

06;07

## **Влияние оптического излучения на проводимость полупроводника в тонкопленочной структуре сегнетоэлектрик—полупроводник**

© В.П. Афанасьев, Д.Ю. Булат, Е.Ю. Каптелов, И.П. Пронин

С.-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: VPAfanasyev@mail.eltech.ru

Поступило в Редакцию 16 января 2004 г.

Исследовано влияние оптического излучения на проводимость тонкопленочного полевого транзистора, сформированного на основе многослойной структуры Si подложка—SiO<sub>2</sub>—Pt—PZT—SnO<sub>2-x</sub>—Pt электроды резистора. Показано, что в пределах допустимой дозы облучения канал характеризуется остаточной фотопроводимостью со временем хранения оптической информации не менее 10<sup>5</sup> с. Эффективное гашение остаточной проводимости в исследованной структуре возможно только при одновременном воздействии знакопеременного поля и температуры.

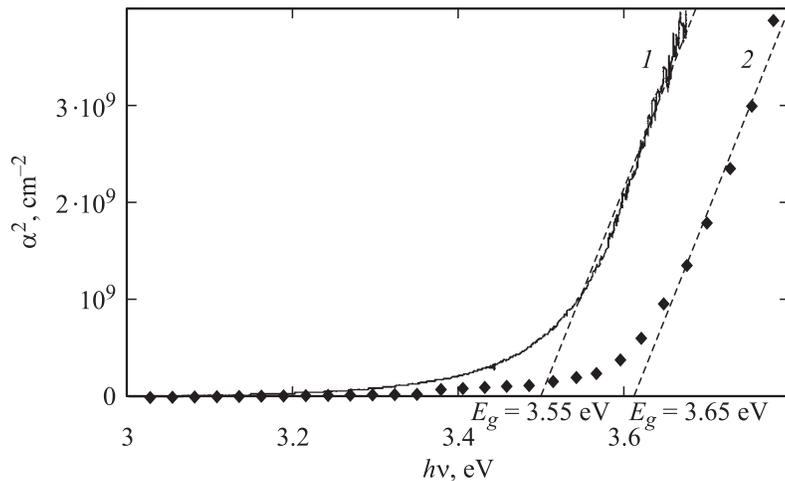
Использование принципов физической интеграции открывает новые перспективы в создании элементов и устройств функциональной электроники. Среди материалов, обеспечивающих развитие данного направления, важное место занимают сегнетоэлектрики, обладающие уникальным набором диэлектрических, пьезоэлектрических, пьезоэлектрических и оптических эффектов. Использование совокупности свойств сегнетоэлектриков и полупроводников в составе тонкопленочных структур позволяет создавать элементы различного назначения, характеристики которых могут изменяться после воздействия импульсов поляризующего электрического поля или света. Так, на основе структур сегнетоэлектрик—полупроводник (СЭ—ПП) могут быть созданы не только репрограммируемые запоминающие устройства с неразрушающим считыванием и хранением информации при отключенном питании [1], но и фото- и пьезоэлектрические приемники излучения с

адаптивными характеристиками [2]. Несмотря на очевидные преимущества таких структур, технологические трудности их формирования, связанные с физико-химической совместимостью слоев, до сих пор не позволили создать тонкопленочные структуры СЭ–ПП с эффективным управлением и стабильными, воспроизводимыми характеристиками [3–7]. Многочисленные варианты транзисторных структур с сегнетоэлектрическим затвором, полученные осаждением сегнетоэлектрической пленки на кремниевую подложку [1,3,4] или комбинацией сегнетоэлектрической и полупроводниковой пленок [5,6,7], пока не дали желаемых результатов. Анализ известных результатов показал, что основные проблемы применения структур СЭ–ПП связаны со свойствами границы раздела.

Целью работы являлось исследование влияния оптического излучения на остаточную фотопроводимость полупроводникового резистора и способа ее эффективного гашения в тонкопленочной композиции СЭ–ПП (цирконат–титанат свинца–диоксид олова).

Выбор пары СЭ–ПП, обеспечивающий наибольший эффект при оптическом и электрическом воздействии, определялся не только свойствами материалов, но и требованиями по их технологической совместимости в процессе изготовления тонкопленочных структур. Для работы в нормальных условиях целесообразно использовать широкозонные полупроводники, среди которых наибольшую эффективность показал диоксид олова ( $\text{SnO}_{2-x}$ ) [2]. Это связано с тем, что его осаждение происходит в кислородсодержащей среде непосредственно на уже сформированные пленки цирконата–титаната свинца (PZT). Отличительными свойствами пленок  $\text{SnO}_{2-x}$  являются технологичность, стабильность, химическая и механическая стойкость, а также большая ширина запрещенной зоны (3.2–3.7 eV, в зависимости от концентрации носителей заряда), обеспечивающая фоточувствительность в ультрафиолетовом диапазоне. Известно, что в оксидном полупроводнике  $\text{SnO}_{2-x}$  можно варьировать концентрацию носителей заряда в широких пределах, изменяя степень отклонения от стехиометрического состава в процессе ионно-плазменного распыления оловянной мишени в кислородсодержащей среде. Благодаря этому были сформированы пленки  $\text{SnO}_{2-x}$  с поверхностным сопротивлением 2–10 kΩ и толщиной 100–120 nm, при которых обеспечивается эффективное управление тонкопленочных структур СЭ–ПП [2].

Состав PZT пленок ( $\text{PbZr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46}\text{O}_3$ ) соответствовал морфотропной фазовой границе, разделяющей тетрагональную и ромбоэдрическую

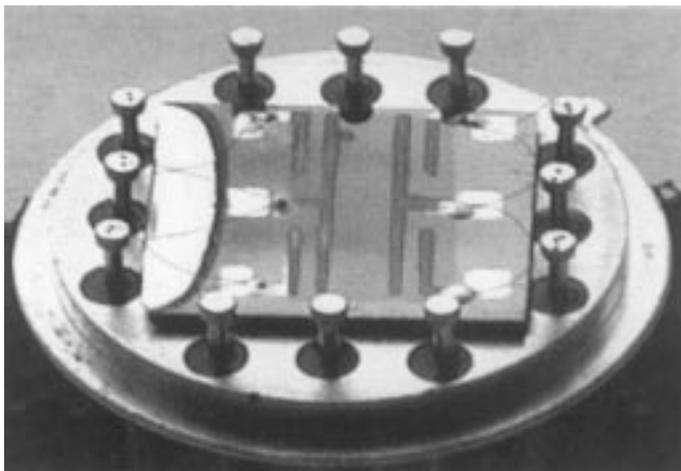


**Рис. 1.** Зависимость коэффициента поглощения  $\alpha^2$  от энергии падающих фотонов для пленок PZT: 1 —  $\text{PbZr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46}\text{O}_3$ ; 2 —  $\text{PbZr}_{0.6}\text{Ti}_{0.4}\text{O}_3$  [10].

сегнетоэлектрические фазы, вблизи которой сегнетоэлектрик характеризуется высокими значениями остаточной поляризации и низкими коэрцитивными полями. Пленки PZT толщиной до  $1 \mu\text{m}$  осаждались на кремниевые подложки с нижним платиновым (управляющим) электродом методом высокочастотного магнетронного распыления керамических мишеней [7–9]. Определенная по спектру пропускания оптическая ширина запрещенной зоны составляла  $3.55 \text{ eV}$  (рис. 1), т. е. собственное поглощение в пленках PZT и  $\text{SNO}_{2-x}$  лежит в одном спектральном диапазоне.

Пленки платины (Pt) толщиной  $80\text{--}120 \text{ nm}$ , которые использовались в качестве нижнего управляющего электрода (затвора) и электродов полупроводникового резистора, осаждались методом ионно-плазменного распыления по описанной в [8] технологии. На рис. 2 показаны размещенные на кремниевой подложке четыре тонкопленочных транзистора с общим электродом затвора. Подложка со сформированными транзисторами была закреплена в основании корпуса, крышка которого имела прозрачное окно из сапфира.

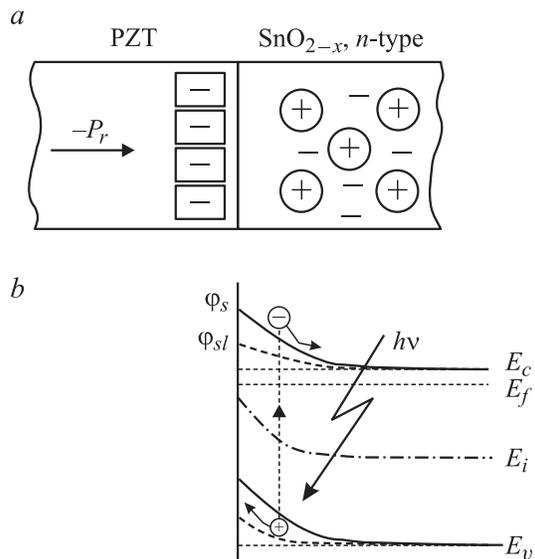
Управление проводимостью полупроводникового резистора осуществлялось за счет изменения величины и направления остаточной поля-



**Рис. 2.** Макетный образец четырех тонкопленочных транзисторов со структурой сегнетоэлектрик–полупроводник и общим электродом затвора на кремниевой подложке в корпусе.

ризованности сегнетоэлектрической пленки разнополярными импульсами напряжения. В результате полевого взаимодействия поверхностного заряда сегнетоэлектрика с носителями заряда в пленке полупроводника происходило либо обогащение, либо обеднение носителями заряда приповерхностной области полупроводника (рис. 3), а значит, и изменение проводимости резистора. Как показала практика [5–7], эффективная работа таких структур напрямую связана с частичным экранированием поляризации зарядами на поверхностных состояниях границы раздела СЭ–ПП, в результате чего изменение проводимости оказывается существенно меньше ожидаемого. Более того, наблюдается временной дрейф установленных после поляризации значений проводимости [3–6].

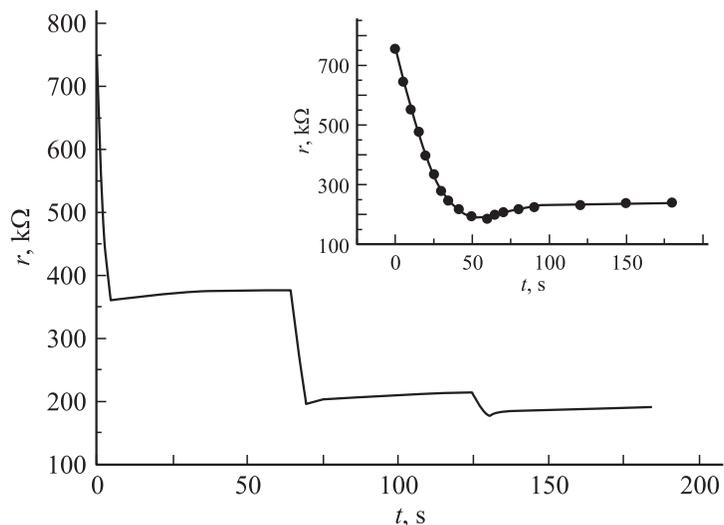
Использование варианта конструкции (рис. 2), в котором на поверхности пленки PZT сформирован тонкопленочный резистор с пленкой  $\text{SnO}_{2-x}$ , позволило существенно повысить эффективность электрического управления. Основная причина этого, судя по всему, кроется в существенном уменьшении плотности поверхностных состояний на границе раздела СЭ–ПП. Измерения показали, что кратность изменения сопротивления при переключении электрическим полем пленки



**Рис. 3.** Схематическое изображение структуры сегнетоэлектрик–полупроводник (а) и энергетическая диаграмма пленки  $\text{SnO}_{2-x}$  в состоянии обеднения до и после воздействия ультрафиолетового облучения (б).

PZT достигала 20, причем установленные уровни сопротивления были стабильны во времени. Поэтому представляло интерес исследовать влияние оптического излучения на проводимость полупроводникового резистора. Очевидно, что структуры PZT– $\text{SnO}_{2-x}$  можно использовать для создания дозиметров ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 310–360 nm [2,11].

Высокая фоточувствительность и остаточная фотопроводимость тонкопленочного транзистора имели место только в состоянии обеднения полупроводника, которое обеспечивалось после подачи отрицательного потенциала на затвор транзистора (рис. 3). Принцип работы структуры СЭ–ПП с фотопамятью основан на том, что ультрафиолетовое излучение поглощается в пленке  $\text{SnO}_{2-x}$ , в ней генерируются носители заряда, которые разделяются полем, обусловленным поверхностным поляризационным зарядом PZT. По мере возрастания дозы облучения концентрация дырок вблизи границы раздела СЭ–ПП увеличивается,



**Рис. 4.** Изменение сопротивления тонкопленочного полупроводникового резистора, сформированного на поверхности сегнетоэлектрической пленки, при воздействии трех импульсов света длительностью 5 s (на вставке: изменение сопротивления при воздействии импульсом света длительностью 60 s).

а высота рекомбинационного барьера уменьшается (рис. 3). Очевидно, что эффект остаточной фотопроводимости наблюдается при ограничении дозы облучения до значения, при котором сохраняется рекомбинационный барьер, обеспечивающий разделение неравновесных носителей заряда и аномально большое время их жизни.

На рис. 4 приведена зависимость изменения сопротивления тонкопленочного резистора–канала транзистора при воздействии трех импульсов света длительностью 5 s, которые создают суммарную дозу облучения около  $30 \text{ J/m}^2$ . Видно, что в пределах этой дозы высота рекомбинационного барьера сохраняется достаточно большой, что обеспечивает сохранение оптической информации в течение длительного времени (время релаксации остаточной фотопроводимости  $10^5 \text{ s}$ ). При облучении структуры от источника малой интенсивности временная зависимость сопротивления близка к линейной. По мере накопления дозы линейность нарушается из-за уменьшения протяженности

Режимы гашения остаточной фотопроводимости переменным и постоянным поляризующим напряжением (значение сопротивления резистора после освещения — 250 кΩ)

Частота переменного напряжения, Hz	Амплитуда переменного напряжения, V	Время гашения, min	Сопротивление дозиметра, кΩ
50	14	120	450
100	14	90	580
200	14	60	655
300	14	50	700
400	14	30	730
500	14	20	750
	Постоянное напряжение, V		
	10	150	380
	12	150	420

области пространственного заряда, в которой происходит разделение генерированных носителей заряда. При больших дозах облучения (60 s облучения от того же источника) временная зависимость становится нелинейной, а высота рекомбинационного барьера после выключения освещения понижается настолько, что наблюдается релаксация (возрастание) установленных при освещении уровней сопротивления (см. вставку на рис. 4). Следует отметить, что и при допустимых дозах облучения наблюдается небольшое увеличение сопротивления после окончания освещения. Это, по-видимому, связано с небольшим разогревом тонкопленочного резистора ртутной лампой, а также с рекомбинацией неравновесных носителей заряда в приповерхностной области полупроводника, в которой отсутствует электрическое поле поляризационного заряда PZT.

Обязательным условием работоспособности дозиметра является возможность многократного измерения дозы облучения, т.е. возможность эффективного гашения остаточной фотопроводимости после освещения структур СЭ–ПП. В [2] стирание оптической информации осуществлялось путем подачи двух разнополярных импульсов поляризующего напряжения на структуру. Первый импульс переводил полупроводник в состояние обогащения и снимал рекомбинационный барьер, что приво-

дило к рекомбинации носителей заряда. Второй импульс восстанавливал режим обеднения, и оптическую информацию можно было записывать снова.

В исследованных нами тонкопленочных структурах погасить остаточную фотопроводимость подобным образом полностью не удастся, особенно, если перед этим они подвергались длительному воздействию освещения. Это, видимо, связано с закреплением носителей на глубоких ловушках. Погасить остаточную фотопроводимость можно путем приложения переменного напряжения, за счет которого происходит разогрев структуры (см. таблицу). Это способствует выводу носителей с глубоких ловушек и возвращению тонкопленочного резистора в исходное высокоомное состояние (примерно  $750 \text{ k}\Omega$ ). Видно, что эффективность гашения повышается с ростом частоты поля при неизменной амплитуде сигнала.

Таким образом, в работе показано, что тонкопленочная транзисторная структура СЭ–ПП характеризуется остаточной фотопроводимостью при воздействии оптического облучения в пределах допустимой дозы. Интегрирование оптического воздействия обеспечивает измерение дозы облучения, счет импульсов излучения лазера и другие применения. Однако эффективное гашение остаточной проводимости в исследованной структуре возможно только при одновременном воздействии знакопеременного поля и температуры. Для устранения этого недостатка необходимо проведение дополнительных исследований поведения экранирующего заряда на границе раздела тонких слоев сегнетоэлектрика и полупроводника.

Работа поддержана грантом президента РФ НШ 2168.2003.2, программой Отделения физических наук РАН и грантом Министерства образования РФ (Е02–3.4–89).

## Список литературы

- [1] *Aizawa K., Okamoto T., Tokumitsu E.* et al. // *Integr. Ferroel.* 1997. V. 15. P. 245–252.
- [2] *Afanasjev V.P., Kramar G.P.* // *Ferroelectrics.* 1993. V. 143. P. 299–304.
- [3] *Tokumitsu E., Shimamura T., Ishiwara H.* // *Integr. Ferroel.* 1997. V. 15. P. 137–144.
- [4] *Noda M., Sugiyama Y., Okuyama M.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1995. V. 34. P. 5254–5257.

- [5] *Veselovskiy I.A., Grekhov I.V., Delimova L.A.* и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. С. 39–46.
- [6] *Seager C.H., McIntyre D.C., Warren W.L.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 2660–2662.
- [7] *Evans J.T., Suizu R.I., Boyer L.L.* // Appl. Surf. Sci. 1997. V. 117/118. P. 413–417.
- [8] *Афанасьев В.П., Богачев С.В., Зайцева Н.В.* и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 6. С. 160–169.
- [9] *Pronin I.P., Kartelov E.Yu., Tarakanov E.A.* et al. // Integr. Ferroel. 2002. V. 49. P. 285–294.
- [10] *Peng C.H., Chang J.-F., Desu S.B.* // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1992. V. 243. P. 21–26.
- [11] *Afanasjev V.P., Pankrashkin A.V., Suchaneck G.* et al. // Proc. of Intern. Conf. „Sensors & Systems“. 2002. V. 1. P. 52–56.