

УДК 621.38.3; 53.082.62

## Наносекундный приемник ИК-излучения на основе тонких пироэлектрических пленок

С. Д. Иванов, Э. Г. Косцов, В. С. Соболев

*Рассматриваются особенности регистрации коротких импульсов излучения тепловыми приемниками на основе тонких пироэлектрических пленок, когда энергия излучения выделяется в тонком поглощающем электроде. Показано, что минимальное время реакции образования на импульсы излучения определяется временем тепловой релаксации поглощающего электрода. В частности, при толщине пироэлектрической пленки 0,5 мкм и толщине поглощающего электрода 0,01 мкм возможна регистрация пикосекундных импульсов излучения.*

PACS: 07.57.Kp

*Ключевые слова:* пироэлектричество, наносекундные импульсы, тонкая пленка, ИК-излучение.

### Введение

Пироэлектрические приемники, как и тепловые приемники, отличаются возможностью регистрации потока излучения с широким спектральным диапазоном — от рентгеновского излучения и ультрафиолета, среднего и дальнего ИК-диапазонов до субмиллиметрового и миллиметрового диапазона. Они реагируют на скорость изменения температуры  $T_{\text{ср}}$ , средней по объему пироэлектрика.

Как известно, пироэлектрические приемники излучения являются наиболее быстродействующими из всех известных типов фотоприемников: при поглощении излучения непосредственно в объеме пироэлектрика время отклика близко ко времени термализации фотона и может составлять всего несколько пикосекунд. В реальных пироэлектрических приемниках время реакции на воздействие импульса излучения определяется временем тепловой релаксации как в объеме пироэлектрика, так и в электродах.

В настоящее время производится несколько десятков типов одноэлементных пироэлектрических инфракрасных устройств как отечественными,

так и зарубежными фирмами, которые широко используются в современной охранной технике различного назначения, образуя объемные датчики движения, в коммутаторах освещения и т. п.

Исследования быстродействующих пироэлектрических приемников мощного излучения проводятся достаточно широко начиная с 70-х годов, см. например, [1—7]. В таких приемниках использовались, как правило, керамические пластины типа PZT, которые при длительности импульса 80 нс выдерживали плотность энергии излучения до  $0,3 \text{ Дж/см}^2$  (при интенсивности потока  $I$  до  $4 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2$ ). Монокристаллы  $\text{LiNbO}_3$  выдерживают ещё более высокую плотность энергии излучения: при длительности импульса 10 нс до  $2,4 \text{ Дж/см}^2$ , а интенсивность потока до  $1,5 \times 10^{10} \text{ Вт/м}^2$ . На основе монокристаллов  $\text{LiTaO}_3$  с толщиной 200 мкм созданы быстродействующие пироэлектрические приемники [7], которые при размере приемной площадки  $1,6 \times 10^{-7} \text{ м}^2$  регистрировали сигнал продолжительностью 170 пс при плотности энергии излучения  $6 \times 10^{-3} \text{ Дж/см}^2$  (или  $I = 1,7 \times 10^{11} \text{ Вт/м}^2$ ). При этом энергия выделялась в электроде — тонкой пленке Ni-Cr (10 нм), где поглощалось до 50 % энергии потока. При указанной длительности импульса излучения порог чувствительности приемника составляет  $5,3 \times 10^8 \text{ Вт/м}^2$ .

В последние годы появились работы, посвященные созданию приемников излучения на основе тонких пироэлектрических пленок [8—13]. Однако регистрация коротких импульсов излучения (наносекундный диапазон), насколько нам известно, не рассматривалась нигде, кроме работы [13].

Иванов Святослав Дмитриевич, аспирант.  
Косцов Эдуард Геннадьевич, заведующий лабораторией.  
Соболев Виктор Сергеевич заведующий лабораторией.  
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.  
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Коптюга, 1.  
E-mail: kostsov@iae.nsk.su

Статья поступила в редакцию 31 мая 2016 г.

© Иванов С. Д., Косцов Э. Г., Соболев В. С., 2016

В ней описаны особенности воздействия импульса длительностью 30 нс на тонкопленочную структуру ИТО—пленка НБС с толщиной 3,5 мкм—проводящая подложка. В этой структуре излучение проходило через прозрачный для излучения электрод ИТО, первоначально поглощалось в подложке, а затем тепло уже распространялось в пленку, вызывая протекание пироэлектрического тока, причем значительно позже, до 100 нс, после выключения импульса излучения.

Общий анализ теплофизических процессов в пироэлектрических структурах показывает, что возможны только два канала передачи электромагнитной энергии излучения пироэлектрику, а именно, собственное поглощение в его объеме и поглощение энергии в электроде с последующим нагревом пироэлектрика. Заметим, что в первом случае для эффективного использования энергии потока в пироэлектрическом материале необходим высокий коэффициент поглощения излучения, что, учитывая низкую проводимость пироэлектрика, возможно только при достаточно большой его толщине (более 10 мкм), а это определяет большую тепловую емкость структуры, большое время тепловой релаксации, т. е. все это снижает быстродействие всей структуры.

Из сказанного следует общий вывод — для обеспечения высокого быстродействия пироэлектрического приемника излучения необходимо использование тонких пироэлектрических пленок, энергия излучения в которые должна поступать из объема поглощающего электрода (при его минимальной толщине, обеспечивающей, тем не менее, достаточное эффективное поглощение).

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование подобных структур в интересах создания эффективных быстродействующих пироэлектрических приемников ИК-излучения.

### Теоретическое рассмотрение

В работе рассматриваются многослойные структуры следующего состава: тонкий поглощающий электрод—тонкий пироэлектрический слой—электрод—подложка (см. рис. 1). Основными процессами, определяющими генерацию пироэлектрического тока и заряда в таких структурах, является перераспределение во времени температуры в объеме пироэлектрика как в момент его нагревания энергией импульсов излучения, так и охлаждения за счет тепловой диффузии после прекращения действия излучения, т. е. отвода тепла в подложку.

При воздействии наносекундных импульсов излучения на указанную структуру главным фактором, определяющим поведение пироэлектриче-

ского тока, является перераспределение в объеме пироэлектрика теплового потока, поступающего из поглощающего электрода. Рассматривается случай, когда на поглощающий электрод поступает излучение в течение времени  $t_p$ , т. е. импульс излучения с интенсивностью  $I$  [Вт/м<sup>2</sup>], а на другой границе — на поверхности подложки — поддерживается постоянная температура.

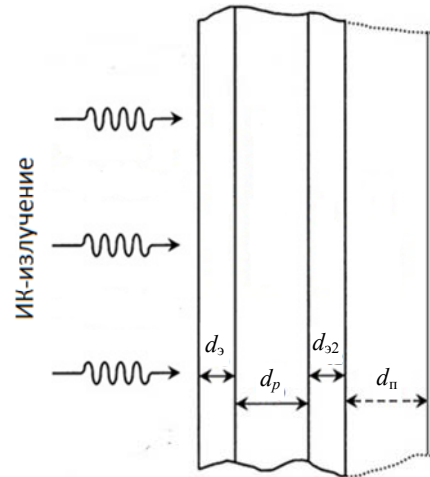


Рис. 1. Конструкция элемента — многослойная структура, толщины пленок:  $d_3$  — Al, Cr (площадь электрода  $5 \times 10^{-7} \text{ м}^2$ ) — 0,05—0,5 мкм;  $d_p$  — SBN ( $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6 + 1\% \text{ вес. La}_2\text{O}_3$ ) — 0,5—3 мкм;  $d_2$  — ИТО ( $\text{In}_2\text{O}_3 + 10\% \text{ SnO}_2$ ) — 0,05—0,5 мкм;  $d_n$  — подложка.

При воздействии потока излучения его энергия выделяется в виде тепла в поглощающем электроде, а в пироэлектрическую пленку через границу раздела двух сред поступает тепловой поток с интенсивностью  $k \cdot dT/dx$  ( $k$  — теплопроводность материала пироэлектрика). Этот поток изменяет распределение температуры  $T(x,t)$  в каждом из слоев структуры, в т. ч. в пироэлектрическом слое, определяя среднюю температуру в нем  $T_{cp}(t)$  как в момент его нагревания энергией импульсов излучения, так и охлаждения после прекращения действия излучения. Поведение  $T_{cp}(t)$  определяет величину пироэлектрического тока  $J_p = \gamma S dT_{cp}(t)/dt$ , ( $\gamma$  — пироэлектрический коэффициент, его размерность — Кл/(м<sup>2</sup>·град),  $S$  — площадь электрода). Величина  $T_{cp}(t) = (1/d_p) \int T(x,t) dx$ ,  $d_2$  — толщина пироэлектрического слоя.

При анализе нестационарного распределения температуры  $T(x,t)$  внутри указанной многослойной структуры, включая пироэлектрическую пленку, и для описания поведения пироэлектрического тока создана математическая модель, учитывающая, что энергия излучения выделяется в тонком поглощающем электроде, расположенном на поверхности пироэлектрического слоя.

Одним из важнейших параметров приемников излучения является величина их отклика на воздействие энергии потока, в частности, величина

полного заряда, генерируемого пироэлектриком в момент действия импульса. Нетрудно показать, что в рассматриваемом элементе отношение величины формируемого за один такт воздействия излучения заряда  $Q$  [Кл] к величине энергии излучения  $E$  [Дж] равно  $Q/E = \int J_p(t) dt / (I d^2 / \chi) = \gamma / c_p d$ . Оно обратно пропорционально  $d$ . Из этого следует, что с уменьшением толщины пироэлектрического слоя эффективность преобразования энергии растет, равно как и эффективность использования тонких пленок при создании наносекундных приемников излучения.

Из выражения для тока следует, что чем тоньше пироэлектрический слой, тем больше величина  $J_p(t)$  и, соответственно, величина заряда, генерируемого структурой за время действия заданного импульса излучения, а также величина удельного заряда Кл/Дж, генерируемого единицей энергии излучения.

Для эффективного использования теплового потока необходимо, чтобы его длительность была меньше времени  $d_p^2 / \chi_p$ , в противном случае будет иметь место неэффективное поглощение энергии излучения в противоположном электроде без генерации пироэлектрического заряда.

Когда величина  $t_p$  значительно меньше  $d_p^2 / \chi_p$ , то имеет место первоначальный рост тока, обусловленный поглощением энергии излучения во внешнем электроде. Это отражено на рис. 2, на котором представлено поведение пироэлектрического тока в указанной структуре с  $d_p = 1$  мкм,  $\gamma = 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup> при воздействии импульса излучения длительностью 10 нс и с интенсивностью  $I(t) = 20$  Вт/м<sup>2</sup>, но для разных значений толщины поглощающего электрода  $d_3$ . Кривые тока 1, 2, 3 соответствуют  $d_3 = 0,03$  мкм, 0,1 мкм, 0,3 мкм. Значения тока нормированы на площадь приемника.

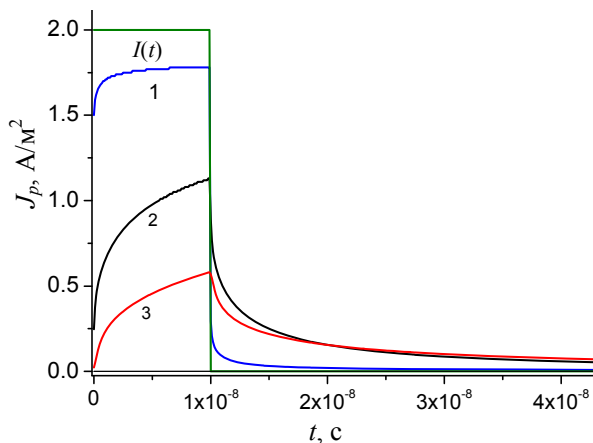


Рис. 2. Влияние толщины поглощающего электрода на амплитуду и форму пироэлектрического тока. Кривые 1, 2, 3 —  $d_3 = 0,01$ ; 0,1; 0,3 мкм соответственно. Интенсивность излучения  $I = 20$  Вт/м<sup>2</sup>.

В рамках указанной модели следует, что минимальное время  $t_{\min}$  реакции образца на короткие импульсы излучения определяется временем тепловой релаксации поглощающего электрода (его тепловой инерцией), в первом приближении равной  $d_3^2 / \chi_3$ , где  $\chi_3$  — температуропроводность его материала.

Для обеспечения высокого быстродействия приемника необходимо, чтобы толщина поглощающего электрода  $d_3$  была значительно меньше толщины пироэлектрического слоя  $d_p$ , а теплопроводность  $\lambda_3$  и температуропроводность  $\chi_3$  значительно больше, чем  $\lambda_p$  и  $\chi_p$  материала пироэлектрика. Полагая что  $d_3 = 10^{-7}$  м,  $\chi_3 = 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/сек, имеем  $t_{\min} \approx 1$  нс. При уменьшении  $d_3$  до  $10^{-8}$  м возможна регистрация уже пикосекундных импульсов.

### Экспериментальное исследование

Проведено экспериментальное исследование кратковременных пироэлектрических токов в тонкопленочных структурах ИТО-SBN-Cr(Al), генерируемых излучением импульсных лазеров, в т. ч. газоразрядных, с длиной волны 10,3 мкм и с интенсивностью потока до  $10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. Пироэлектрические гетероэпитаксиальные пленки SBN ( $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ ) с толщиной порядка 1 мкм синтезированы на поверхности пленок ИТО ( $\text{In}_2\text{O}_3 + 10\% \text{SnO}_2$ ) или Pt, расположенных на подложках кремния или сапфира. Они имеют высокое значение пироэлектрического коэффициента до  $(8-20) \times 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>, абсолютное значение которого определялось методом низкочастотной модуляции температуры [13—15]. Величина диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , достигает значений 1000—5000.

Как известно, для широкого круга пироэлектрических материалов — сегнетоэлектриков — соотношение  $\epsilon/\gamma^{0,5}$  является константой, (см., например, [16]), поэтому удельная емкость исследуемых структур, обладающих высоким значением диэлектрической проницаемости, достаточно высока, а именно, до  $10^{-3}$  Ф/м<sup>2</sup> и более, что накладывает определенные ограничения на точность определения формы коротких импульсов пиротока при площади исследуемых элементов порядка  $5 \times 10^{-7}$  м<sup>2</sup>.

Импульсы излучения мощностью до 150 мВт, модулируемые частотами 1—700 кГц и обладающие фронтами 25—30 нс, создавались с помощью полупроводникового лазера. Реально в поглощающем электроде выделялась мощность до 1 мВт при интенсивности потока  $10^2-10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. Импульсный пироэлектрический ток  $J_p$  регистрировался с помощью трансимпедансного усилителя и преобразовывался в напряжение  $U$  с выполнением соот-

ношения  $U = 470 J_p$ . Фронты выходного напряжения трансимпедансного усилителя были в пределах 100 нс, что позволяет достаточно точно определять форму импульсов пиротока при длительности импульсов излучения в пределах 300 нс.

На рис. 3 представлены типичные осциллограммы пиротока и потока излучения при частоте его модуляции 650 кГц, для образца с толщиной пироэлектрика 1,5 мкм, толщиной поглощающего Cr-электрода 0,2 мкм. Вверху показана осциллограмма импульсов излучения лазера, а внизу осциллограмма пиротока.

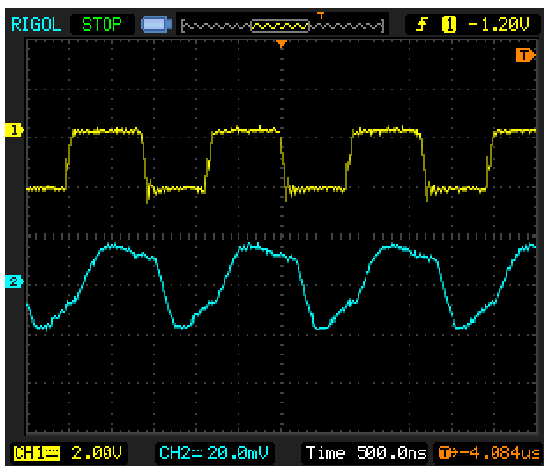


Рис. 3. Пироэлектрический ток в тонкопленочной структуре Cr-SBN-ITO. Подложка сапфир.  $S = 5 \times 10^{-7} \text{ м}^2$ . Вверху показана осциллограмма импульсов излучения лазера, а внизу осциллограмма пиротока.  $I^{\max}(t) = 10^3 \text{ Вт/м}^2$ ,  $J_p^{\max}(t) = 1,7 \times 10^3 \text{ А/м}^2$ . Значения тока нормированы на площадь приемника.

### Заключение

В работе рассмотрены особенности регистрации коротких импульсов излучения тепловыми приемниками на основе тонких пироэлектрических пленок, когда энергии излучения выделяется в тонком поглощающем электроде. Показано, что минимальное время реакции образца на импульсы излучения определяется временем тепловой релаксации поглощающего электрода. В частности, при толщине пироэлектрической пленки 0,5 мкм и толщине поглощающего электрода 0,01 мкм возможна регистрация пикосекундных импульсов излучения.

Проведенное математическое моделирование тепловых процессов в многослойной структуре

«тонкий поглощающий электрод—тонкий пироэлектрический слой—электрод—подложка» показало, что характер поведения пироэлектрического тока, его форма и фаза относительно импульсов излучения, соответствует модельным представлениям о распределении температуры в случае длительности импульса, меньшим времени перемещения тепловым фронтом межэлектродного расстояния. Установлено, что при использованных значениях  $\gamma$  и  $d_p$  величина генерируемого заряда в момент действия импульса составляет  $(1-4) \times 10^{-4}$  Кл/Дж вне зависимости от площади электродов и длительности импульсов излучения.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что на основе описанных тонкопленочных пироструктур может быть создано новое семейство как одноэлементных высокочувствительных быстродействующих приемников излучения, так и неохлаждаемых мегапиксельных тепловизионных устройств [15, 17].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Roundy C. B., Byer R. L. // Appl. Phys. Lett. 1972. Vol. 21. No. 10. P. 512.
2. Simhony M., Base M. // IEEE J. Quant. Electron. 1979. No. 4. P. 206.
3. Stotlar S.C., McLelan E.J., Webb J. // Proc. Soc. Photo-Optic. Instrum. 1979. Vol. 190. No. 2. P. 347.
4. Byer R. L., Roundy C. B. // Ferroelectrics. 1972. Vol. 3. P. 333.
5. Peterson R. L. // Appl. Phys. 1974. Vol. 45. No. 8. P. 3296.
6. Shaulov A., Rosenthal A., Simhony M. // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. No. 2. P. 4518.
7. Roundy C. B., Byer R. L., Phillion D. W., Kuizendga D. J. // Opt. Commun. 1974. Vol. 10. No. 4. P. 374.
8. Wu Ch. G., Zhang W. L., Li Y. R., Liu X. Zh., Zhu J., Tao B. W. // Infrared Physics & Technology. 2006. Vol. 48. P. 187.
9. Akai D., Hirabayashi K., Yokawa M., Sawada K., Taniguchi Y., Murashige S. // Sensors and Actuators. 2006. Vol. 111. P. 130.
10. Ramos P., de Andres A., L'opez A. // Integrated Ferroelectrics. 2007. Vol. 92. P. 147.
11. Kao M. C., Chen H. Z., Yang S. L., Chen Y. C., Hsieh P. T. // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. P. 5518.
12. Stenger V., Shnider M., Sriram S., Dooley D., Stout M. // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8261-27.
13. Анцыгин В. Д., Косцов Э. Г., Соколов А. А. // Автометрия. 1986. № 2. С. 30.
14. Kostsov E. G. // Ferroelectrics. 2005. Vol. 314. P. 169.
15. Иванов С. Д., Косцов Э. Г. // Автометрия. 2016. № 1. С. 104.
16. Кузьминов Ю. С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. — М.: Наука, 1982.
17. Косцов Э. Г. // Микроэлектроника. 1996. № 3. С. 177.

## Nanosecond IR-radiation detector based on a thin pyroelectric film

S. D. Ivanov, E. G. Kostsov, and V. S. Sobolev

Institute of Automation and Electrometry, SB RAS  
1 Koptug av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: kostsov@iae.nsk.su

Received May 31, 2016

**Consideration is given to features of registration of short radiation pulses by the thermal detectors based on thin pyroelectric films in the case when a radiation energy is released in a thin absorbing electrode. It is shown that the minimum reaction time of the sample on radiation pulses is determined by the time of thermal relaxation of the absorbing electrode. In particular, picosecond pulses can be detected with the thickness of the pyroelectric film being  $0.5 \mu\text{m}$  and the thickness of the absorbing electrode being  $0.01 \mu\text{m}$ .**

PACS: 07.57.Kp

**Keywords:** pyroelectricity, nanosecond pulses, thin film, IR-radiation, transimpedance amplifier.

### REFERENCES

1. C. B. Roundy and R. L. Byer, Appl. Phys. Lett. **21**, 512 (1972).
2. M. Simhomy and M. Base, IEEE J. Quant. Electron., No. 4, 206 (1979).
3. S. C. Stotlar, E. J. McLelan, J. Webb, Proc. Soc. Photo-Optic. Instrum. **190**, 347 (1979).
4. R. L. Byer, and B. Roundy, Ferroelectrics. **3**, 333 (1972).
5. R. L. Peterson, J. Appl. Phys. **45**, 3296 (1974).
6. A. Shaulov, A. Rosenthal, and M. Simhony, J. Appl. Phys., **43**, 4518 (1972).
7. C. B. Roundy, R. L. Byer, D. W. Phillion, and D. J. Kuizendga, Opt. Commun., **10**, 374, (1974).
8. Ch. G. Wu, W. L. Zhang, Y. R. Li, X. Zh. Liu, J. Zhu, and B. W. Tao, Infrared Physics & Technology **48**, 187 (2006).
9. D. Akai, K. Hirabayashi, M. Yokawa, K. Sawada, Y. Taniguchi, and S. Murashige, Sensors and Actuators, **111**, 130 (2006).
10. P. Ramos and A. de Andres, A. L'opez, Integrated Ferroelectrics, **92**, 147 (2007).
11. M. C. Kao, H. Z. Chen, S. L. Yang, Y. C. Chen, and P. T. Hsieh, Thin Solid Films **516**, 5518 (2008).
12. V. Stenger, M. Shnyder, S. Sriram, D. Dooley, and M. Stout, Proc. SPIE **8261-27** (2012).
13. V. D. Antsygin, E. G. Kostsov, and A. A. Sokolov, Avtometriya, No 2, 30 (1986).
14. E. G. Kostsov, Ferroelectrics. **314**, 169 (2005).
15. S. D. Ivanov and E. G. Kostsov, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, No. 1, 104 (2016).
16. Y. S. Kuz'minov, *Segnetoelectric Crystals for Laser Radiation Control* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
17. E. G. Kostsov, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, No. 3, 177 (1996).