

16. Mitchell K., Potter R., Gay R. // 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.—New Orleans, 1987.— P. 1p — 2.
17. Yang J., Ross R., Mohr R., Fournier J. // Ibid.— P. 3c — 8.
18. Iihara T., Takezono S., Sasaki H. e. a. // Ibid.— P. 10p — 3.
19. Hamakawa Y., Matsumoto Y., Zhang-Yang Xu e. a. // Proc. MRS Symposium.— 1986.— V. 70.— P. 481.
20. Hirose M., Naruyama N., Miyazaki S., Ihara Y. // Proc. MRS Spring Meeting.— Palo Alto, 1986.— P. 405.
21. Tsuda S., Haku H., Tarui H. e. a. // MRS Spring Meeting.— Anaheim, 1987.— P. E6 — 3.
22. Cond J. P., Aljishi S., Shen D-S. e. a. // Ibid.— P. E7 — 3.
23. Fortmann C. M., Lange S., O'Dowd J. // Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.— New Orleans, 1987.— P. 3c — 1.
24. Hamakawa Y. // Bussiness Japan.— 1986.— N 6.— P. 28.
25. Nakanø S., Fukatsu T., Takeuchi M. e. a. // Proc. 3rd Sensor Symposium.— 1983.— P. 97.
26. Kagawa T., Matsumoto N., Kumabe K. // Proc. 13th Conf. on Solid State Devices.— Tokyo, 1981.— P. 251.
27. Ozawa K., Takagi N., Hiranaka K. // Spring Meeting JSAPE.— 1982.— P. 4a — z — 5.
28. Nishiura M., Ueno M., Kato T. e. a. // Fuji Electric Reviews.— 1987.— V. 33.— P. 13.
29. Matsumura M., Hayama H., Nara Y., Ishibashi K. // Proc. 13th Conf. on Solid State Devices.— Tokyo, 1981.— P. 311.
30. Ito H., Suzuki T., Nobue M. e. a. // Proc. MRS Spring Meeting.— Anaheim, 1987.— P. E9—3.
31. Baji T., Shimomoto Y., Matsumaru H. e. a. // Proc. 13th Conf. on Solid State Devices.— Tokyo, 1981.— P. 269.
32. Ishioka S., Imamura Y., Takasaki Y. e. a. // Proc. 14th Conf. on Solid State Devices.— Tokyo, 1982.— P. 461.
33. Kawamura T., Yamamoto N. // Ibid.— P. 311.
34. Shimizu I., Oda S., Saitø K. e. a. // J. Phys., Paris, 1981.— V. 42.— P. C4—1123.
35. Nakayama Y., Natsuhara T., Nkano M. e. a. // Proc. 14th Conf. on Solid State Devices.— Tokyo, 1982.— P. 453.
36. Fukatsu T., Kuwano Y. // Proc. of JSPS.— N125. Committee Meeting. 113 the Conf., 1985.— P. 433.
37. Pankove J. D., Carlson D. E. // Appl. Phys. Lett.— 1976.— V. 29.— P. 620.
38. Kruangam D., Endo T., Deguchi M. e. a. // Optoelectronics — Device and Technologies.— 1986.— V. 1.— P. 67; Extended Abstracts of 1986 International Conf. on SSDM.— Tokyo, 1986.— P. 683.
39. Hamakawa Y., Kruangam D., Okamoto H., Takakura H. // Proc. ESSDERC'87.— Bologna, Italy, Sept., 1987.
40. Kruangam D., Deguchi M., Endo T. e. a. // Proc. MRS Spring Meeting.— Anaheim, 1987.— P. 64.

*Поступила в редакцию 5 января 1988 г.*

УДК 621.315.5/61 : 537.311.33

В. Д. АНЦЫГИН, Р. С. МАДОЯН, А. А. СОКОЛОВ, О. А. ХАЧАТУРЯН  
(Ереван — Новосибирск)

### СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НИОБАТА — ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ

**Введение.** Современный уровень развития интегральной оптики, наряду с дальнейшей разработкой ее элементной базы, характеризуется стремлением к созданию монолитных и гибридных оптических интегральных схем, которые найдут применение в различных системах оптической обработки информации, а также в волоконно-оптических линиях связи.

Анализ тенденций развития новых направлений электроники показывает возрастание роли диэлектрических материалов, в первую очередь нецентросимметричных пьезо- и сегнетоэлектриков [1—4]. Расширение числа тонкопленочных структур на основе сегнетоэлектриков, вовлекаемых в сферу практического использования, сопровождается детальным изучением комплекса разнообразных физико-химических свойств веществ, совершенствованием технологии их получения. Это позволяет в дальнейшем создавать материалы с заранее заданными физическими

Рис. 1. Граница раздела подложка — пленка гетероэпитаксиальной структуры  $\text{Li}(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_3/\text{LiTaO}_3$  и электронограмма с поверхности пленки



свойствами, оптимальными для конкретного применения в технике. Использование эпитаксии для получения тонких монокристаллических пленок пьезо- и сегнетоэлектриков находит все большее развитие [5, 6].

В работе представлены результаты исследования планарных эпитаксиальных структур сегнетоэлектриков ниобата — танталата лития, синтезированных методом жидкофазной эпитаксии.

**Выращивание пленок.** В настоящее время эпитаксиальные пленки сегнетоэлектриков, выращиваемые методом жидкофазной эпитаксии, получают путем погружения подложки в тигель с раствором-расплавом. Указанный способ не позволяет управлять основными параметрами роста, он характеризуется неоднородностью пленки по толщине, ее клиновидностью. Для получения более совершенных структур предложен капиллярный метод жидкофазной эпитаксии сегнетоэлектриков [7]. В общем случае капиллярная технология [8, 9] предусматривает рост пленки из ограниченного объема раствора-расплава, заключенного между двумя параллельно установленными подложками. За счет действия капиллярных сил происходит затягивание раствора-расплава в зазор между подложками. Затем создается пересыщение в жидкой фазе и на внутренних поверхностях подложек происходит рост пленки.

Важным преимуществом капиллярной технологии является то обстоятельство, что толщина жидкой зоны над всей поверхностью подложки постоянна. Это позволяет устранить клиновидность и получить слой с одинаковой толщиной. Максимальная толщина зазора определяется вязкостью раствора-расплава и смачиваемостью поверхности подложки.

Капиллярная технология позволяет, наряду с возможностью вариации толщины пленки, управлять скоростью роста, а также составом слоя. Скорость осаждения определяется степенью пересыщения у фронта кристаллизации, которая, в свою очередь, зависит от диффузии компонент расплава и скорости изменения температуры.

На рис. 1 представлены характерный поперечный скол гетероэпитаксиальной структуры  $\text{Li}(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_3/\text{LiTaO}_3$ , полученной капиллярным методом жидкофазной эпитаксии, и электронограмма с поверхности пленки.

Распределение компонент по толщине гетероструктуры приведено на рис. 2 с совмещенными рентгенодифракционными кривыми от пленок  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3$  на подложках  $\text{LiTaO}_3$  (1210).

**Диэлектрические свойства.** Для определения температурной зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  пленок использовались измерения емкости  $c$  и проводимости  $\sigma$  конденсаторов, образованных планарной структурой встречно-штыревых электродов из платины на поверхности пленки. Измерения выполнялись в температурном интервале 20—970 °С в режиме «слабого» поля ( $E_{\text{взм}} < 10^4$  В/м) с помощью моста Е7-8. На рис. 3, а представлены типичные температурные зависимости  $c$  и  $\sigma$  для пленки  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3$  толщиной 6 мкм на подложке  $\text{LiTaO}_3$  (1210).

Анализ полученных результатов показывает, что для исследуемых структур характерно наличие двух максимумов в  $c(T)$  и  $\sigma(T)$ . Первый — в окрестности ~580 °С для  $c$  и ~575 °С для  $\sigma$  и более размытый — при

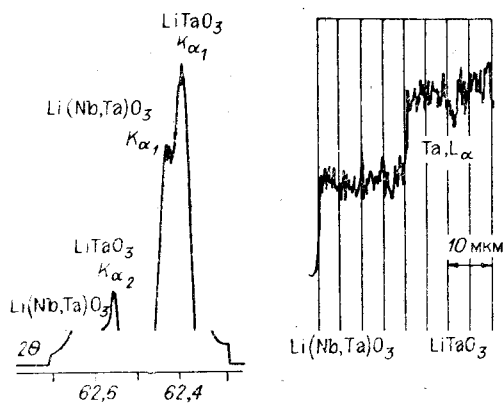


Рис. 2. Рентгенодифракционные кривые от пленок  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3$  на подложках  $\text{LiTaO}_3$  (1210) и распределение компонент по толщине гетероструктуры

$\sim 770^\circ\text{C}$  ( $c$ ) и  $\sim 750^\circ\text{C}$  ( $\sigma$ ). Максимумы  $c(T)$  и  $\sigma(T)$  вблизи  $\sim 580^\circ\text{C}$  можно связать с вкладом, обусловленным фазовым переходом в материале подложки, на что указывает меньшее размытие максимума для монокристаллов  $\text{LiTaO}_3$  температура фазового перехода лежит в интервале  $550\text{--}680^\circ\text{C}$  [10].

Поскольку у кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  фазовый переход имеет место при  $1140\text{--}1180^\circ\text{C}$  [10], то естественно ожидать, что у  $\text{Li}(\text{Nb}_x\text{Ta}_y)\text{O}_3$  фазовый переход будет наблюдаться при температурах в интервале  $550\text{--}1190^\circ\text{C}$ , т. е. размытые максимумы на кривых  $c(T)$  и  $\sigma(T)$  при  $770$  ( $750$ )  $^\circ\text{C}$  могут быть связаны с фазовым переходом в пленке.

Предполагая, что диэлектрические проницаемости как пленки  $\epsilon_1$ , так и подложки  $\epsilon_2$  имеют лишь один максимум, соответствующий области их собственного фазового перехода, можно решить задачу определения значений  $\epsilon_1(T)$  и  $\epsilon_2(T)$  из измерений емкости структуры. Для определения  $\epsilon$  используются следующие факты и предположения.

1. Легко показать, что

$$c = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi n} \sin^2\left(\frac{\pi n a}{l}\right) \left\{ 1 + \epsilon_1 \frac{\epsilon_1 \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n d}{l}\right) + \epsilon_2 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n d}{l}\right)}{\epsilon_2 \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n d}{l}\right) + \epsilon_1 \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n d}{l}\right)} \right\}, \quad (1)$$

где  $c$  — емкость структуры;  $l$  — период структуры ( $\sim 300$  мкм);  $a$  — ширина электродов ( $\sim 100$  мкм);  $d$  — толщина пленки ( $6\text{--}20$  мкм).

2. В области  $T \geq 750^\circ\text{C}$   $\epsilon_1 \gg \epsilon_2$  и, как следует из (1), можно с удовлетворительной точностью восстановить  $\epsilon_1(T)$ .

3. Зная поведение  $\epsilon_1(T)$  при  $T \geq 750^\circ\text{C}$  и учитывая, что  $\epsilon_1(20^\circ\text{C}) = 46$  [11], можно интерполировать  $\epsilon_1(T)$  в область  $T < 700^\circ\text{C}$ . Исполь-

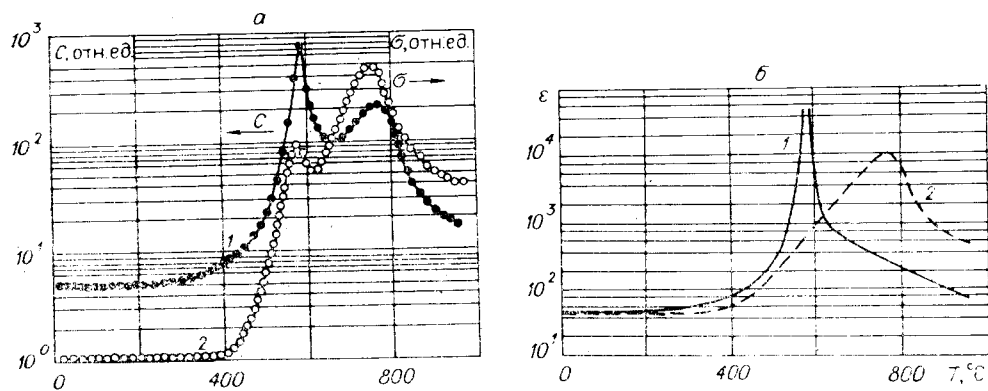


Рис. 3. Температурная зависимость диэлектрических свойств структуры  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3/\text{LiTaO}_3$ :

$a$  — экспериментальные результаты для емкости (1) и проводимости (2);  $b$  — зависимость диэлектрической проницаемости подложки (1) и пленки (2), расчет

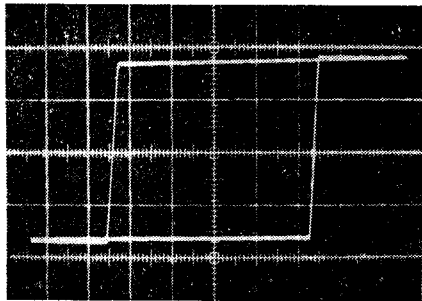


Рис. 4. Диэлектрический гистерезис пленки  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3$ :  
 $T = 750^\circ\text{C}$ ,  $f = 60$  Гц,  $P_s \approx 0,46$  Кл/м<sup>2</sup>,  $E_c \approx 2,3 \cdot 10^5$  В/м

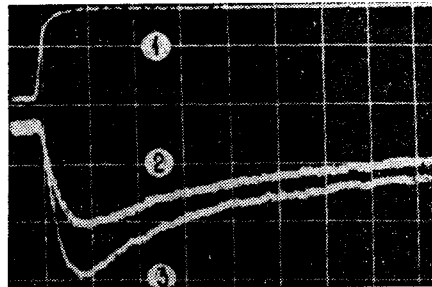


Рис. 5. Осциллограмма пироэлектрического сигнала структуры  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3/\text{LiTaO}_3$ :  
 1 — импульс света; пироэлектрический отклик при воздействии импульса света: со стороны пленки (2), со стороны подложки (3); X:  $5 \cdot 10^{-5}$  с/дел.

зую эту интерполяцию, нетрудно восстановить поведение  $\epsilon_2(T)$  в указанной температурной области. Отметим, что, как видно из (1) (даже в области, где  $\epsilon_2 \gg \epsilon_1$ ), для используемых соотношений между толщинами пленок и периодом решетки вклад  $\epsilon_1$  всегда существен и, более того, он ограничивает емкость структуры сверху. Результаты расчетов диэлектрических проницаемостей пленки и подложки представлены на рис. 3, 6.

Поведение структуры в сильных электрических полях исследовалось при  $T \geq 750^\circ\text{C}$ , где влияние подложки мало, поскольку при этих температурах она находится в параэлектрической фазе.

Для измерений использовался гистерограф с компенсацией полной проводимости исследуемого образца. Типичная осциллограмма зависимости спонтанной поляризации  $P_s$  от величины электрического поля  $E$  представлена на рис. 4.

Анализ петель диэлектрического гистерезиса показывает, что у пленок  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3$  на  $\text{LiTaO}_3$  (1210) при  $750\text{--}800^\circ\text{C}$  напряженность коэрцитивного поля составляет  $(2\text{--}3) \cdot 10^5$  В/м и  $P_s = 0,46$  Кл/м<sup>2</sup>. Наблюдаемые выбросы на петлях гистерезиса, по-видимому, обусловлены выбросом заряда с мелких ловушек при перераспределении приложенного электрического поля, связанного с уменьшением импеданса сегнетоэлектрика в момент реполяризации [1].

**Пироэлектрические свойства.** Измерения пироэлектрических свойств пленок выполнялись методом теплового импульса и низкочастотной синусоидальной модуляции температуры на установках, описанных ранее [12]. В измерениях использовались структуры с осью  $C$ , нормальной к плоскости подложки; в качестве электродов применялись пленки хрома (толщиной  $\sim 10^{-7}$  м и площадью  $(1\text{--}3) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>), изготовленные методом термического напыления.

Типичная осциллограмма импульсных пироэлектрических сигналов представлена на рис. 5. Анализ поведения импульсного пироэлектрического токового отклика структуры, возникающего при действии на нее импульса света как со стороны пленки, так и со стороны подложки, показал, что спонтанная поляризация пленки ориентирована так же, как и поляризация в подложке, а оценка пироэлектрического коэффициента пленок по начальному наклону токового отклика составляет  $\gamma \approx 0,77 \times \gamma_{\text{под}} \approx 1,4 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> · град. Полученное значение хорошо согласуется с величиной  $\gamma = 1,57 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> · град, характерной для твердых растворов того же химического состава [11], что свидетельствует о высоком качестве эпитаксиальной структуры.

Спад пироэлектрического отклика во времени с  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-4}$  с, а также нелинейная зависимость пироэлектрического напряжения от сопротивления нагрузки при измерениях на инфранизких частотах модуляции температуры указывают на существование в исследуемой структуре слоя

несегнетоэлектрической природы. Отсутствие задержки токового отклика во времени относительно импульса света (менее  $10^{-8}$  с) при поглощении света электродами как со стороны пленки, так и со стороны подложки показывает, что этот слой находится на границе пленка — подложка.

**Электрооптические свойства.** Исследование электрооптических свойств структуры выполнено методами интегральной оптики. Ввод излучения He — Ne-лазера ( $\lambda = 0,63$  мкм) в плоский волновод осуществлялся с помощью призмы из фосфида галлия, а вывод — через полированный торец структуры.

Измерения интенсивности выходящего света в зависимости от длины оптического пути в волноводе показали, что интегральные потери света не превышают 6 дБ/см, причем основное рассеяние происходит на отдельных локальных макроскопических неоднородностях типа свилей. Измерения, выполненные при длинах оптического пути менее 1 см, показывают, что на этих масштабах потери интенсивности света не превышают 2 дБ/см.

Оценки показателей преломления пленок  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3$  по измерениям углов ввода излучения (с точностью  $\sim 1$  угл. мин) при использовании условия близости показателей преломления пленки и подложки составляют  $\sim 2,1867$  для обыкновенного и  $\sim 2,1859$  для необыкновенного показателей преломления.

Измерения электрооптических свойств выполнены при приложении электрического поля к электродам, напыленным на поверхность структуры в виде параллельных полосок с зазором  $\sim 0,3$  мм на установке, блок-схема которой представлена в [13].

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что значения эффективного поперечного электрооптического коэффициента достигают величины  $\sim 2 \cdot 10^{-9}$  м/В в пленках состава  $\text{Nb}/\text{Ta} = 1/9$ . Высокая линейность индуцированного двулучепреломления в зависимости от амплитуды измерительного электрического поля ( $3 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^5$  В/м) указывает на высокую монокристалличность исследуемых гетероэпитаксиальных пленок.

**Заключение.** Методом капиллярной жидкофазной эпитаксии созданы планарные тонкопленочные структуры твердых растворов ниобата — танталата лития на подложках из танталата лития.

Эпитаксиальные пленки монокристалличны и обладают высоким структурным совершенством, что позволяет использовать их при создании устройств интегральной оптики.

Исследование диэлектрических, пьезоэлектрических и электрооптических свойств пленок  $\text{Li}(\text{Nb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9})\text{O}_3$  показало, что они обладают размытым фазовым переходом в области  $750-800^\circ\text{C}$  и проявляют типичные сегнетоэлектрические свойства с высокими значениями пьезоэлектрического и электрооптического коэффициентов.

Авторы благодарны Э. Г. Косцову за полезные дискуссии при обсуждении результатов работы и В. В. Пашкину за помощь в проведении электрооптических измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы.— М.: Мир, 1981.
2. Рез И. С. Новые неорганические материалы и их роль в обеспечении прогресса электроники и смежных областей // Журн. Всесоюз. хим. об-ва.— 1982.— № 3.
3. Окаяма М., Хамакава И. Тонкие сегнетоэлектрические пленки  $\text{PbTiO}_3$  и ЦТСЛ и их применение // Автометрия.— 1986.— № 2.
4. Анцыгин В. Д., Косцов Э. Г. Тонкопленочные приемники излучения на основе сегнетоэлектриков.— Новосибирск, 1986.— (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАиЭ; 311).
5. Хачатурян О. А., Мадоян Р. С., Авакян М. С. Эпитаксиальные пленки ниобата лития.— Ереван: АрмНИИ НТИ, 1984.
6. Алешин В. А., Мухортов В. М., Головки Ю. И. и др. Доменное строение гетероэпитаксиальных сегнетоэлектрических пленок  $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ , полученных ВЧ-кашодным распылением // ФТТ.— 1983.— Т. 32, № 2.

7. Madoyan R. S., Sarkisyan G. N., Khachaturyan O. A. Growth, x-ray structure and optical investigation of epitaxial films of solid solutions of lithium niobate — tantalate // *Cryst. Res. Technol.*— 1985.— V. 20, N 8.— P. 1031.
8. Panish M. B., Sumski S. A capillary liquid film technique for solution epitaxy of III — V compounds // *J. Cryst. Gr.*— 1971.— V. 11, N 1.— P. 101.
9. Болховитянов Ю. Б., Болховитянова Р. И., Мельников П. Л. Получение тонких пленок GaAs из раствора, находящегося в зазоре между подложками // *Изв. АН СССР. Неорг. материалы.*— 1973.— Т. 9, № 6.
10. *Акустические кристаллы*/Под ред. М. П. Шаскольской.— М.: Наука, 1982.
11. Wang Hong, Wang Ming. The piezoelectric, pyroelectric, dielectric and elastic properties of single crystal  $\text{LiNb}_{0,1}\text{Ta}_{0,9}\text{O}_3$  // *J. Cryst. Gr.*— 1986.— V. 79, N 1—3.— P. 527.
12. Андцыгин В. Д., Косцов Э. Г., Соколов А. А. Пироэлектричество в тонких сегнетоэлектрических пленках // *Автометрия.*— 1986.— № 2.
13. Antsigin V. D., Kostsov E. G., Malinovsky V. K., Sterelyukhina L. N. Electrooptics of thin ferroelectric films // *Ferroelectrics.*— 1981.— V. 38, N 1—4.— P. 761.

*Поступила в редакцию 30 декабря 1987 г.*

УДК 537.82.384.3 : 536.53

М. ОКАЯМА, Дж. ОНИШИ, И. ТОГАМИ, Ю. ХАМАКАВА

(Осака, Япония)

### НЕОХЛАЖДАЕМЫЙ ПЗС-ПРИЕМНИК ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА $\text{LiTaO}_3$

**Введение.** В последнее время привлечено большое внимание к визуализации ИК-изображений, поскольку пространственное распределение температуры или инфракрасное отображение объектов в термографии и дистанционной локации может быть легко получено таким способом. Для данных задач ранее предложены фото- и термоприемники ИК-изображения. Фотонные приемники имеют большую обнаружительную способность, на их основе сделаны линейные матрицы и ИК-ПЗС [1—4]. Для получения ИК-изображений используются  $\text{HgCdTe}$ ,  $\text{InSb}$  и барьер Шоттки на Si, однако все они должны охлаждаться до очень низких температур. С другой стороны, тепловые приемники такие, как болометры, пироэлектрические детекторы и термобатареи [5], могут работать даже при комнатной температуре и очень удобны для широкой области применения несмотря на то, что их обнаружительные способности меньше. Пироэлектрические приемники обладают максимальной обнаружительной способностью среди тепловых приемников и пригодны для преобразования ИК-изображений. Сегнетоэлектрические материалы: PZT-керамика, керамика  $\text{PbTiO}_3$ , тонкие пленки  $\text{PbTiO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  — проявляют хорошие пироэлектрические свойства [6—8]. В [9] разработан пироэлектрический видикон — преобразователь ИК-изображения, имеющий, однако, высокие управляющие напряжения и большие размеры. Если пироэлектрическое считывание совместить с Si-ПЗС, управляющимся малыми напряжениями, возможна была бы реализация приемника ИК-изображений, имеющего хорошие характеристики. Осаждение тонких пленок сегнетоэлектриков на поверхность кремниевого ПЗС разрешило бы задачу их объединения, однако высокие температуры подложки в процессе осаждения пленки выводят из строя Si-ПЗС. Поэтому мы предложили соединить кремниевый ПЗС с  $\text{LiTaO}_3$  при комнатной температуре [10].

В данной работе описывается принцип действия, изготовление и основные характеристики нового пироэлектрического ИК-ПЗС, состоящего из Si-ПЗС, соединенного с монокристаллом  $\text{LiTaO}_3$ .

**Структура и принцип действия ИК-ПЗС.** На рис. 1 показано устройство одного элемента ИК-ПЗС. Кристаллическая пластинка  $\text{LiTaO}_3$  прикрепляется к Si-ПЗС через слой глицерина, причем в области контакта с ПЗС обеспечивается зеркально-полированная поверхность.  $\text{LiTaO}_3$  про-