

ЛИТЕРАТУРА

1. Весницкий А. И., Потапов А. И. Качественный метод исследования волновых процессов в системах с изменяющимися во времени размерами.— В кн.: Динамика систем. Горький, изд. Горьк. ун-та, 1975, № 7.
2. Rayleigh (Strutt J. W.) On the pressure of vibrations.— «Phil. Mag.», 1902, ser. 6, vol. 3, N 15, p. 338.
3. Николай Е. Л. О поперечных колебаниях участка струны, длина которого равномерно меняется.— В кн.: Труды по механике. М., ГИТТЛ, 1955.
4. Горошко О. А., Савин Г. Н. Введение в механику одномерных деформируемых тел переменной длины. Киев, «Наукова думка», 1971.
5. Весницкий А. И., Потапов А. И. Некоторые общие свойства волновых явлений в одномерных механических системах переменной длины.— ПМ, 1975, т. 11, вып. 4, с. 98.
6. Красильников В. Н., Панкратов А. М. Электромагнитные поля в резонаторах с колеблющимися границами.— В кн.: Проблемы дифракции и распространения волн. Ленинград, изд. Ленингр. ун-та, 1968, № 8, с. 59.
7. Весницкий А. И., Островский Л. А., Папко В. В., Шабанов В. Н. О параметрической генерации импульсов.— «Письма в ЖЭТФ», 1969, т. 9, № 5, с. 274.
8. Кабанов Д. А., Никулин С. М. Генерация импульсов в линии передачи с параметрическими диодами.— «Радиотехника и электроника», 1973, т. 17, № 8, с. 1756.

УДК 535.231.6 : 537.227 + 533.6.011.72

**МАЛОИНЕРЦИОННЫЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ПРИЕМНИКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ
В ДИАПАЗОНЕ 40—1100 НМ**

Ю. Н. Киселев, В. З. Крохин

(Москва)

Пироэлектрические приемники излучения, в которых используется резкая температурная зависимость спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках от температуры, обладают сравнительно высокой чувствительностью, неселективностью в широком спектральном диапазоне и малой инертностью [1, 2]. Обычно пироприемники применялись для индикации инфракрасного излучения.

Рассмотрим работу пироприемника продольного типа на основе сегнетоэлектрического кристалла, в котором вектор поляризации P направлен по оси x перпендикулярно электродам и излучение поглощается одним из электродов. Пироэлектрический ток, возникающий в каком-либо элементе кристалла $\Delta x \Delta y \Delta z$, определяется изменением поляризации во времени $dq/dt = \Delta y \Delta z dP/dt$, а среднее значение тока в кристалле пропорционально изменению средней температуры кристалла

$$\frac{dq}{dt} = \frac{A}{d} \int_0^d \frac{dP}{dT} \frac{dT}{dt} dx; \quad \frac{dP}{dT} = \gamma; \quad \frac{1}{d} \int_0^d \frac{dT}{dt} dx = \frac{d\bar{T}}{dt}; \quad \frac{dq}{dt} = A\gamma \frac{d\bar{T}}{dt},$$

где A — площадь поверхности кристалла, воспринимающей излучение; d — толщина кристалла в направлении распространения тепловой волны; $\gamma = dP/dT$ — пироэлектрический коэффициент, постоянный в некоторой области температур ниже температуры Кюри.

Если пренебречь теплопотерями кристалла, то уравнение теплового баланса можно записать в виде

$$cdd\bar{T}/dt = adE/dt,$$

где c — теплоемкость единицы объема кристалла; E — плотность энергии излучения; a — коэффициент поглощения излучения кристаллом.

Измерительную схему можно представить как генератор тока, к которому параллельно подсоединены: собственная емкость кристалла C_+ , его собственное сопротивление R_+ , емкость измерительной цепи C_- и сопротивление нагрузки R_- . Собственное сопротивление кристалла обычно значительно больше сопротивления нагрузки ($R_+ \sim 10^{10} - 10^{12}$ Ом·см), и им можно пренебречь. Тогда напряжение на нагрузочном сопротивлении в случае $R-C_1 \gg \tau^0$, $C_1 = C_- + C_+$

$$(1) \quad U = (Aa\gamma/C_1dc)E,$$

в случае $R-C_1 \ll \tau^0$

$$(2) \quad U = (Aa\gamma R_-/dc) \cdot dE/dt,$$

τ^0 и τ_* — соответственно максимальное и характерное минимальное времена длительности светового импульса. Соотношения (1), (2) определяют два важных режима работы пироэлектрического приемника: режим измерения энергии импульса ($R-C_1 \gg \tau^0$) и режим измерения его мощности ($R-C_1 \ll \tau_*$).

В пироприемниках продольного типа временное разрешение ограничивается влиянием верхнего электрода, поглощающего излучение. Постоянная времени такого пироприемника выражается зависимостью [3]

$$(3) \quad \tau \approx 9c_0^2/kc,$$

где c_0 — поверхностная теплоемкость поглощающего излучение электрода; k — теплопроводность.

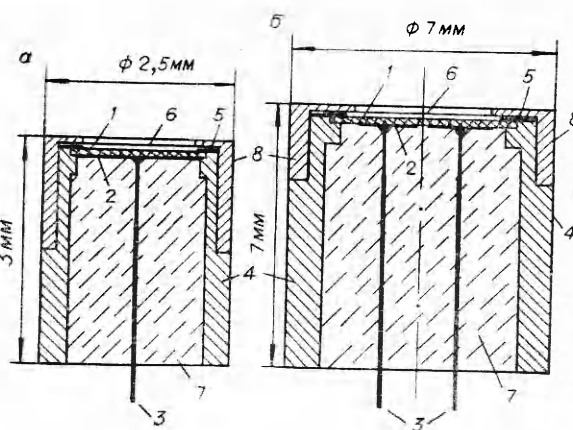
Временное разрешение пироприемников продольного типа обычно составляет несколько мкс. Имеется несколько противоречивое сообщение [4] о пироприемнике продольного типа с указанием о временном разрешении 30 нс. В то же время из приведенной в этом сообщении осциллограммы следует, что временное разрешение этого пироприемника не менее 300 нс.

Приемники излучения с фронта сильных ударных волн должны удовлетворять довольно жестким требованиям: разрешать времена порядка 100 нс, обладать равномерной чувствительностью как в видимой области спектра, так и в вакуумном ультрафиолете, регистрировать довольно мощные потоки излучения. Немаловажным в условиях взрывного эксперимента является простота конструкции и помехозащищенность приемника.

В качестве чувствительного элемента нами выбрана заводская керамика ЦТС-19, у которой пирокоэффициент ($\gamma = 5 \cdot 10^{-9}$ Кл/см²·°С) постоянен в области температур до 100°С [2].

Отрабатывались конструкции двухсекционного и односекционного пироприемников. Двухсекционный пироприемник позволяет одновременно получать значения потока мощности и потока энергии излучения. Схемы пироприемников представлены на фиг. 1. Чувствительный элемент 1 из керамики ЦТС-19 с напыленными на нижнюю сторону электродами

2, к которым припаяны электрические выводы 3, приклеивался на эпоксидной смоле к латунному корпусу 4 и притирался до необходимой толщины. Сверху на корпус и край чувствительного элемента напылялся слой серебра 5 толщиной порядка 1 мкм. Затем на всю верхнюю поверхность напылялся слой золота толщиной 30 нм, который служил верхним электродом 6 (7 — эпоксидная смола, 8 — латунная диафрагма).



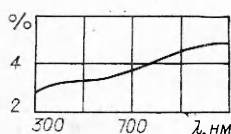
Фиг. 1

Для уменьшения коэффициента отражения на электрод наносилось чернящее покрытие.

Из формулы (3) следует, что для получения временного разрешения 10^{-7} с для пироприемника из ЦТС-19 ($c = 3,2$ Дж/см³·°С, $k = 0,013$ Вт/см × °С) необходимо, чтобы поверхностная теплоемкость верхнего электрода с чернящим покрытием не превышала $2,2 \cdot 10^{-5}$ Дж/см²·°С. Такой небольшой поверхностной теплоемкостью обладает золотая чернь [5, 6], которая обычно получается при распылении золота в атмосфере азота. Для получения равномерной поглощательной способности черни необходимо, чтобы содержание кислорода не превышало 0,3%. Получение такого чистого азота в наших условиях представлялось трудным, поэтому применялся аргон марки «чистый» с содержанием примесей менее 0,01%. Оптимальными для напыления золотой черни с вольфрамового испарителя в атмосфере аргона оказались следующие параметры напыления: давление аргона 0,5 мм рт. ст., расстояние от испарителя до подложки 3,5 см, вес навески золота 7 мг, скорость испарения 0,5 мг/с.

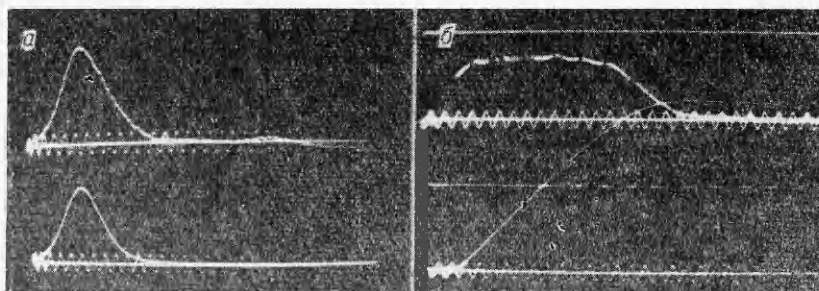
На фиг. 2 представлены результаты измерения коэффициента диффузионного отражения керамики ЦТС-19, на которую напылен слой золота толщиной 30 нм и золотая чернь, напыленная при указанных выше условиях. Измерения проведены на спектрофотометре СФ-4 с приставкой ПДО-1. Видно, что коэффициент отражения в диапазоне длин волн 300—1100 нм не превышает 5%. В работе [7] указано, что коэффициент отражения золотой черни в диапазоне длин волн от 220 до 4 нм меняется от 2,9% до 1,5%. В области 40—120 нм возникают потери энергии при вылете фотоэлектронов. В этом диапазоне чувствительность пироприемника может изменяться на несколько процентов из-за непостоянства фотоэлектрического квантового выхода золота. Максимальные потери (5%) возникают при $\lambda = 72,5$ нм [7].

Испытание пироприемников производилось воздействием на них импульса излучения неодимового лазера длительностью 1 мкс. Сигнал с пироприемника через предусилитель (входное сопротивление 75 Ом, коэффициент усиления 100, полоса пропускания до 20 МГц) подавался на вход осциллографа ОК-33. Постоянная времени электрической цепи менее 10^{-7} с.



Фиг. 2

На второй канал этого же осциллографа для сравнения подавался сигнал с фотоэлемента ФЭК-14 с временным разрешением менее 10^{-8} с.



Фиг. 3

При отработке конструкции пироприемников особое внимание уделено уменьшению амплитуды колебаний, связанных с пьезорезонансом керамического элемента, возникающим в результате тепловых деформаций. Наиболее сильные (долго не затухающие) колебания возникали, когда чувствительный элемент свободно подвешивался на тонких проволочках. При приклеивании керамического элемента на эпоксидной смоле эти колебания затухали значительно быстрее. Некоторое уменьшение амплитуды колебаний наблюдалось при уменьшении толщины керамического элемента. Отмечено влияние на амплитуду колебаний размеров нижнего электрода и диаметра диафрагмы, ограничивающей облучаемую поверхность. Оптимальной оказалась диафрагма с диаметром, равным диаметру нижнего электрода. Из осциллограммы, представленной на фиг. 3, а, видно, что пироприемник удовлетворительно воспроизводит форму импульса лазерного излучения (вверху запись сигнала с пироприемника, внизу — с ФЭК-14, период синусоиды 10^{-7} с). Считая, что пироприемник должен полностью воспроизводить энергию импульса, можно оценить искажение формы импульса, построив сигналы от пироприемника и фотоэлемента в таком масштабе по амплитуде, чтобы площади под кривыми были равны. Тогда можно представить нарастание сигнала от пироприемника в виде [1] $\Phi(t) = \Phi_{-}(t)/\sqrt{1 + \tau^2/t^2}$, где $\Phi_{-}(t)$ — нарастание сигнала от фотоэлемента; τ — постоянная времени пироприемника.

Постоянная времени разработанных пироприемников оценивается не хуже $2 \cdot 10^{-7}$ с. Максимальные измеряемые длительности импульса излучения ограничиваются временем прихода тепловой волны на нижний электрод $t^0 \approx d^2 c/4k$.

Для калибровки пироприемников по чувствительности применялся эталонный источник ЭВ-39, в котором излучателем является сильноточный разряд в капилляре, излучающий как черное тело с температурой 39000 ± 1000 К. При калибровке изображение светящегося капилляра проецировалось с помощью линзы на пироприемник. Плотность энергии, падающей на пироприемник за время импульса, предварительно была измерена измерителем энергии типа ИМО-2. При этом среднеквадратичное отклонение от среднего значения энергии импульса излучения ЭВ-39 по результатам 20 измерений не превышало $\pm 4\%$ при точности измерения $\pm 6\%$. Воспроизведение двухсекционным пироприемником импульса излучения от ЭВ-39 представлено на фиг. 3, б (вверху в режиме измерения мощности, внизу в режиме измерения энергии, период синусоиды 10^{-5} с). Импульсная чувствительность по потоку энергии для обеих конструкций пироприемников достигала значения $22 \text{ В} \cdot \text{см}^2/\text{Дж}$, что хорошо согласуется с расчетом для ЦТС-19. Чувствительность от датчика к датчику

Параметры	Односекционный приемник	Двухсекционный приемник
Размеры пироприемника	∅ 2,5×3 мм	∅ 7×7 мм
Размеры керамического элемента	∅ 1,8×0,03 мм	∅ 5×0,07 мм
Площадь воспринимающей излучение поверхности	1,7 мм ²	10,6 мм ²
Собственная емкость одной секции	600 пФ	600 пФ
Импульсная чувствительность по энергии	1300 В/Дж	210 В/Дж
Импульсная чувствительность по мощности при $R_{\text{н}}=75$ Ом	$4,1 \cdot 10^{-5}$ В/Вт	$6,6 \cdot 10^{-6}$ В/Вт
Диапазон измеряемых длительностей импульса излучения	0,2—500 мкс	0,2—3000 мкс
Спектральный диапазон измерений, где коэффициент отражения не превышает 6%	40—1100 нм	

менялась не более чем на 30%. Параметры пироприемников приведены в таблице.

Диапазон мощности, измеряемой пироприемником в линейной области чувствительности, определяется диапазоном температур ниже точки Кюри, где пирокэффициент меняется незначительно. В случае задачи теплопроводности для бесконечного полупространства, на поверхность которого падает в момент $t = 0$ постоянный тепловой поток $a\Phi$, повышение температуры на поверхности

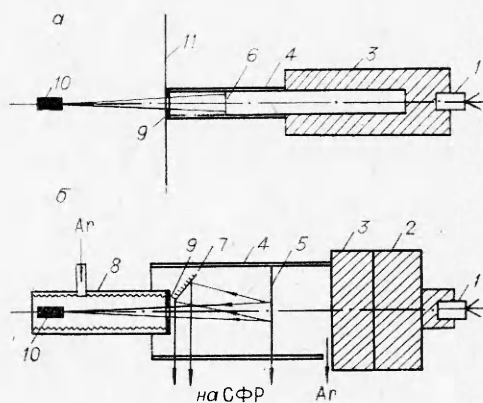
$$\Delta T(0, t) = (2a\Phi/\sqrt{\pi ck})\sqrt{t},$$

т. е. максимальный поток мощности

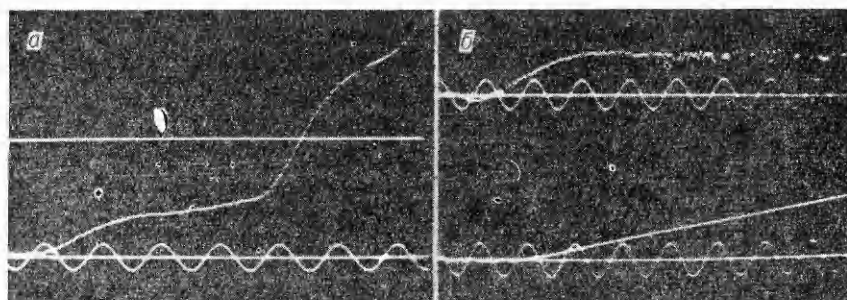
$$\Phi^0 = \Delta T\sqrt{\pi ck}/2a\sqrt{t}.$$

Чувствительность разработанных пироприемников оставалась постоянной вплоть до потоков мощности $\Phi^0 = 20/\sqrt{t}$, Вт/см², где t — длительность импульса, с. При больших потоках мощности происходило просветление черни, вызванное ее коагуляцией.

С помощью разработанных пироприемников произведены измерения излучения с фронта ударных волн в воздухе и в аргоне. Ударная волна в воздухе со скоростью 13,6 км/с генерировалась в кумулятивном канале диаметром 8 мм взрывного эталонного источника [8] и выпускалась в стеклянную трубку диаметром 8 мм и длиной 10 см, где она распространялась без затухания (фиг. 4, а). Ударная волна 5 в этом источнике излучает как черное тело с яркостной температурой $24000+1000$ К вплоть до границы пропускания воздуха 186 нм [8, 9]. На расстоянии 5 см от конца стеклянной трубки 4 ставилась тонкая черная копировальная бумага 6, чтобы отсечь начало кумуляции, где



Ф и г. 4



Ф и г. 5

ударная волна нестабильна. На конце трубки устанавливалась стальная диафрагма 9, позволявшая отсечь отражения света от стенок трубки. Излучение продуктов взрыва отсекал непрозрачный экран 11. Односекционный пироприемник 10, работающий в режиме измерения мощности, устанавливался по оси трубки (1 — детонатор, 2 — взрывная линза, 7 — зеркало). На фиг. 5,а представлена осциллограмма записи сигнала от пироприемника в этом опыте. Резкое возрастание сигнала в конце записи связано с выходом ударной волны через диафрагму и ее расширением. Мощность потока излучения, падающего на пироприемник через диафрагму, выражается зависимостью

$$\Phi = \Phi_+ r^2 / (r^2 + b^2),$$

где Φ_+ — мощность потока излучения с фронта ударной волны; r — радиус диафрагмы; b — расстояние от диафрагмы до пироприемника.

В этом опыте измерена мощность потока излучения с фронта ударной волны $0,82 \cdot 10^6$ Вт/см² ± 12%, что соответствует яркостной температуре 23700 ± 1200 К. Это хорошо согласуется со спектральными измерениями [8].

Работа пироприемника в области вакуумного ультрафиолета проверялась при измерении излучения с фронта ударной волны в аргоне, который пропускает излучение вплоть до 79,8 нм. Ударная волна генерировалась при выходе плоской детонационной волны на торец заряда 3 из прессованного гексогена и распространялась в стеклянной трубке 4 диаметром 30 мм (см. фиг. 4, б). Двухсекционный пироприемник помещался в медную трубку 8, на внутренней поверхности которой нарезана резьба, вся трубка оксидирована в черный цвет для того, чтобы исключить отражение от стенок. Поле зрения пироприемника ограничивала стальная диафрагма. Во время опыта обе трубки продувались аргоном марки «чистый». Одна секция пироприемника работала в режиме измерения потока мощности излучения (фиг. 5, б вверху), другая — в режиме измерения потока энергии (фиг. 5, б внизу). Одновременно с измерением пироприемником проводились измерения скорости движения и яркостной температуры ударной волны в синей области спектра (светофильтр 430 нм с полушириной 20 нм) с помощью щелевого фоторегистратора СФР-2М, который калибровался эталонным источником ЭВ-45. Скорость ударной волны в этом опыте была постоянной в течение первых 6 мкс и равной $8,8$ км/с ± 5%, а яркостная температура 24200 ± 1200 К. Измеренный пироприемником поток мощности излучения с фронта ударной волны равнялся $1,59 \cdot 10^6$ Вт/см² ± 12%, что соответствует яркостной температуре 23400 ± 700 К.

Таким образом, измерения яркостной температуры в синей области спектра и во всем спектральном диапазоне излучения ударной волны хорошо согласуются между собой и соответствуют ударной адиабате аргона. Надо отметить, что при температуре 24000 К примерно половина энергии излучения лежит в вакуумном ультрафиолете. Время нарастания сигнала пироприемника обусловлено нарастанием «пробки» ударно-сжатого газа. Высокая точность измерения яркостной температуры в аргоне (3%) с помощью пироприемника обусловлена зависимостью потока мощности с фронта ударной волны в спектральном диапазоне измерений $\Phi_+ \sim T^4$.

Разработанные пироприемники могут использоваться для регистрации и других процессов, связанных с излучением в широком спектральном диапазоне.

Авторы выражают благодарность Б. Д. Христофорову за полезную дискуссию.

Поступила 18 VI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловые приемники излучения. Труды 1-го Всесоюзного симпозиума. Киев, «Наукова думка», 1967.
2. Кременчугский Л. С. Сегнетоэлектрические приемники излучения. Киев, «Наукова думка», 1971.
3. Кременчугский Л. С. Исследование пироэлектрического приемника.— «Оптико-мех. промышленность», 1966, № 10.
4. Glass A. M. Ferroelectric $Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$ as a fast and sensitive detector of infrared radiation.— «Appl. Phys. Letters», 1968, vol. 13, N 4.
5. Harris L., Beasley J. K. The infrared properties of gold smoke deposits.— «JOSA», 1952, vol. 42, p. 134.
6. Кременчугский Л. С., Лысенко В. С., Мальнев А. Ф., Ройцина О. В. Определение толщины теплоемкости и теплопроводности тонких пленок малых размеров.— «Инж.-физ. журн.», 1964, т. 7, № 2.
7. Johnston R. G., Madden R. P. On the use of the thermopiles for absolute radiometry in the far ultraviolet.— «Appl. Optics», 1965, vol. 12, N 4.
8. Попов Е. Г., Цикулин М. А. Высокотемпературный излучатель взрывного типа для целей фотометрии.— ПМТФ, 1970, № 5.
9. Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в инертных газах и воздухе. Дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. М., МФТИ, 1969.

УДК 533.6.011.8

РАССЕЯНИЕ АТОМОВ АРГОНА С ЭНЕРГИЕЙ 0,15—1,8 ЭВ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ГЕРМАНИЯ

А. В. Колосов, С. Г. Миронов
(Новосибирск)

Взаимодействие нейтральных атомов и молекул с твердыми поверхностями при энергиях от тепловой до нескольких электронвольт изучено очень мало, что неоднократно отмечалось в литературе [1].

В работах [2—4], охватывающих указанный диапазон энергий, изучались только угловые распределения интенсивности рассеянных атомов без измерения скоростей. В [5] приведены результаты измерения ско-