

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 ПЭС-ПРИЕМНИК ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА 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-ПЭС [1—4]. Для получения ИК-изображений используются HgCdTe , 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 PbTiO_3 , тонкие пленки PbTiO_3 и 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-ПЭС, управляющимся малыми напряжениями, возможна была бы реализация приемника ИК-изображений, имеющего хорошие характеристики. Осаждение тонких пленок сегнетоэлектриков на поверхность кремниевого ПЭС разрешило бы задачу их объединения, однако высокие температуры подложки в процессе осаждения пленки выводят из строя Si-ПЭС. Поэтому мы предложили соединить кремниевый ПЭС с LiTaO_3 при комнатной температуре [10].

В данной работе описывается принцип действия, изготовление и основные характеристики нового пироэлектрического ИК-ПЭС, состоящего из Si-ПЭС, соединенного с монокристаллом LiTaO_3 .

Структура и принцип действия ИК-ПЭС. На рис. 1 показано устройство одного элемента ИК-ПЭС. Кристаллическая пластинка LiTaO_3 прикрепляется к Si-ПЭС через слой глицерина, причем в области контакта с ПЭС обеспечивается зеркально-полированная поверхность. LiTaO_3 про-

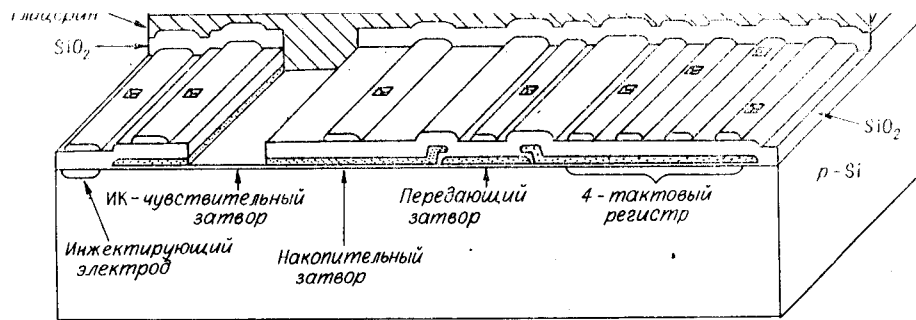


Рис. 1

являет хорошие пьезоэлектрические свойства благодаря большому пьезоэлектрическому коэффициенту ($2,3 \cdot 10^{-8}$ Кл/см \cdot К), относительно малой диэлектрической постоянной ($\epsilon_r = 54$) и высокой температуре Кюри (628°C). Электрод из тонкой пленки NiCr, поглощающей инфракрасный свет, сформированный на другой шероховатой поверхности кристалла LiTaO₃ путем обычного вакуумного испарения, электрически соединялся с кремниевой подложкой. Si-ПЗС имеет 64×32 ИК-чувствительных МОП-затвора, которые управляют сигнальными зарядами, возникающими вследствие пьезоэлектрического эффекта в LiTaO₃. Между ними получается хорошее диэлектрическое соединение, так как глицирин, помещенный между Si-ПЗС и LiTaO₃, имеет большую диэлектрическую постоянную $\epsilon_r = 42,5$. Более того, глицирин отличается малой теплопроводностью $2,85 \cdot 10^{-3}$ Вт/см \cdot К при $10-70^\circ\text{C}$, тогда как у Si теплопроводность большая — $0,84$ Вт/см \cdot К, а у LiTaO₃ — $3,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/см \cdot К. Таким образом, тепло, возникающее в NiCr — LiTaO₃ под действием ИК-облучения, плохо передается через глицирин в кремниевую подложку и может эффективно накапливаться в LiTaO₃. Это приводит к увеличению пьезоэлектрического сигнала вследствие роста скорости изменения температуры. Если инфракрасное изображение фокусируется на LiTaO₃-компоненте ИК-ПЗС, в LiTaO₃ индуцируется пьезоэлектрический заряд из-за роста температуры, что вызывает соответствующее изменение напряжения, которое модулирует поверхностный потенциал цепочек МОП-затворов через последовательно соединенные емкости пленок SiO₂ и глицирина. Поперечный разрез одного элемента ИК-ПЗС приведен на рис. 2. Профили потенциала края зоны проводимости кремния на границе раздела SiO₂ — Si под цепочкой управляющих затворов также показаны в нижней части рис. 2. На стадии передачи сигнального заряда затвор $V_{\text{гн}}$ соединен с накопительным затвором и не играет существенной роли.

Заряд поступает из области обеднения кремния под пьезоэлектрическим затвором в область накопительного затвора при подаче импульса напряжения на инжектирующий электрод после прекращения ИК-облучения. Кроме того, сигнальные заряды переносятся на передающие затворы (64×32 элемента) и перемещаются на выход путем подачи четырехтактных тянущих импульсов.

Изменения поверхностного потенциала, индуцированного пьезоэлектрическим зарядом. Чтобы изучить выходной сигнал ИК-ПЗС и оптимизировать толщину LiTaO₃, вычислялись изменения поверхностного потенциала кремния под пьезоэлектрическим затвором. Исследуемая структура представляет собой последовательное соединение LiTaO₃ и SiO₂ — Si, поэтому приращение заряда, индуцированное в LiTaO₃, делится между LiTaO₃ и SiO₂ — Si. Зависимости изменения пьезоэлектрического заряда (ΔQ) и изменения заряда в слое обеднения кремния от приращения при-

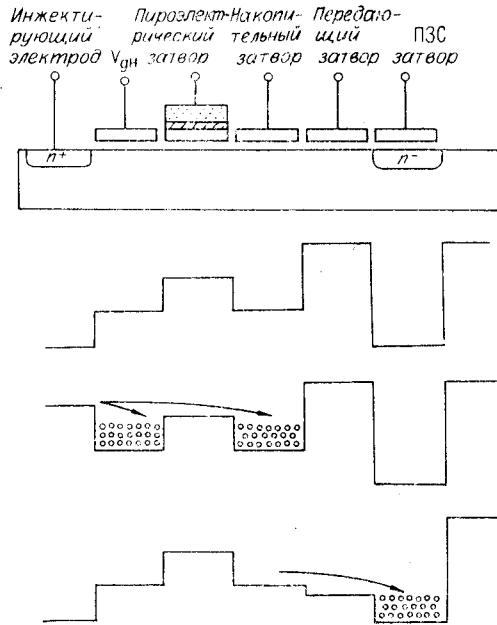


Рис. 2

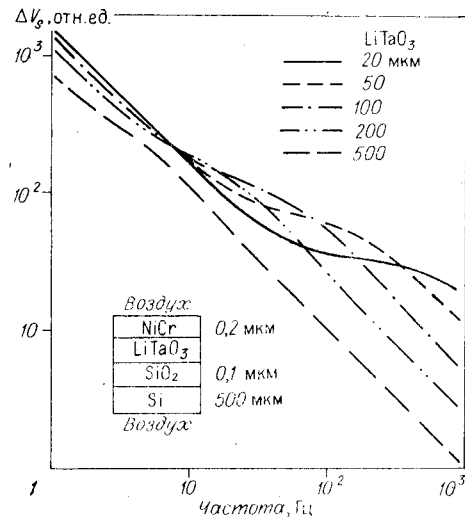


Рис. 3

ложенного к структуре напряжения выражаются следующим образом:

$$\Delta Q = C_{LT}\Delta V_{LT} + C_I\Delta V_I; \quad (1)$$

$$\Delta Q_s = C_s\Delta V_s; \quad (2)$$

$$\Delta V_{LT} = \Delta V_I + \Delta V_s, \quad (3)$$

где C_{LT} , C_I и C_s — емкости LiTaO_3 , SiO_2 и слоя обеднения кремния; ΔV_{LT} , ΔV_I и ΔV_s — соответствующие напряжения на этих слоях. Емкостью слоя глицерина пренебрегаем, поскольку его диэлектрическая постоянная очень большая, причем эта емкость может быть еще увеличена путем прижатия LiTaO_3 и уменьшения толщины глицерина. Из (1)–(3), учитывая C_s , можно получить изменение поверхностного потенциала ΔV_s , которое прямо пропорционально выходному сигналу устройства:

$$\Delta V_s = \Delta Q / \{C_{LT}C_s(C_{LT}^{-1} + C_I^{-1} + C_s^{-1})\}. \quad (4)$$

Если структура освещается модулированным инфракрасным светом, ΔQ пропорционально токовой чувствительности и интенсивности света и обратно пропорционально частоте прерывания. Токовая чувствительность вычисляется посредством решения уравнения распространения тепла в структуре воздух — NiCr — LiTaO_3 — Si — SiO_2 — воздух [11, 12]. Толщины пленок NiCr , SiO_2 и кремниевой пластинки 0,2; 0,1 и 500 мкм соответственно. На рис. 3 показано изменение поверхностного потенциала ΔV_s , вычисленное с использованием (4), в зависимости от частоты модуляции: параметр — толщина LiTaO_3 . Если ширина слоя LiTaO_3 достаточно большая (например, 500 мкм), ΔV_s обратно пропорционально частоте и описывается теорией пироэлектричества. Когда ширина слоя LiTaO_3 уменьшается, ΔV_s несколько увеличивается с уменьшением частоты в области низких частот. Однако этот процесс ограничен, поскольку потери тепла в кремниевую подложку начинают расти и скорость изменения температуры, индуцированной инфракрасным светом, становится относительно малой. Если ИК-ПЗС работает в области частоты обычной кадровой развертки (например, 30 Гц), максимальный выходной сигнал получается при толщине кристалла LiTaO_3 от нескольких десятков до сотен микрон. Эта величина в данной работе составляла 80 мкм.

Основные характеристики структуры металл — LiTaO_3 — глицерин — SiO_2 — Si . Емкость структуры металл — LiTaO_3 — глицерин — SiO_2 — Si

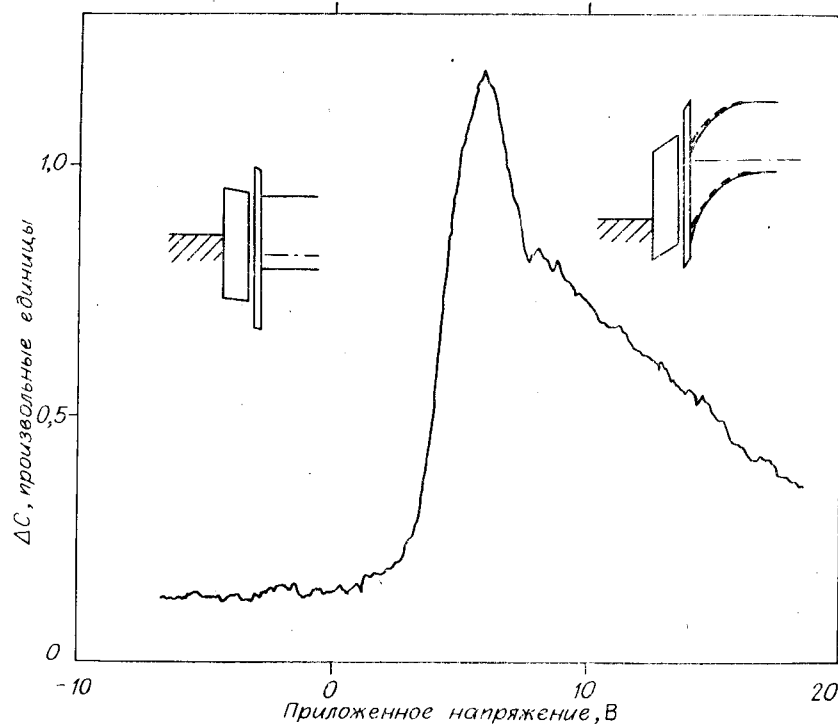


Рис. 4

(MLGOS) (пироэлектрический затвор) измерялась при частоте 1 МГц и изучалось поведение поверхностного потенциала кремния, индуцированного пироэффектом в LiTaO_3 . Пластинка LiTaO_3 шириной порядка 80 мкм прикреплялась к структуре $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ глицерином, и покрытая слоем NiCr поверхность LiTaO_3 прижималась тонкой металлической проволокой. Толщины слоя SiO_2 и пластинки Si равнялись 100 нм и 500 мкм соответственно; использовался кремний *p*-типа. Зеркально-полированная поверхность LiTaO_3 прижималась к кремниевой подложке, а шероховатая поверхность покрывалась пленкой NiCr.

Электрическая емкость MLGOS-структуры почти не зависит от напряжения, и приращение емкости ΔC , вызванное облучением, очень мало, потому что емкость LiTaO_3 много меньше, чем емкость $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ МОП-структуры, которая изменяется при приложении напряжения. Описанная MLGOS-структура освещалась прерываемым светом CO_2 -лазера малой интенсивности, увеличивающим температуру LiTaO_3 , но не вызывающим фотогенерацию носителей в Si. Приращение пироэлектрического заряда кристалла LiTaO_3 влияет на ширину области обеднения Si и изменяет ее емкость. В результате суммарная емкость структуры модулируется емкостью области обеднения, индуцированной инфракрасным облучением.

ΔC измерялось синхронным усилителем в зависимости от приложенного напряжения при частоте модуляции 40 Гц (рис. 4). Отметим, что эти кривые различны для разных образцов вследствие разброса толщины глицерина и имеют гистерезис из-за наличия поверхностных состояний на границе раздела Si — SiO_2 . ΔC мало при отрицательных напряжениях, так как в этом случае в области границы $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ формируется слой обогащения и емкость практически не зависит от приложенного напряжения. При положительных напряжениях ΔC большое и сильно зависит от приложенного напряжения, так как около границы раздела Si — SiO_2 создается область обеднения и пироэлектрический заряд изменяет суммарную емкость. ΔC уменьшается при достаточно больших приложенных напряжениях, поскольку формируется инверсионный слой. На

Рис. 5

рис. 5 приведено изменение ΔC в зависимости от частоты модуляции. ΔC почти постоянно при частоте модуляции от 8 до 20 Гц, но уменьшается с дальнейшим ростом частоты. Считается, что эта частотная зависимость характерна для пироэлектрического отклика. Таким образом, поверхностный потенциал кремния в

MLGOS-структуре управляется пироэффектом, что доказывает возможность существования ИК-чувствительности в предложенных ИК-ПЗС.

Основные характеристики ИК-ПЗС. Si-ПЗС, объединенный с LiTaO_3 , управлялся одиннадцатью сериями тактовых импульсов. На рис. 6 приведена временная диаграмма тянущих импульсов для инжекции заряда Φ_I , передачи заряда на накопительный затвор Φ_T , вертикальных переходов Φ_{C1} , Φ_{C2} , Φ_{C3} и Φ_{C4} , горизонтальных переходов $\Phi_{\delta 1}$, $\Phi_{\delta 2}$, $\Phi_{\delta 3}$, $\Phi_{\delta 4}$ и установления выхода Φ_R . Прежде всего, пироэлектрический затвор управляет поверхностным потенциалом Si при воздействии ИК-облучения на LiTaO_3 (см. рис. 2). Заряд перетекает из инжектирующего электрода через область пироэлектрического затвора в область накопительного затвора при подаче Φ_I . Заряд, сосредоточившийся под накопительным затвором, переходит в область передающего затвора при подаче Φ_T . Этот заряд передается на выход посредством четырехтактных импульсов для вертикальных и горизонтальных переходов Φ_{C1} , Φ_{C2} , Φ_{C3} , Φ_{C4} и $\Phi_{\delta 1}$, $\Phi_{\delta 2}$, $\Phi_{\delta 3}$, $\Phi_{\delta 4}$. Устанавливающий импульс Φ_R удаляет оставшийся заряд в области выходного затвора перед передачей заряда в следующем цикле. Выходной сигнал сформированного ИК-ПЗС обрабатывался в описанных ниже схемах. На рис. 7 показана система образования ИК-изображения и обработки сигнала. Сигналы с основного и опорного выходов ИК-ПЗС подавались на дифференциальный усилитель, затем результирующий сигнал был преобразован схемой выборки и хранения, оцифрован на АЦП и введен в микрокомпьютер. Сигнал обрабатывался микрокомпьютером и визуализировался на ЭЛТ.

На рис. 8 приведены осциллограммы выходного сигнала дифференциального усилителя с ИК-облучением (а) и без ИК-облучения (б). Масштаб по вертикали 0,1 В/дел., по горизонтали 20 мкс/дел. Отрицательные участки выходного сигнала, преобразованные схемой выборки и хранения, отражают воздействие ИК-облучения. На рис. 9 показаны

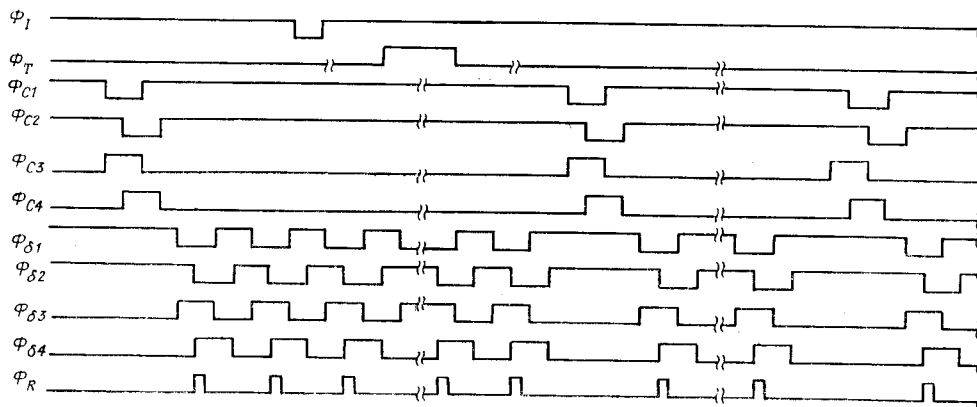
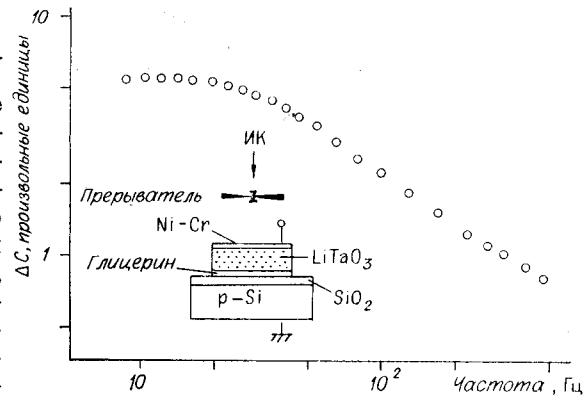


Рис. 6



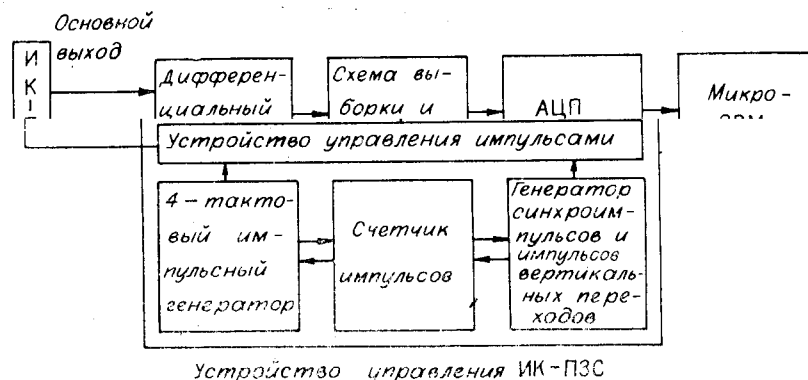


Рис. 7

серии импульсов усиленных выходных сигналов (обратной полярности), соответствующих некоторой горизонтальной цепочке Si — ПЗС после облучения (а) и после выключения (б). Этим облучением являлось слабое излучение CO₂-лазера. Пик серии импульсов сразу после облучения имеет полярность, противоположную пику, который возникает после выключения. Такое поведение присуще только пироэффекту. После обработки сигнала на АЦП и микрокомпьютере изображение пятна получено на ЭЛТ.

Время задержки и зависимость выходного сигнала от толщины глицерина. Чтобы оптимизировать инжекцию заряда в накопительный затвор, измерялись выходные сигналы как функция синхронизации. На рис. 10, а показана часть выходного сигнала, измеренная как функция времени задержки, начиная с определенного момента периода. Частота прерывания составляла 14 Гц, что меньше обычной частоты кадровой развертки (30 Гц). Температура пластинки LiTaO₃ постепенно возрастает со временем и выходит на предельное значение, соответствующее интенсивности ИК-излучения. Затем температура резко уменьшается, когда облучение прекращается. Изменение температуры при ИК-облучении анализировалось путем численного решения уравнения распространения тепла в одномерной структуре воздух — LiTaO₃ — глицерин — кремний — воздух. Рис. 10, б иллюстрирует изменение температуры во времени. Измеряемый сигнал возрастает (в соответствии с вычислениями), но выходит на насыщение и немного уменьшается после максимума. Поэтому следует учитывать спад сигнала, связанный с электрической RC-цепью, хотя для идеальной схемы MLGOS-структуры характерен только

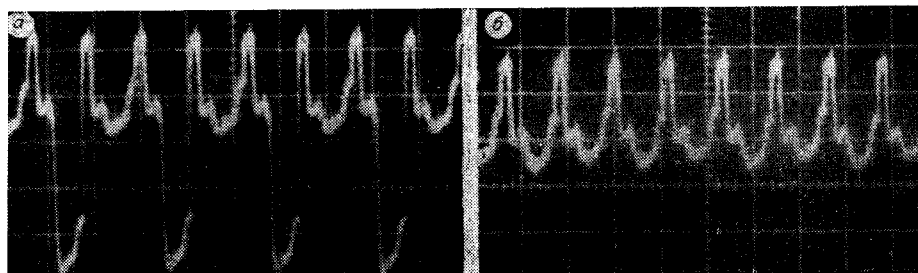


Рис. 8

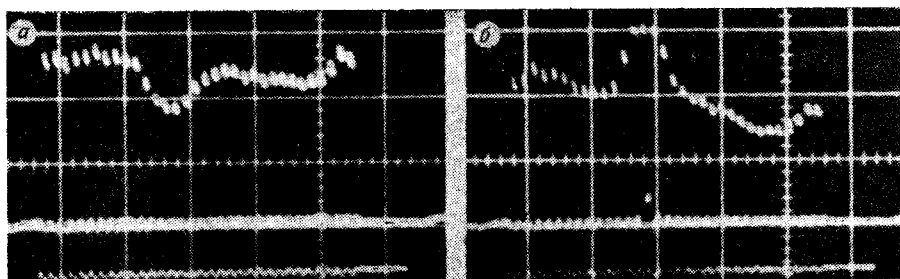


Рис. 9

небольшой спад вследствие большого сопротивления LiTaO_3 . В реальной структуре этот спад возникает из-за малых токов утечки через глицерин, который окружает всю поверхность LiTaO_3 и играет роль сопротивления, параллельного LiTaO_3 . Кривая (см. рис. 10, в), вычисленная при наличии последовательного сопротивления в 10 МОм, объясняет экспериментальные данные, хотя на возрастающем участке наблюдаются небольшие расхождения между экспериментом и вычисленной кривой.

Кроме того, измерены максимальные выходные сигналы за время кадровой развертки при изменении частоты модуляции. На рис. 11 показано максимальное значение сигнала как функция частоты модуляции. Сплошные линии на рис. 11 — теоретические кривые, вычисленные путем решения уравнения распространения тепла и RC -цепи. Измеряемые кривые хорошо совпадают с расчетом, выполненным для толщины глицерина 10 мкм. Сигналы возрастают, когда частота уменьшается от 100 Гц, но скорости их роста падают при частоте менее 60 Гц вследствие потери тепла в кремниевую подложку. Вычисленные величины амплитуды сигнала растут с уменьшением толщины глицерина. Поэтому можно ожидать значительного увеличения выходного сигнала при уменьшении толщины глицерина.

Обсуждение и выводы. Сформирован ИК-ПЗС, состоящий из пироэлектрического кристалла LiTaO_3 , приклеенного глицерином к Si-ПЗС. Изучались основные свойства MLGOS-структуры (металл — LiTaO_3 —

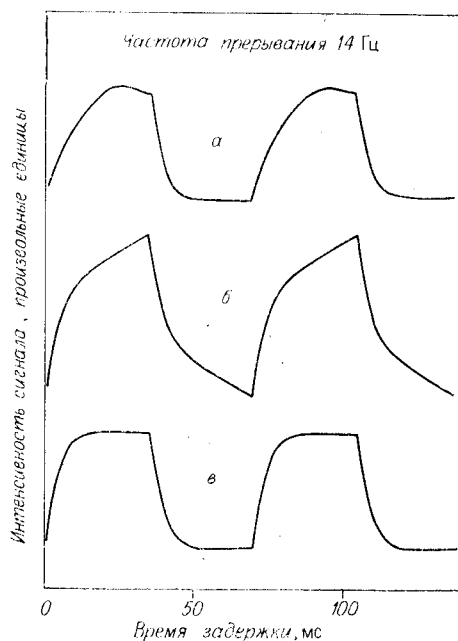


Рис. 10

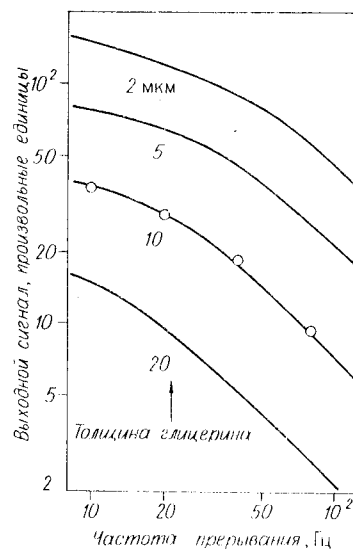


Рис. 11

глицерин — оксид — кремний) путем анализа ее емкости, и управляемость поверхностного потенциала Si была подтверждена. Измерялись и анализировались основные характеристики ИК-ПЗС (зависимости выходного сигнала от частоты прерывания и толщины глицерина). Эти результаты описываются уравнением теплопроводности с учетом RC-цепи MLGOS-структуры. ИК-ПЗС использовался в системе преобразования ИК-изображения, и визуализировалось инфракрасное изображение светового пятна после обработки сигнала.

Выходной сигнал не достаточен для образования детального ИК-изображения; разброс выходных сигналов отдельных элементов также велик. Предполагается, что эти недостатки возникают из-за нестабильности поверхностного потенциала на границе SiO_2 — Si в пироэлектрическом затворе, вызванной неконтролируемыми примесями, проникшими к границе раздела. Таким образом, чтобы достичь максимальной чувствительности элементов, поверхность кремния должна быть стабилизирована либо путем ее очистки, либо с помощью покрытий.

Авторы благодарят М. Кимата и М. Денда из Электрической корпорации Мицубиси за изготовление Si-ПЗС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kosonocky W. F., Elabd H. // *Jap. J. Appl. Phys.*— 1983.— V. 22—1.— P. 103.
2. Denda M., Kimata M., Uematsu S. // *Proc. IEEE IEDM*, 1983.— P. 722.
3. Rode J. P., Blackwell J. D., Linebarger R. S., Seib D. H. // *Proc. Advanced Infrared Detectors and Systems*, 1983.— P. 65. (IEE Conf. Publ., N 204).
4. Keenan M. A., Baker I. M., Parsons J. E. e. a. // *Proc. Advanced Infrared Detectors and Systems*, 1983.— P. 54 (IEE Conf. Publ., N 263).
5. Putley E. H. // *Semiconductors and Semimetals*/Ed. by Willardson and Beer.— N. Y.: Academic Press, 1975.— V. 5.
6. Okuyama M., Ohtani K., Ueda T., Hamakawa Y. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves.*— 1985.— V. 6.— P. 74.
7. Beerman H. P. // *Infrared Phys.*— 1975.— V. 15.— P. 225.
8. Landoldt — Bornstein: *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology.*— Berlin — Heidelberg — New York: Springer — Verlag, 1975.— V. 3.— P. 157.
9. Holeman B. R., Wreathhall W. M. // *J. Phys.*— 1971.— V. D4.— P. 1898.
10. Okuyama M., Togami Y., Hamakawa Y. e. a. // *Digest of the 4th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators.*— Tokyo, 1987.— P. 500.
11. Okuyama M., Matsui Y., Seto H., Hamakawa Y. // *Jap. J. Appl. Phys.*— 1980.— V. 20—1.— P. 315.
12. Wu S. Y. // *IEEE Trans. Electron. Devic.*— 1980.— V. ED-27.— P. 88.

Поступила в редакцию 13 января 1988 г.

УДК 621.382 : 537.226.4 : 537.246

И. Л. БАГИНСКИЙ, Э. Г. КОЦОВ

(Новосибирск)

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛ — $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ — SiO_2 —Si

В настоящее время эффект памяти в структурах металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) нашел широкое применение при создании матриц элементов памяти, репрограммируемых электрическим полем. Элементами этих матриц служат МНОП-транзисторы или МОП-транзисторы с плавающим затвором [1, 2]. Эффект памяти обусловлен изменением поля на границе раздела полупроводник — диэлектрик ΔE_c вследствие инжекции носителей заряда из полупроводника на глубокие центры захвата в диэлектрике. Указанный процесс приводит к изменению порога включения МДП-транзистора ΔV_T , которое может сохраняться продолжительное время. Количественной мерой сдвига порога служит