ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.083

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ И ПОЛНОГО ВЫХОДА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ

©2027 г. Г. С. Волков[a],[b],*, Г. Л. Комаров[a], А. А. Рупасов[c]

[a] *Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ)*

Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушковых, 12

[b] *МИРЭА–Российский технологический университет*

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78

[c] *Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук*

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп. 53

**E-mail: gsvolkov@triniti.ru*

Поступила в редакцию 04.09. 2026
После доработки 12.10.2026
Принята к публикации 05.11.2026

Исследованы чувствительности и временное разрешение пироэлектрических детекторов на основе $TiBaO^3$ с различными геометриями приемных элементов. На оптическом излучении лампы-вспышки проведены абсолютные калибровки чувствительности детекторов при энергии за импульс на единицу площади 17 мДж/см^2. В качестве опорного детектора использовался образцовый калориметр ИКТ-1Н. Форма сигнала от пироэлектрического детектора сравнивалась с формой импульса оптического излучения быстрого фотодиода ФД–226, включенного по схеме с обратным смещением. В режиме измерения мощности излучения чувствительность калибруемых детекторов составила от 10^{-10}до 10^{-9} А·см^2/Вт, что позволяет проводить измерения плотности потока излучения до 10^7 Вт/см^2 при нагрузке детектора на волновое сопротивление кабеля 50 Ом с наносекундным временным разрешением. В режиме измерения энергии излучения с применением зарядочувствительного усилителя с емкостью обратной связи 6 пФ получена чувствительность детектора пирамидальной формы, равная 19 В·см^2/Дж. Для измерений выходного рентгеновского излучения источников в условиях высокого уровня электромагнитных наводок разработана схема дифференциального зарядочувствительного усилителя с емкостями обратной связи 6 пФ.

Ключевые слова: пироэлектрик, рентгеновское излучение, сильноточные Z -пинчи, калибровка чувствительности, временное разрешение

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение потоков мягкого рентгеновского излучения импульсных *Z*-пинчей высокотемпературных плазменных источников мощностью свыше 1–10 ТВт имеет большое значение для решения задач непрямого облучения термоядерных мишеней в лабораторных условиях. Плотность потока энергии на расстоянии 3 м от источника излучения в этом случае

составляет величину свыше 10^6–10^7 Вт/см^2, а выделяемая энергия на единицу площади поверхности детектора за время импульса излучения длительностью около 10 нс составляет 0.01–0.1 Дж/см^2 [1].

Детекторы для измерения абсолютной мощности излучения таких импульсных потоков должны обладать ровной спектральной чувствительностью в диапазоне энергий квантов от 10 эВ до 1–3 кэВ. Требуемое временное разрешение для детектора при измерении мощности излучения составляет 1–2 нс. Измерение полного выходного излучения, как правило, не требует столь высокого временного разрешения. Для измерения энергии излучения сильноточных Z–пинчей отдельно от энергии, переносимой разлетающейся плазмой источника излучения, в зависимости от условий эксперимента достаточно иметь временное разрешение 1–5 мкс [1]. В настоящее время в качестве детекторов мощности мягкого рентгеновского излучения используются полупроводниковые кремниевый *p*–*i*–*n*-детекторы с тонким “мертвым” поверхностным слоем, имеющие ровную спектральную чувствительность, фольговые резистивные болометры и вакуумные рентгеновские диоды с соответствующей спектральной чувствительностью. Для полупроводниковых детекторов основная проблема измерений заключается в обеспечении линейного режима регистрации из-за их слишком высокой чувствительности. В резистивных болометрах измеряемый сигнал, как правило, составляет малую часть базового напряжения на фольге болометра при пропускании по нему греющего импульса тока [2]. Вакуумные рентгеновские диоды обладают высоким временным разрешением, но имеют сложную спектральную чувствительность. Для измерения полного выходного излучения используются термопарные калориметры с временным разрешением примерно 50 мс и фольговые радиационные калориметры с временным разрешением около 1 мкс [1].

Использование пироэлектрических детекторов рентгеновского излучения имеет ряд положительных моментов. Во-первых, это ровная спектральная чувствительность в диапазоне энергий квантов от 10 эВ до 10 кэВ. Во-вторых, возможны измерения с высоким временным разрешением (порядка 1–2 нс) в режиме регистрации тока с детектора на низкоомную нагрузку. Если детектор нагружен на входное сопротивление усилителя, то усилитель должен обеспечивать полосу регистрации около 200 МГц. Длительность импульса регистратора с пироэлектриком в этом случае будет равна 1.5–2 нс, что существенно меньше длительности импульса излучения. В-третьих, эти детекторы имеют хорошую чувствительность, что существенно при измерении мощных потоков излучения.

Пироэлектрики с зарядочувствительным усилителем (интегральные измерения с временным разрешением порядка 0.5–1 мкс) позволяют измерять энергию излучения отдельно

от энергии, переносимой плазменными потоками распадающегося пинча при условии, что детектор располагается достаточно далеко от источника излучения (более 2 м).

В токовом режиме при измерении мощности излучения (направление облучения вдоль поляризации) получаем

$$J = A\,(dP_s/dT)\,dT/dt = (dP_s/dT)\,W/lc_p\rho = \Upsilon W,$$

где W – мощность излучения, попадающего на кристалл пироэлектрика, A – площадь детектора, l – толщина кристалла, c_p – удельная теплоемкость материала пироэлектрика, P_s – поверхностная плотность поляризационного заряда (σ'), ρ – плотность материала пироэлектрика, $\Upsilon = dP_s/dT/lc_p\rho$.

По литературным данным [3], например, для кристалла $LiTaO_3$ имеем ρ = 7.45 г/см^3, c_p= 0.46 Дж/(г· К), dP_s/dT = (1.6 ± 0.2) 10^{-8} Кл/см^2·К. В работе [3] для пироэлектрика из кристалла $LiTaO_3$ диаметром 1 см (площадь 0.8 см^2) и толщиной 500 мкм по результатам калибровки на излучении плазмы стелларатора ($h\nu$ ~ 30–60 эВ) и на излучении синхротрона ($h\nu$ ~ 100–600 эВ) при работе детектора в токовом режиме получены следующие значения чувствительности: S = (7.5 ± 1.5)·10^{-8} А/Вт, dP_s/dT =(1.3 ± 0.3) 10^{-8} Кл/см^2. В работе [4] определялась чувствительность пироэлектрических детекторов из ниобата лития в токовом режиме и в режиме регистрации энергии излучения при облучении со стороны электродов. В токовом режиме получена чувствительность детектора S ~ (1–2)·10^{-2} В·см^2/Вт, а при измерении энергии излучения – около (100–200) В·см^2/Дж для площади детектора 0.8 см^2. В режиме регистрации мощности излучения (направление излучения параллельно вектору поляризации) ток детектора преобразовывался в напряжение высокочувствительным усилителем тока с коэффициентом преобразования, равным 10^9 В/А и входным сопротивлением 30 кОм. Минимальная измеряемая мощность составила 10^{-4} Вт. Временное разрешение порядка 300 мкс определялось полосой пропускания усилителя (порядка 3 кГц).

Отметим, что коммерческие пироэлектрические детекторы для измерения коротких лазерных импульсов имеют временное разрешение менее 0.5 нс [5, 6]. Высокое временное разрешение детекторов реализуется в диапазоне от длин волн рентгеновского излучения до субмиллиметровых.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

В работе измерялись чувствительность и временное разрешение пироэлектрических детекторов на основе $TiBaO_3$ с различными геометриями приемных элементов (плоские пластины 18×10 мм^2, четырехгранная пирамидка с эффективной площадью детектора 6×6 мм^2). Направление облучения было перпендикулярно направлению поляризации

пироэлектрика (плоская пластина толщиной 1 мм) или составляло с ним угол 7–8° (геометрия пирамидки из пластинок толщиной 0.5 мм).

Калибровка абсолютной чувствительности детекторов проводилась на оптическом излучении от лампы-вспышки с использованием в качестве опорного измерителя образцового термопарного калориметра ИКТ-1Н. Диаметр чувствительной области образцового калориметра D_1 =18 мм (площадь A = 2.54 см^2) Погрешность измерения абсолютных потоков излучения образцовым калориметром составляет ±10%.

Лампа-вспышка запитывалась от конденсаторной батареи емкостью 270 мкФ, заряжаемой до напряжения 250 В. В качестве монитора использовался сигнал с фотодиода ФД-226, включенного по схеме с обратным смещением. Временное разрешение фотодиода в схеме с обратным смещением проверялось на импульсном излучении лазерного фотодиода ADL 63055 TL при подаче на него напряжения длительностью 10 нс с амплитудой –10В, оно составило величину не более 5 нс. Проверка линейности выходного сигнала пироэлектрика проводилась за счет изменения расстояния от лампы-вспышки до детектора.

При калибровке пироэлектрика в режиме регистрации мощности излучения нагрузкой было входное сопротивление канала цифрового осциллографа (1 МОм) или сопротивление 100 кОм. При этом сигнал на вход осциллографа подавался коротким кабелем РК-50 (длиной 0.5 м). В случае использования усилителя с большим входным и малым выходным сопротивлениями сигнал от выхода усилителя подавался на осциллограф по кабелю с волновым сопротивлением 50 Ом на согласованную нагрузку. Абсолютная калибровка пироэлектрика, работающего в режиме регистрации мощности излучения, проводилась по интегрированию выходного сигнала за время излучения лампы-вспышки. Калибровка проводилась также в режиме измерения энергии излучения с измерением напряжения на выходе зарядочувствительного усилителя.

Для используемого пироэлектрика из титаната бария $BaTiO_3$ основные характеристики следующие: ρ = 6 г/см^3, c_p = 500–600 Дж/кг·К, k=3 Вт/м·К, спонтанная поляризация составляет примерно 30 мкКл/см^2. Отметим, что слой пироэлектрика титаната бария $BaTiO_3$ толщиной 0.5 мкм поглощает более 50% рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов, который соответствует спектру излучения плазмы высокотемпературных сильноточных Z-пинчей (100–1000 эВ). С учетом температуры Кюри t_C =120–130 °С допустимое энерговыделение на единицу площади за время импульса не должно превышать величину уровня 0.01–0.02 Дж/см^2. За характерное время выделения энергии рентгеновского излучения на пироэлектрике $\boldsymbol{\tau} \sim$ 5–10 нс при коэффициенте температуропроводности $\chi = k/(\rho c_p) = 10^{-6}$м^2/с тепловая волна распространяется в нем на расстояние $\Delta\sim$ 0.1 мкм, что не позволяет снять тепловую нагрузку с поверхностного слоя.

3. КАЛИБРОВКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМОПАРНОГО КАЛОРИМЕТРА

В экспериментах по измерению мощных потоков мягкого рентгеновского излучения необходимо контролировать энергию излучения на единицу площади пироэлектрического детектора для того, чтобы не превышать величину порядка 20 мДж/см^2. С этой целью был откалиброван термопарный калориметр типа ВЧ [7], который предполагается размещать в паре с пироэлектрическим детектором. Диаметр чувствительного элемента калориметра был d =10 мм (площадь A = 0.785 см^2) [7]. Сигнал калориметра подавался на усилитель с резистивной отрицательной обратной связью с коэффициентом усиления K = 50 и далее по кабелю передавался на согласованный вход осциллографа сопротивлением 50 Ом.

В начале измерений на шкале 0.5 Дж была проведена самокалибровка образцового калориметра ИКТ-1Н. По образцовому калориметру без коллимации была определена энергия излучения на единицу площади на расстоянии 11.6 см от лампы-вспышки. Среднее значение энергии излучения по пяти измерениям составило 43.2 мДж на A = 2.54 см^2 при измерении на шкале 0.05 Дж, что соответствует энергии на единицу площади на расстоянии 11.6 см, равной 17.0 мДж/см^2.

При калибровке калориметра расстояние от чувствительного элемента калориметра до лампы-вспышки было L= 11.6 см, как при измерениях потоков энергии образцовым калориметром. Сигнал от калориметра при этих условиях составил 20 мВ, что соответствует его чувствительности, составляющей 1.18 мВ см^2/мДж (1.5 мВ/мДж). На рис. 1 приведены типичные осциллограммы сигнала термопарного калориметра и сигнал с фотодиода. Сигнал фотодиода на данной развертке (50 мс/дел) не разрешается.

Рис. 1. Сигналы от термопарного калориметра и фотодиода ФД-226 с обратным смещением

4. КАЛИБРОВКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ В РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

4.1. Калибровка чувствительности пироэлектрика в форме плоской пластины ($BaTiO_3$) площадью 18×10 мм^2

Калибровался детектор – плоский пироэлектрик с площадью облучаемой области 18×10 мм^2 (рис. 2). Детектор получен разрезом пластины размерами 40×20 мм^2 на две размерами 18×10 мм^2. Расстояние от лампы-вспышки до пироэлектрика составляло 11.6 см. Выходные торцы пироэлектрика зажаты в струбцины с контактами через медную тонкую фольгу по всей длине торцов.

Рис. 2. Пироэлектричекая пластина:

Если сигнал от детектора $U(t)$[В], его чувствительность $S_{\text{дет}}$ [В·см^2/Вт], а плотность потока мощности в месте расположения детектора I [Вт/см^2], то $S_{\text{дет}}I = U$ [В]. Если

проинтегрировать по времени импульса излучения, то получим $S_{дет} = (\int_0^\tau U\,dt)/E$, где $E = \int_0^\tau I\,dt$ – энергия, выделяемая на единицу площади в месте расположения детектора за время импульса излучения.

Полярность сигнала определяется ориентацией пластины при ее зажиме в струбцины. Нагрузка пироэлектрика – входное сопротивление осциллографа (1 МОм). От детектора на осциллограф сигнал подавался отрезком кабеля РК-50 длиной порядка 50 см. Выходной сигнал от пироэлектрика составил 30 мВ (рис. 3). Поскольку на расстоянии 11.6 см мы имеем экспозицию 17 мДж/см^2, при сигнале уровня 30 мВ чувствительность будет порядка $S = 0.7\cdot10^{-3}$ В·см^2/Вт или $S_{дет} \sim 0.7\cdot10^{-9}$ (А·см^2/Вт). Фронт нарастания сигнала порядка 100 мкс, что определяется величиной RC-схемы регистрации.

Рис. 3. Сигналы от фотодиода Ф-226 с обратным смещением и с пироэлектрика, работающего на сопротивлении нагрузки 1 МОм.

При измерениях в тех же условиях, но при эффективной нагрузке 90 кОм (100 кОм параллельно входу осциллографа, имеющего сопротивление около 1 МОм), выходной сигнал пироэлектрика уменьшается приблизительно в 10 раз – до уровня 3–4 мВ (рис. 4). Полярность сигнала определяется ориентацией пластины при ее зажиме в струбцины. Для сигнала величиной 3.5 мВ чувствительность будет порядка S=$0.7\cdot10^{-4}$ В·см^2/Вт или $S_{дет} \sim 0.7\cdot10^{-9}$ (А·см^2/Вт). Таким образом, видно, что пироэлектрик работает как генератор тока. Отметим, что фронт сигнала более крутой, чем регистрируемый при нагрузке 1 МОм. Более крутой фронт нарастания сигнала при эквивалентной нагрузке 90 кОм связан с уменьшением времени RC-схемы регистрации. Величина RC-схемы регистрации с учетом емкости отрезка кабеля РК-50 длиной 0.5 м (25 пФ), входной емкости осциллографа (20 пФ) и емкости датчика (20 пФ) составит порядка 6–7 мкс.

Рис. 4. Сигналы от фотодиода ФД-226 с обратным смещением

Если мы учтем чувствительность детектора по току $S_{дет} \sim 0.7\cdot10^{-9}$ А·см^2/Вт, то расчетное значение чувствительности на согласованный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом составит $S = 0.35\cdot10^{-7}$ В·см^2/Вт. При плотности потока излучения в месте расположения детектора в экспериментах с сильноточными Z-пинчами в диапазоне 10^6–10^7 Вт/см^2 ожидаемый уровень сигнала составит 0.3–0.4 В при временном разрешении порядка 2.5 нс.

4.2. *Калибровка пироэлектрического детектора пирамидальной формы*

Калибровался детектор, собранный из четырех одинаковых пластин треугольной формы в конструкцию типа пирамидки с толщиной пластинок 0.5 мм из $BaTiO_3$. Внутренний угол пирамидки между противоположными гранями составлял 15°. Эффективная толщина поглощающего элемента при падении излучения под углом 7.5° к плоскости пироэлектрика

составляет 4 мм (рис. 5). Отметим, что такая геометрия детектора позволяет уменьшить влияние фотоэффекта на измерения. Расстояние от лампы-вспышки до входа в пирамидку пироэлектрика составляло 11.6 см. Размер чувствительной области пироэлектрика равен 6×6 мм^2 (вход во внутреннюю часть пирамиды).

Рис. 5. Геометрия детектора пирамидальной формы

С выхода детектора сигнал подается на вход осциллографа отрезком кабеля РК-50 длиной 50 см (входное сопротивление осциллографа 1 МОм). Зарегистрирован сигнал величиной 5 мВ (рис. 6). Сигнал фотодиода снимается с сопротивления 100 Ом.

Рис. 6. Сигналы от пироэлектрика и фотодиода ФД-226 с обратным смещением

Передний фронт сигнала от пироэлектрика не такой крутой, как от фотодиода, он определяется величиной RC-схемы регистрации: $S_{\text{дет}} = 0.15 \cdot 10^{-3}$ В·см^2/Вт или $S_{\text{дет}} = 0.15 \cdot 10^{-9}$ А·см^2/В. В тех же условиях измерений, когда сигнал снимается на сопротивлении нагрузки 100 кОм, подсоединенной параллельно входу осциллографа (1 МОм), его уровень составляет около 1 мВ (рис. 7). Сигнал уменьшился приблизительно в 10 раз, как и сопротивление нагрузки. Видно, что пироэлектрик работает на высокоомной нагрузке как генератор тока. Чувствительность детектора составила порядка $S_{\text{дет}} = 0.25 \cdot 10^{-4}$ В·см^2/Вт. Чувствительность по току с пироэлектрика составляет $S_{\text{дет}} \sim 0.2 \cdot 10^{-9}$ А·см^2/Вт. Хотя уровень сигнала небольшой, видно, что передний фронт по длительности такой же, как у сигнала от фотодиода. Величина RC-схемы регистрации с учетом емкости отрезка кабеля РК-50 длиной 0.5 м (25 пФ), входной емкости осциллографа (20 пФ) и емкости датчика (20–30 пФ) составляет 6–7 мкс.

Рис. 7. Сигналы от фотодиода ФД-226 и от пироэлектрика на сопротивлении нагрузки 90 кОм.

Результаты по чувствительности калибруемых детекторов, приведенные в данном разделе, отражены в сводной табл. 1.

Таблица 1. Результаты калибровки детекторов в режиме измерения мощности излучения

Детектор	Сопротивление нагрузки, кОм	Чувствительность по напряжению, В·см^2/Вт	Чувствительность по току, А·см^2/Вт
Пирамидка	1000	$0.15 \cdot 10^{-3}$	$0.15 \cdot 10^{-9}$
Пирамидка	90	$0.25 \cdot 10^{-4}$	$\sim 0.2 \cdot 10^{-9}$
Пластина 18×10 мм^2	1 000	$0.7 \cdot 10^{-3}$	$0.7 \cdot 10^{-9}$
Пластина 18×10 мм^2	90	$0.7 \cdot 10^{-4}$	$0.7 \cdot 10^{-9}$

5. КАЛИБРОВКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРОВ В РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

5.1. Калибровка пироэлектрического детектора пирамидальной формы с зарядочувствительным усилителем

При калибровках расстояние от лампы-вспышки до чувствительного элемента пироэлектрика составляло 11.6 см. Детектор был использован с зарядочувствительным усилителем с емкостью отрицательной обратной связи C = 6 пФ. С выхода усилителя сигнал подавался на осциллограф на нагрузку 50 Ом. Размер чувствительной области детектора составлял приблизительно 6×6 мм^2 (вход во внутреннюю область пирамиды).

На рис. 8 приведены сигналы от детектора и фотодиода. Выходной сигнал от пироэлектрика получился на уровне 320–340 мВ. При экспозиции 17 мДж/см^2 и сигнале величиной 330 мВ чувствительность будет S = 0.019 В·см^2/мДж или S = 19 В·см^2/Дж. Такой же уровень сигнала (300–400 мВ) должен быть и при измерениях рентгеновского излучения. Отметим, что усилители с отрицательной обратной связью имеют повышенное входное и пониженное выходное сопротивления.

Рис. 8. Сигналы от пироэлектрика пирамидальной формы

5.2. Калибровка пироэлектрика в форме плоской пластины площадью 18×10 мм^2 с зарядочувствительным усилителем

Измерения проводились с зарядочувствительным усилителем с емкостью обратной связи C = 6 пФ и последующим усилением сигнал. Детектор – плоский пироэлектрик с площадью облучаемой области 14×10 мм^2. Как уже отмечалось, пироэлектрик получен разрезом пироэлектрика размером 20×40 мм^2 на два с размерами 18×10 мм^2. Расстояние от лампы-вспышки до пластины пироэлектрика 21 см. Выходной сигнал с пироэлектрика находится на уровне 800 мВ (рис. 9). Полярность сигнала определяется ориентацией пластины при ее зажиме в струбцины. У усилителя вход развязан с датчиком через разделительную емкость. Нагрузка на входе осциллографа составляет 50 Ом.

Рис. 9. Сигналы с выхода зарядочувствительного усилителя

На расстоянии 21 см имеем E= 5.2 мДж/см^2, что соответствует чувствительности датчика $S_д$ = 0.8/5.2= 0.154 В·см^2/мДж. Если выражать чувствительность в величине собранного заряда $Q = CU$ на 1 мДж/см^2 экспозиции в месте расположения детектора, то чувствительность будет $S_д = 0.92 \cdot 10^{-12}$ Кл·см^2/мДж.

5.3. Проверка работы дифференциального зарядочувствительного усилителя

Для проведения измерений с пироэлектрическими детекторами в условиях высокого уровня электромагнитных наводок был разработан дифференциальный зарядочувствительный

усилитель. Усилитель имел два входа, а на выходе регистрировался разностный сигнал с этих входов. Проверка работы усилителя проводилась с детектором пирамидальной формы. Расстояние от лампы-вспышки до чувствительного элемента пироэлектрика составляло 11.6 см. Размер чувствительной области детектора 6×6 мм^2 (вход во внутреннюю пирамиду). Напряжение зарядки конденсатора лампы-вспышки 250 В. Сигналы с выхода зарядочувствительного усилителя подавались на вход осциллографа кабелем РК-50 с нагрузкой 50 Ом. Сигнал от детектора подавался поочередно на входы дифференциального усилителя, а выходной сигнал регистрировался на осциллографе (рис. 10, 11).

Рис. 10. Сигналы с выхода дифференциального усилителя при

Рис. 11. Сигналы с выхода дифференциального усилителя при подключении

На рис. 12 приведен сигнал от детектора при подключении его через тройник на оба входа усилителя одновременно. Как видно, разностный сигнал не превышает нескольких мВ при вычитаемых сигналах с амплитудой свыше 1 В. В случае подключения ко входам дифференциального усилителя двух одинаковых детекторов, состоящих из пластин площадью 18×10 мм^2 при сигналах от детекторов величиной 700 мВ разностный сигнал составлял 25–30 мВ.

Рис. 12. Сигналы с выхода усилителя усилителя при подаче на входы одинаковых сигналов с пироэлектрика ...

5.4. Измерения пироэлектрическим детектором пирамидальной формы выходного излучения лампы-вспышки ИСК-10 с длительностью импульса 20 мкс

Измерялась интенсивность оптического излучения лампы-вспышки ИСК-10. Разрядная емкость 1 мкФ заряжалась до напряжения +1200 В. Длительность импульса излучения составила порядка 20 мкс. Измерения проводились при расстоянии 7 см от лампы до пироэлектрика. Использовалась схема измерений с заряд чувствительным усилителем с емкостью обратной связи C = 6 пФ. С выхода усилителя сигнал подавался на осциллограф на нагрузку 50 Ом**.**

Размер чувствительной области составлял приблизительно 6×6 мм^2 (вход во внутреннюю пирамиду). Фронт нарастания сигнала на выходе усилителя имел длину порядка 20 мкс. Сигнал имел правильную полярность и амплитуду чуть больше 4 мВ (рис. 13). Время нарастания сигнала соответствует длительности излучения лампы-вспышки. На этом уровне регистрации сигнала видна наводка от срабатывания лампы-вспышки. Исходя из чувствительности детектора, можно сказать, что энергия за время срабатывания лампы-вспышки в месте расположения детектора составляет порядка 0.2 мДж/см^2. Результаты по чувствительности калибруемых детекторов, приведенные в данном разделе, отражены в сводной табл. 2.

Таблица 2. Результаты калибровки детекторов в режиме измерения энергии излучения с зарядочувствительным усилителем (емкость обратной связи 6 пФ)

Детектор	Сопротивление нагрузки на выходе усилителя, Ом	Чувствительность по напряжению, В·см^2/мДж	Чувствительность по заряду, Кл·см^2/мДж
Пирамидка	50	0.019	$0.12\cdot10^{-12}$
Пластина 18×10 мм^2	50	0.154	$0.92\cdot10^{-12}$

Рис. 13. Сигналы от фотодиода с обратным смещением и пироэлектрика пирамидальной формы с

6. ВЫВОДЫ

В работе исследованы чувствительность и временное разрешение пироэлектрических детекторов на основе $TiBaO_3$ с различными геометриями приемных элементов (плоские пластины 18×10 мм^2 и четырехгранная пирамидка с эффективной площадью детектора 6×6 мм^2). Направление облучения было перпендикулярно направлению поляризации пироэлектрика (плоская пластина толщиной 1 мм) или составляло с ним угол 7–8° (геометрия пирамидки, состоящей из пластинок толщиной 0.5 мм). На оптическом излучении лампы-вспышки проведены абсолютные калибровки чувствительности детекторов при энергии за импульс на единицу площади 17 мДж/см^2. В качестве опорного детектора использовался образцовый калориметр ИКТ-1Н. Форма сигнала от пироэлектрического детектора сравнивалась с формой импульса оптического излучения быстрого фотодиода ФД-226, включенного по схеме с обратным смещением. В режиме измерения мощности излучения чувствительность калибруемых детекторов составила от 10^{-10} до 10^{-9}А·см^2/Вт, что позволяло проводить измерения плотности потока излучения до 10^7 Вт/см^2 при нагрузке детектора на волновое сопротивление кабеля 50 Ом с временным разрешением порядка 2.5 нс (RC-схемы). В режиме измерения энергии излучения с применением зарядочувствительного усилителя с емкостью обратной связи 6 пФ получена чувствительность детектора пирамидальной формы S_1=19 В·см^2/Дж. Ожидаемый уровень сигнала в режиме измерения энергии излучения при чувствительности детектора-пирамидки в схеме с зарядочувствительным усилителем величиной $S \sim 20$ В·см^2/Дж составил 0.2–2 В при выделении энергии за время измерений на поверхности детектора на уровне 0.01–0.1 Дж/см^2.

Для измерений выходного рентгеновского излучения источников в условиях высоких значений электромагнитных наводок разработана схема дифференциального зарядочувствительного усилителя с емкостями обратной связи 6 пФ. Предполагается использовать два одинаковых пироэлектрических детектора, из которых один детектор не поляризован или не подвергается облучению.

Для мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов 100–1000 эВ допустимое выделение энергии на пироэлектрике должно быть менее 0.02 Дж/см^2, с тем чтобы не превысить температуру Кюри (120–130 °C). В экспериментах по измерению импульсных потоков рентгеновского излучения выделение энергии на единицу площади пироэлектрика предполагается контролировать откалиброванным термопарным калориметром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В и др.* Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 2. С. 160. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21092722
2. *Jones M.C., Ampleford D.J., Cuneo M.E. et al.* Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 083501. https://doi.org/10.1063/1.4891316
3. *Андрюхина Э.Д., Дябилин К.С., Федянин О.И.* Препринт ФИАН № 217. М.: ФИАН, 1982. http://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2013/03/1982-217.djvu
4. *Вертипорох А.Н., Максимов Ю.С.* Диагностика плазмы (сб. статей). М.: Энергоиздат, 1981. № 4. С. 70.
5. *Roundy C.B.* Proceedings of SPIE. 1976. V. 0062. P. 191. https://doi.org/10.1117/12.954450
6. *Whatmore R. W., Ward S. J.* Appl. Phys. 2023. V. 133. P. 080902. https://doi.org/10.1063/5.014104
7. *Борисенко Л.А., Куценко А.В., Михайлов Ю.А. и др.* Препринт ФИАН №15. М.: РИИС ФИАН, 2014. https://preprints.lebedev.ru/wp-content/uploads/2014/10/15-2014.pdf

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Сигналы от термопарного калориметра и фотодиода ФД-226 с обратным смещением

Рис. 2. Пироэлектричекая пластина: d = 1 мм – толщина пластины , *1* – контакты для съема сигнала. Направление поляризации показано стрелкой. Амплитуда сигнала от фотодиода уменьшен в 10 раз

Рис. 3. Сигналы от фотодиода Ф-226 с обратным смещением и пироэлектрика, работающего на сопротивлении нагрузки 1 МОм. Амплитуда сигнала от пироэлектрика увеличен в 5 раз

Рис. 4. Сигналы от фотодиода ФД-226 с обратным смещением и пироэлектрика на сопротивлении нагрузки 90 кОм. Амплитуда сигнала от пироэлектрика увеличена в 20 раз

Рис. 5. Геометрия детектора пирамидальной формы. Угол между направлением поляризации и падающим излучением составляет примерно 7°. Стрелками показано направление поляризации пироэлектрика; *1, 2* – контакты для съема сигнала

Рис. 6. Сигналы от пироэлектрика и фотодиода ФД-226 с обратным смещением. Амплитуда сигнала от пироэлектрика увеличена в 5 раз

Рис. 7. Сигналы от фотодиода ФД-226 и пироэлектрика на сопротивлении нагрузки 90 кОм Амплитуда сигнала от пироэлектрика увеличена в 50 раз

Рис. 8. Сигналы от пироэлектрика пирамидальной формы и от фотодиода ФД-226

Рис. 9. Сигналы с выхода зарядочувствительного усилителя (детектор – плоский пироэлектрик размером 18×10 мм^2) и фотодиода ФД-226 с обратным смещением

Рис. 10. Сигналы с выхода дифференциального усилителя при подключении пироэлектрика ко входу *1* (рис. 5) и от фотодиода ФД-226 со смещением. Амплитуда сигнала от фотодиода увеличена в 5 раз

Рис. 11. Сигналы с выхода дифференциального усилителя при подключении пироэлектрика ко входу *2* (рис. 5) и от фотодиода ФД-226 со смещением. Амплитуда сигнала от пироэлектрика уменьшена в 2 раза

Рис. 12. Сигналы с выхода усилителя при подаче на входы одинаковых сигналов пироэлектрика при его подключении к усилителю через тройник и от фотодиода ФД-226 со смещением

Рис. 13. Сигналы от фотодиода с обратным смещением и пироэлектрика пирамидальной формы с выхода зарядочувствительного усилителя. Амплитуда сигнала от пироэлектрика увеличена в 100 раз

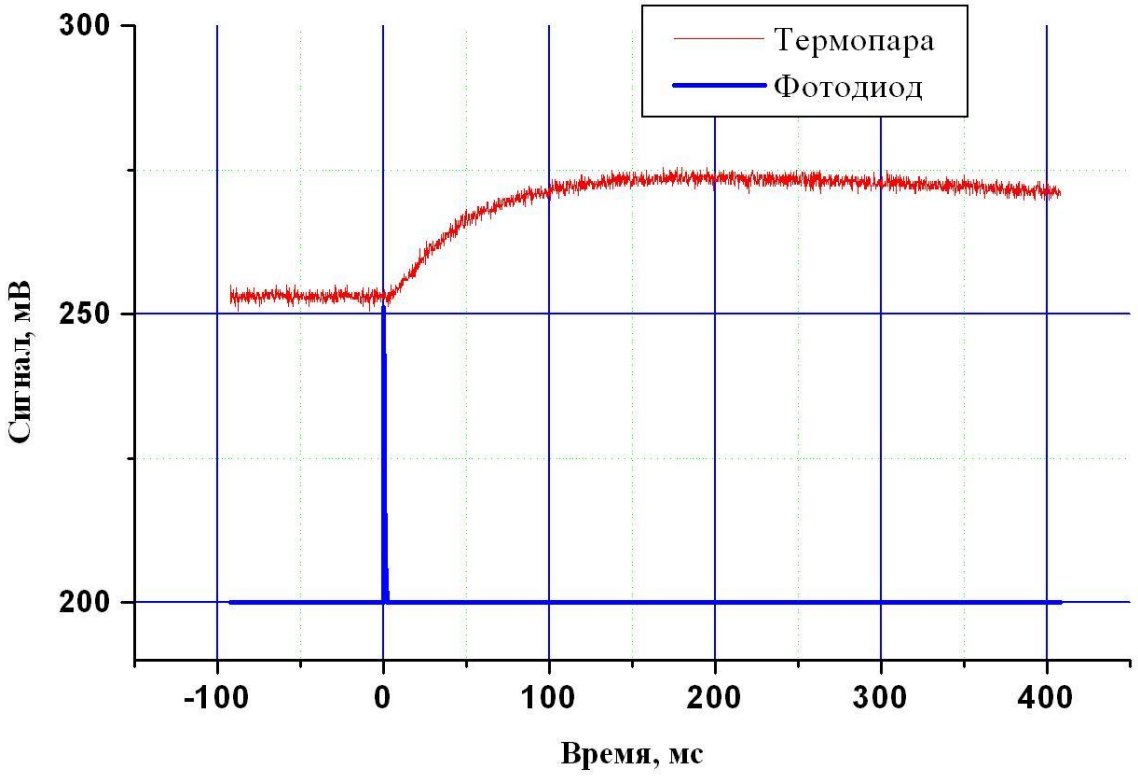

Термопара
Фотодиод
300
250
200
Сигнал, мВ
-100
0
100
200
300
400
Время, мс

Рис. 1.

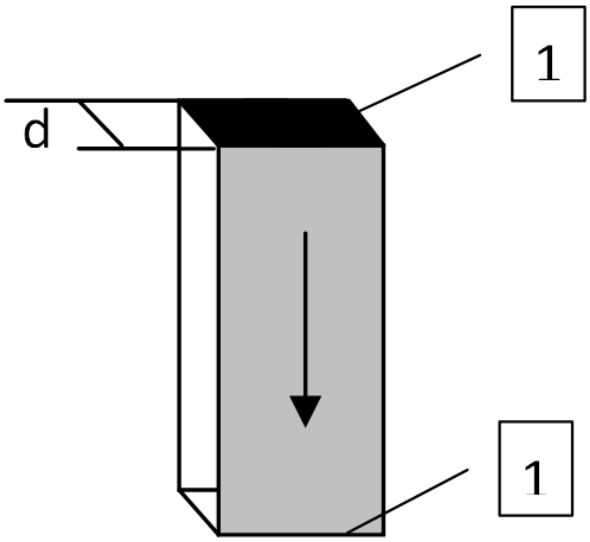


Рис. 2.

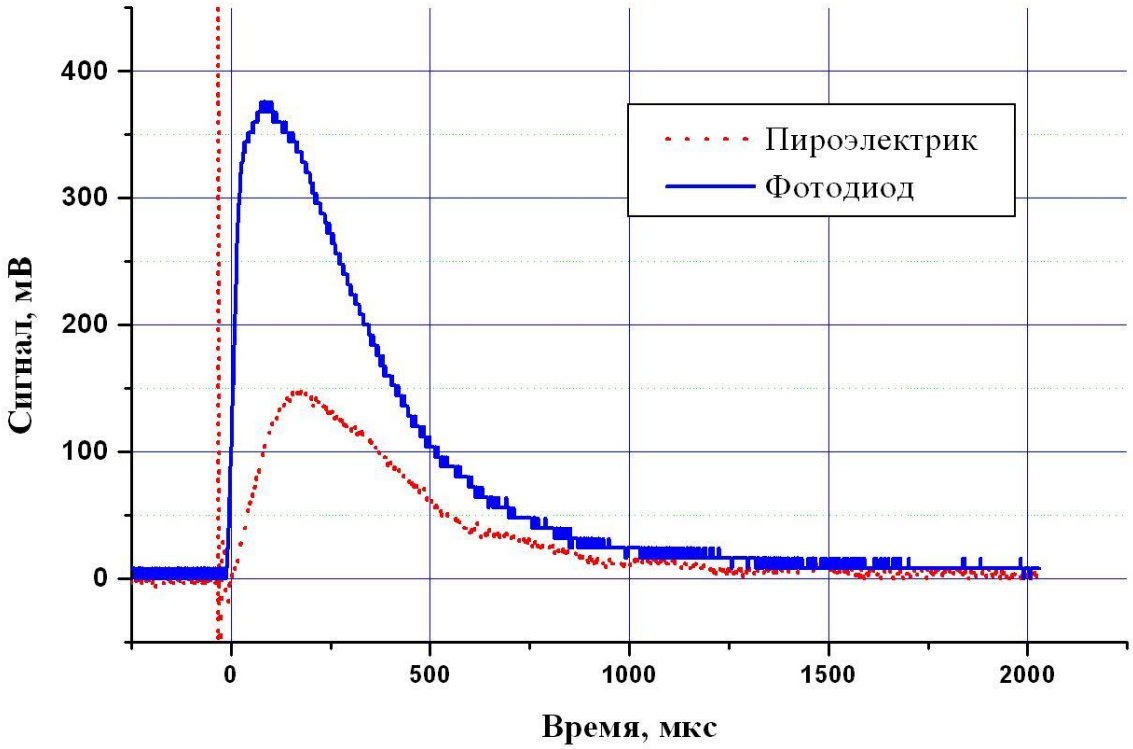

Пироэлектрик
Фотодиод
Сигнал, мВ
Время, мкс
400
300
200
100
0
0
500
1000
1500
2000

Рис. 3.

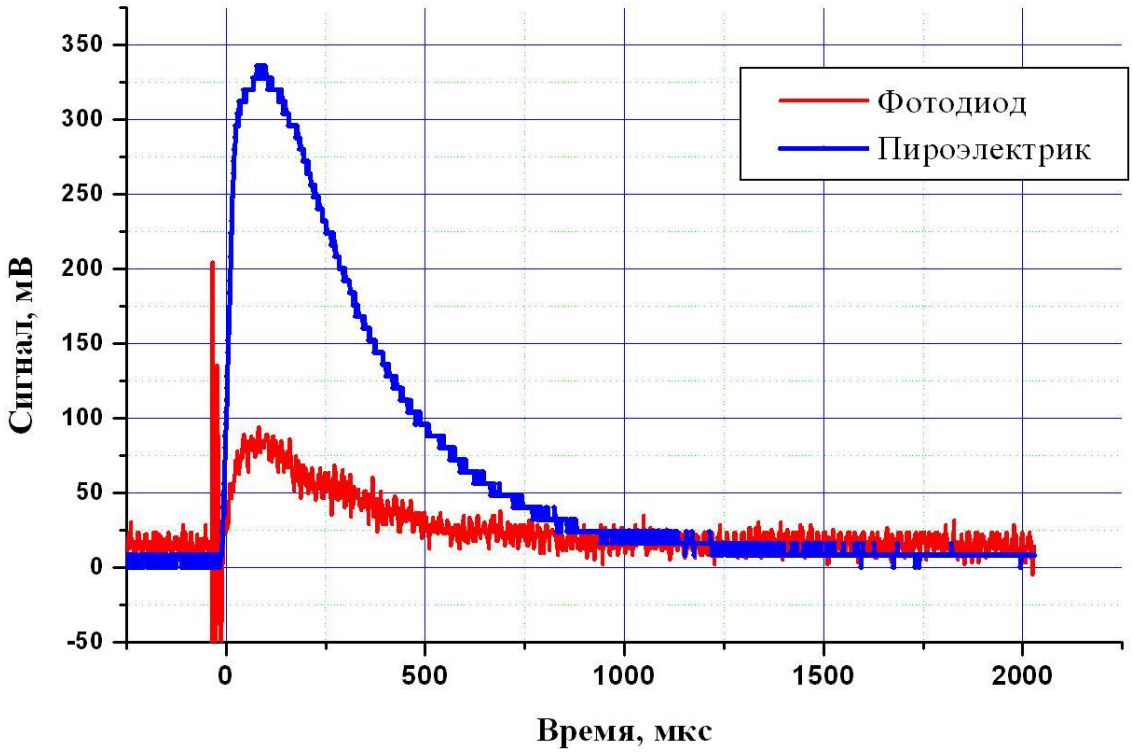

Фотодиод
Пироэлектрик
Сигнал, мВ
Время, мкс
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
0
500
1000
1500
2000

Рис. 4.

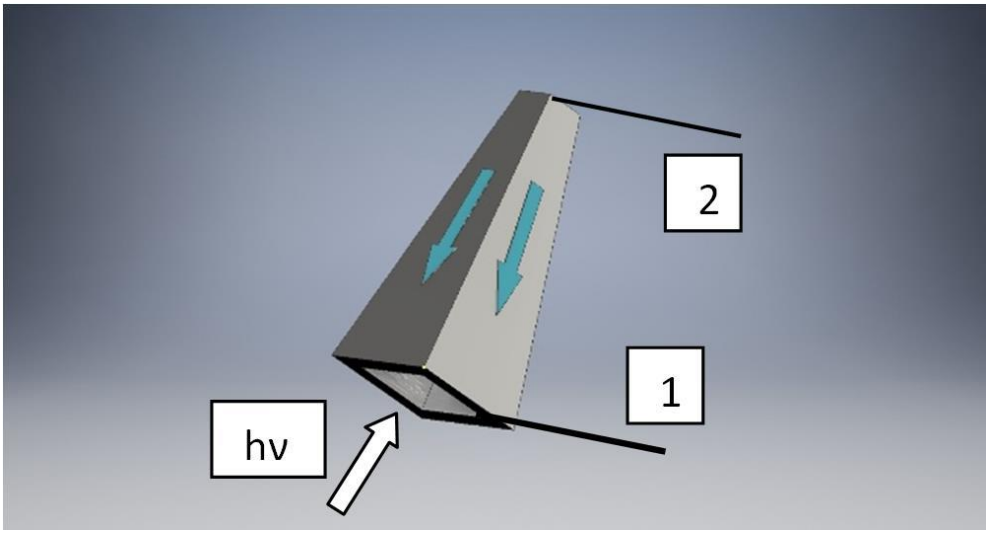


Рис. 5.

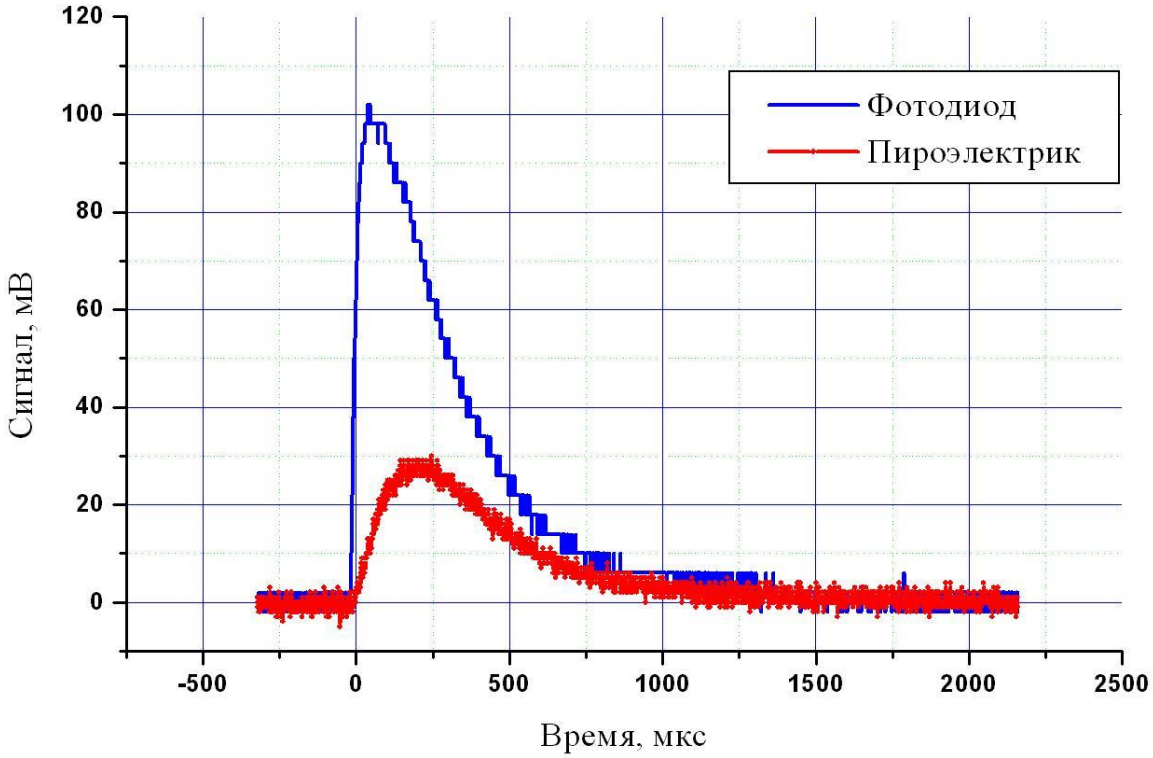

Фотодиод
Пироэлектрик
Сигнал, мВ
Время, мкс
120
100
80
60
40
20
0
-500
0
500
1000
1500
2000
2500

Рис. 6.

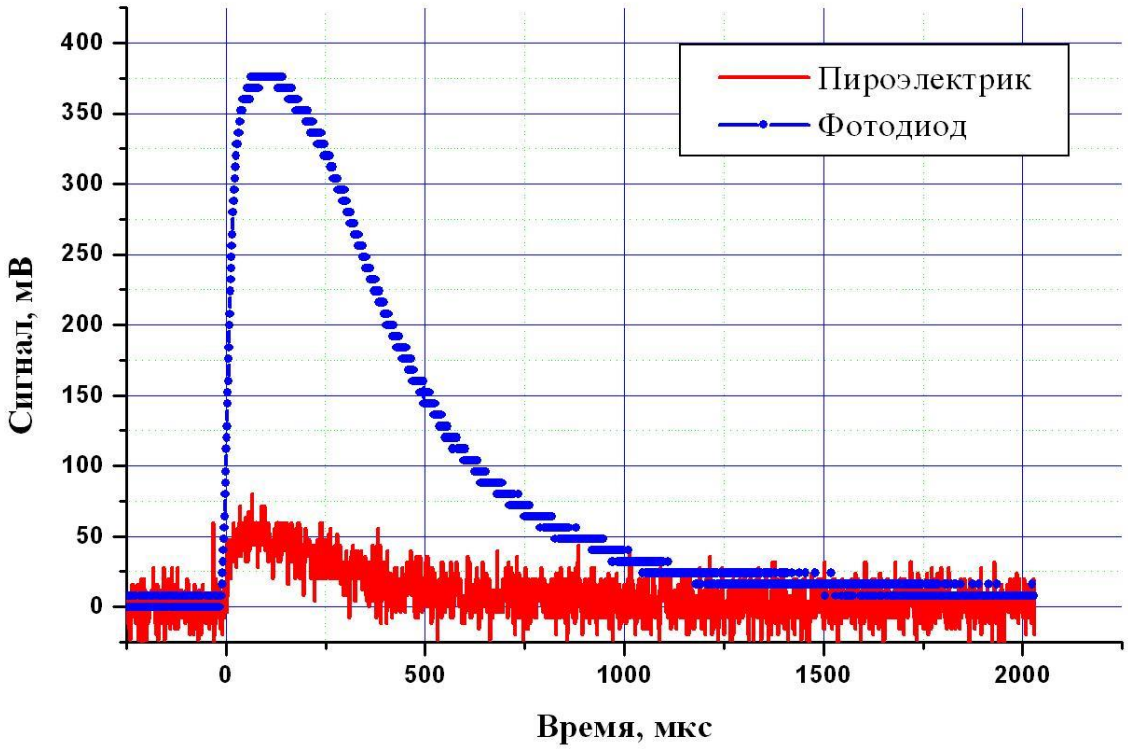

Пироэлектрик
Фотодиод
Сигнал, мВ
Время, мкс
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
500
1000
1500
2000

Рис. 7.

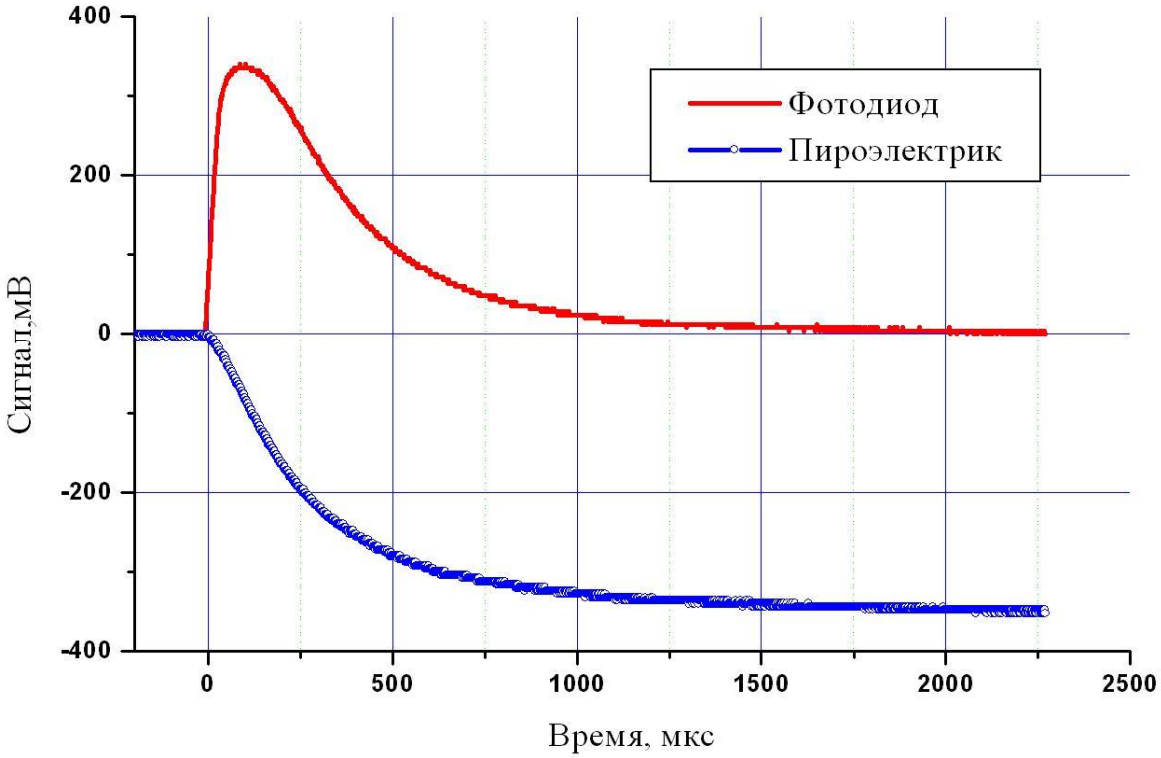

Фотодиод
Пироэлектрик
Сигнал,мВ
Время, мкс
400
200
0
-200
-400
0
500
1000
1500
2000
2500

Рис. 8.

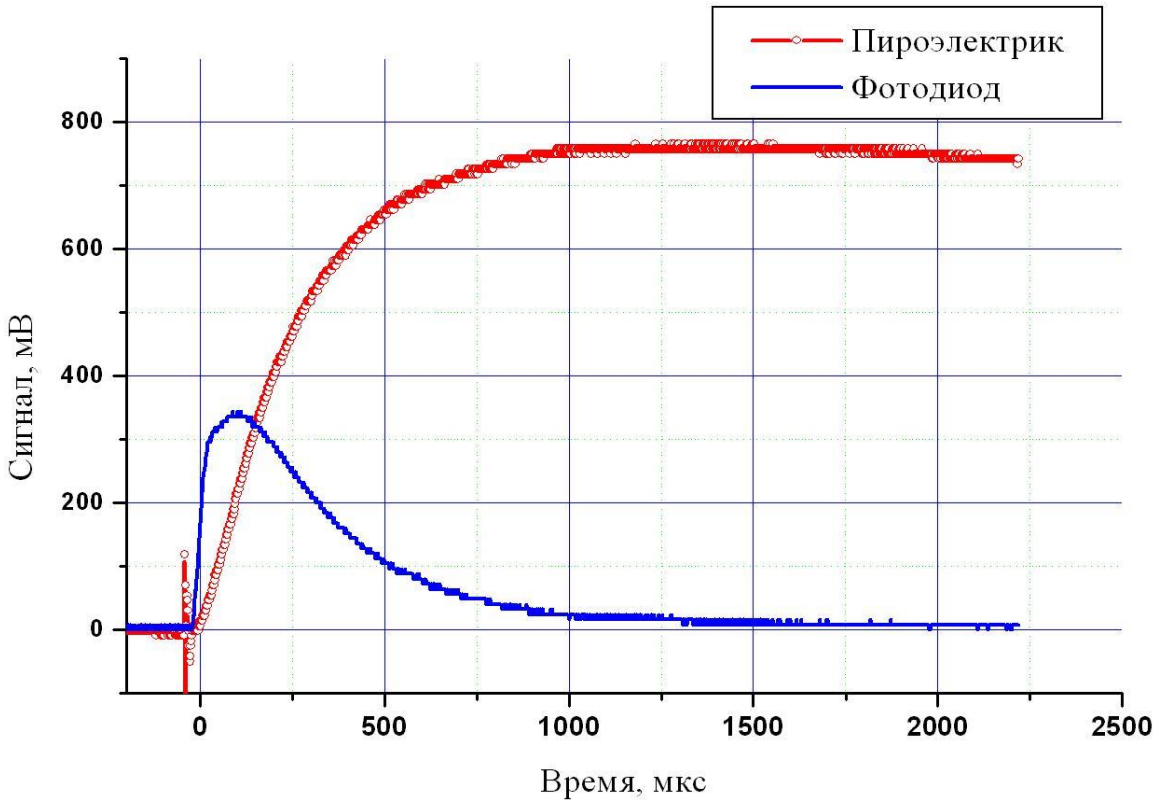

Пироэлектрик
Фотодиод
Сигнал, мВ
800
600
400
200
0
0
500
1000
1500
2000
2500
Время, мкс

Рис. 9.

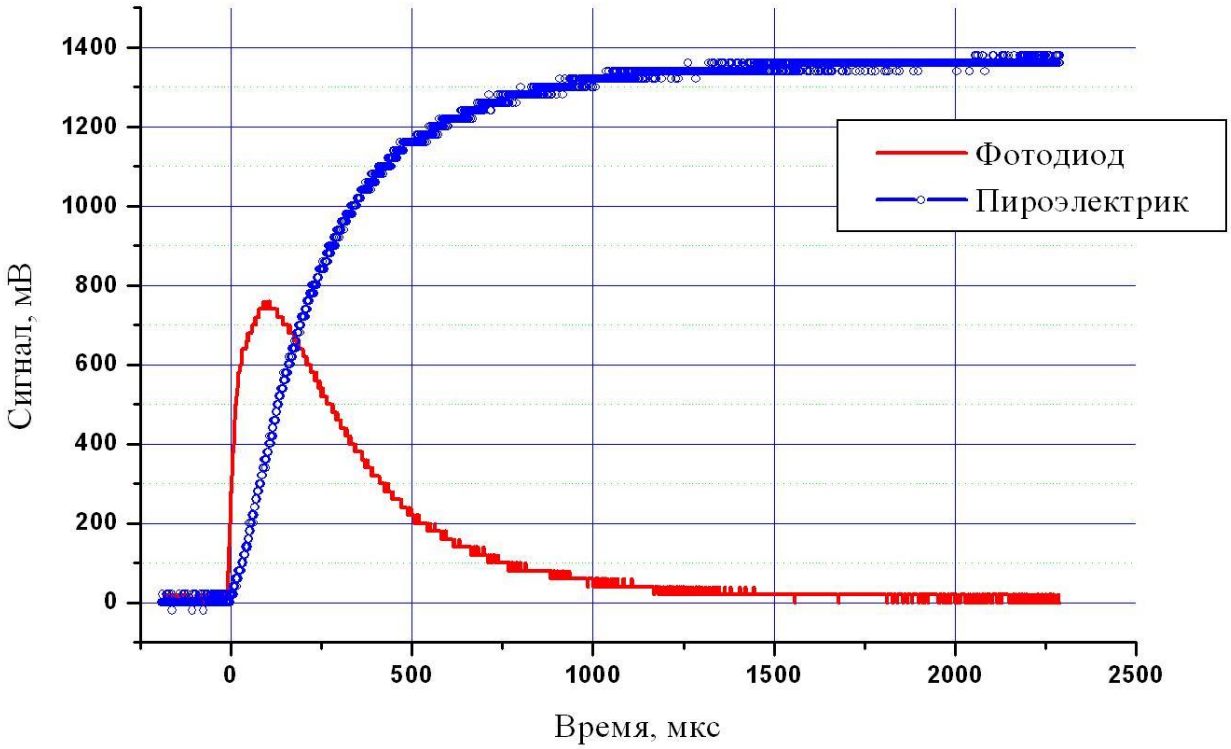

Сигнал, мВ
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
500
1000
1500
2000
2500
Время, мкс
Фотодиод
Пироэлектрик

Рис. 10.

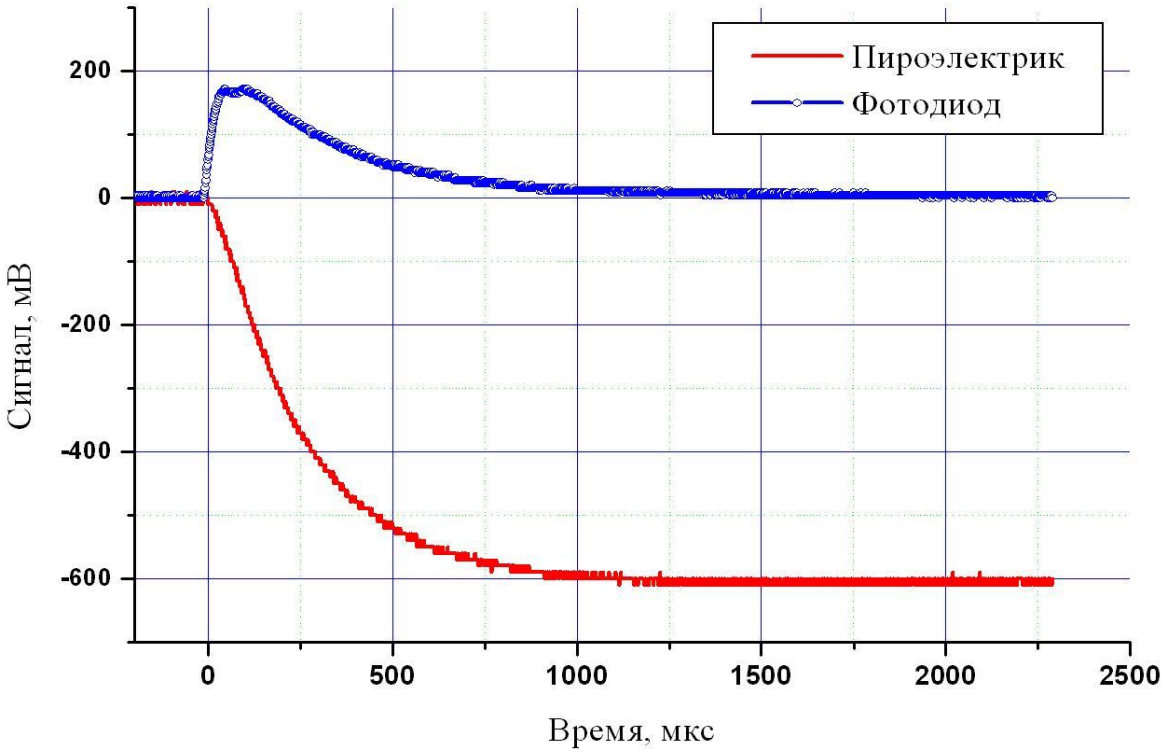

Пироэлектрик
Фотодиод
200
0
-200
-400
-600
Сигнал, мВ
0
500
1000
1500
2000
2500
Время, мкс

Рис. 11

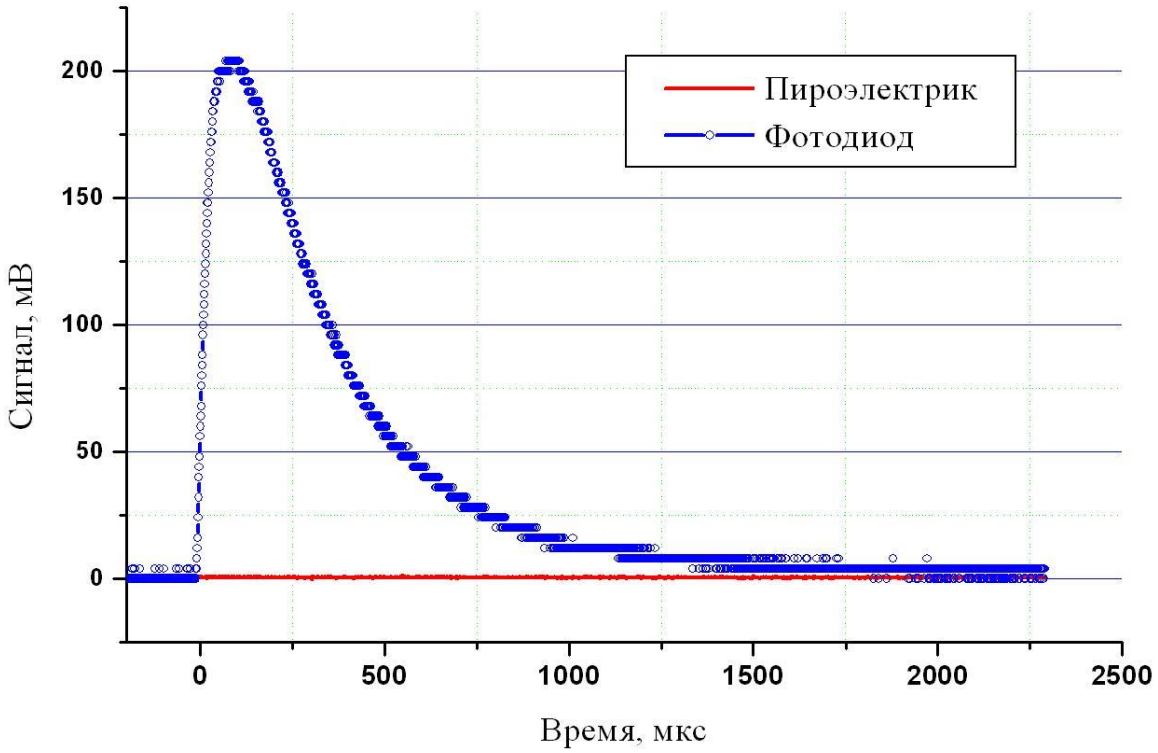

Пироэлектрик
Фотодиод
Сигнал, мВ
Время, мкс
200
150
100
50
0
0
500
1000
1500
2000
2500

Рис. 12.

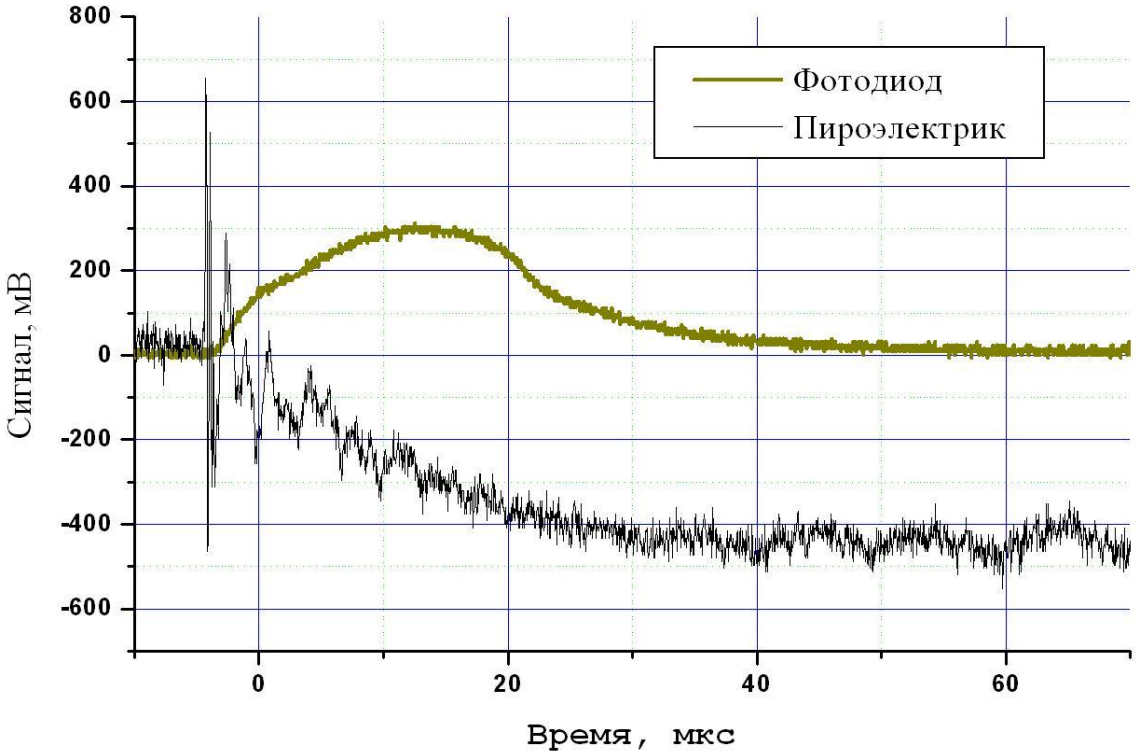

Фотодиод
Пироэлектрик
Сигнал, мВ
Время, мкс
800
600
400
200
0
-200
-400
-600
0
20
40
60

Рис. 13