

Д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН, В. А. КРИВЧЕНКО, к. ф.-м. н. Д. В. ЛОПАЕВ,
Л. В. ПАВЛУШКИН, к. т. н. П. В. ПАЩЕНКО, к. ф.-м. н. В. Г. ПИРОГОВ,
к. ф.-м. н. С. Н. ПОЛЯКОВ, д. ф.-м. н. Н. В. СУЕТИН,
к. т. н. Н. И. СУШЕНЦОВ.

Россия, г. Москва, ЦНИТИ «Техномаш», НИИЯФ МГУ
им. Д. В. Скобельцына; г. Йошкар-Ола, МарГТУ
E-mail: belyanin@technomash.ru

Дата поступления в редакцию
22.05 2006 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ
(БГУИР, г. Минск)

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ ZnO ДЛЯ УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТИКИ

Пленки ZnO получены методом магнетронного ВЧ-распыления. Применялось дополнительное магнитное поле, создаваемое магнитной системой, помещенной за подложкодержателем.

Оксид цинка — широкозонный полупроводник, обладающий уникальной комбинацией оптических и электрофизических свойств. Пленки ZnO находят применение в устройствах отображения информации (светодиоды, прозрачные проводники), солнечных батареях, устройствах на поверхностных акустических волнах (фильтры, резонаторы, линии задержки, акустооптические и другие приборы). Широкое промышленное применение устройств, включающих слой ZnO, сдерживается сложностью получения пленок ZnO с заданными функциональными характеристиками. В настоящее время активно исследуются различные методы осаждения пленок ZnO: физическое распыление, в том числе магнетронное, лазерное испарение, газофазное осаждение, молекулярная эпитаксия, атомное напыление. С нашей точки зрения, метод магнетронного распыления наиболее технологически привлекателен, поскольку, с одной стороны, имеется большой выбор оборудования, а с другой — технология позволяет осаждать пленки ZnO различного качества и уровня легирования.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния дополнительного магнитного поля на строение пленок, получение пленок ZnO с контролируемым содержанием и строением кристаллических фаз, формирование многослойных структур, включающих эти пленки, и создание на их основе устройств электронной техники с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Влияние конфигурации магнитного поля на строение пленок ZnO

Конструкция установки. Использовали специально разработанную установку магнетронного распыления (рис. 1, а) [1]. Установка содержит вакуумную камеру с размещенными в ней двумя магнетронами, нагревателем и вращающимся подложкодержателем карусельного типа; турбомолекулярный насос ТМН-500; блок питания турбомолекулярного насоса СПЧ-10М; форвакуумный электромагнитный клапан КВУМ-50, имеющий диаметр условного прохода 50 мм; ВЧ-генератор; согласующее устройство.

Возможности установки существенно расширены введением дросселирующего устройства, обеспечивающего устойчивую работу магнетронов в диапазоне давлений 0,1–2,5 Па без опасности перегрузки турбомолекулярного насоса. В установке применена раз-

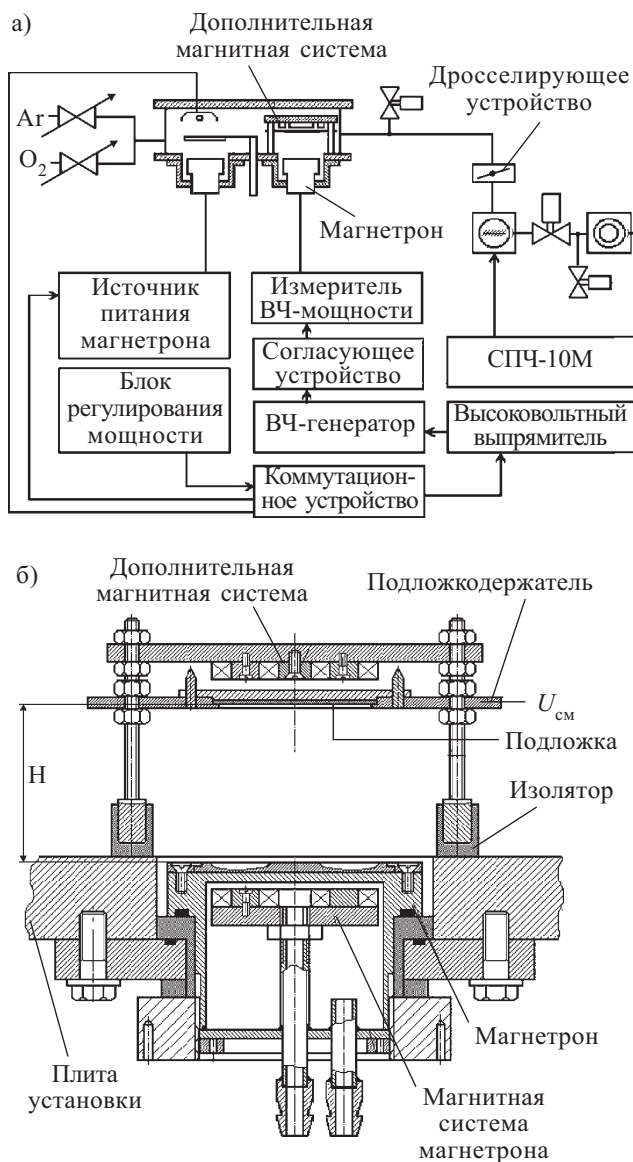


Рис. 1.

а — схема установки, оснащенной двумя цельнометаллическими магнетронами; б — конструкция распылительного узла

дельная подача газов, величины потоков которых контролируются расходомерами. Магнетроны имеют цельнометаллическую конструкцию, аналогичную представленной в работе [2], и рассчитаны на применение металлических, керамических и порошковых мишеней диаметром 130 мм.

Особенностью конструкции распылительного узла являлось наличие дополнительной магнитной системы, размещенной напротив одного из магнетронов (рис. 1, б) (расстояние от подложки до полюсов дополнительной магнитной системы — 10 мм). В центре магнитопровода дополнительной магнитной системы помещалось 12 Co–Sm-магнитов КС-37 (остаточная магнитная индукция $\geq 0,77$ Тл, коэрцитивная сила 1300 кА/м, магнитная энергия 55 кДж/м³) одной полярности, вокруг которых располагались 27 магнитов другой полярности (размеры магнитов: диаметр 10 мм, высота 6 мм) (рис. 2, а). Конструкция дополнительной магнитной системы позволяла изменять полярность полюсов.

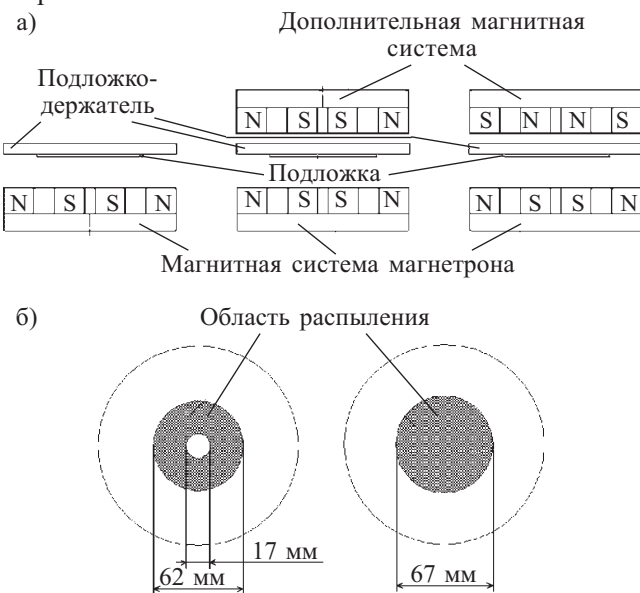


Рис. 2.

а — использованные в работе сочетания полярностей полюсов магнитов магнетрона и дополнительной магнитной системы; б — форма и размеры области распыления мишени при одинаковой (справа) и противоположной (слева) полярностях полюсов магнитных систем

В зависимости от расположения полюсов магнитов дополнительной магнитной системы силовые линии магнитного поля ведут себя по-разному:

1. В случае униполярного расположения магнитов (т. е. когда магниты в магнетроне и у подложки имеют одинаковую полярность) силовые линии периферических магнитов оказываются незамкнутыми и плазма может уходить вдоль силовых линий в центре объема (рис. 3, а).

2. В случае биполярного расположения магнитов силовые линии имеют конфигурацию, представленную на рис. 3, б. В этом случае силовые линии магнитного поля замкнуты внутри камеры и радиальная диффузия плазмы подавлена из-за замагниченности. Это неизбежно приводит к возрастанию концентрации плазмы, а значит, и к росту диссоциации кисло-

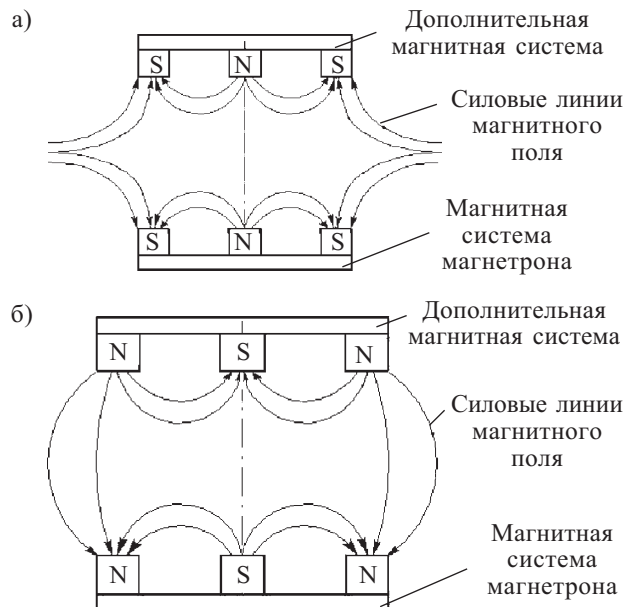
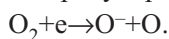


Рис. 3. Распределение силовых линий магнитного поля при совпадающих (а) и противоположных (б) полярностях магнитов в магнитных системах

рода. Именно в этом случае обеспечивается достаточный поток атомарного кислорода на подложку, что препятствует образованию несвязанного Zn, который, как известно, является донорной примесью.

Мы также хотим обратить внимание еще на один фактор, который может приводить к росту качества получаемых пленок. При высокой концентрации и энергии электронов один из наиболее эффективных механизмов их гибели — диссоциативное прилипание к кислороду в реакции



Образующиеся в этой реакции отрицательные ионы компенсируют положительный потенциал вблизи подложки, что снижает энергию бомбардирующих ионов, а значит, и дефектность осаждаемой пленки. Отметим, что ранее на этот фактор никто не обращал внимания.

Подложкодержатель либо электрически соединялся с корпусом установки, либо устанавливался на изоляторе. В последнем случае при обратной полярности полюсов магнетрона и дополнительной магнитной системы на подложкодержателе в зависимости от величины емкости конденсатора согласующего устройства (от 5 до 100 пФ) устанавливалось автосмещение ($U_{см}$), равное от +3 В до -11 В. Форма и размер области распыления мишени зависят от полярности полюсов магнитов дополнительной магнитной системы относительно полярности (постоянной) полюсов магнетрона (рис. 2, б).

Параметры процесса. Пленки ZnO толщиной до 6 мкм формировали методом магнетронного ВЧ-распыления мишени из Zn (99,9%) в газовой смеси Ar+(50...60)%O₂ (Ar и O₂ в камеру поступали раздельно) при давлении 1—1,33 Па и температуре подложки 300—420 К. При расстоянии "мишень—подложка" $H=70$ мм и мощности ВЧ-разряда 80—100 Вт скорость осаждения пленок составляла 0,8—1 мкм/ч. При больших мощностях наблюдался пере-

грев дополнительной магнитной системы, что приводило к деградации магнитов. Пленки ZnO формировали на подложках размерами 48×60 мм различных материалов: стекло К-8, ситалл СТ-50, поликристаллический W, поликристаллический корунд (поликор), поликластерные пленки алмаза, Si ориентаций {111} и {110}.

Строение пленок. Пленки ZnO (пространственная группа $R\bar{6}_3mc$), сформированные как с дополнительной магнитной системой (вне зависимости от полярности магнитов), так и без дополнительной магнитной системы, имеют волокнистое (столбчатое) строение с ориентированием волокон по $\langle 0001 \rangle$ (рис. 4, растровый электронный микроскоп LEO1430). Поскольку при магнетронном распылении плотности потоков и энергетический спектр пленкообразующих кластеров неоднородны относительно области распыления мишени, неоднородно и строение пленки по поверхности подложки (пленки формировали на неподвижных подложках и с использованием подвижного подложкодержателя). Неоднородность по толщине пленок ZnO, сформированных на подложке 48×60 мм, размещенной в процессе осаждения напротив центра мишени, составляла $\pm 9\%$.

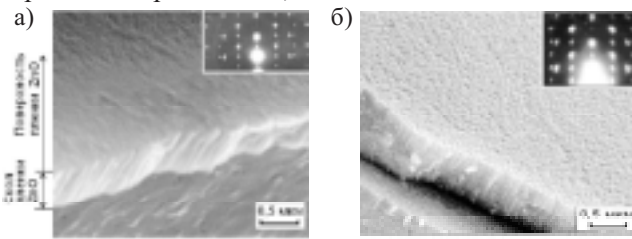


Рис. 4. Строение поверхности и скола пленок ZnO, сформированных методом ВЧ-магнетронного распыления при различной полярности полюсов магнитов магнетрона и дополнительной магнитной системы (на вставках представлены электронограммы на отражение): а — противоположная полярность; б — одинаковая полярность

Параметры решетки определяли по рентгеновским дифрактограммам по отражениям (0002), (1120) и (1013), а размер кристаллитов (областей когерентного рассеяния рентгеновских лучей ($L_{окр}$)) — по (0002). Разориентация кристаллитов относительно оси $\langle 0001 \rangle$ текстуры, ориентирование оси текстуры относительно нормали к рабочей поверхности подложки, степень кристалличности (содержание кристаллической фазы в объеме пленки) и доля объема пленки ZnO, определяющая ее пьезоэлектрическую эффективность, рассчитывались по рентгенограммам качания отражения (0002) (рентгеновский дифрактометр Rigaku D/max-RC; $Cu K_{\alpha}$ -излучение, графитовый монохроматор).

Было установлено, что тип текстуры пленок ZnO не зависит от положения анализируемого участка пленки относительно распыляемой мишени. На ориентирование оси $\langle 0001 \rangle$ текстуры пленок температура подложки и концентрация O_2 в газовой смеси не влияли. Высокая степень текстурированности характерна для пленок ZnO, полученных при повышенном (50 об.% и более) содержании O_2 в вакуумной камере. Снижение температуры подложки и уменьшение

содержания кислорода в вакуумной камере увеличивали разориентацию кристаллитов.

Пленки ZnO имели размер кристаллитов $L_{окр} = 7 \dots 36$ нм, который (в направлении, перпендикулярном поверхности подложки) определяли по уширению (B) на дифрактограммах отражения (0002):

$$L_{окр} = k\lambda / \beta \cos \theta_{0002},$$

где k — константа, зависящая от способа определения интенсивности рефлекса;

λ — длина волны рентгеновского излучения, $\lambda = 0,154178$ нм;

$\beta = (B^2 - b^2)^{0,5}$;

b — уширение рефлекса, вызванное погрешностью дифрактометра;

θ_{0002} — угол дифракции отражения (0002), по которому проводится измерение.

Разориентация кристаллитов относительно оси $\langle 0001 \rangle$ текстуры составляла $\sigma = 0,5 \dots 1,8^\circ$, наклон оси текстуры относительно нормали к поверхности подложки $\gamma < 1,5^\circ$, степень кристалличности $J = 60$ об.%. При отдельных параметрах процесса, помимо кристаллитов, ориентированных по $\langle 0001 \rangle$, получали кристаллиты, ориентированные параллельно поверхности подложки плоскостями (1120) (брэгговский угол $2\theta = 56,2 \dots 56,5^\circ$, межплоскостное расстояние $d/n \approx 0,1635 \dots 0,1630$ нм) и (1013) ($2\theta = 62,0 \dots 62,8^\circ$, $d/n \approx 0,1496 \dots 0,1478$ нм). Перераспределение концентрации кристаллитов, ориентированных по (1120) и (1013), варьировалось с изменением давления.

Степень кристалличности зависит от полярности магнитов дополнительной магнитной системы. Кристаллическая фаза образцов ZnO склонна к двойникованию, проявляющемуся в различной степени для разных условий процесса формирования и положения анализируемого участка пленки относительно мишени. Содержание кристаллической фазы в пленках составляла 6,5—100 об.% в сравниваемом ряду образцов. Количество фазы, определяющей пьезоэлектрическую эффективность пленок, сформированных на подложках, расположенных в процессе осаждения напротив области распыления мишени, уменьшалось за счет возрастания объема рентгеноаморфной фазы (уменьшение степени кристалличности), а

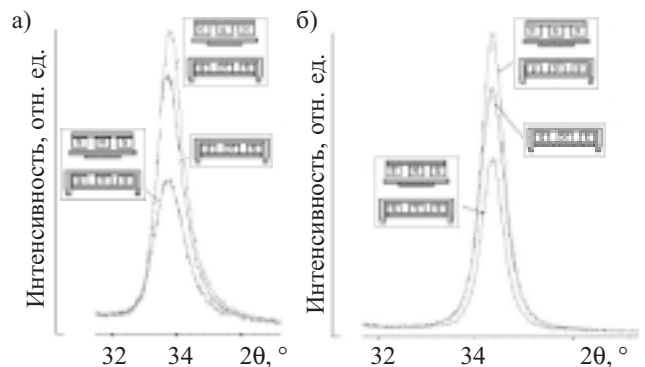


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы (отражение (0002), $Cu K_{\alpha}$ -излучение) пленок ZnO толщиной 1,5 мкм, полученных на подложках из стекла при различных полярностях магнитов магнитных систем (показаны на вставках):

а — неотожженные пленки; б — те же участки пленок после отжига

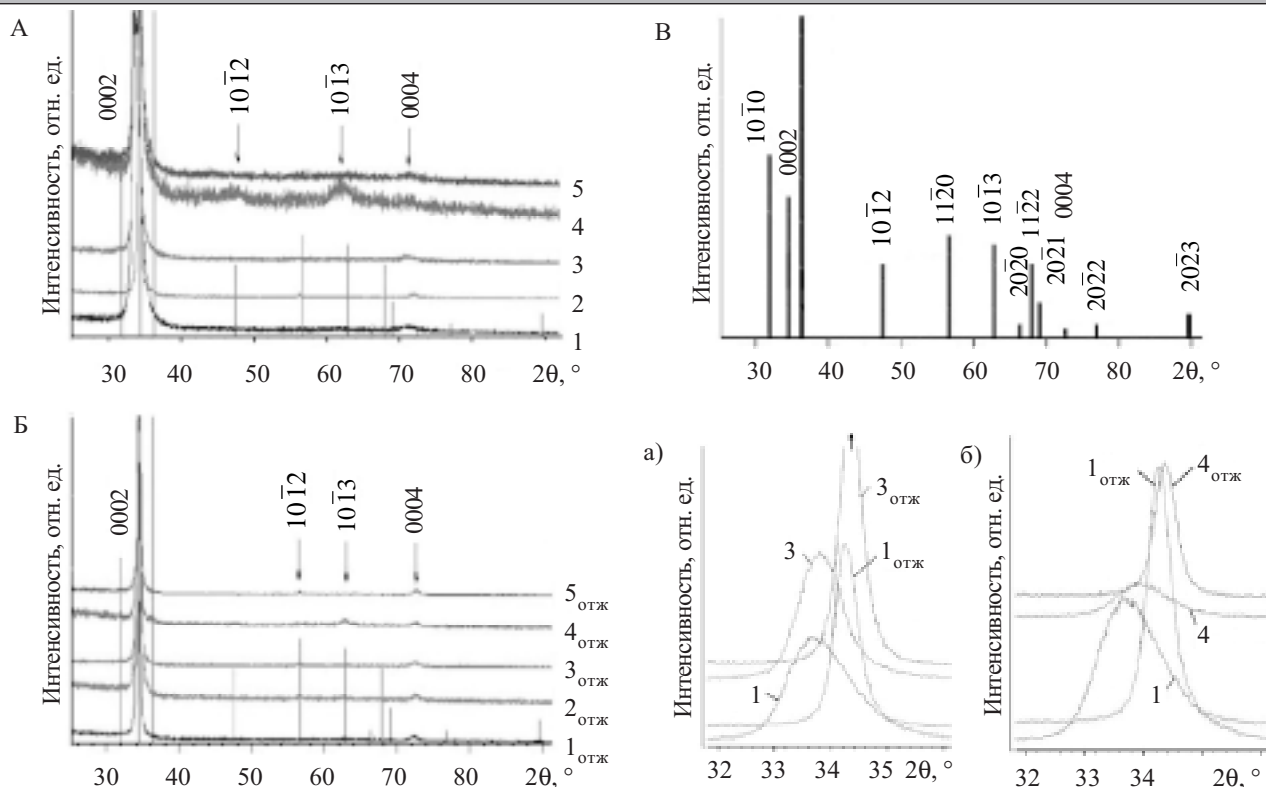


Рис. 6. Рентгеновские дифрактограммы ($\text{Cu K}\alpha$ -излучение) пленок ZnO толщиной 1,5 мкм, полученных на подложках из стекла при противоположной полярности магнитов магнитных систем: А — пленки после осаждения; Б — пленки после отжига; В — штрихрентгенограмма ZnO по данным картотеки ASTM 1—5 — неотожженные пленки; 1_{отж}—5_{отж} — те же образцы после отжига а, б — совмещенные фрагменты дифрактограмм А, Б
Электрическое смещение на подложкодержателе см. в табл. 1

Таблица 1
Влияние электрического смещения на подложкодержателе на строение пленок ZnO

Номер образца	$U_{см}, \text{В}$	$2\theta, ^\circ$	Рефлексы	Полуширина рефлекса, $^\circ$	Интенсивность, отн. ед.	Параметры решетки, нм	$L_{окр}, \text{нм}$
1	-2...-3	33,588	0002	1,312	100	$c=0,5332$	7,0
		70,928	0004	2,880	2,5		
1 _{отж}	-2...-3	34,222	0002	0,454	35,9	$c=0,5236$	20,4
		72,177	0004	1,032	1,0		
2	-6...-11	34,082	0002	0,345	32,9	$a=0,3273$ $c=0,5257$	26,8
		56,215	11-20	0,276	0,3		
		71,899	0004	0,405	0,8		
2 _{отж}	-6...-11	34,373	0002	0,261	47,2	$c=0,5214$	35,4
		72,564	0004	1,120	1,4		
3	-10	33,948	0002	1,051	6,5	$a=0,3280$ $c=0,5277$	8,8
		62,019	10-13	0,719	2,2		
3 _{отж}	-10	34,341	0002	0,429	32,5	$a=0,3248$ $c=0,5219$	21,6
		62,764	10-13	0,810	2,1		
		72,514	0004	0,860	1,1		
4	+2...+3	33,723	0002	0,899	68,9	$c=0,5311$	10,3
		70,811	0004	1,609	2,5		
4 _{отж}	+2...+3	34,318	0002	0,439	36,8	$c=0,5222$	21,1
		72,384	0004	0,930	1,0		
5	-1...-3	33,838	0002	1,113	53,6	$c=0,5294$	9,0
		71,451	0004	0,318	0,6		
5 _{отж}	-1...-3	34,392	0002	0,315	28,6	$a=0,3258$ $c=0,5211$	29,4
		56,494	11-20	0,291	0,3		
		72,569	0004	0,676	0,9		

также за счет развития двойникования и, следовательно, увеличения объема сдвойникованной части пленки. Максимальный размер кристаллитов наблюдали у пленок ZnO, сформированных на участке подложки, расположенном в процессе формирования напротив центра мишени. Указанные участки пленок содержали наибольшее количество фазы, определяющей пьезоэлектрическую эффективность.

Параметр решетки a изменялся в пределах 0,3261—0,3318 нм, а c — 0,5243—0,5296 нм (теоретические значения параметров решетки $a=0,3215$ нм, $c=0,5205$ нм). Отжиг на воздухе (650—750 К, 0,5—2 ч) приводит к обесцвечиванию пленок, а также к уменьшению параметров решетки пленок ZnO, на что указывает перемещение на дифрактограммах дифракционных максимумов в сторону больших углов 2θ (рис. 5, 6). Параметры решетки пленок после отжига становятся в зависимости от условий отжига равными: $a=0,3248\dots 0,3258$ нм, $c=0,5211\dots 0,5236$ нм. Отжиг увеличивает степень преимущественного ориентирования зерен, что проявляется в возрастании интенсивности отражений на дифрактограммах и уменьшении полуширины пиков на дифрактограммах качания. Полуширина дифракционных линий также уменьшается, что указывает на увеличение $L_{\text{окр}}$. Подобное изменение параметров решетки пленок ZnO объясняется не внутренними напряжениями, а созданием сильно неравновесной концентрации междоузельных атомов Zn как одного из основных типов собственных дефектов в ZnO [3]. Это подтверждается и изменением цветности пленок ZnO при отжиге, обусловленной электронными дефектами [4]. Для неотожженных образцов характерно асимметричное размытие дифракционного максимума (0002) в сторону больших углов 2θ , что связано с присутствием в структуре пленки набора межплоскостных расстояний d/n , меньших, чем d/n (0002) ZnO, обычно наблюдающихся при наличии в решеточных пустотах собственных точечных дефектов.

С увеличением концентрации легирующей примеси степень кристалличности пленок ZnO уменьшается и при концентрации ≈ 2 ат.% не превышает 50 об.%. Легирующая примесь размещается в виде отдельных

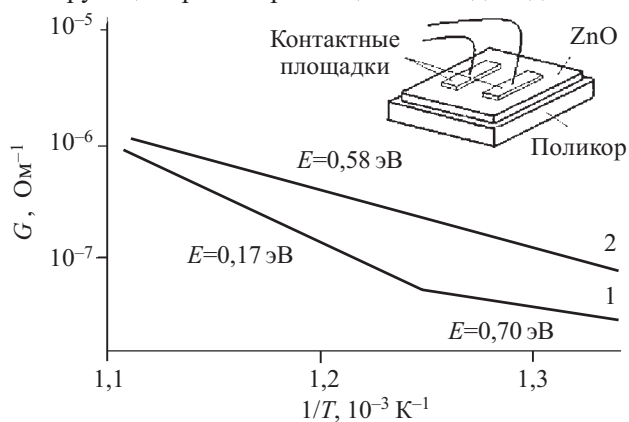


Рис. 7. Температурные зависимости продольной электропроводности пленок ZnO (слоистая структура поликор/ZnO):

1 — до отжига; 2 — после отжига

атомов как в кристаллической, так и в рентгеноаморфной фазах ZnO. Кроме того, примесь осаждается по границам волокон в виде включений металла и соответствующего оксида, которые, по данным рентгеновской дифрактометрии, рентгеноаморфные (до концентрации ≈ 10 ат.%). Концентрацию примеси в рентгеноаморфной и кристаллической фазах легированных пленок ZnO определяли методами инверсионной вольтамперометрии и микрорентгеноспектрального анализа.

Рентгенограммы и параметры, характеризующие строение пленок ZnO, сформированных при $U_{\text{см}}$ от +3 до -10 В, приведены на рис. 6 и в табл. 1. Оптимальной является полярность магнитов в дополнительной магнитной системе, противоположная полярности магнитов магнетрона.

Для пленок ZnO толщиной 2 мкм были измерены температурные зависимости продольной проводимости $G(1/T)$ в интервале температур 600—800 К (рис. 7). По зависимости $G(1/T)$ определены величины энергии активации проводимости (E) пленок ZnO.

Сформированные пленки ZnO в зависимости от условий процесса имеют удельное сопротивление $\rho=10^3\dots 10^5$ Ом·см, и при использовании в устройствах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) низкоомных слоев закорачиваются электроды встречно-штыревых преобразователей (ВШП). С целью увеличения удельного сопротивления пленки ZnO отжигали или в процессе формирования легировали медью. Удельное сопротивление отожженных пленок возрастает на два-три порядка по сравнению с неотожженными и достигает величины 10^6 — 10^7 Ом·см. При легировании ZnO медью получали пленки с $\rho>10^8$ Ом·см.

Применение пленок ZnO в устройствах электронной техники

Слоистый звукопровод пленка алмаза/ZnO в устройствах на ПАВ. Отличительной особенностью слоистых звукопроводов является зависимость коэффициента электромеханической связи (k^2) и скорости поверхностной акустической волны Рэлея (V_R) от толщины слоя пьезоэлектрика, скорости распространения ультразвука, упругих, диэлектрических, пьезоэлектрических констант и ориентационных соотношений отдельных слоев, а также от выбранных направления распространения ПАВ и конструкции устройства [5—7].

Толщина слоя пьезоэлектрического материала в слоистой структуре подбирается исходя из условия получения максимального значения k^2 , которое для различных конструкций разное. Перспективность применения пленок ZnO ($V_R \approx 3$ км/с) в устройствах на ПАВ обусловлена большой величиной k^2 . На основе монокристаллических и наноструктурированных текстурованных пленок ZnO можно изготовить устройства на ПАВ с величиной $k^2>3\%$.

При создании устройств на ПАВ СВЧ-диапазона (>1 ГГц) перспективна пара алмаз/ZnO. Здесь преимущество структур алмаз/ZnO по сравнению с другими звукопроводами (монокристаллы и слоистые структуры, не содержащие слоя алмаза) связано с

Таблица 2

Параметры процессов осаждения поликластерных пленок алмаза

Метод	Нагретая нить	Дуговой разряд
Рабочий газ	1,5 об.% CH ₄ +H ₂	(1,5...4) об.% CH ₄ +H ₂
Давление газа, Па	3·10 ³	>10 ³
Температура подложки, К	800—1300	873—1473
Скорость осаждения, мкм/ч	0,2—2	До 40

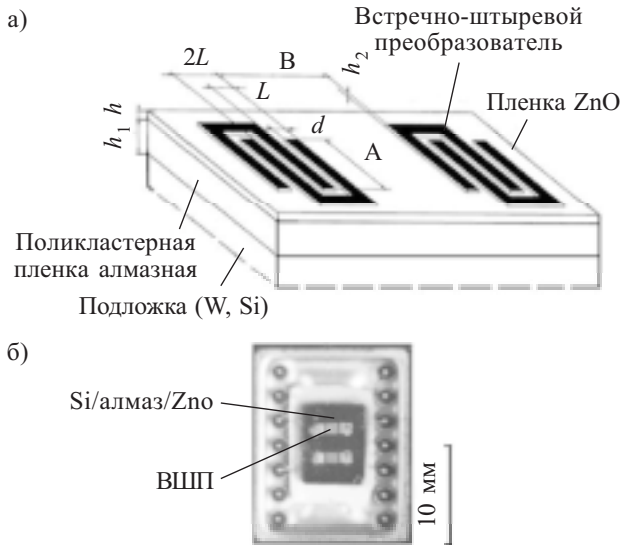


Рис. 8. Конструкция (а) и фотография (б) линии задержки на ПАВ на слоистом звукопроводе Si/алмаз/ZnO

повышением в 1,5—3 раза частоты обработки сигнала при одинаковой геометрии ВШП. Поверхностные акустические волны рэлеевского типа — упругие волны, в которых смещение атомов происходит в поверхностном слое с толщиной порядка длины волны (λ). Поэтому во всех конструкциях линий задержки (ЛЗ) и фильтров, сформированных с применением алмазного звукопровода, минимальная толщина слоистого звукопровода рассчитывается из соотношения $h+h_1 > \lambda$, где h — толщина пьезоэлектрической пленки ZnO, h_1 — толщина поликластерной пленки алмаза (рис. 8).

При использовании монокристаллического звукопровода, для которого известны табличные значения скорости ПАВ, вычисление периода ВШП ($2L$) не представляет труда. В слоистом звукопроводе вычислить скорость ПАВ сложно из-за трудности определения точного значения упругих постоянных наноструктурированной пленки пьезоэлектрика, формируемой ВЧ-магнетронным распылением и состоящей из кристаллической и аморфной фаз. Частота обработки сигнала равна $f = V_R / 4d$, где d — ширина электродов (зазоров) ($d = L/2$). Полоса пропускания уменьшается при увеличении числа пар электродов (M), поэтому одна и та же конструкция может быть и ЛЗ (время задержки равно B/V_R , где B — расстояние между группами ВШП), и фильтром.

Единственная возможность получения на неориентирующих подложках (аморфные и поликристаллические материалы) пленок ZnO, обладающих упорядоченным атомным строением и пьезоэлектрическими свойствами, — это применение методов распыления.

Исследовались слоистые структуры Si(W)/алмаз/ZnO, в которых поликластерную пленку алмаза получали различными методами (табл. 2). Поликластерные пленки алмаза ($\lambda_T = 400 \dots 1200$ Вт/(м·К); температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = 1,6 \dots 3,0 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; $\rho > 10^{13}$ Ом·см; термическая стабильность ≈ 873 К (на воздухе) и ≈ 1673 К (в вакууме)

при $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па)) формировали на базовых подложках из W ($\lambda_T = 160$ Вт/(м·К); $\alpha = 4,4 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; $\rho = 5,8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см) и Si ($\lambda_T = 120$ Вт/(м·К); $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; $\rho = 10^{-3} \dots 10^5$ Ом·см).

Применялись только отожженные пленки ZnO ($\alpha = 4,6 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; $\rho > 10^8$ Ом·см), имеющие $J = 60 \dots 80$ об.%; $a = 0,3261$ нм, $c = 0,5237$ нм; $L_{окр} = 30 \dots 35$ нм; $\sigma = 0,5 \dots 1,0^\circ$. Для увеличения ρ пьезоэлектрических пленок ZnO их легировали медью до концентрации $\approx 0,3$ ат.%. Использованные для создания устройств на ПАВ поликластерные пленки алмаза состояли из кристаллической (95—99 об.%) и рентгеноаморфной фаз.

Использовались беспористые поликластерные пленки алмаза ($L_{окр} = 800 \dots 1000$ нм) толщиной $h_1 = 12 \dots 86$ мкм. Эквидистантные ВШП изготавливали из пленки Al толщиной $h_2 \approx 0,2$ мкм фотолитографией, методами контактной печати и проекционной литографии. Пленки Al ($\rho = (3 \dots 3,2) \cdot 10^{-6}$ Ом·см) получали ВЧ-магнетронным распылением металлических мишеней. При использовании конструкции W/алмаз/ZnO/ВШП ($h_1 = 42$ мкм, $h = 6$ мкм, $d = 40$ мкм, $M = 8,5$) скорость ПАВ составляла 8,82 км/с [8].

Была исследована зависимость k^2 от толщины пленки ZnO, выращенной магнетронным распылением на постоянном токе, для конструкции алмаз/ZnO/ВШП. При $h/\lambda > 0,3$ значение k^2 постоянно и равно $\approx 1,1\%$. На частоту обработки сигнала и внесенные потери фильтров на ПАВ сильное влияние оказывает строение слоя пьезоэлектрического материала. С увеличением J и размера кристаллитов, а также с уменьшением разориентации кристаллитов относительно оси текстуры, вносимые потери могут быть уменьшены на $\approx 20\%$.

Акустическая волна движется по кристаллитам алмаза, состоящим из аксиальных текстурированных пластин толщиной 50—100 нм, и монокристаллическим волокнам ZnO с поперечным размером 50—300 нм, а также по рентгеноаморфным фазам алмазоподобного углерода и ZnO.

Линии задержки на слоистых структурах ситалл/ZnO. Характеристики слоистого звукопровода с использованием пьезоэлектрической пленки ZnO проверялись экспериментально на образцах ЛЗ, сформированных на подложках из ситалла ($\alpha_T = 5 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹).

Расчет геометрических размеров ВШП основывается на известных значениях k^2 , V_R и удельной емко-

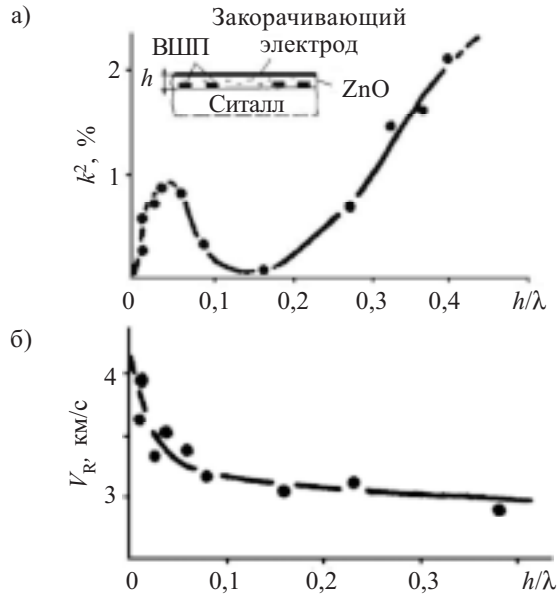


Рис. 9. Влияние толщины пленок ZnO на параметры слоистого звукопровода:

а — коэффициент электромеханической связи k^2 ; б — скорость ПАВ V_R

сти пары электродов (C_F). Для подложек из пьезоэлектрических материалов числовые значения этих величин определены. Однако для подложек с пьезоэлектрическими пленками указанные значения определяются взаимным расположением подложки, преобразователя ПАВ, пьезоэлектрической пленки и закорачивающего электрода. Применяемая в данной работе конструкция ситалл/ВШП/ZnO представлена на рис. 9, а. Значения k^2 , V_R и C_F зависят также от h и λ . Для определения этих величин использовали ЛЗ с $M=40$ и $\lambda=28$ мкм. Значения k^2 определяли по сопротивлению излучения ВШП при согласовании его индуктивными элементами на частоте акустического синхронизма. Скорость ПАВ определяли по периоду преобразователя ПАВ.

Зависимость эффективного k^2 от соотношения h/λ приведена на рис. 9, а. Величина k^2 составляет $\approx 2\%$ при $h/\lambda=0,4\dots 0,45$, что делает перспективным применение пленок ZnO для изготовления устройств на ПАВ. Если учесть, что лучшие структурные характеристики сильнотекстурированных по $\langle 0001 \rangle$ пленок ZnO достигаются при их формировании с относительно невысокой скоростью, то на частотах >70 МГц, для которых требуются пленки ZnO небольшой (5—7 мкм) толщины, можно изготавливать устройства на ПАВ с величиной $k^2 \approx 2\%$. На меньших частотах, из-за трудностей получения толстых (несколько десятков микрон) пленок ZnO, ВШП изготавливают исходя из условия, что пленки ZnO имеют толщину, соответствующую величине первого максимума ($0,035\lambda$).

На рис. 9, б представлена зависимость изменения скорости ПАВ от величины h/λ . В области значений $0 < h/\lambda \leq 0,1$ наблюдается наиболее сильное изменение V_R . С увеличением толщины пленки ZnO ($h > 0,1\lambda$) скорость ПАВ уменьшается незначительно. Для первого максимума в зависимости $k^2(h/\lambda)$ фазовая скорость ПАВ на ситалловых подложках составляет 3,4 км/с (рис. 9, а, б). Поскольку в области значений

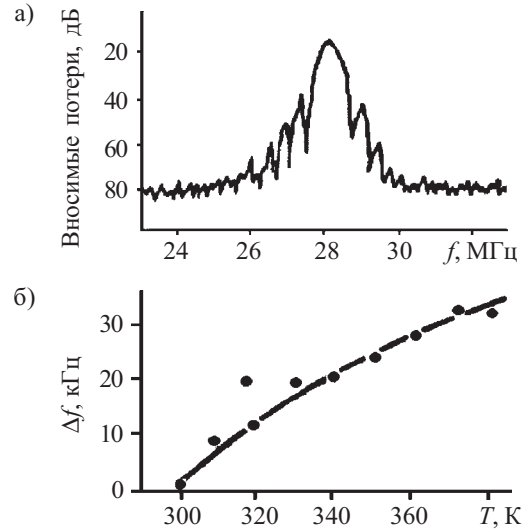


Рис. 10. Характеристики устройств на ПАВ на основе пленок ZnO, сформированных на подложках из ситалла: а — АЧХ линии задержки; б — температурная зависимость частоты

$h/\lambda=0,035$ скорость ПАВ существенно изменяется, то в процессе осаждения пленки ZnO необходимо строго контролировать ее толщину и однородность толщины по поверхности подложки.

Частотная зависимость вносимых потерь ($\gamma_{\text{п}}$) устройств на ПАВ определялась на простой линии задержки. На ситалловой подложке были сформированы два неаподизованных преобразователя ($M=40$, $\lambda=120$ мкм, $A=8$ мм). Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) устройства на ПАВ представлена на рис. 10, а. Вносимые потери в полосе пропускания $\gamma_{\text{п}}=15\dots 16$ дБ при условии, что статическая емкость обоих преобразователей компенсировалась индуктивными элементами. В отсутствие компенсации статической емкости вносимые потери увеличивались до 25—30 дБ. Для такой линии задержки искажения АЧХ в полосе пропускания не превышали 1 дБ.

Температурную стабильность устройств на ПАВ определяли по изменению частоты (Δf) одномодового ПАВ-генератора с линией задержки (рис. 10, б), включенной в качестве частотно-задающего элемента. В области температур 300—380 К температурный коэффициент изменения частоты не превышал $20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Это значение почти в 5 раз меньше, чем для подложек из LiNbO_3 , у которого температурный коэффициент изменения частоты равен $90 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Пленки ZnO — отражающие зеркала УФ-диапазона. Оксид цинка является перспективным материалом для тонкопленочных отражающих покрытий в УФ-области спектра. Особенностью тонких пленок является не только высокий коэффициент отражения (80—85%), но и высокая оптическая прочность, позволяющая использовать их при удельной мощности более 1 МВт/см² при частоте повторения импульсов до 1 кГц и длительности ≈ 1 мкс. Для пленок ZnO характерен достаточно широкий спектральный диапазон отражения. Все эти свойства в сочетании со значительно меньшей стоимостью (по сравнению с многослойными диэлектрическими зеркалами) делают

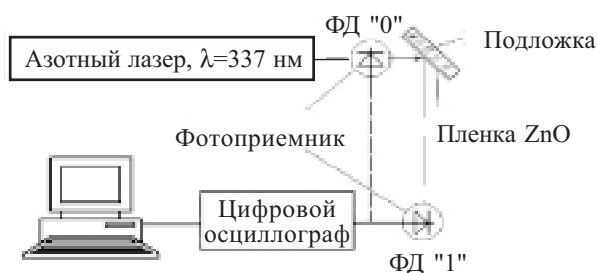


Рис. 11. Схема измерения коэффициента отражения пленок ZnO

пленки ZnO перспективным материалом в области покрытий для УФ лазерной техники.

Пленки ZnO толщиной 0,8—1 мкм были исследованы на отражение падающего излучения (рис. 11). В качестве источника света использовался импульсный азотный лазер ($\lambda=337$ нм). Приемником излучения служили кремниевые ррn-фотодиоды (ФД), сигналы с которых поступали на цифровой осциллограф TDS3032 (ТЕКТРОНИХ). Результат измерения усреднялся по 200 импульсам, что обеспечило точность измерения $\pm 0,5\%$. Угол падения излучения на образец составлял $\approx 45^\circ$.

Таблица 3

Влияние расположения полюсов магнитов на коэффициент отражения пленок ZnO

Расположение магнитов магнитной системы относительно магнетрона	$k_1, \%$	$k_2, \%$
Без дополнительной магнитной системы	80,3	79,6
Полюса магнитных систем совпадают	73,4	80,9
Полюса магнитных систем противоположны	81,0	80,3

Таблица 4

Зависимость коэффициента отражения от напряжения смещения

$U_{см}, В$	$k_1, \%$	$k_2, \%$
-6...-11	77,0	82,1
-5...-10	81,5	83,2
-2...-3	81,5	85,0
-1...-3	73,9	83,5
+2...+3	83,6	86,9

Фотодиодом замерялась интенсивность излучения лазера до попадания на пленку (I_0) (положение ФД "0") и интенсивность отраженного пленкой излучения (I_r) (положение ФД "1"). Для всех пленок коэффициент отражения $k=I_r/I_0 \cdot 100\%$ измерялся до и после отжига (k_1 и k_2 , соответственно). В табл. 3 приведены значения k для пленок, полученных в режиме без $U_{см}$ (подложкодержатель заземлен), а в табл. 4 показана зависимость k от $U_{см}$ (расположение полюсов магнитов магнетрона и дополнительной магнитной системы противоположное).

Лучшие параметры наблюдали у отожженных пленок, сформированных при небольшом электрическом смещении на подложкодержателе ($U_{см} \approx -3...+3 В$).

Выводы

Разработано оборудование для магнетронного распыления материалов с воздействием на формируемую пленку магнитного поля, создаваемого дополнительной магнитной системой. Метод позволяет получать при низких температурах ($< 420 К$) на неориентирующих подложках наноструктурированные пленки ZnO с упорядоченным строением кристаллической фазы и обладающих заданными функциональными свойствами, изготавливать на их основе многослойные структуры для создания устройств электронной техники и оптики с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Показана возможность использования слоистой структуры подложка/ZnO (подложка — ситалл, поликластерная пленка алмаза) при изготовлении устройств на ПАВ. Пленки ZnO, полученные разработанным методом, обладают коэффициентом отражения $> 82\%$ в ближней ультрафиолетовой зоне. При этом наблюдается высокая стойкость к лазерному излучению, что дает возможность использовать пленки ZnO для создания отражающих покрытий в мощных УФ лазерных системах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Belyanin A. F., Pashchenko P. V., Senchenok A. E. et al. Magnetron sputtering apparatus for depositing films of various materials // Thin Films in Electronics. Proceedings of 12th International Symposium.— Kharkov, Ukraine.— 2001.— P. 330—335.
2. Белянин А. Ф., Пашченко П. В., Семенов А. П. Устройство высокочастотного магнетронного распыления для выращивания тонких пленок // Приборы и техника эксперимента.— 1991.— № 3.— С. 220—222.
3. Крегер Ф. Химия несовершенных кристаллов.— М.: Мир, 1969.
4. Платонов А. Н. Природа окраски минералов.— Киев: Наукова думка, 1976.
5. Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера.— М.: Мир, 1981.
6. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Пашченко П. В., Багдасарян С. А. Слоистые структуры алмазоподобный углерод/AlN(ZnO) в устройствах на поверхностных акустических волнах // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания.— 2004.— № 1—2.— С. 58—63.
7. Белянин А. Ф., Самойлович М. И., Ковальский К. А. и др. Наноструктурированные пленки AlN и ZnO в электронной технике // Наука и технология в промышленности.— 2005.— № 2.— С. 46—57.
8. Белянин А. Ф., Зима В. Н., Алексенко А. Е. и др. Применение алмазных пленок в качестве звукопровода устройств на ПАВ // Тонкие пленки в электронике. Мат-лы III Межрегионального совещания.— Йошкар-Ола: МГТУ, 1992.— С. 162—167.