

УДК 621.317

## РЕГИСТРАЦИЯ МАЛОМОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИЁМНИКОМ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЁНОЧНОЙ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

В. Н. Вьюхин, С. Д. Иванов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: ivanov.svyatoslav.d@gmail.com*

Приведены результаты экспериментального исследования тонкоплёночного пироэлектрического приёмника излучения на основе ниобата бария-стронция для детектирования наносекундных импульсов излучения. Показана возможность регистрации импульсов излучения длительностью 30 нс при чувствительности 1 В/Вт ( $NEP = 8 \cdot 10^{-7}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>).

*Ключевые слова:* пироэлектрический приёмник, тонкая плёнка, наносекундный импульс излучения, операционный усилитель, ниобат бария-стронция.

DOI: 10.15372/AUT20180512

**Введение.** Пироэлектрические приёмники излучения являются наиболее быстродействующими из всех известных типов тепловых приёмников, они способны регистрировать нано- и пикосекундные импульсы излучения в широком спектральном диапазоне.

Возможность регистрации пироэлектрическими приёмниками коротких импульсов излучения (нано- и пикосекундных) была показана экспериментально в ряде работ. В [1] с помощью кристалла  $\text{LiTaO}_3$ , легированного Cu, толщиной  $10^{-3}$  м регистрировались импульсы излучения с фронтом 13 пс при длине волны  $\lambda = 10,6$  мкм. В [2] исследовались пикосекундные пироэлектрические токи, индуцируемые лазерными импульсами с  $\lambda = 10,6$  мкм, в кристаллах  $\text{LiTaO}_3$  и  $\text{Sr}_{0,48}\text{Ba}_{0,52}\text{Nb}_2\text{O}_6$  (НБС) толщинами 7 и 0,8 мм соответственно. В [3] с помощью керамики  $\text{LiTaO}_3$  толщиной 7 мм получен пироэлектрический отклик на воздействие лазерного излучения с фронтом 500 пс для лазерного импульса с  $\lambda = 10,6$  мкм и мощностью до 35 Вт. В [4] при изучении воздействия ИК-излучения на кристаллы ниобата бария-стронция толщиной 0,5 мм был зарегистрирован наносекундный пироэлектрический сигнал при вольт-ваттной чувствительности 20 В/МВт с линейностью до 3 МВт/см<sup>2</sup>. С помощью неохлаждаемого пироэлектрического приёмника в [5] определён временной продольный профиль электронного пучка на ускорителе SLAC — данная задача требовала временного разрешения импульса в несколько пикосекунд.

В указанных экспериментах энергия излучения поглощалась непосредственно в объёме пироэлектрика за счёт термализации фотонов по механизму фотон—электрон с примесного центра [6]. Эффективность поглощения пироэлектриком энергии (при его достаточно большой толщине) высока. При этом в рассмотренных ранее работах [1–4] удельная плотность мощности излучения составляла  $3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. С уменьшением толщины пироэлектрического слоя доля энергии излучения, поглощаемого в нём, существенно снижается, поэтому в тонкоплёночных пироэлектрических структурах организация поглощения энергии в одном из электродов более эффективна.

Цель данной работы — продемонстрировать возможность регистрации коротких одиночных импульсов излучения низкой мощности с помощью тонкоплёночных пироэлектрических приёмников.

В качестве объекта исследования использовалась тонкоплёночная структура, в которой термализация энергии излучения осуществляется в тонком слое металла — скин-слое

поглощающего электрода. Время этого процесса для большинства металлов составляет пикосекунды в зависимости от концентрации электронов в металле [7]. Тепловая энергия, выделенная в электроде, поступает за счёт тепловой диффузии в пироэлектрическую плёнку и вызывает за короткое время появление пироэлектрического тока.

**Исследуемый образец.** Проведено экспериментальное исследование кратковременных пироэлектрических токов, генерируемых импульсным лазером, в тонкоплёночной структуре ИТО—НБС—Al. Пироэлектрическая плёнка НБС толщиной 1,5 мкм синтезирована методом плазмохимического осаждения на поверхности электрода — плёнок ИТО ( $\text{In}_2\text{O}_3 + 10\% \text{SnO}_2$ ), расположенных на подложках сапфира [8, 9]. Такие плёнки пироэлектрические обладают высокими значениями пироэлектрического коэффициента до  $(8-20) \times 10^{-4}$  Кл/(К · м<sup>2</sup>), его абсолютное значение определялось методом низкочастотной модуляции температуры [10]. Площадь элемента составила 0,5 мм<sup>2</sup>. Толщина поглощающего электрода (Al) 0,03 мкм, что значительно меньше толщины пироэлектрического слоя.

**Методика эксперимента.** В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер мощностью до 0,1 Вт ( $\lambda = 630$  нм), его излучение модулировалось импульсным модулятором, плотность потока мощности излучения составляла  $2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Ток через лазерный диод и мощность излучения регулировались напряжением питания модулятора. Минимальная длительность импульса излучения 30 нс.

Широкополосный усилитель обеспечивал регистрацию пироэлектрического тока стандартными средствами — с помощью осциллографа (АЦП). Электрическая принципиальная схема усилителя приведена на рис. 1 (ПП — пироэлектрический приёмник, M1 — стабилизатор напряжения (78L05), M2, M3 — операционные усилители (ОУ) (AD8007),  $R_1 = 2$  кОм,  $C_1 = 10$  пФ, номиналы резисторов (Ом), конденсаторы (мкФ)).

Усилитель включает в себя два каскада. Первый каскад — трансимпедансный усилитель (усилитель тока). Трудность разработки широкополосного усилителя для регистрации наносекундных импульсов с тонкоплёночного пироэлектрического приёмника излучения на основе сегнетоэлектрика НБС связана с его высокой ёмкостью  $C_0$  (до 1–5 нФ/мм<sup>2</sup>), что определяется высокой диэлектрической постоянной сегнетоэлектрика — 1000 и более. Такая величина ёмкости на входе усилителя приводит к его самовозбуждению. Для исключения этого в схему вводилась корректирующая ёмкость  $C_1$ . Используя методику расчёта широкополосных фотодиодных усилителей [11], получаем выражения для  $C_1$  и полосы усилителя:

$$C_1 = \sqrt{\frac{C_0 + C_{\text{вх}}}{2\pi R_1 f_1}}, \quad (1)$$

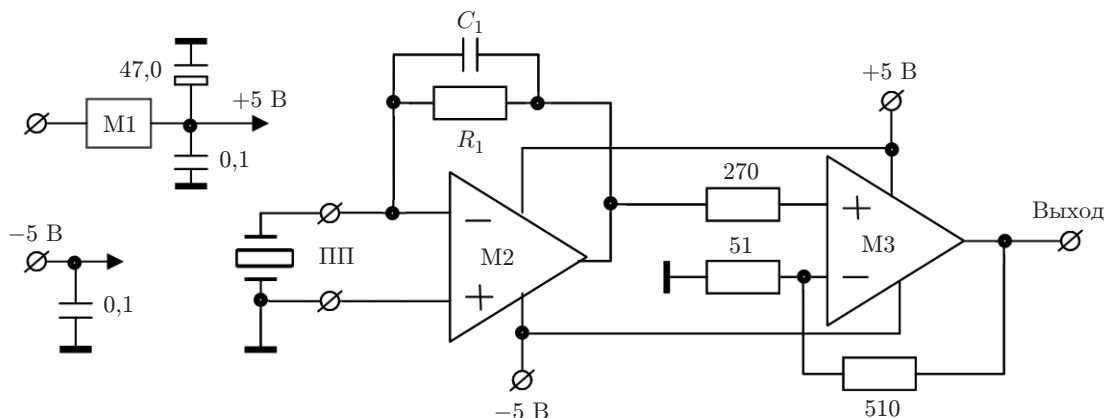


Рис. 1

$$f_{45} = \sqrt{\frac{f_1}{2\pi R_1(C_0 + C_{\text{вх}})}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{вх}}$  — входная ёмкость усилителя;  $f_1$  — частота единичного усиления ОУ М2;  $f_{45}$  — полоса усилителя тока при запасе по фазе  $45^\circ$ . Из (2) следует, что полоса частот усилителя тока с пиродатчиком на входе равна среднему геометрическому частот  $1/2\pi R_1(C_0 + C_{\text{вх}})$  и единичного усиления ОУ. Из приведённых соотношений следует, что для получения полосы 30 МГц при ёмкости на входе  $C_0 = 2$  нФ (измерена на частоте 10 кГц) требуемое значение  $R_1 = 200$  Ом. Это приводит к низкому коэффициенту передачи каскада и значительно усложняет схему всего усилителя — необходимо вводить ряд каскадов усиления для получения приемлемой чувствительности.

В реальном эксперименте было установлено, что  $C_0$  имеет частотную зависимость: с увеличением частоты ёмкость значительно уменьшается. При подаче фронта напряжения на пироприёмник через резистор скорость нарастания в начале фронта существенно выше экспоненциальной зависимости, что означает уменьшение ёмкости на высоких частотах. Такой эффект позволяет увеличить значение трансимпеданса до 2 кОм, даёт возможность ограничиться всего лишь одним дополнительным каскадом усиления после трансимпедансного каскада. Выше 100 кГц частотная зависимость ёмкости не исследовалась, поэтому корректирующая ёмкость  $C_1$  подобрана экспериментально и составила 5 пФ. Значение ёмкости пиродатчика было принято равным 100 пФ во всей полосе частот.

Усилитель выполнен на ОУ с токовой обратной связью AD8007. Первый каскад на микросхеме М2 — усилитель тока с трансимпедансом  $R_1 = 2$  кОм, второй каскад — усилитель напряжения, коэффициент усиления 11. Общий коэффициент передачи усилителя 45 мкА/В. Использование ОУ, для которых полоса пропускания слабо зависит от коэффициента усиления, позволило получить большой коэффициент усиления, равный 11, без существенной потери полосы пропускания. Переходная характеристика усилителя с подключённым пироэлектрическим приёмником (рис. 2, а) измерялась при подаче на вход импульса от генератора длительностью 50 нс через резистор 2 кОм. Длительность фронта (по уровню 0,1–0,9) составляла 8 нс. При подключении пироэлектрического датчика этот фронт увеличивался до 12 нс.

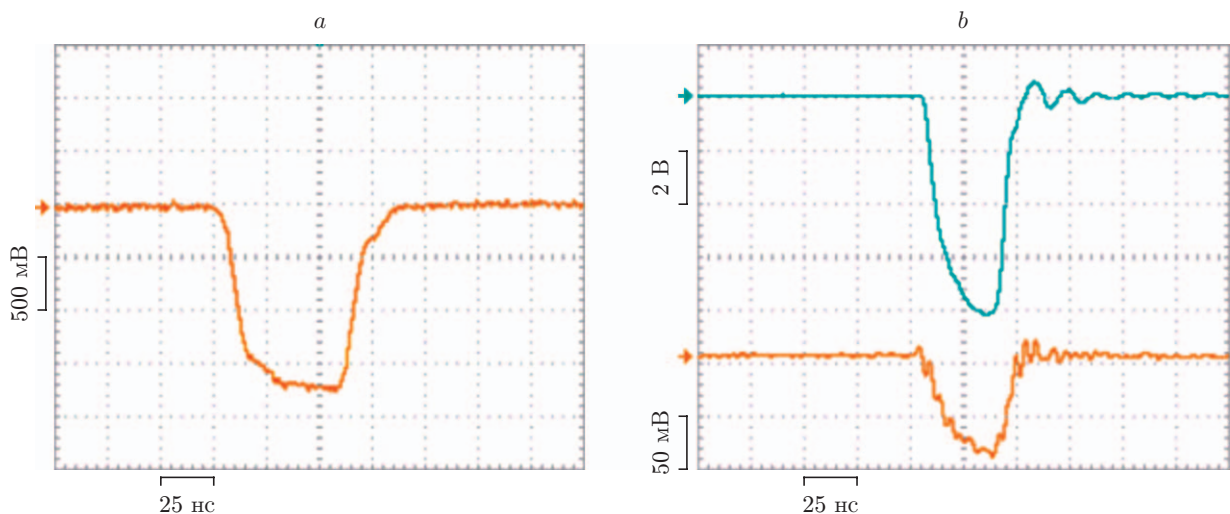


Рис. 2

Среднеквадратичный шум, приведённый к выходу усилителя, описывается выражением

$$\sigma_{\text{ш}} = K_2 \sqrt{(\sigma_{U1}^2 K_{\text{ш}} + \sigma_{I1}^2 R_1 + \sigma_{U2}^2 + \sigma_{I2}^2 R_3) \Delta f}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{U1}^2$ ,  $\sigma_{I1}^2$ ,  $\sigma_{U2}^2$ ,  $\sigma_{I2}^2$  — спектральные плотности шума напряжения и тока первого и второго каскадов усилителя;  $K_{\text{ш}} = C_0/C_1$  — шумовое усиление первого каскада;  $K_2$  — коэффициент усиления второго каскада;  $\Delta f$  — полоса частот усилителя;  $R_3 \simeq 50$  Ом — эквивалентное сопротивление инверсного входа ОУ М3. В (3) не учтён тепловой шум резисторов из-за его малости.

Исходя из паспортных значений спектральной плотности шума напряжения и тока ОУ ( $\sigma_U = 2,7$  нВ/Гц<sup>1/2</sup>,  $\sigma_I = 22$  пА/Гц<sup>1/2</sup>) расчётное значение шума на выходе усилителя  $\sigma_{\text{ш1}}$  в полосе  $\Delta f = 30$  МГц равно 3,4 мВ. Наибольший вклад даёт шумовой ток инверсного входа ОУ трансимпедансного каскада М2.

На рис. 2, *b* приведена осциллограмма, иллюстрирующая реакцию исследуемого образца на импульс излучения длительностью 30 нс и мощностью 100 мВт (верхний луч — ток лазерного диода (50 мА/дел.), нижний луч — пироэлектрический сигнал (50 мВ/дел.) с выхода усилителя). Вольт-ваттная чувствительность приёмника составляет  $S_V = 1$  В/Вт. Среднеквадратичный шум на выходе усилителя измерен при отсутствии падающего потока на приёмник путём записи и обработки осциллограммы шума и составил  $\sigma_{\text{ш2}} = 4,4$  мВ, что хорошо согласуется с (3). Оценка эквивалентной шумовой мощности приёмника в единичной полосе (NEP) даёт соответственно

$$\text{NEP} = \frac{\sigma_{\text{ш2}}}{S_V \sqrt{\Delta f}} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/Гц}^{1/2}. \quad (4)$$

Материал теплопоглощающего электрода пиродатчика (алюминий) имеет коэффициент отражения до 0,95, поэтому чувствительность пироэлектрического приёмника излучения может быть технологически повышена до 5–20 В/Вт путём чернения электрода.

В работе [12] на основе анализа экспериментальных данных, полученных при исследовании различных тепловых приёмников излучения, установлено, что минимальные обнаруживаемые энергии излучения имеют близкие значения, в частности при размерах приёмника 1 мм<sup>2</sup> справедливо следующее соотношение:

$$P_{\text{порог}} t_{\text{имп}} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{порог}}$  — минимальная обнаруживаемая мощность,  $t_{\text{имп}}$  — время воздействия излучения. Такая эмпирическая оценка оказалась удачной, она была проверена на многих тепловых болометрических, термоэлектрических приёмниках (но не пироэлектрических). Рассмотрим выполнение энергетического критерия (5) для описанного пироэлектрического приёмника излучения в предельном случае, когда вся падающая мощность поглощается пиродатчиком. При выполнении этого условия чувствительность приёмника  $S_{V_{\text{max}}} = 20$  В/Вт, а пороговая мощность в полосе 30 МГц  $P_{\text{порог}} = \sigma_{\text{ш2}}/S_{V_{\text{max}}} = 2,2 \cdot 10^{-4}$  Вт. При  $t_{\text{имп}} = 30$  нс экспериментально полученный энергетический порог пироэлектрического приёмника излучения равен  $6,6 \cdot 10^{-12}$  Дж, что по порядку величины совпадает с пределом (5).

**Заключение.** Проведённые исследования показывают, что описанный тонкоплёночный пироэлектрический приёмник в режиме регистрации однократных импульсов излучения с длительностью в десятки наносекунд в широком спектральном диапазоне может быть эффективно использован для обнаружения маломощных тепловых импульсов излучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Auston D. H., Glass A. M.** Optical generation of intense picosecond electrical pulses // Appl. Phys. Lett. 1972. **20**, Is. 10. P. 398–399.
2. **Roundy C. B., Byer R. L.** Subnanosecond pyroelectric detector // Appl. Phys. Lett. 1972. **21**, Is. 512. P. 512–515.
3. **Воронов В. В., Карлов Н. В., Кузьмин Г. П. и др.** Малоинерционный пироэлектрический детектор на основе кристаллов  $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{Nb}_2\text{O}_6$  // Квантовая электроника. 1977. **4**, № 9. С. 1903–1910.
4. **Дорожкин Л. М., Лазарев В. В., Плешков Г. М. и др.** Тонкопленочный пироэлектрический приемник на основе органических соединений для измерения параметров импульсного лазерного излучения // Квантовая электроника. 1983. **10**, № 6. С. 1107–1113.
5. **Blackmore V., Doucas G., Perry C. et al.** First measurements of the longitudinal bunch profile of a 28.5 GeV beam using coherent Smith — Purcell radiation // Phys. Rev. Spec. Topics — Accel. and Beams. 2009. **12**, N 3. 032803.
6. **Greten G., Hunsche S., Knpffer U. et al.** Defect and light induced absorption, luminescence and dielectric properties in SBN:cerium // Ferroelectrics. 1996. **185**, N 1. P. 289–292.
7. **Chichkov B. N., Momma C., Nolte S. et al.** Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids // Appl. Phys. A. 1996. **63**, N 2. P. 109–115.
8. **Antsignin V. D., Egorov V. M., Kostsov E. G., Malinovsky V. K.** Ferroelectric properties of thin strontium barium niobate films // Ferroelectrics. 1985. **63**, N 1. P. 235–242.
9. **Kostsov E. G.** Ferroelectric barium-strontium niobate films and multi-layer structures // Ferroelectrics. 2005. **314**, N 1. P. 169–187.
10. **Garn L. E., Sharp E. J.** Use of low frequency sinusoidal temperature waves to separate pyroelectric currents from nonpyroelectric currents. Pt. I. Theory // Journ. Appl. Phys. 1982. **53**, Is. 12. 8974.
11. **Data Sheet.** ADA4817-1/ADA4817-2. P. 25. URL: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ada4817-1\\_4817-2.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ada4817-1_4817-2.pdf). (дата обращения: 15.05.2018).
12. **Havens R. R.** Theoretical comparison of heat detectors // JOSA. 1946. **36**. P. 355–356.

*Поступила в редакцию 15 мая 2018 г.*