники излучения малой мощности выпускаются в самом широком ассортименте и вариантах конструктивного исполнения в СССР и странах СЭВ. На западный рынок около 50 фирм поставляют приемники и приборы на их основе. В библиографии по этим приемникам (свыше 1000 наименований на середину 1988 г.) представлен широкий спектр индивидуальных разработок специализированного назначения.

К последним можно отнести пирозлектрические измерители энергии частиц в ускорителях. Созданные в СССР и за рубежом, эти приемники успешно используются для измерения параметров пучков электронов,

протонов, дейтронов, нейтронов, сверхтяжелых ядер и легких атомов. Основное достоинство пироприемников в этих условиях состоит в их высокой радиационной и термической (работоспособны до 400°C) стойкости. Пироприемники, как показывают исследования, могут быть использованы и как дозиметры нейтронов с общей дозой до 10^{18} нейтронов $\cdot \text{см}^{-2}$.

Столь же успешно эксплуатируются в лабораторных и полевых условиях пироприемники γ -излучения. Эти приборы имеют ряд преимуществ перед детекторами других типов (фотопленками, сцинтилляционными детекторами или термолюминесцентными дозиметрами): они линейны до высоких уровней мощности (10^{12} рад $\cdot \text{с}^{-1}$), не требуют напряжения питания, легко встраиваются в миниатюрные экспериментальные установки и сопрягаются с системами обработки сигналов. Эти приемники нашли применение при аттестации радиоактивных источников, тормозного излучения, ядерных взрывов и т. п.

Более широкое распространение получили пироприемники рентгеновского излучения. Их используют в медицинской радиологии, для измерения радиационных потерь в плазме лазерного термояда, со стационарными и импульсными рентгеновскими установками, в частности для спектрометрии рентгеновского диапазона. Созданы и пироэлектрические рентгеновские дозиметры, устойчивые и воспроизводимые по свойствам при уровне доз до $2 \cdot 10^6$ рад.

Интенсивное исследование излучения различных плазменных источников (взрывов, ударных волн, электрических разрядов в газах и т. д.) стимулировало многочисленные разработки советскими и зарубежными учеными быстродействующих приемников ультрафиолетового диапазона (от 20 до 1500 нм). Были созданы приемники с временным разрешением $\simeq 80$ пс, работоспособные в условиях сильнейших электромагнитных помех. В нашей стране, в частности, с помощью пироприемников измеряются профили радиационных потерь из плазмы в опытах по управляемому термоядерному синтезу на установках типа ТОКАМАК.

В видимом и ближнем инфракрасном диапазонах тепловые приемники не могут (исключая случай больших мощностей) конкурировать с фотоэлектрическими приемниками, и поэтому в этой спектральной области

их использование нецелесообразно. А вот в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах пироприемники уверенно заняли «место под солнцем». Сначала приведем несколько цифр, характеризующих их параметры, а затем — основные сферы применений.

Полный набор численных параметров, характеризующих приемник по преобразовательным, шумовым и эксплуатационным свойствам, очень велик — около полутора десятков данных. Мы ограничимся указанием лишь спектра излучения, воспринимаемого приемником, интервала частот модуляции излучения, минимальной детектируемой мощности падающего излучения (порог чувствительности) P_{\min} и детектирующей способности D^* , величины, используемой для сравнения приемников различных типов.

Высокочувствительные приемники, выпускаемые для эксплуатации в лабораторных или близких к ним условиях при температурах от 10 до 40°C, обычно рассчитаны на диапазон инфракрасной области спектра от 5 до 25 мкм, частоты модуляции 5—100 Гц, имеют $P_{\min} = (4 - 8) \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ и $D^* = (4 - 7) \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Используемый пироэлектрик — модифицированные кристаллы семейства триглицинсульфата (ТГС). Основные сферы применения таких приемников — аппаратура для научных исследований, в частности спектрометрическая, средства авиационного и космического зондирования земной атмосферы и подстилающей поверхности. С помощью этих приемников измеряются профили температуры, влажности и газового состава атмосферы, определяется температура океанов, морей и участков суши, что в конечном итоге является исходным массивом данных для прогнозов погоды. Такие же приемники стоят в системах стабилизации спутников по земной вертикали, которая осуществляется привязкой к контуру «земля — космос» по инфракрасному излучению земной сферы.

Подобные же функции выполнялись пироприемниками на межпланетных станциях СССР и США в исследованиях Марса и Венеры.

Промышленные пироэлектрические приемники могут использоваться в более жестких условиях: при температурах от — 60 до + 80°C (в отдельных случаях — до 400°C), тряске, повышенной влажности. Их спектральный диапазон обычно расширен — от 2 до 30 мкм, ча-

стотный составляет $0,1-10^4$ Гц, но порог чувствительности несколько хуже, $P_{\min} = (2-10) \cdot 10^{-10}$ Вт·Гц^{-1/2}, соответственно $D^* = (2-10) \cdot 10^8$ см·Гц^{1/2}Вт⁻¹. Рабочими телами этих приемников являются, как правило, монокристаллы танталата и ниобата лития и сегнетокерамики оптимизированных составов. Именно к этому классу приемников относятся приборы типов ПМ-3, ПМ-4, МГ-30, ППМ-1, серийно выпускаемые в нашей стране.

Основными сферами применения этих приемников являются радиометрия (бесконтактное дистанционное измерение температур по собственному излучению тел), охранно-пожарная сигнализация, дистанционное включение исполнительных устройств, детектирование лазерного излучения.

Бесконтактное измерение температур крайне важно для всех областей народного хозяйства. Каким еще способом можно измерить температуру глазного дна, пули, вылетающей из ствола, деталей бесчисленных движущихся механизмов? Бесконтактные термометры с пироприемниками измеряют температуры от -50 до 2000°C с погрешностью (для лучших) $\approx 0,15\%$. Время измерения $-1-5$ с.

Эти приборы с успехом используются в медицине (в том числе в офтальмологии и гинекологии), ветеринарии (температура пасти тигра была измерена с расстояния трех метров за две секунды), агрономии (полеводство, тепличное хозяйство, оранжереи), в коммунальных службах (обнаружение утечек в теплоизоляции). Перечислим и некоторые отрасли промышленности: черная и цветная металлургия, прокат стекла, текстильная (температурное поле перематываемых полотнищ), электроэнергетика (высоковольтные цепи), электроника (температурный режим микросхем) и т. д. и т. п. Укажем, что и на космической станции «Мир» советскими космонавтами использовались приборы такого типа.

Чувствительность пироприемников позволяет с простейшей оптикой обнаружить человека по его собственному излучению на расстоянии около 150 м. И естественно, что пироприемники легли в основу разнообразных систем охраны как внутри, так и вне помещений. Несколько обобщив принцип такого применения, можно сказать, что приемник реагирует на изменение лучистого теплообмена в установленном поле зрения. И этот принцип может быть использован не только для вклю-

чения тревожного сигнала (или тепловизионных камер с целью выявления причин тревоги), но и автоматического открывания дверей перед приблизившимся человеком, зажигания светильников и т. д. И в этих устройствах используются пироприемники.

Высокая чувствительность и быстроедействие приемников обусловили их повсеместное использование в новейших средствах спектromетрии — фурье-спектрометрах, позволяющих в считанные секунды получать сложные широкополосные спектры.

Тепловые источники потеряли монополию как инфракрасные излучатели с появлением лазеров. И всюду, где используется инфракрасный или субмиллиметровый лазер, на каком-либо из этапов лазерного тракта применяется пироприемник.

Перечисленные примеры существенно дополняет использование пироприемников в приборах, индуцирующих свойства среды распространения излучения. Это и портативные газоанализаторы, в том числе для контроля алкогольных паров или выхлопа автомобильных двигателей, и приборы для контроля толщины и выявления микроотверстий полимерных пленок, пропускные пункты, счетчики деталей и т. д.

Современная техника нуждается также в приемниках очень мощного излучения, в первую очередь для работы с импульсными лазерами, огромными газоразрядными светильниками, источниками высокотемпературной плазмы, радиолокационными СВЧ-трактами, газовыми струями ракетных и авиационных двигателей и т. д. Пироприемники оказались полезными и в этих областях, дав, например, возможность исследователям определить тонкие детали структуры импульсов излучения (разрешение 30 пс) или изменение этих параметров в зависимости от режимов работы источников излучения.

Нужды технической практики сопряжены не только с потребностью детектирования инфракрасного излучения, но и с необходимостью измерения его параметров с определенной погрешностью. Наиболее важно измерение мощности потоков излучения. В пироэлектрических измерителях мощности излучения пластина пироэлектрика попеременно нагревается потоком излучения и электрическим нагревателем, мощность которого легко измерить с высокой точностью. Отсутствие переменной составляющей в выходном напряжении пироэлектрика

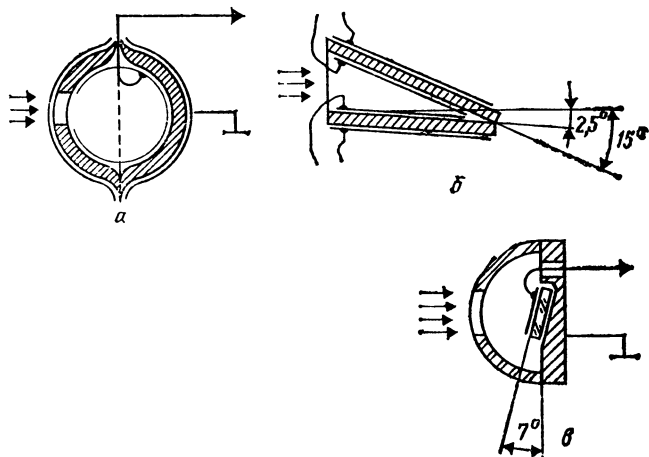


Рис. 7. Пироприемники для спектральных измерений конструкции «абсолютно черное тело»: а — сферический; б — пирамидального типа БП2 — 4 (выводы четырех пластин, образующих пирамиду, соединяются последовательно); в — плоский с интегрирующей зеркальной полусферой типа БП2—5. Указаны углы между поверхностями керамики и соответствующими электродами

свидетельствует о равенстве мощностей нагрева излучением и подстраиваемым подогревателем. Погрешность определения абсолютного значения мощности излучения такими измерителями не превышает $\pm 1,5\%$, поэтому они получили метрологический статус не только рабочих приборов, но и вторичных эталонов.

Метрологическое обеспечение фотометрии не может обойтись без приемников с высокой равномерностью спектральной характеристики. Пироприемники, выполненные из сегнетокерамики в виде абсолютно черных тел (конические, пирамидальные и сферические полости) (рис. 7) имеют коэффициент поглощения, равный $0,99 \pm \pm 0,005$ для длин волн от 0,1 до 100 мкм. Эти приборы используются для аттестации спектральных характеристик всех остальных типов приемников.

В заключение этого раздела упомянем о специальных пироприемниках, измеряющих координаты луча, падающего на приемную площадку, без пространственного сканирования и вне зависимости от уровня падающей мощности (конечно, выше порога чувствительности).

За 25 лет, прошедших с момента последнего в истории пирoeлектричества возрождения интереса к этому явлению, количество типов разработанных пироприемников превысило общую номенклатуру тепловых приемников, построенных на основе всех других физических эффектов. Достижения в этой области, создание специализированного материаловедения, технологий и схемотехники стали фундаментом для развития качественно нового типа пирoeлектрических преобразователей — преобразователей изображения.

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Приборы, преобразующие поток излучения в электрический сигнал, индуцирующие одно- или двумерное пространственное распределение мощности падающего излучения, называются преобразователями изображения. Электрический сигнал в последующих за преобразователем цепях визуализируется (электронно-лучевая трубка, матрица светодиодов, жидкокристаллический дисплей и т. д.). Хотя пирoeлектрические преобразователи изображения, подобно приемникам, в принципе могут использоваться для визуализации как потоков частиц, так и излучения в спектре от γ -квантов до видимого диапазона, они разрабатывались только применительно к инфракрасному и в меньшей степени субмиллиметровому диапазонам длин волн.

Создание этого типа преобразователей стимулировалось крайне важной для ряда применений проблемой визуализации теплового излучения без глубокого охлаждения приемников. Иными словами, уже несколько десятилетий назад была осознана необходимость тепловых преобразователей изображения. С этой целью в разных странах было испытано множество физических эффектов, объединяемых только одним признаком — температурной зависимостью каких-либо свойств. Но все эти эффекты были параметрическими, т. е. выходной сигнал представлял собой сумму значений параметра, соответствующего абсолютной температуре элемента изображения, и собственно информативного приращения этого параметра. Поскольку величина параметра и его приращения различаются на 5—6 по-

рядков, их не удавалось эффективно разделить никакими схемами и конструктивными приемами, что усугублялось также неизбежно присутствующим температурным градиентом приемной мишени, обусловленным неоднородностью фоновой засветки.

В нашей стране принципиальная порочность такого подхода была довольно скоро понята, и уже в 1966 г. была испытана первая передающая трубка с пироэлектрической мишенью. Напомним, что пироэффект — это генераторный эффект, не реагирующий на стационарное значение температуры. Пироэлектрические передающие трубки (пировидиконы) стали первыми серийно выпускаемыми в различных странах тепловыми преобразователями инфракрасного изображения.

Закономерен вопрос: а чем же, собственно, привлекательны инфракрасные изображения? Ответ, несколько академически, звучит так: визуализация тепловой картины дает легко воспринимаемую информацию об энергетических источниках, формирующих эту картину. Такое определение (возможно, излишне сухое) говорит о том, что человек максимально быстро воспринимает зримую информацию, и если сделать видимым распределение температур наблюдаемого объекта, то можно легко установить и причины процессов, создающих его.

Например, заболевание внутренних тканей локально изменяет температуру кожи, плохая изоляция стен или окон вызывает местный нагрев наружной поверхности, трущиеся поверхности трещин в автопокрышке создают на ней местные разогревы, замаскированные костры или человек, заблудившийся в лесу, контрастируют с общим холодным фоном, производственный дефект обуславливает изменение топографии очагов тепла микросхемы и т. п. Все эти взятые из жизни примеры, иллюстрирующие, по сути, очевидную универсальную связь энергии взаимодействия и температурного поля, являются лишь малой частью жизненно важных разнородных практических задач.

Пироэлектрический видикон (рис. 8) построен по компоновке обычного видикона с той разницей, что фотопроводящая мишень заменена пироэлектрической. Она представляет собой тонкую (12—30 мкм) пластинку пироэлектрика диаметром 16—20 мм, закрепленную одной плоскостью на несущей пленке и разрезанную со стороны электронного луча на квадратные или шести-

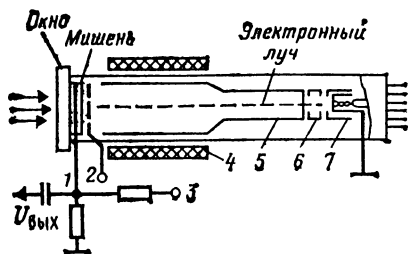


Рис. 8. Схема пирозлектрического видикона: 1 — вывод общего электрода мишени; 2 — сетка-коллектор; 3 — точка подключения напряжения смещения мишени; 4 — фокусирующие и отклоняющие катушки; 5 — второй анод; 6 — ускоряющий анод; 7 — сетка

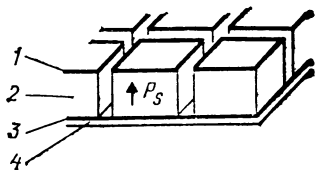


Рис. 9. Конструкция мишени пировидикона: 1 — защитная поверхность маски; 2 — пирозлектрик (ТГС); 3 — общий электрод мишени; 4 — несущая пленка

угольные элементы (рис. 9). Вектор P_s пластины ориентирован по ее толщине. Со стороны несущей пленки на пластину нанесен сплошной электрод, к которому подключено нагрузочное сопротивление R_n . На эту сторону пластины фокусируется инфракрасное изображение объекта.

Изображение объекта, модулированное прерывателем или покачиванием трубки, создает на мишени переменный во времени тепловой и соответствующий ему электрический (зарядовый и потенциальный) рельеф. Электрический рельеф элементов мишени, в свою очередь, модулирует ток, протекающий через R_n при сканировании мишени электронным лучом. Созданное этим током напряжение, усиленное и соответствующим образом обработанное, управляет яркостью луча, воспроизводящего изображение на телевизионном мониторе.

Тепловизионная передающая камера, помимо пировидикона — ее сердца, — содержит инфракрасный объектив, модулятор и электронные блоки развертки, синхронизации, усиления и обработки сигнала. Камеры обычно комплектуются видеоманитофоном для последующего анализа изображений.

От тепловизионных камер, требующих для охлаждения фотоэлектрического приемника жидкого азота, ка-

мера с пировидиконом выгодно отличается возможностью ее эксплуатации в любом пространственном положении и в полевых условиях, отсутствием ограничения на срок включения. Стоимость пироэлектрических тепловизионных камер значительно меньше, чем сканеров с охлаждением, и можно считать, что именно распространение пироэлектрических камер перевело тепловидение из разряда надуманной экзотики в категорию полезного производственного инструмента.

Пироэлектрические видиконы выпускаются широкой номенклатурой в СССР, ЧССР, КНР, США, Англии, Франции, ФРГ, Голландии, Японии.

Характеризуя инфракрасный мир теплового излучения, следует сказать, что он довольно сер, в нем исключительно слабые контрасты и совсем нет теней. Относительное изменение уровня излучения тел, температуры которых, близкие к комнатной, отличаются на доли градуса, чаще всего не превышает 1% среднего уровня. Но полезная информация (контуры нагретого участка, их изменения и перемещения) связана именно с контрастом тепловой сцены. Поэтому наиболее важными для потребителя характеристиками камер оказывается минимально разрешимая разность температур (в градусах) на объекте и соответствующее этой разности пространственное разрешение (число пар линий на 1 мм плоскости мишени). Между этими величинами имеется нелинейная связь. Для лучших камер соотношение следующее: $0,1^\circ$ — 2 п.л./мм, $0,6^\circ$ — 5 п.л./мм. Напомним, что диаметр мишени составляет 17—18 мм.

Пироэлектрические тепловизионные камеры уже нашли свое место и утвердились как необходимый инструмент в ряде областей применения. Более того, в ряде случаев было установлено, что температурное поле как измерительный агент дает более общую, полную и объективную информацию об объекте, чем локализованные точечные источники. Ранее скрытые связи наглядно проявляются при наблюдении и анализе кинетики и динамики этих полей, что и неудивительно: цельное восприятие всегда ставило более верные диагнозы и давало более точные прогнозы, чем фрагментарное.

В областях промышленности, оперирующих с мощными потоками тепловой энергии, тепловизионные камеры оказались полезными для дистанционного определения скрытых нарушений тепловой изоляции (прожоги,

уточнение, растрескивание и выпадение шамотного кирпича в металлургических печах и ковшах, увлажнение и разрушение изоляции трубопроводов и т. п.), появления микротрещин и внутренних препятствий движению носителя в трубопроводах, недопустимого переувлажнения или запыленности сушильных и обжиговых печей, в том числе вращающихся, однородности нагрева заготовок и определение их макроцелостности, температур и состава уходящих газов и пара в дымовых трубах и градирнях и т. д. Эта информация служит не столько стабилизации технологических режимов, сколько предотвращению драматических ситуаций и катастроф, чреватых длительной остановкой производства.

Камеры нашли применение в бумажной и текстильной промышленности для контроля однородности температуры и влажности бегущего продукта, при производстве полимерных пленок — для выявления микроотверстий.

В энергетике непреходящей проблемой остается контроль за состоянием элементов высоковольтных энергетических трактов в рабочих режимах. Поскольку в идеале элемент транспортной электрической цепи всегда должен быть холодным, пирозлектрические камеры позволяют определить температуру изоляторов (в том числе линий электропередач — с вертолета), коммутационных узлов, мест шинных соединений и т. п. и вовремя принять необходимые меры.

Традиционным конструктивным решением охлаждающих теплообменников остается пара «трубчатый радиатор — вентилятор». Наблюдение температурного поля трубок позволяет определить как их проходимость, так и эффективность траектории воздушных струй.

Коммунальное хозяйство в высокоразвитых странах давно использует тепловидение для контроля за тепло-трассами и пускорегулирующей аппаратурой. Но наиболее продуктивную, так сказать, максимальную отдачу тепловидение дает при контроле за утечками тепла из зданий за счет набивших оскомину в нашей печати плохих уплотнений дверей и окон, некачественной заделки стыков, вводов вентиляционных каналов и тому подобного. Контроль за утечками ведется обзором зданий извне и изнутри. Разности температур внешнего и комнатного воздуха в 20° вполне достаточно для объективной, документированной тепловизионными фотографиями

оценки качества строительства или ремонта. А с фактическими свидетельствами не поспоришь!

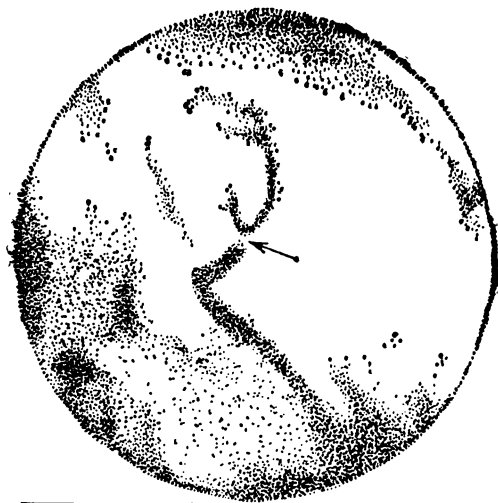
Тепловидение оказывается полезным в решении многих проблем основного транспорта страны — железнодорожного. Среди них назовем только одну — сохранность контактного провода, воистину болевую точку энергоснабжения локомотивного состава. Своевременный учет реальной температуры провода и таким опосредованным способом его текущих прочностных свойств в режиме работы локомотивов, пробегающих критический участок, гарантирует предотвращение дорогостоящих обрывов.

В ряде композиционно сложных технических систем с запутанной топографией множественных источников тепла тепловидение оказывается оперативным средством общего контроля посредством простого сравнения заданной топографии с имеющей место реально. Природа пироэлектрического эффекта позволяет обойтись без запоминающих устройств в сравнении этих топографий. Пироэффект, как уже неоднократно говорилось, не дает электрической реакции на постоянное во времени температурное поле мишени. По этой причине, фиксируя поочередно излучение эталона и объекта, можно визуализировать только разность тепловых картин, т. е. появление источников тепла, обусловленных нарушением каких-то норм. Подобный контроль оказывается весьма эффективным при проверке интегральных схем как первичный выбраковочный этап.

Пироэлектрические тепловизионные камеры начинают внедряться в медицинскую термографию. Привлекательные черты медицинской термографии как метода диагностики связаны с тем, что она абсолютно безопасна, пассивна, никоим образом не воздействует на пациента, крайне дешева в эксплуатации, поскольку не требует расходных материалов, оперативна и пригодна для массовых осмотров. Любая патология какого-либо органа неотвратимо меняет энергетику его жизнедеятельности и как следствие — его температуру (рис. 10). Эта связь и есть фундаментальная основа медицинской термографии. Однако нетрудно видеть, что констатация изменения теплового поля организма является лишь начальной, так сказать, сигнальной фазой диагностики, что необходимо помнить при массовых осмотрах.

С помощью тепловидения делаются попытки понять

Рис. 10. Тепловизионная картина кровеносных сосудов сердца, полученная пировизионной камерой. Стрелкой указано место тромба



механизмы действия на организм иглоукалывания и пассивных «экстрасенсов». Любопытно, что категории мышления человека «рациональное — эмоциональное» можно определить по нагреванию тех или иных участков черепа вследствие прилива крови к соответствующим областям мозга. Вполне вероятно, что со временем тепловизионные фрагменты проникнут в кино и широкоэкранный телевидение, обогатив художников новым средством передачи человеческих эмоций в дополнение к жестам, мимике и модуляциям голоса. Эмоциональное состояние неизбежно отражается на температуре кожи, что при некотором художественном воображении может быть передано необычным сочетанием цветов или светотеней в границах привычных очертаний человеческого тела.

В актив пирозлектрического тепловидения следует занести существенный вклад в инструментальное оснащение академической и прикладной лазерной оптики инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов. Первоначально камеры использовались просто для визуализации излучения на различных участках тракта, впоследствии они стали выполнять и более сложные функции. Посредством этих камер аттестуют качество оптических материалов, искажение геометрии линз, шероховатость

их поверхности, пространственное распределение коэффициента преломления заготовок, метрологическое определение по эталонным лазерам видимого диапазона длин волн инфракрасных лазеров, стабилизацию их частоты на уровне 10^{-11} , прецизионное совмещение осей излучения инфракрасного и видимого лазеров. Естественно, что пироэлектрические камеры стали стандартным приемником в инфракрасных интерферометрах различного назначения.

Модифицированная пироэлектрическая камера используется как своеобразный многоканальный приемник в широкополосном инфракрасном спектрометре ($\lambda = 1 - 30$ мкм), предназначенном для работы с непрерывными и импульсными лазерами. Укажем также на успешное применение камеры в инфракрасных микроскопах и для сверхбыстрой фотографии (импульс ≈ 10 нс) при $\lambda = 10,6$ мкм.

Высокая надежность камер и практически неограниченный срок непрерывной работы (разумеется, в пределах ресурса элементов) предопределили их использование в системах охраны. Камера позволяет идентифицировать человека в поле ночью по собственному излучению лица и одежды на расстоянии ≈ 200 м. Специальное конструктивное исполнение камер для пожарных значительно облегчило им поиск пострадавших в сплошной пелене дыма и пара, непроницаемой для глаз, но прозрачной для инфракрасного излучения.

Пироэлектрические камеры расширили рынок тепловизионных систем, и этот рынок, в свою очередь, заставил разработчиков поднять пироэлектрические преобразователи изображения на качественно новую, более высокую ступень. При всех своих эксплуатационных достоинствах пироэлектрические видиконы уступают по чувствительности (минимально разрешаемой разности температур) тепловизорам с механической разверткой и охлаждаемым фотоэлектрическим приемником (сканерам) приблизительно на порядок.

Преодолеть этот разрыв возможно только, перейдя к новой структурной схеме преобразователя. Пировидикон построен по схеме «сигнал приемного элемента — коммутатор (электронный луч) — усилитель». Электронный луч переключает на нагрузочное сопротивление слабый сигнал элементов, и естественно, шумы коммутации даже при самой малошумящей электронной оптике суще-

ственно увеличивают общий уровень шумов. Нельзя сбрасывать со счетов и нагрев мишени электронным лучом — дополнительный источник температурных флуктуаций.

Исключить эти источники шумов можно, перейдя к структурной схеме «сигнал приемного элемента — индивидуальный усилитель сигнала приемного элемента — коммутатор — последующее усиление и обработка», т. е. постоянно подключив усилительный элемент к каждому приемному элементу.

Эта структура соответствует матрице индивидуальных пироприемников с коммутируемыми выходами. Для лучших одиночных пироприемников обнаружительная способность достигает $D^* = (4 - 7) \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, что открывает перспективу создания тепловизионных матриц с $D^* = 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, в то время как для пировидиконов характерно значение на два порядка меньше: $D^* \simeq \simeq 10^6 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Очень привлекательным в таком решении представляется переход от электровакуумного прибора к твердотельному, поскольку матрица усилителей и коммутатор должны реализоваться как полупроводниковые структуры. Этот переход в дополнение к выигрышу в чувствительности снижает габариты преобразователя и потребляемую мощность, повышает эксплуатационную надежность.

Работы в направлении создания пироэлектрических матриц, начатые в конце 70-х — начале 80-х годов, к настоящему времени дали ожидаемый результат. Столь длительное по меркам конца XX века время создания простой в принципе структуры объясняется необходимостью разработки технологии формирования матрицы малозумящих полевых транзисторов (индивидуальных усилителей) с соответствующими разводками питания, установления режимов по постоянному току и коммутации. Ранее потребности в такого рода интегральных схемах просто не возникало.

В настоящее время высокочувствительные пироэлектрические тепловизионные матрицы стоят очень дорого. По сообщениям зарубежной печати, они разрабатываются в основном для военных применений — прицелов стрелкового вооружения, приборов наблюдения пехоты, курсографов крылатых ракет и т. п. В промышленной и лабораторной практике, о которой уже говорилось, ис-

пользуются модификации матриц меньшей чувствительности.

Упомянем об одной сфере применений, где пироэлектрические матрицы оказались вне конкуренции. Это — измерение распределения мощности лазерного излучения по сечению луча. Лазерный луч стал широко распространенным технологическим инструментом и, подобно любому инструменту, должен сохранять характеристики в пределах нормированных величин. Пироэлектрическим матрицам не страшен перегрев. Они дают информацию о распределении мощности для непрерывного излучения, а импульсные могут охарактеризовать по распределению как мощности, так и энергии. Посредством матриц можно оценить и нестационарные явления в лазерном пучке, как временные, так и пространственные. Результаты измерений выводятся на дисплее в форме трехмерного изображения, графика мощности по любому из сечений или в виде цифры для заданных координат сечения.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Эту группу преобразователей объединяет общий признак — пироэлектрик реагирует на контактный или конвективный теплообмен, иными словами, используется как термометр. Необычность такого термометра состоит в том, что он фиксирует только переменную составляющую собственной температуры, позволяя измерять или само приращение температуры (с чувствительностью до $\sim 7 \cdot 10^{-9} \text{K}$), или скорость его изменения (с чувствительностью до $\sim 1 \cdot 10^{-7} \text{K} \cdot \text{с}^{-1}$), или параметры тепловых импульсов (с временным разрешением до $1 \cdot 10^{-9} \text{с}$).

Эти возможности пиротермометров были использованы в широкой гамме аналитических приборов и устройств экспериментальной техники.

Химические производства и исследования постоянно нуждаются в анализе состава газообразных и жидких смесей. Наиболее распространенным способом такого анализа является хроматографический.

За счет различной скорости диффузии в хроматогра-

фической колонне компоненты смеси разделяются и последовательно проходят через детектор, определяющий их концентрацию. Для малых количеств и объемов вещества универсальный метод определения концентрации должен основываться на наиболее просто измеряемых свойствах газов с тем, чтобы можно было определить разницу в поведении эталонной (газ-носитель) и контролируемой смесей. Тепловые сигналы вполне удовлетворяют этому требованию, а их получение может основываться или на реакционной способности газов (в частности, за счет теплоты каталитической реакции), или на теплопроводности газов. Пиротермометры используются в хроматографических детекторах обоих типов.

Пироэлектрический детектор по теплоте каталитической реакции окисления представляет собой пластинку пироэлектрика размером $10 \times 10 \times 0,5$ мм³, вырезанную перпендикулярно полярной оси, на которую напылены платиновые электроды толщиной 0,3 мкм. Эти электроды одновременно играют роль катализатора. При использовании в качестве газа-носителя обычного воздуха минимально детектируемые концентрации H_2 , CO и непредельных углеводородов (этилена, пропилена и др.) составляют $5 \cdot 10^{-6}$ — $2 \cdot 10^{-5}$ объемных процента, что приблизительно на два порядка превышает чувствительность аналогичных по назначению детекторов с термометрами сопротивления и термисторами в качестве чувствительных элементов.

Добавим, что данный тип пироэлектрического детектора обладает еще одним уникальным свойством — он нечувствителен к присутствию в смеси предельных углеводородов. Направленная выборка анализируемого вещества катализатором и низкие рабочие температуры (до 200°C) практически исключают влияние предельных углеводородов на результаты измерений. Иными словами, малые концентрации непредельных углеводородов ($\sim 10^{-3}$ об.%) можно непосредственно измерять в смеси со значительными концентрациями ($\simeq 98$ об.%) предельных углеводородов, что, в частности, крайне важно при анализе проб природного газа.

Пироэлектрический детектор, определяющий концентрацию компонент по теплопроводности газа, представляет собой полый цилиндр из сегнетоэлектрической керамики, внутри которого соосно размещен с зазором 0,5—1 мм цилиндрический источник тепла. Стационар

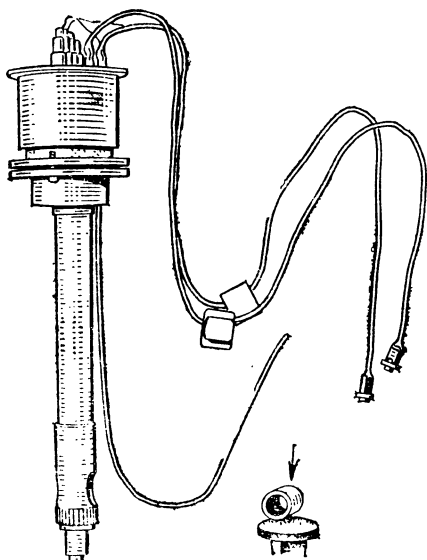


Рис. 11. Катарометрическая ячейка хроматографа. Стрелкой показан цилиндрический пирозлектрический чувствительный элемент

ная разность температур между источником и детектором составляет ~ 3 К. Хроматографическая ячейка (рис. 11) содержит два строго идентичных по чувствительности детектора. Через один из них проходит чистый газ-носитель, через другой — газ-носитель с разделенными компонентами газовой смеси. Выходные сигналы детекторов включены навстречу друг другу, и разностное выходное напряжение в линейном приближении пропорционально концентрации компоненты газовой смеси.

Применение пирозлектрических детекторов теплопроводности в промышленном хроматографе «Цвет-511» позволило снизить уровень минимально детектируемых концентраций до $2 \cdot 10^{-5}$ об. %, что как минимум на порядок улучшило чувствительность сравнительно с приборами того же назначения. В лабораторной модификации этого хроматографа минимально детектируемые концентрации не превышают $2 \cdot 10^{-6}$ об. %.

Калориметрические измерения занимают важное место в аналитической практике. Основным прибором для таких измерений служит сканирующий калориметр — прибор, линейно разворачивающий во времени температуру ячеек с анализируемым и эталонным веществами. Наблюдаемые аномалии тепловых свойств анализируемого вещества дают информацию о его составе, структуре и т. д.

Пирозлектрические сканирующие калориметры вы-

годно отличаются от калориметров других типов высокой чувствительностью к изменениям температуры и возможностью задания крайне малых (до $\approx 10^{-7} \text{K} \cdot \text{с}^{-1}$) скоростей развертки при сохранении высокой линейности. Малые скорости развертки обеспечивают отсутствие градиентов по объему калориметрической ячейки и позволяют изучить детали тепловых аномалий с разрешением 100—200 точек на 1° изменения температуры. Высокая чувствительность пиротермометров, выполненных в форме чашек, заполненных исследуемым и эталонным веществами, дает возможность изучать минимальные, $< 10^{-3}$ г количества вещества, даже со слабыми тепловыми аномалиями.

Пиротермометры используются как теплоприемники для измерения тепло- и температуропроводности твердых и жидких тел методом нестационарного теплового поля. Высокая чувствительность пиротермометров позволяет минимизировать градиент на объекте (до $10^{-2} \text{K} \cdot \text{см}^{-1}$), что имеет большое значение при изучении температурных фронтов фазовых переходов.

Достоинством пиротермометров является также возможность пространственного усреднения теплового потока, проходящего через исследуемый объект благодаря тому что пиротермометры могут быть довольно большими, площадью до нескольких квадратных сантиметров.

В последние годы контактная пироэлектрическая термометрия получила распространение в самых неожиданных областях: в фототермальной спектроскопии для измерения сильно поглощающих ($\sim 400 \text{ см}^{-1}$) сред; для измерения импульсных ($\sim 1,5 \cdot 10^{-8} \text{с}$) тепловых реакций разрыва связей в полимерах при их травлении излучением ультрафиолетовых лазеров; в пироэлектрических газоанализаторах — для измерения реакционной энтальпии; для измерения теплот испарения микрокапель ($\sim 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$) с чувствительностью $\sim 10^{-6}$ кал; для измерения энергии сорбции — десорбции молекул; для измерения энергии инфранизкочастотных акустических колебаний; для создания интегральных твердотельных воздушных анемометров, измеряющих скорости ветра от 0,1 до 2000 см. мин $^{-1}$ при погрешности $\sim 1\%$ и общей потребляемой мощности менее 0,1 Вт.

Своеобразное применение пирометры нашли в тепловых цепях с конвективным теплообменом. СКТБ Института физики АН УССР серийно выпускает датчики пара-

метров дыхания, в которых пиротермометр взаимодействует с выдыхаемым и вдыхаемым воздухом. Спектральный состав и амплитуда выходного сигнала датчика позволяют медикам и биологам проследить реакцию человека или подопытного животного на состав и температуру атмосферы или какие-либо внешние раздражители.

Для иллюстрации широких возможностей пирозлектрических термометров приведем пример использования их в режиме одновременного измерения радиационного, конвективного и механического воздействия, т. е. когда они играют роль пироприемника, термометра и пьезодатчика. Именно такие функции исполняет пирозлектрический датчик энергетических компонент взаимодействия ударной волны с моделью.

Моделирование на ударной волне входа космических объектов в атмосферу (скорость $\simeq 30 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) соответствует температуре плазмы $15 \cdot 10^3 \text{ К}$, т. е. свыше половины мощности излучения лежит в области вакуумного ультрафиолета. Время воздействия ударной волны на датчик не превышает 1 мс, и за столь короткое время необходимо проследить динамику всех трех воздействий на одну и ту же площадку диаметром не более 5 мм, поскольку при больших размерах площадок воздействия не могут считаться равномерными.

Универсальный пирозлектрический датчик для одновременного измерения всех трех компонент ударной волны представляет собой комбинацию секций с несколькими выходами, напряжение на которых соответствует реакции датчика на одно, два или три воздействия. Дифференциальное включение секций позволяет выделить три самостоятельных сигнала, генерируемых каждым из воздействий.

Оценивая перспективы развития пирозлектрических химико-аналитических приборов, можно высказать уверенность, что именно посредством таких преобразователей будет решена проблема «искусственного носа», или «искусственной собаки», т. е. селективного газоанализатора с чувствительностью на уровне тысяч молекул, использующего принцип избирательной каталитической реакции. Современные работы в этом направлении и освоение промышленностью оптимизированных пирозлектрических материалов позволяют надеяться на реализацию этой идеи.

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Преобразование тепловой энергии в электрическую и поныне остается актуальной проблемой, волнующей исследователей и побуждающей их к опробыванию нетрадиционных эффектов в этой роли. Пироэлектрический эффект не стал исключением — уже в течение почти 70 лет (с 1919 г.) не прекращаются попытки создать на его основе теплоэлектрический генератор энергии.

Преобразователи тепловой энергии в электрическую применяются в устройствах самого разнообразного назначения, и именно назначение этих устройств определяет требования к рабочим параметрам преобразователей и их эксплуатационным свойствам. Стационарно и длительно работающие преобразователи большой мощности должны иметь повышенный КПД. В последние несколько лет появилась надежда на преодоление крайне низкого (0,3%) КПД пироэлектрических преобразователей, лимитируемого фундаментальными причинами: энергия, необходимая для измерения температуры кристаллической решетки в целом, всегда много больше энергии, расходуемой на смещение структурных элементов, обуславливающих изменение спонтанной поляризации. Энергия выделившихся электрических зарядов, в свою очередь, много меньше тепловой энергии смещения дипольных структурных элементов.

Не выдерживая конкуренции с другими типами теплоэлектрических преобразователей (полупроводниковых термоэлементов и т. п.) по КПД, пироэлектрические преобразователи выгодно отличаются от них простотой технологии и малой стоимостью (поляризованная керамика), широким диапазоном рабочих температур, высокой устойчивостью к механическим воздействиям, радиационной стойкостью и т. д. В соответствии с этим ранее пироэлектрические преобразователи энергии были конкурентоспособны лишь в устройствах, в которых при избытке тепловой энергии важнейшим параметром является надежность. К таким устройствам относятся устройства специального назначения, в первую очередь взрыватели различных типов.

Современные материалы, используемые в области температур сегнетоэлектрических фазовых переходов, и изящные конструктивные решения позволили в извест-

ной мере нейтрализовать фундаментальные ограничения величины КПД. По некоторым литературным оценкам, многокаскадные пироэлектрические машины, выполненные из высокоэффективных материалов, могут достичь непрерывного съема мощности до 2 кВт/дм³ рабочего тела при КПД 10—20%. Реально к 1982 г. при сравнительно небольшой амплитуде изменения температуры рабочего тела $\Delta T = 200^\circ$ была экспериментально снята удельная мощность 0,13 кВт/дм³, что свидетельствует о весомости теоретических оценок.

Основная предполагаемая сфера применения таких преобразователей — космические аппараты и орбитальные станции.

Пироэлектрический эффект обратим, т. е. под действием внешнего электрического напряжения того или иного знака возрастает или понижается температура пироэлектрика. Это свойство эффекта положено в основу интенсивно разрабатываемых в настоящее время электростатических рефрижераторов, посредством которых можно легко достичь температур, лишь на несколько сотых градуса отличных от абсолютного нуля. Принципиальное достоинство таких рефрижераторов сравнительно с другими состоит в их простоте, ничем не ограничиваемой пространственной локализации — электрическое напряжение легко (в отличие от жидких и газообразных хладагентов, а также магнитного поля) подается в любую точку заданного объема.

ПОЛЯРНАЯ СРЕДА — УНИВЕРСАЛЬНАЯ СРЕДА ДЛЯ СЕНСОРНЫХ РЕЦЕПТОРОВ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Достижения физики и техники в использовании пироэлектричества, вероятно, не обесценятся тем фактом, что Природа уже миллиарды лет назад успешно сделала это.

Ткани живых организмов состоят из биополимеров с цепочечными или пирамидальными молекулами (вспомним молекулу глицина), представляющими собой электрические диполи, упорядоченно расположенные в одном выделенном полярном направлении. Классиче-

ским диполем является и молекула воды, повсеместно присутствующая в живых организмах. Не останавливаясь на глубинных причинах, констатируем только одно: биологически активная клетка животных и растений представляет собой полярную среду и, как показано исследованиями, сам факт жизнедеятельности коррелирован с уровнями некоторых параметров, характеризующих полярные свойства этой среды.

Полярная среда удивительно чувствительна к самым разнообразным воздействиям — механическим, тепловым, химическим, магнитным, электрическим, электромагнитному излучению разных частот, проникающей радиации и т. д. И на все эти воздействия среда откликается одинаково — изменением поляризации за счет изменения или упругой деформации молекул и их пространственной подвижки как целого (тепловые, механические, электрические, магнитные воздействия), или самих молекул (химические воздействия), или за счет разрыва связей и возбуждения электронных оболочек (проникающее излучение, электромагнитные волны). Таким образом, полярная среда является универсальной сенсорной средой, формирующей самый удобный для последующего использования вид сигнала — электрический*.

Природа в процессе длительной эволюции живых организмов выделила полярную среду как оптимальную для реализации рецепторов (биологических датчиков) различных воздействий.

Многочисленные эксперименты, проведенные на животных и растениях, привели ученых к заключению, что поведение полярной среды есть общий физический механизм действия термо-, фото-, электро-, хемо- и механорецепторов.

Электрический сигнал рецептора при раздражении нагревом (охлаждением) и прикосновением обуславливается пиро- и пьезоэлектрическими свойствами ткани рецептора, при химическом раздражении — изменением числа активных электрических диполей и общего дипольного момента ткани вследствие появления чужеродных молекул.

Напомним уже обсуждавшееся выше уникальное

* Авторы надеются, что читатель с пониманием отнесется к упрощенному изложению этой интереснейшей проблемы,

свойство полярной среды — она реагирует только на приращение воздействия и не формирует выходного сигнала в случае стационарного воздействия. По этой причине «полярные» рецепторы выдают сигнал только при изменении раздражающего воздействия, а от рецепторов, состояние которых неизменно, сигналы не поступают. Используя терминологию автоматических систем, можно сказать, что полярные рецепторы исключают избыточность информации уже на уровне первичных преобразователей (датчиков). Это свойство «полярных» рецепторов избавляет управляющий центр организма — мозг, куда идут от них сигналы, от фантастической (учитывая количество рецепторов) перегрузки. При высочайшей чувствительности рецепторов мозг не получает сигналов, если воздействие на рецептор стационарно. Именно по этой причине человек не замечает веса своего платья, но живо реагирует на прикосновение к коже травинки, различает контрасты цветов, температур, запахов.

Этот биологический аспект пирозлектричества уже был реализован в оснащении роботов контактными температурными рецепторами, что позволяет роботам выбирать детали по степени их нагрева и блокирует захват перегретых деталей.

Ранее говорилось о работах по оснащению роботов тепловизионными пирозлектрическими камерами, т. е. придании им возможности различать тепловые объекты. И закономерен вопрос: неужели Природа упустила возможность использовать пирозлектрические свойства полярной среды для оснащения живых организмов тепловым локатором?

Такая возможность была использована и эволюционно закреплена у тех биологических видов, где она служит для добычи пищи. К ним относятся гремучие змеи, анаконды и некоторые другие типы рептилий. Кобры, например, обнаруживают мышь по ее собственному тепловому излучению на расстоянии около 10 м. Причем для змеи тепловое излучение остается в темноте единственным признаком пищи, т. е. признаком теплокровного животного, ибо в природе ночью других источников тепла просто нет. Единственность этого признака подтверждают лабораторные эксперименты — змея локализует цель и нападает на любой нагретый предмет. Процедура локализации однозначно указывает на пиро-

электрическую природу ее теплового локатора: змея покачивает головой, сканируя тепловое поле. Такой режим работы пироэлектрических тепловизионных камер носит название панорамирования.

Приведенный пример еще раз дополняет многочисленные свидетельства того, что корни многих, казалось бы, наисовременнейших технических решений уходят в живую Природу.

ЛИТЕРАТУРА

Желудев И. С. Физика кристаллических диэлектриков. — М.: Наука, 1968.

Струков Б. А. Сегнетоэлектричество. — М.: Наука, 1979.

Струков Б. А., Леванюк А. П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. — М.: Наука, 1983.

Новик В. К., Гаврилова Н. Д., Фельдман Н. Б. Пироэлектрические преобразователи. — М.: Советское радио, 1979. — 182 с.

Старковская Р. Я. Основы пироэлектрической дозиметрии. — Киев: Наукова думка, 1983.

Бержье Ж. Промышленный шпионаж. — М.: Международные отношения, 1971.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Кратко об истории наблюдения и исследования пирозлектричества	4
Физика пирозлектричества	5
Электрические явления, сопутствующие полярному состоянию	20
О конкурентоспособности физических эффектов и о том, как был реанимирован пирозлектрический эффект	26
Что могут пирозлектрические преобразователи?	33
Пирозлектрические приемники излучения	37
Пирозлектрические преобразователи изображения	45
Преобразователи в аналитических приборах и экспериментальных устройствах	54
Пирозлектрические преобразователи тепловой энергии в электрическую	59
Полярная среда — универсальная среда для сенсорных рецепторов живых организмов	60
Литература	63

Научно-популярное издание

**Н. Д. ГАВРИЛОВА,
М. Н. ДАНИЛЫЧЕВА,
В. К. НОВИК**

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*
Редактор *К. А. Кутузова*
Мл. редактор *Л. Л. Нестеренко*
Обложка художника *В. Н. Конюхова*
Худож. редактор *П. Л. Храмцов*
Техн. редактор *О. А. Найденова*
Корректор *Л. В. Иванова*

ИБ № 9831

Сдано в набор 01.02.89. Подписано к печати 24.03.89. Т 00918. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,44. Тираж 28 774 экз. Заказ 245. Цена 15 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 894005.
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 80 к.



СЕРИЯ
ФИЗИКА