

5. Астратов В. Н., Ильинский А. В., Киселев В. А., Мельников М. Б. Динамика распределения поля и заряда в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ при термической ионизации ловушек // ФТТ.—1983.—25, вып. 9.
6. Астратов В. Н., Ильинский А. В., Фурман А. С. Динамика экранирования электрического поля в фоторефрактивных кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ // Письма в ЖТФ.—1988.—14, вып. 14.
7. Фурман А. С. Динамика экранирования поля в полупроводнике с глубоким примесным уровнем // ФТП.—1988.—22, вып. 12.
8. Астратов В. Н., Ильинский А. В., Мельников М. Б. Влияние предварительного оптического возбуждения ловушек на процессы переноса заряда в $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ // ФТТ.—1983.—25, вып. 7.
9. Peltier M., Micheron F. Volume hologram recording and charge transfer process in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ // J. Appl. Phys.—1977.—48.—P. 3683.
10. Камшилин А. А., Петров М. П. Инфракрасное гашение фотопроводимости и голографическая запись в силикате висмута // ФТТ.—1981.—23, вып. 10.
11. Гудаев О. А., Гусев В. А., Детиненко В. А. и др. Уровни энергии в запрещенной зоне кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ // Автометрия.—1981.—N 5.
12. Астратов В. Н., Ильинский А. В. Прямое исследование распределения поля в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ с помощью поперечного электрооптического эффекта // ФТТ.—1982.—24, вып. 1.
13. Брыксин В. В., Коровин Л. И. Роль нелинейных процессов в формировании приповерхностного фотоиндуцированного заряда в диэлектриках // ФТТ.—1984.—26, вып. 11.
14. Ильин В. П., Куклина Г. Я. Об итерационном решении уравнений переноса заряда в полупроводниках // Автометрия.—1990.—N 1.
15. Ильинский А. В., Куценко А. Б., Мельников М. Б. Эволюция электрического поля в силикате висмута при локальном фотовозбуждении // ЖТФ.—1990.—60, вып. 11.
16. Астратов В. Н., Ильинский А. В., Киселев В. А. Стратификация объемного заряда при экранировании поля в кристаллах // ФТТ.—1984.—26, вып. 9.
17. Ильинский А. В., Куценко А. Б., Мельников М. Б. Релаксация фототока и электрического поля в МДП-структуре на основе силиката висмута // ФТТ.—1988.—30, вып. 6.
18. Брыксин В. В., Коровин Л. И., Петров М. П., Хоменко А. В. Теория явления динамической селекции изображений в фоторефрактивных средах // ФТТ.—1982.—24, вып. 2.

Поступила в редакцию 18 декабря 1990 г.

УДК 621.382:537.226.4:537.246

М. Окуяма, А. Фуйисава, Н. Исака, Й. Хамакава

(Осака, Япония)

ВЫРАЩИВАНИЕ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК PbTiO_3 НА ПОДЛОЖКЕ SiO_2/Si

Введение. Сегнетоэлектрическим тонким пленкам в последнее время уделяется много внимания, так как они могут иметь широкий спектр применений: в интегральной памяти [1, 2], инфракрасных датчиках [3—5], ультразвуковых датчиках [6] и оптических устройствах [7, 8].

Пленки PbTiO_3 обладают хорошими сегнетоэлектрическими свойствами. Тонкие пленки PbTiO_3 изготавливаются различными методами, такими, как радиочастотное распыление [9], химическое осаждение [10—12], разложение органометаллических компаундов [13] и золь-гель метод [14]. Когда подложками являются окисные кристаллы, например MgO и SrTiO_3 , выращиваются эпитаксиальные или ориентированные по оси с пленки, обладающие значительно лучшими сегнетоэлектрическими свойствами, нежели поликристаллические пленки на кремниевых (Si) или платиновых (Pt) подложках [15—18]. Для широкого применения необходимо, чтобы сегнетоэлектрические тонкие пленки осаждались на кремниевую подложку при низкой температуре.

Нами исследовались тонкие пленки PbTiO_3 , выращенные эпитаксиально путем электронно-лучевого испарения на кремниевую подложку, покрытую CaF_2 или SrF_2 при $400\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ [19]. Пленки, полученные на CaF_2 и SrF_2 , ориентированы в плоскостях (101) и (110), и (100) соответственно. Эпитаксиальные пленки PbTiO_3 осаждались и на пленку MgAl_2O_4 , ориентированную в плоскости (100), предварительно напыленную на кремниевую подложку при $980\text{ }^\circ\text{C}$ [20]. Однако под этими пленками нет хорошего электрода, и, кроме того, для монокристаллического устройства желательно осаждение пленки SiO_2 на подложку $\text{Si}(\text{SiO}_2/\text{Si})$. Нами сделана попытка выращивать пленки PbTiO_3 на SiO_2/Si путем катодного распыления [19]. Пленки в этом случае были текстурированы, но состояние плазмы нестабильно, так как электрический потенциал плазмы легко изменяется из-за аномального разряда, смены геометрического расположения компонент технологической оснастки и загрязнений в камере распыления. Нами осаждались платиновые пленки, ориентированные в плоскости (100), на SiO_2/Si -подложку. Затем на них выращивались путем радиочастотного распыления пленки PbTiO_3 , ориентированные в плоскостях (100) и (001). Кроме того, текстурированные пленки PbTiO_3 осаждались на подложку Si и путем реактивного испарения Pb и Ti в атмосфере кислорода.

1. Осаждение текстурированных пленок на пленку Pt с подложкой SiO_2/Si . 1.1. *Выращивание предпочтительно ориентированных тонких пленок Pt.* Известно, что пленка Pt , выращенная на стеклянной подложке катодным распылением в атмосфере Ar при наличии O_2 , текстурирована [21]. Платиновая пленка была напылена нами на подложке SiO_2/Si в такой же атмосфере катодным распылением. Пленка SiO_2 толщиной ~ 200 нм выращена термически на подложке Si , ориентированной в плоскости (100). Она покрывалась очень тонким слоем Ti для улучшения адгезии Pt на SiO_2 . Мишень (платиновая пластина диаметром 80 мм) размещалась на верхнем электроде технологической установки (ANELVA SPM-112), подложка — на нижнем электроде. Она находилась под положительным потенциалом и не нагревалась. Радиочастотное напряжение и ток для распыления составляли 1,44 кВ и 150 мА соответственно. Рабочее давление — 0,1 Торр. Толщина осаждаемой платиновой пленки — примерно 200 нм, ее текстура соответствует плоскости (111). Однако направление кристаллитов пленки изменяется при приложении напряжения смещения $0 \sim 120$ В. Рентгенограммой показаны ориентации (111) и (200), причем линия (200) кардинально изменяется при изменении напряжения смещения. На рис. 1 приведено отношение интенсивности (200) к суммам (200) и (111), оно увеличивается при повышении напряжения смещения и имеет максимум вблизи 40 В. Причина ориентации платиновой пленки при напряжении смещения видится в том, что отрицательные ионы кислорода бомбардируют подложку и влияют таким образом на рост кристалла.

1.2. *Выращивание PbTiO_3 на платиновой пленке путем ВЧ-распыления.* Тонкие пленки PbTiO_3 осаждались на платиновую пленку на подложке SiO_2/Si магнетронным распылением. Мишенью был порошок PbTiO_3 , помещенный на кварцевую пластину диаметром 80 мм. Это спекшаяся смесь Pb_3O_4 и TiO_2 , причем Pb_3O_4 на 10 мол. % больше. Условия

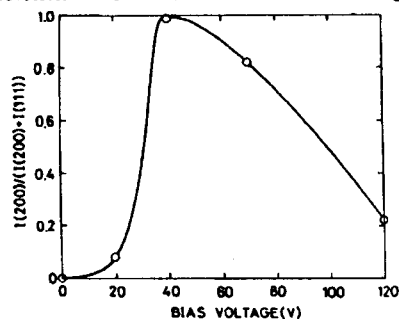
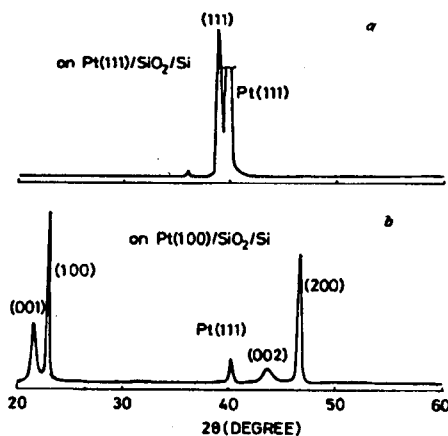


Рис. 1. Соотношение интенсивности линии (200) с суммой интенсивностей линий (200) и (111) в рентгенограмме Pt -пленки как функция постоянного напряжения смещения в процессе ВЧ-распыления

Рис. 2. Рентгенограмма тонкой пленки PbTiO_3 , осажденной на платиновую пленку, ориентированную в плоскостях: *a* — (111); *b* — (100), на подложке SiO_2/Si



распыления практически те же, что и ранее [15]. Под мишень подведены магниты (ANELVA SP-21B), при этом максимальное магнитное поле — 240 Гс. Температура подложки — около 600 °С. Скорость осаждения ~ 5,4 нм/мин. Рентгенограмма пленок, выращенных на платиновой пленке, ориентированной в плоскостях (111) и (100), на подложке SiO_2/Si , показана на рис. 2, *a*, *b* соответственно. Пленка PbTiO_3 , синтезированная на пленке Pt, ориентированной в плоскости (111), также ориентирована в этой же плоскости. На рентгенограмме сегнетоэлектрической пленки, осажденной на пленке Pt, ориентированной в плоскости (100), хорошо видны линии (100), (001), (200) и (002). Считается, что скорость охлаждения пленки после распыления влияет на соотношение линий (001) и (100) из-за разных коэффициентов температурного расширения пленки и подложки [20], хотя изменение соотношения этих линий нами не наблюдалось, когда скорость остывания образца после осаждения увеличилась от 150 до 300 °С/ч. При более резком охлаждении (450 °С/ч), кроме основных линий (100) и (001), появляются и менее четкие линии (101), (110) и (111).

Микроструктура пленки изучалась при помощи сканирующего электронного микроскопа. На рис. 3 показаны вид сверху и поперечный разрез пленки, осажденной на платиновую пленку, ориентированную в плоскости (111). Кристаллиты PbTiO_3 "выстроены" в колонны, и поверхность пленки очень неровная. Горизонтальные размеры, судя по виду сверху, 100—500 нм, разброс их очень велик. На рис. 4 приведены вид сверху и поперечный разрез пленки, осажденной на платиновую пленку, ориентированную в плоскости (100). Горизонтальные размеры 200—300 нм очень однородны. Форма зерен, наблюдаемая на виде сверху, выглядит почти прямоугольной, что соответствует тетрагональной элементарной ячейке кристалла. Поверхность пленки PbTiO_3 на Pt-пленке,

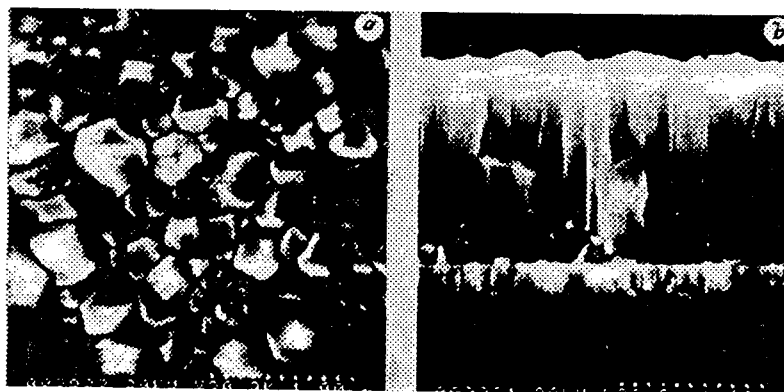


Рис. 3. Микрофотографии: *a* — поверхности, *b* — поперечного сечения тонкой пленки PbTiO_3 , ориентированной в плоскости (111), осажденной на платиновую пленку, ориентированную в той же плоскости, на подложке SiO_2/Si



Рис. 4. Микрофотографии:
a — поверхности, *b* — поперечного сечения тонкой пленки $PbTiO_3$, ориентированной в плоскостях (001) и (100), осажденной на платиновую пленку, ориентированную в основном в плоскости (100), на подложке SiO_2/Si

ориентированной в плоскости (100), несколько более ровная, чем на Pt (111).

1.3. *Электрические свойства пленки $PbTiO_3$.* Был замерен ток через пленку $PbTiO_3$ толщиной 3,3 мкм при напряжении смещения $-100—100$ В. Вольт-амперные характеристики носят диодный характер, они антисимметричны при изменении полярности напряжения, что можно отнести к влиянию процессов реполяризации. Когда напряжение на верхнем электроде пленки меняется от 100 до -100 В, удельное сопротивление пленки меньше $3,3 \cdot 10^{11}$ Ом·см (при электрическом поле между -90 и 150 кВ/см). Оно уменьшается с увеличением приложенного поля, затем увеличивается опять и становится меньше $3,2 \cdot 10^9$ Ом·см при электрическом поле от -240 до -300 кВ/см.

На рис. 5 показана петля диэлектрического гистерезиса, измеренная при $0^\circ C$ в пленке толщиной 1,4 мкм на платиновой пленке, ориентированной в плоскости (100). Она исследовалась с помощью схемы Сойера — Тауэра. Форма петли более прямоугольна по сравнению с формой петли, характерной для неориентированной поликристаллической пленки, осажденной на платиновую пластину. Остаточная поляризация и коэрцитивное поле определены из петли диэлектрического гистерезиса — 19 мкКл/см² и 250 кВ/см соответственно. Остаточная поляризация максимальна при температуре $18^\circ C$ и равна 31 мкКл/см².

2. Выращивание ориентированных пленок реактивным испарением Pb и Ti. Нами испробовано осаждение тонких пленок $PbTiO_3$ реактивным испарением. Осаждение при помощи термического испарения компонент удобно, так как давление в технологической камере может быть очень низким и, следовательно, легко поддержать поверхностную реакцию подачей кислорода к подложке. Более того, можно легко контролировать качество образцов изменением температуры испарителей. Pb и Ti использовались в качестве исходных материалов, так как давление их паров больше, чем у $PbTiO_3$, либо у окислов свинца и титана. Система испарения схематично показана на рис. 6. Гранулы свинца и титановая проволока помещались в две отдельные вольфрамовые лодочки и после

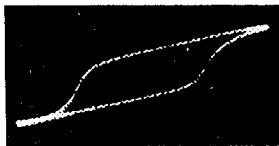
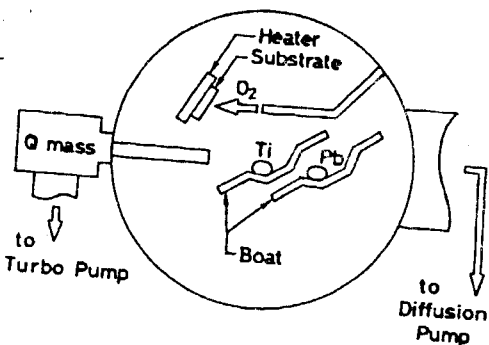


Рис. 5. Петля диэлектрического гистерезиса тонкой пленки $PbTiO_3$, ориентированной в плоскостях (001) и (100), осажденной на платиновую пленку на подложке SiO_2/Si : по вертикали — 32 мкс/см²/дел., по горизонтали — 156 кВ/см/дел.

Рис. 6. Схематический вид системы реактивного испарения

расплавления испарялись. Угол между поверхностью подложки и потоком пара около 70° . Расстояние от подложки до лодочек с Ti и Pb 70 и 80 мм соответственно. Газообразный кислород или кислородные радикалы подводились к подложке через сопло из нержавеющей стали или с помощью ионной



пушки. Испарение производилось при давлении $33 \cdot 10^{-4}$ Торр. Подложка нагревалась до 600°C . Испаряемые компоненты Pb и Ti анализировались квадрупольным масс-спектрометром (ULVAC MSQ-400), вход которого был направлен на источники Ti и Pb. Чувствительность анализа была выше для Pb ($m = 207$), чем для Ti ($m = 48$). Масс-спектрометрический анализ выявил наличие в процессе испарения окислов Pb и Ti.

Пленки окиси свинца росли в атмосфере кислорода при $3 \cdot 10^{-4}$ Торр и 260°C , однако при 400°C они уже не осаждались из-за большой десорбции с поверхности подложки. В пленках, осажденных при 260°C , были обнаружены различные виды окислов свинца: PbO и PbO₂, и Pb₂O₃. Количество испаренного свинца оценивалось по толщине пленки, осажденной при 260°C . Титановые пленки, осажденные при температуре подложки 400°C , не имеют характерных пиков на рентгенограмме и являются аморфными. Количество испаренного титана также оценивалось, исходя из толщины пленок. На рис. 7 показаны скорости осаждения пленок при испарении Ti и Pb, характеризуемые величиной ионных токов масс-спектрометра. Скорость осаждения прямо пропорциональна ионному току. Пересечение линии, соответствующей окиси титана, с осью x происходит не в нулевой точке из-за шумовых сигналов, связанных с различного вида углеводородами.

Кроме того, тонкие пленки PbTiO₃ осаждались одновременным испарением Pb и Ti при $3 \cdot 10^{-4}$ Торр в присутствии кислорода и на кремниевые подложки с естественно окисленной поверхностью. Соотношение испаряемых компонент было постоянным благодаря контролю тока накала испарителя в соответствии с величиной ионного тока масс-спектрометра. Пленки затем отжигались при 650°C в течение 3 ч. Таблица указывает на кристаллографические состояния свежесозаженных и отожженных пленок. Образцы, осажденные при низких температурах, аморфные или мелкокристаллические. Пленки, осажденные при 560°C , являются окислами Ti или смесью PbTiO₃ и окислов Ti, пленки же, осажденные при 400°C , представляют собой смесь перовскитных (101) и пироклорных структур. В случае если соотношение испаряемого Ti к Pb (Ti/Pb) не равно 1, в отожженных пленках содержатся окислы Pb и Ti. Пленка, осажденная при 400°C при выполнении условия Ti/Pb = 1 и отожженная при 650°C , имеет хорошие кристаллические свойства. Свежеизготовленные пленки ориентированы в основном в плоскости (101), хотя механизм роста пока не

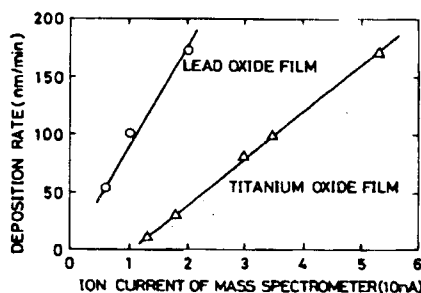


Рис. 7. Скорость осаждения пленок окислов Pb и Ti как функция ионного тока квадрупольного масс-спектрометра

Кристаллическая структура приготовленных пленок

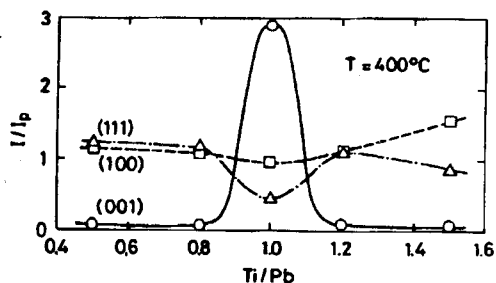
Sub. Temp. (°C)			260	400	560
Ti/Pb	0,5	As-dep	—	Δ Pv(101)+ + O Py	Δ TiO ₂
		Anneal	—	O Pv(ply)+ + O PbO _x	O TiO ₂
	1,0	As-dep	Amorphous	O Pv(101)+ + O Py	Δ Pv(&)+ + Δ Ti ₂ O
		Anneal	O Pv(ply)+ + Δ Pb,TiO _x	Θ Pv(ply)	Δ Ti ₂ O
	1,5	As-dep	—	O Pv(101)+ + O Py	Δ Pv(101)+ + Δ Ti ₂ O
		Anneal	—	O Pv(ply)+ + Δ TiO _x	O Ti ₂ O

П р и м е ч а н и е . Pv — структура перовскита; Py — структура пироклора; Ply — неориентированная структура; (101) — предпочтительная ориентация (101); & — предпочтительная (101)- и (110)-ориентация; кристалличность — $\Theta > O > \Delta$; As-dep — пленки мышьяка; Anneal — отожженные пленки.

ясен. На рис. 8 изображены нормализованные интенсивности, соответствующие плоскостям (100), (001) и (111) при рентгеновской дифракции в пленках, осажденных при 400 °С, как функции соотношения Ti/Pb. Они нормализованы с помощью эталона — порошка PbTiO₃. Интенсивность линий, соответствующая плоскости (001), очень велика в пленке, осажденной при соблюдении соотношения Ti/Pb = 1.

Кислородные радикалы подавались к подложке с помощью ионной пушки. Расстояние между ионной пушкой и подложкой 40 мм, угол между пучком радикалов и поверхностью 45°. Поток кислорода в ионной пушке установлен таким, чтобы можно было получить максимальный ионный ток. Кроме того, для сохранения суммарного давления $3 \cdot 10^{-4}$ Торр дополнительно был подведен кислород при помощи сопла из нержавеющей стали. Пленка, осажденная при 400 °С, является смесью перовскитных и пироклоровых структур. После отжига она становится перовскитной. Пленка, осажденная в присутствии кислородных радикалов, после отжига становится поликристаллической. При этом интенсивность линии (100) возрастает с увеличением напряжения ускорения ионов от 2 до 6 кэВ.

Рис. 8. Нормализованная интенсивность линий (111), (100) и (001) рентгеновской дифракции как функция соотношения испаряемых образцов Ti и Pb, Ti/Pb. Измеренная интенсивность пленки I соотносится с интенсивностью порошка I_p



ВЫВОДЫ

На подложки SiO_2/Si осаждались тонкие пленки PbTiO_3 , ориентированные в основном в плоскостях (111) или (100) и (001). Платиновые пленки осаждались катодным распылением при постоянном напряжении смещения на подложке. При приложении постоянного смещения кристаллическая ориентация слоев изменялась со (111) на (100). Кристаллическая ориентация тонкой пленки PbTiO_3 , выращенной радиочастотным распылением, может наблюдаться по направлениям (111), (100) и (001), соответствующим ориентации платиновой пленки. Тонкая пленка PbTiO_3 также была получена путем реактивного испарения Pb и Ti в атмосфере кислорода, она ориентирована в основном в плоскости (001) при 400°C и $\text{Ti/Pb} = 1$. Ее петля диэлектрического гистерезиса имеет более прямоугольную форму, чем у неориентированной поликристаллической пленки, осажденной на платиновую пластину. Максимальная остаточная поляризация — 31 мкКл/см^2 . Описанные способы создания ориентированной пленки PbTiO_3 могут быть использованы при изготовлении функциональных устройств, осажденных на кремниевую подложку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Womack R. and Tolsch S. // Digest of Technical Papers of Int. Solid-State Circuits Conference.—1989.—P. 242.
2. Higuma Y., Matsui Y., Okuyama M. et al. // Jpn. J. Appl. Phys.—1977.—17-1.—P. 209.
3. Takayama R., Tomita Y., Asayama J. et al. // Sensors and Actuators.—1990.—A21-23.—P. 508.
4. Okuyama M., Ohtani K. and Hamakawa Y. // Int. J. Infrared and Millimeter.—1985.—6.—P. 71.
5. Takayama R., Tomita Y., Iijima K. and Ueda I. // J. Appl. Phys.—1987.—61.—P. 411.
6. Okuyama M. and Hamakawa Y. // Sensors and Materials.—1988.—1.—P. 13.
7. Wasa K., Yamazaki O., Adachi H. et al. // J. Lightwave Techn.—1984.—LT-2.—P. 710.
8. Adachi H., Kawaguchi T., Setsune K. et al. // Appl. Phys. Lett.—1983.—42.—P. 867.
9. Okuyama M., Matsui Y., Nakano H. et al. // Jpn. J. Appl. Phys.—1979.—18.—P. 1633.
10. Kojima M., Okuyama M., Nakagawa T. and Hamakawa Y. // Jpn. J. Appl. Phys.—1983.—22-2.—P. 14.
11. Brierley C. J., Trundle C., Considine L. et al. // Ferroelectrics.—1989.—91.—P. 181.
12. Swartz S. L., Seifert D. A., Noel G. T. and ShROUT T. R. // Ferroelectrics.—1989.—93.—P. 37.
13. Ariizumi A., Kawamura K., Kikuchi I. and Kato I. // Jpn. J. Appl. Phys.—1985.—24-3.
14. Budd K. D., Dey S. K. and Payne P. A. // Brit. Cer. Soc. Proc.—1985.—36.—P. 107.
15. Okuyama M., Usuki T., Hamakawa Y. and Nakagawa T. // Appl. Phys.—1980.—21.—P. 339.

16. Sviridov E. V., Mukhortov V. M., Golovko Y. I. et al. // Sov. Tech. Phys. Lett.—1983.—9.—P. 72.
17. Kushida K. and Takeuchi H. // Jpn. J. Appl. Phys.—1985.—24-2.—P. 407.
18. Iijima K., Tomita Y., Takayama R. and Ueda T. // J. Appl. Phys.—1986.—60.—P. 361.
19. Okuyama M., Ueda T. and Hamakawa Y. // Jpn. J. Appl. Phys.—1985.—24-2.—P. 619.
20. Matsubara S., Miura S., Miyasaka Y. and Shohata N. // J. Appl. Phys.—1989.—66.—P. 5826.
21. Hecq H. and Hecq A. // J. Vac. Sci. Technol.—1981.—18.—P. 219.

Поступила в редакцию 4 января 1991 г.

УДК 621.383:537.226.82

Т. С. Дубровская, В. В. Михневич, И. П. Потапенко,
С. Р. Сырцов

(Витебск)

СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯТОРА СВЕТА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ ПИРОЭЛЕКТРИК—ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

В последние годы наблюдается повышенный интерес к исследованию параметров пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) для среднего и дальнего ИК-диапазонов длин волн на основе структуры пироэлектрик — жидкий кристалл (ПЭ — ЖК) [1—3]. Это объясняется перспективностью данной структуры в плане использования ее в качестве основного узла малогабаритных неохлаждаемых тепловизионных приборов, что позволит значительно упростить их конструкцию и уменьшить массогабаритные характеристики за счет исключения систем сканирования и охлаждения. Несмотря на это, целенаправленных исследований по влиянию параметров пироэлектрического и жидкокристаллического слоев на электрооптические характеристики указанных структур до настоящего времени выполнено не было.

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию частотных и сенситометрических характеристик оптоэлектронной пары на основе структуры пироэлектрик — жидкий кристалл.

Теория. Функционирование ЖК-ячейки в оптоэлектронной паре (рис. 1) описывается стандартным образом: ее оптический отклик зависит от природы используемого в ЖК эффекта — ориентационного (*S*-, *B*-, "твист"-эффект) или электрогидродинамического — и определяется лишь частотой *f* модуляции ИК-излучения и величиной напряжения *U*, генерируемого на ячейке, в результате облучения пироэлектрика. Поэтому анализ действия оптопары ПЭ — ЖК может быть проведен на основе известной теории пироэлектрических приемников излучения [1], где роль нагрузки выполняет ЖК-ячейка.

Величина напряжения *U* при падении на ПЭ потока ИК-излучения $\Phi = \Phi_0 \sin 2\pi f t$ (Φ_0 — амплитуда потока) определяется выражением

$$U = \frac{\alpha R_1 \gamma W s_1}{d \sqrt{1 + (\omega \tau_e)^2}} \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где $\tau_e = R_1(C_1 + C_2)$; $W = \Phi_0/s_1$; s_1, d — соответственно площадь и толщина пироэлектрика; $\omega = 2\pi f$; R_1 — сопротивление ЖК; C_1, C_2 —