

- [6] Браун О. М., Люксов И. Ф., Наумов А. Г. В кн.: Структура и свойства границ зерен. Уфа, 1983, с. 12.
- [7] Даринский Б. М., Сайко Д. С., Федоров Ю. А. Изв. вузов. Физика, 1987, № 9, с. 53—57.
- [8] Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 599 с.
- [9] Глейтер Г., Чалмерс Б. Большебугровые границы зерен. М.: Мир, 1975. 375 с.
- [10] Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. М.: Мир, 1978. ч. 1. 806 с.
- [11] Aubry S. J. Phys., 1983, v. 44, N 2, p. 147—162.

Воронежский политехнический институт

Поступило в Редакцию
12 декабря 1986 г.

УДК 534—18

Журнал технической физики, т. 58, в. 10, 1988

ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ ZnO/Si

В. И. Анисимкин, Э. Верона¹, Дж. Социо¹

Слоистая структура пьезоэлектрическая пленка ZnO на кремниевой подложке представляет особый интерес для устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ): она позволяет совместить на одной подложке акустическую и электрическую обработки сигналов. Особенности изготовления таких интегральных устройств с порядком проведения технологических операций для электронной и акустической частей описаны в работе [1].

В настоящей работе сообщаются предварительные результаты исследований акустических датчиков водорода и постоянного электрического поля на основе структуры ZnO/Si. В экспериментах использовались подложки (001) Si толщиной 500 мкм с направлением распространения ПАВ вдоль оси $\langle 100 \rangle$. Пьезоэлектрические текстурированные пленки ZnO толщиной h от 0.8 до 16 мкм наносились на подложку методом реактивного магнетронного распыления. Встречно-штыревые преобразователи изготавливались на поверхности пленки ZnO и содержали 15 пар электродов с периодом $\lambda = 20.5$ мкм. Сплошной металлический электрод из Cr/Au напылялся на границу пленка—подложка непосредственно под преобразователями. В датчике водорода между входным и выходным преобразователями наносилась пленка Pd длиной 6 мм, чувствительная к водороду. В датчике электрического поля между преобразователями на обеих поверхностях ZnO изготавливались два полевых электрода из Cr/Au длиной 6 мм.

Эксперименты проводились на установке, схематически показанной на рис. 1. Ее ключевым элементом служила линия задержки на ПАВ с пленкой Pd (а) или с полевыми электродами (б) на пути распространения волны. При адсорбции—десорбции водорода пленкой Pd происходило изменение плотности и упругих модулей этой пленки [2]. В результате скорость ПАВ изменялась на величину ΔV , зависящую от концентрации водорода в газовой смеси. Подача водорода в систему осуществлялась в смеси с азотом: 1 % $H_2 + N_2$.

При приложении постоянного электрического поля E поперек пленки ZnO перпендикулярно направлению распространения ПАВ изменение скорости ПАВ ΔV наступало вследствие электроакустического эффекта — зависимости упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических модулей ZnO от напряжения смещения E . Напряжение E величиной до ± 15 В подавалось от генератора пилообразного напряжения, плавно меняющегося с частотой 10^{-1} Гц.

Величина относительного изменения скорости ПАВ $\Delta V/V$ в датчиках обоих типов определялась из измерений относительного сдвига частоты $\Delta f/f$ на выходе интегратора (рис. 1). Регистрация динамических характеристик датчиков производилась на самописце.

Отметим, что нанесение пленки Pd значительно (более чем на 20 дБ) увеличивало потери на распространение ПАВ. Это ограничивало диапазон используемых частот величиной $f < 400$ МГц и затрудняло исследование акустических мод высокого порядка. Настоящие исследования проводились на двух первых модах — волне Рэлея и волне Сезава.

¹ Институт акустики им. О. М. Корбино, Рим.

Типичная временная зависимость «отклика» датчика водорода приведена на рис. 2. В первый момент после подачи газовой смеси 1 % H_2+N_2 скорость ПАВ остается неизменной, а накапливающиеся в Pd изменения проявляются в виде коротковременных хаотических выбросов. По прошествии ≈ 20 с с момента подачи водорода скорость ПАВ посте-

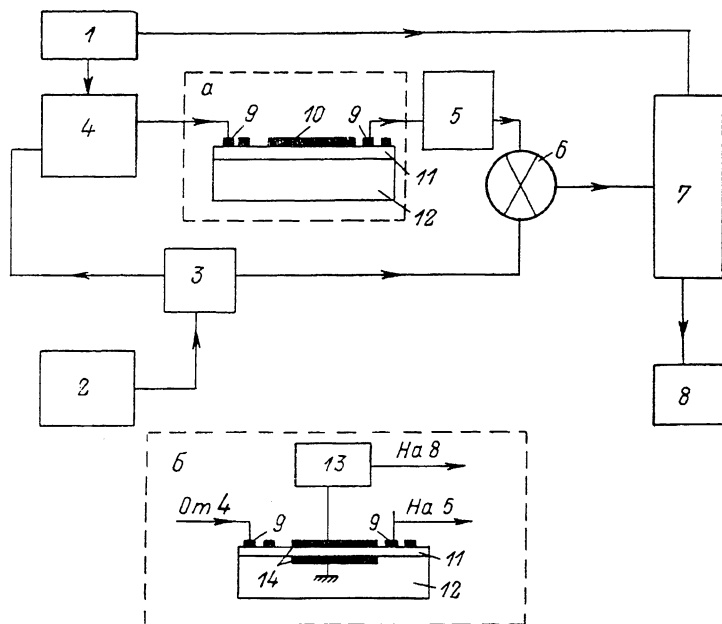


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования действия водорода (а) и постоянного электрического поля (б) на скорость распространения ПАВ.

1 — импульсный генератор, 2 — ВЧ генератор, 3 — разветвитель, 4 — модулятор, 5 — усилитель, 6 — фазовый детектор, 7 — бокс-кар интегратор, 8 — самописец, 9 — встречно-штыревые преобразователи, 10 — пленка Pd, 11 — пьезоэлектрическая пленка ZnO, 12 — подложка кремния, 13 — генератор пилообразного напряжения, 14 — полевые электроды.

пенно уменьшается, а затем увеличивается до своего первоначального значения. Затем примерно через 1 мин скорость ПАВ достигает максимума, величина которого определяется концентрацией H_2 в подаваемой газовой смеси. Далее отклик датчика (при продолжающейся подаче смеси) не меняется. При отключении водорода и введении в систему чистого

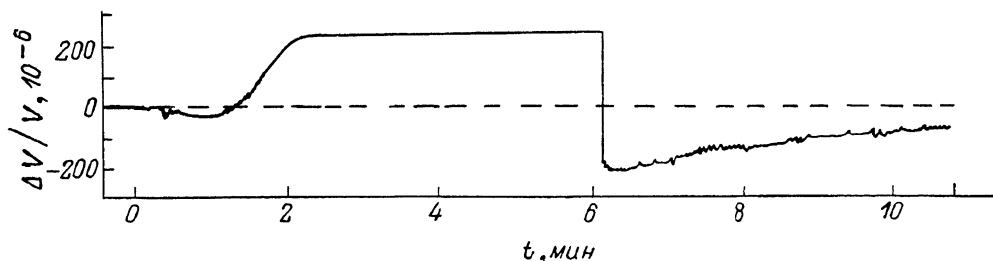


Рис. 2. Относительные изменения скорости ПАВ Рэлея $\Delta V/V$ в структуре ZnO/Si в зависимости от времени в процессе воздействия водорода и кислорода на пленку Pd.

Газовая смесь: 1 % H_2+N_2 и 100 % O_2 , скорость потока: 13.5 и 2.5 cm^3/s соответственно, температура комнатная.

кислорода скорость ПАВ вначале резко уменьшается, а затем медленно (примерно за 10 мин) увеличивается до первоначального значения. Процессы адсорбции и десорбции водорода пленкой Pd носили воспроизводимый характер: повторные включения — выключения H_2 и O_2 не меняли временной зависимости и максимального значения величины $\Delta V/V$. Характер временной зависимости был одинаков для обеих исследуемых мод, а имеющиеся отличия в основном касались длительности релаксационных процессов при включении—отключе-

нии газов. По сравнению с датчиком водорода на ПАВ в структуре Pd/LiNbO₃ [3] релаксационные процессы в структуре Pd/ZnO/Si имели большую продолжительность. Это, по-видимому, связано с проникновением Pd в поры между кристаллитами ZnO и замедлением взаимодействия Pd с вводимыми газами. Вместе с тем чувствительность ПАВ к водороду в структуре Pd/ZnO/Si оказалась на 2 порядка величины больше, чем при тех же условиях в структуре Pd/LiNbO₃. Наибольшая чувствительность, равная $\Delta V/V = 250 \cdot 10^{-6}$, была получена на волне Рэлея ($f = 195$ МГц) при $h(\text{ZnO}) = 0.8$ мкм, $h(\text{ZnO})/\lambda = 0.039$, $h(\text{Pd}) = 1550$ А. Для «утекающих» волн Сезава, существующих при h/λ , меньших «отсечки» [4], изменении скорости волны под действием водорода не наблюдалось.

Типичная зависимость относительного изменения скорости ПАВ от электрического поля показана на рис. 3. Линейность характеристики имела место как для ПАВ Рэлея, так и для ПАВ Сезава, сохраняясь на всех используемых частотах (100—350 МГц) при амплитудах смещения до ± 1 В/мкм. При более значительных полях «отклик» датчика электрического поля насыщался.

Как известно [5-7], теоретический расчет электроакустического эффекта требует знания упругих пьезоэлектрических и диэлектрических модулей 2-го и 3-го порядков. Поскольку модули 3-го порядка для ZnO неизвестны, выбор номера акустической моды и значений относительной толщины пленки ZnO h/λ , обеспечивающих наибольшую величину эффекта, не представляется возможным. Для нахождения критерия приближенной оценки эффекта нами были проанализированы экспериментальные результаты работы [7] и настоящей работы для ПАВ Рэлея и Сезава в структурах ZnO/Si с различными значениями h/λ . Анализ проводился с учетом двух факторов: пьезоактивности волны и распределения ее энергии по сечению слоистой структуры. Пьезоактивность ПАВ оценивалась по величине

коэффициента электромеханической связи K^2 , который является обобщенной характеристикой пьезоэлектрических свойств пленки ZnO в линейном приближении [8]. Распределение энергии ПАВ по сечению слоистой структуры приближенно определялось величиной относительной доли энергии ПАВ τ в пленке, которая и подвергалась действию электрического поля. Результаты анализа приведены в таблице. Они показывают, что величина относительного изменения скорости ПАВ Рэлея и ПАВ Сезава в структуре ZnO/Si под действием электрического поля коррелирует с величиной произведения $K^2 \times \tau$, возрастая при его увеличении. По нашему мнению, величина $K^2 \times \tau$ может служить приближенным критерием для оперативной оценки целесообразности использования той или иной акустической моды для создания электрических датчиков на основе слоистых структур.

Максимальная чувствительность датчика, полученная в настоящей работе, составила $5.3 \cdot 10^{-6}$ мкм/В. Это на порядок меньше, чем для датчика на волне Лэмба в пластине YZ-LiNbO₃ [8]. «Утекающие» волны Сезава были не чувствительны к электрическому полю.

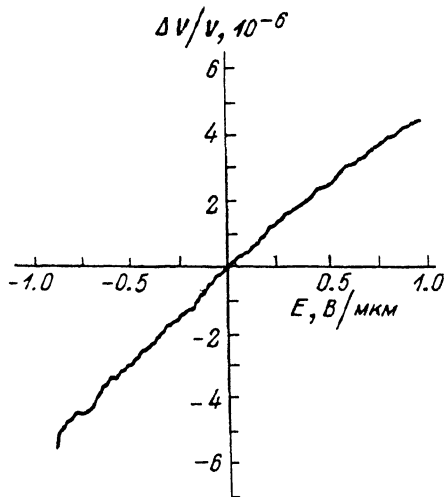


Рис. 3. Относительные изменения скорости ПАВ Сезава в слоистой структуре ZnO/Si с $h/\lambda = 0.234$ под действием электрического поля E поперек пленки ZnO (вдоль оси C_6).

h/λ	ПАВ Рэлея				ПАВ Сезава			
	$\Delta V/V, 10^{-6}$	$K^2, 10^{-2}$	τ	$K^2 \times \tau, 10^{-2}$	$\Delta V/V, 10^{-6}$	$K^2, 10^{-2}$	τ	$K^2 \times \tau, 10^{-2}$
0.78	5.0	0.8	0.97	0.78	4.2	1.25	0.83	1.04
0.53	3.4	0.4	0.9	0.36	3.0	2.9	0.79	2.4
0.23	—	0	—	—	5.3	4.95	0.77	3.8
0.16	—	0.1	—	—	4.5	3.6	0.15	0.6
0.04	0.6	0.85	0.19	0.16	—	0	—	—

Примечание. Значения $\Delta V/V$ соответствуют величине поля $E = 1$ В/мкм.

Таким образом, слоистая структура ZnO/Si допускает создание на своей основе акустических датчиков водорода и электрического поля. Определение максимальной и минимальной концентраций водорода (напряженности поля), на которые еще реагирует датчик, оптимизация чувствительности, номера акустической моды и других рабочих характеристик, а также сравнение этих характеристик с данными для других типов датчиков тех же величин (например, [9]) требует дальнейших исследований.

Литература

- [1] *Vellekoop M. J., Neiwkoop E., Haartsen J. C., Venema A.* Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1987, p. 19.
- [2] *Mazzolai F. M., Birnbaum H. K.* In: Electronic Structure and Properties of Hydrogen in Metals, 1983, N 357, p. 125—131.
- [3] *D'Amico A., Palma A., Verona E.* Appl. Phys. Lett., 1982, v. 41, N 3, p. 300—301.
- [4] *Анисимкин В. И., Котелянский И. М., Осипенко В. А.* ЖТФ, 1987, т. 57, № 3, с. 535—539.
- [5] *Tiersten H. F. J.* Acoust. Soc. Am., 1978, v. 64, N 3, p. 832—838.
- [6] *Лямов В. Е.* Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М., 1983. 223 с.
- [7] *Palmieri L., Socino G., Verona E.* Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1986, p. 1093—1096.
- [8] *Palma A., Palmieri L., Socino G., Verona E. J.* Appl. Phys., 1985, v. 58, N 8, p. 3265—3267.
- [9] *Jelley K. W., Maclay G. J.* IEEE Trans., 1987, v. ED-34, N 10, p. 2036—2097.

Институт радиотехники и электроники АН СССР

Москва

Институт акустики им. О. М. Корбиню

Рим

Поступило в Редакцию

16 марта 1988 г.

УДК 539.124 : 541.64

Журнал технической физики, т. 58, в. 10, 1988

ПОЗИТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ МДМ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНАТА СТРОНЦИЯ

*Б. Н. Шаралов, С. Н. Скоков, Л. Т. Тер-Мартirosян,
А. И. Дедык, А. М. Прудан*

Позитронная спектроскопия твердых тел позволяет получить информацию о локальном и макроскопическом полях в веществе. В частности, воздействие внешнего электрического поля на твердое тело приводит к смещению центра углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) [1-3]. Термализованные позитроны дрейфуют в направлении макроскопического поля \mathcal{E} со средней скоростью $v = \mu \mathcal{E}$, где μ — дрейфовая подвижность позитронов. При этом средний импульс аннигилирующих электрон-позитронных пар отличен от нуля, что вызывает сдвиг центра спектра УРАФ на $\Delta \Theta = \mu c^{-1} \mathcal{E}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ мс⁻¹. Дрейфовая подвижность позитронов в веществе может быть также определена по сдвигу спектра доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ) [4, 5] или растяжению (сжатию) имплантационного профиля позитронов [3].

Подвижность позитронов в различных материалах приведена в таблице.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния макроскопического электрического поля на положение центра спектра УРАФ в монокристаллическом титанате стронция (ТС).

Использовалась длиннощелевая установка с геометрическим разрешением 1 мрад. Время разрешения совпадений установки 50 нс, полное число фоновых отсчетов не более 2.5 % от полного числа событий. Накопление информации многоканальным амплитудным анализатором происходило при непрерывном многократном сканировании подвижным плечом в пределах ± 20 мрад.

Исследуемый образец представлял собой кристалл ТС в виде диска диаметром 8 мм и толщиной 600 мкм, вырезанного в плоскости [110]. Многоканальная проводимость материала 10^{-10} Ом⁻¹·м⁻¹ при $T = 300$ К [6]. Измерение УРАФ проводилось при комнатной температуре. Металлические электроды толщиной 0.7 мкм наносились на поверхность диска методом термического испарения в вакууме. Перед измерением спектров УРАФ образец был отожжен в течение 3 ч при $T = 300$ °С с замкнутыми электродами для устранения неравновесного состояния в структуре.