

13
Зависимость наклона текстуры и эффективности возбуждения сдвиговых волн пленками ZnO от давления рабочего газа в магнетронной системе на постоянном токе

© А.Г. Веселов,¹ В.И. Елманов,¹ О.А. Кирясова,¹ Ю.В. Никулин^{1,2}

¹ Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 410019 Саратов, Россия

² Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия
e-mail: labsftwo@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 июля 2018 г.

В окончательной редакции 23 июля 2018 г.

Принято к публикации 28 ноября 2018 г.

Для пленок ZnO толщиной $\sim 0.45\text{--}1.2\ \mu\text{m}$, синтезируемых в планарной магнетронной системе на постоянном токе в сдвиговой геометрии осаждения, исследована зависимость угла наклона текстуры и эффективности возбуждения сдвиговых волн от давления рабочего газа в диапазоне $0.14\text{--}0.74\ \text{mTorr}$, при котором происходит переход режима осаждения из бесстолкновительного в близкий к диффузному. Показано, что увеличение давления с $\sim 0.14\text{--}0.24$ до $0.74\ \text{mTorr}$ приводит к уменьшению угла наклона столбчатой текстуры с $\sim 25\text{--}27$ до $\sim 7^\circ$ и снижению эффективности возбуждения звука. Пленки, синтезированные при давлениях $\sim 0.14\text{--}0.24\ \text{mTorr}$, близких к границе перехода разряда от таунсендовского к тлеющему, характеризуются наилучшей эффективностью возбуждения сдвиговых волн — наблюдается наименьшая величина вносимых потерь при толщинах $0.45\text{--}0.75\ \mu\text{m}$, число наблюдаемых эхо-импульсов достигает $20\text{--}40$, что позволяет наблюдать отраженный звук с задержкой до $80\ \mu\text{s}$ при длине кристалла-звукопровода $10\ \text{mm}$.

DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47484.289-18

Введение

Широкий спектр применения пьезоактивных текстурированных пленок ZnO в СВЧ-устройствах акусто- и оптоэлектроники (резонаторы, фильтры, оптические модуляторы, линии задержки, конвольверы) [1–15], а также их устойчивость к физическому воздействию (вибрация, температура, электромагнитное излучение) являются причиной неослабевающего интереса к разработке технологий синтеза пьезоактивных текстурированных пленок ZnO толщиной менее $1\ \mu\text{m}$ и исследованию их свойств.

С точки зрения применения текстурированных пленок ZnO в области акустоэлектроники особый интерес представляют пленки с наклонной или лежащей текстурой (ось C направлена под углом или параллельно плоскости пленки ZnO). Это обусловлено рядом отличительных особенностей, которыми обладают такие пленки по сравнению с пленками с прямой текстурой (ось C направлена перпендикулярно поверхности пленки ZnO). В частности, акустические резонаторы на объемных сдвиговых волнах имеют наполовину меньшие температурный коэффициент частоты и площадь электродов, чем у резонаторов на продольных волнах, что способствует уменьшению массо-габаритов устройств на их основе. Кроме того, сдвиговые волны обладают почти вдвое меньшей скоростью распространения по сравнению с продольными волнами, что позволяет создавать линии

задержки (ЛЗ) с более короткими звукопроводами при том же времени задержки сигнала по сравнению с ЛЗ на продольных волнах. Отметим, что интерес к развитию технологий формирования и исследованию свойств пьезоактивных пленок ZnO с наклонной текстурой дополняет способность возбуждения такими пленками поверхностных горизонтальных (SH) акустических волн, а также возможность их применения в интегральной оптоэлектронике и создания акусто-оптических приборов спектрального анализа на основе коллинеарной дифракции на объемных сдвиговых волнах.

На сегодняшний день для синтеза пьезоактивных пленок ZnO с наклонной или лежащей текстурой наиболее часто применяются методы магнетронного распыления (МР) — высокочастотного (ВЧ) [2,3,6,9,16–22] и на постоянном токе (МРТП) [23–26], а также реактивное [1,2,5], электронно-лучевое [27] и ионно-лучевое [28] распыления. Для методов магнетронного распыления наибольшее влияние на пьезоакустические и структурные свойства формируемых пленок ZnO оказывают давление P и состав рабочего газа [5,16,17,19,22], температура подложки T_s [5,16,17,22,24], расстояние между мишенью и подложкой [22], мощность магнетронного разряда E и скорость осаждения v [16]. При этом, как было показано ранее, для получения высококачественных пленок ZnO с наклонной или лежащей текстурой методом МР осаждение пленок ZnO следует производить при низком давлении рабочего газа

$P < 7 \text{ mTorr}$ [1,2,19–21,24–26] и как можно меньшем расстоянии L между распыляемой мишенью и подложкой [1,22]. Выбор низкого P и малого L обусловлен стремлением обеспечить режим пролета атомов распыляемой мишени близкий к бесстолкновительному [29], при котором формируются пленки с лучшими структурными характеристиками (плотность, химическая чистота, кристалличность) и адгезией, по сравнению с пленками, осаждаемыми при высоком давлении ($P > 7 \text{ mTorr}$), когда режим пролета атомов близок к диффузному. Кроме того, диффузный режим осаждения, если не созданы какие-либо специальные условия [18], способствует формированию в пленках кристаллической ориентации с минимальной поверхностной энергией — прямая текстура (0002) для ZnO [17,19].

Отметим, что при формировании пленок ZnO с наклонной текстурой независимо от выбора параметров P , T_s , E и v , особое значение приобретает необходимость реализации ориентирующего фактора, определяющего наклон текстуры пленки. Среди ориентирующих факторов, применяемых в технологии синтеза пленок ZnO с наклонной текстурой, наиболее распространенным является наклон подложки относительно плоскости магнетрона [2,3,19,20–22,26–28]. Однако наклон подложки способствует формированию пленок с высокой неоднородностью толщины и угла наклона кристаллитов [26] по всей площади пленки, что приводит к искажению фронта распространения возбужденной в кристалле-звукопроводе акустической волны и ограничивает область применения таких пленок. К ориентирующим факторам, лишенным этого недостатка, можно отнести сдвиговую геометрию осаждения [17,19,24,25], при которой подложка располагается над зоной эрозии мишени без наклона относительно плоскости распыляемой мишени, а также использование различных ориентирующих подслоев [2,22], ионной бомбардировки [18,27] и напряжения смещения на подложке [18].

Для методов магнетронного распыления (ВЧ и на постоянном токе) с оптимизированными ростовыми режимами и способами ориентации оси текстуры была показана возможность формирования пьезоактивных пленок ZnO с наклонной или лежащей текстурой толщиной $0.8–10 \mu\text{m}$ [2,3,6,17–21,24,25,28]. Возможность создания пьезоактивных пленок ZnO толщиной менее $0.8 \mu\text{m}$ с однородной по всей площади подложки-звукопровода наклонной текстурой, представляющих наибольший интерес с точки зрения применения в устройствах акустоэлектроники СВЧ-диапазона, обсуждалась в работе [25]. Так, для пленок ZnO, осаждаемых при $P \approx 0.26 \text{ mTorr}$ методом МРПТ в сдвиговой геометрии, с помощью химического травления в водном растворе HCl, было показано, что получаемые пленки ZnO с наклонной текстурой толщиной $\sim 0.9 \mu\text{m}$ сохраняют пьезоактивность и способны возбуждать сдвиговые волны вплоть до толщин $\sim 0.4 \mu\text{m}$.

Отметим, что для сдвиговой геометрии осаждения характерно наличие касательной составляющей скорости

движения атомов распыляемой мишени к плоскости подложки, величина которой может зависеть от давления рабочего газа P . Следует ожидать, что чем выше давление P , тем меньше будет касательная составляющая скорости за счет возросшего рассеяния атомов распыляемого материала мишени на атомах рабочего газа при переходе режима осаждения из бесстолкновительного в диффузный. Для пленок ZnO, синтезируемых методом ВЧ-магнетронного распыления в сдвиговой геометрии, влияние давления рабочего газа на текстуру пленок исследовалось в [17,19]. Однако для пленок ZnO с наклонной текстурой, синтезируемых методом МРПТ в сдвиговой геометрии [24,25], вопрос о влиянии давления рабочего газа на эффективность возбуждения сдвиговых волн и микроструктуру пленок не обсуждался.

В настоящей работе для пленок ZnO с наклонной текстурой, осаждаемых методом МРПТ в сдвиговой геометрии, определен диапазон давлений рабочего газа P и времени осаждения t , при которых происходит стабильный синтез пьезоактивных пленок ZnO толщиной $d \approx 0.45–1.2 \mu\text{m}$. Показано, что синтез пленок ZnO с наклонной текстурой возможен в достаточно широком диапазоне давлений рабочего газа $P \approx 0.14–0.74 \text{ mTorr}$, однако наименьшие значения вносимых потерь и наилучшая эффективность возбуждения сдвиговых волн (по величине вносимых пленкой потерь и числу наблюдаемых эхо-импульсов) достигаются для пленок, осаждаемых при давлениях рабочего газа вблизи границы зажигания плазмы $P \approx 0.14–0.24 \text{ mTorr}$ (переход разряда от таунсендовского к тлеющему).

Эксперимент

Синтез пленок ZnO толщиной $d \approx 0.45–1.2 \mu\text{m}$ производился в планарной несбалансированной магнетронной распылительной системе на постоянном токе с квазизамкнутым объемом зоны горения плазмы (рис. 1). Квазизамкнутый объем представлял собой кварцевый стакан диаметром $D \approx 40 \text{ mm}$ и высотой $h \approx 23 \text{ mm}$, нижняя часть которого ограничивалась магнитной системой магнетрона (катод), а верхняя — пластиной из алюминия (анод, находящийся под потенциалом „земли“) с отверстием диаметром 8 mm над зоной эрозии мишени. Базовое давление в ростовой камере составляло $P_b \approx 0.01 \text{ mTorr}$. В качестве рабочего газа использовалась смесь газов — 40% кислорода (чистота 99.999%) и 60% аргона (чистота 99.999%). В качестве мишени использовался диск Zn (диаметр $\sim 40 \text{ mm}$, толщина $\sim 1 \text{ mm}$, чистота 99.99%). Осаждение пленок ZnO производилось при температуре подложки $T_s \approx 300^\circ\text{C}$ и давлениях рабочего газа вне квазизамкнутого объема $P \approx 0.14, 0.24, 0.34, 0.44, 0.54$ и 0.74 mTorr . Давление P_{iv} внутри квазизамкнутого объема на $\sim 0.6 \text{ mTorr}$ превышало P (далее по тексту и на рисунках приводится давление P вне квазизамкнутого объема). Измерение давления рабочего газа в процессе напыления пленки

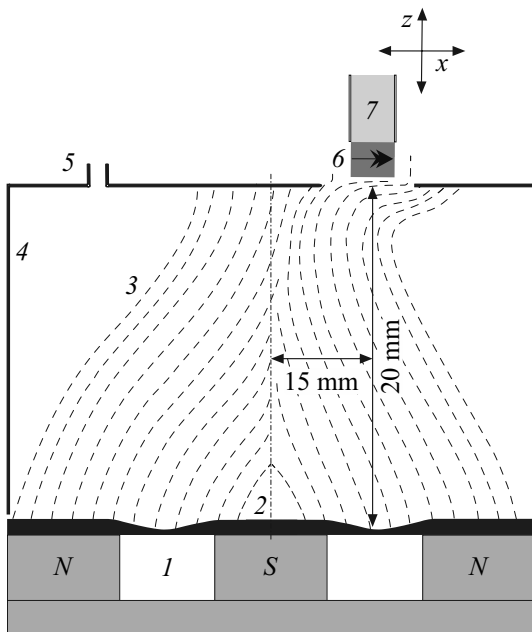


Рис. 1. Схема квазизамкнутого объема для осаждения пленок ZnO с наклонной текстурой: 1 — магнитная система магнетрона, 2 — мишень Zn, 3 — зона горения плазмы (штриховыми линиями схематически показана светящаяся область рекомбинационного горения), 4 — квазизамкнутый объем с анодом из алюминия и отверстием для размещения подложки-звукопровода, 5 — место напуска газа в квазизамкнутый объем, 6 — пленка ZnO, 7 — подложка-звукопровод АИГ с нагревателем, положение которой юстировалось над зоной эрозии мишени за счет перемещения по осям X и Z .

осуществлялось с помощью ионизационного вакуумметра ВИТ-2. В процессе напыления на мишень подавалось постоянное напряжение величиной $U \approx -500$ В, при этом ток разряда поддерживался на уровне $I \approx 120$ мА для всех P . Мощность магнетронного разряда E и скорость осаждения v зависели от давления P линейно и составляли $E \approx 41-33$ Вт и $v \approx 40-20$ нм/мин для $P \approx 0.14-0.74$ мТорр. В качестве подложки-звукопровода использовался монокристаллический алюмоитриевый гранат, легированный лютецием (АИГ) с площадью поверхности под осаждение пленки 4×4 мм и длиной 10 мм.

Для создания пьезопреобразователей на основе пленок ZnO в качестве материала подслоя использовался хром (Cr) чистотой 99.99%. Металлический подслоя Cr толщиной 400 нм осаждался на подложку АИГ при температуре $T_s \approx 300^\circ\text{C}$ термическим осаждением из танталового тигля при давлении остаточной атмосферы $P_b \approx 0.05$ мТорр. После нанесения подслоя Cr подложка без развакууммирования размещалась по центру отверстия в аноде квазизамкнутого объема над зоной эрозии мишени на расстоянии $L \approx 23$ мм от поверхности мишени, где в течение времени $t \approx 12-40$ мин при $T_s \approx 300^\circ\text{C}$ происходило осаждение пленок ZnO. Осаждение пленок ZnO осуществлялось на один и тот же кристалл АИГ,

для этого после каждого напыления пленки ZnO и ее исследования она удалялась путем химического травления в водном растворе кислоты HCl. Отметим, что пленки ZnO с наклонной текстурой, выращиваемые по описанной в настоящей работе технологии, характеризуются высокой прочностью и адгезией к подложке — удалить пленку ZnO с подложки АИГ было возможно только путем химического травления в азотной или соляной кислоте.

В настоящей работе исследовались пьезоакустические свойства и микроструктура для двух серий пленок: серия № 1 — пленки ZnO осаждались при давлениях $P \approx 0.14-0.74$ мТорр в течение $t \approx 20$ мин с целью определения влияния давления рабочего газа на толщину пленки и эффективность возбуждения звука; серия № 2 — пленки ZnO осаждались при $P \approx 0.14$ мТорр ($t \approx 12-30$ мин), $P \approx 0.44$ мТорр ($t \approx 20$ и 30 мин), $P \approx 0.54$ мТорр ($t \approx 20$ и 30 мин), $P \approx 0.74$ мТорр ($t \approx 30$ и 40 мин) с целью определения различий в эффективности возбуждения звука и наклоне текстуры для пленок с близкой по значению толщиной, выращенных при разных P . Изменение t позволяло формировать пленки ZnO различной толщины, при этом увеличение времени осаждения до 30–40 мин для высоких давлений рабочего газа ($P \approx 0.54-0.74$ мТорр) способствовало увеличению толщины d формируемых пленок до 750 нм.

Возбуждение и регистрация акустических колебаний в пьезопреобразователях на основе текстурированных пленок ZnO производились на измерительной установке, состоящей из импульсного СВЧ-генератора (845 МГц, длительность импульса 1–5 мкс), генератора синхронимпульсов, усилителя и осциллографа. СВЧ-импульсы мощностью $1 \mu\text{W}-0.5$ Вт подводились непосредственно к пьезоактивному преобразователю через СВЧ-зонд с центральным электродом диаметром 100 мкм, что позволяло оценивать однородность текстуры пленки с шагом $\sim 100 \mu\text{m}$ по всей поверхности подложки-звукопровода. В эксперименте измерялись общие потери звука в пленке и подложке-звукопроводе. Отметим, что за счет отсутствия согласования подводящей зондовой СВЧ-линии с пленкой ZnO, а также различия акустических импедансов подложки-звукопровода АИГ и пленки ZnO, наименьшая величина потерь, наблюдаемая нами в эксперименте, составляла около 47 дБ. Для определения качества выращенной пленки ZnO с точки зрения эффективности возбуждения звука, наряду с потерями оценивалось число N эхо-импульсов, наблюдаемых на осциллограммах. Если на осциллограммах наблюдалось $N \approx 20-40$ эхо-импульсов и их число было постоянным (в пределах $\pm 1-2$) на всей площади пленки, то считалось, что пленка ZnO обладает однородной по площади подложки текстурой и толщиной и эффективно возбуждает звук.

Исследование поперечного сечения пленок ZnO производилось методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Auriga, CarlZeiss). Оценка толщины пленок d и ее однородности по площади подложки производилась для каждого образца методом профилометрии (Dectak 150, Veeco) с точностью 2–3%.

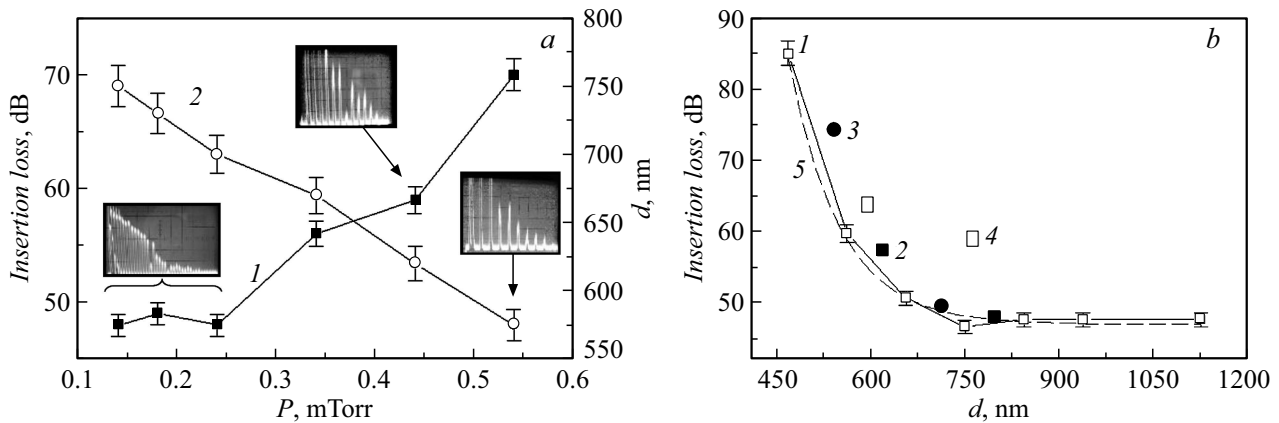


Рис. 2. *a* — зависимости величины вносимых пленкой потерь (1) и толщины пленки d (2) от давления рабочего газа P . На вставках к рисунку приведены типичные осциллограммы эхо-импульсов, наблюдаемые для пленок, синтезируемых при $P \approx 0.14$ – 0.24 mTorr (масштаб осциллограммы — $4 \mu\text{s}/\text{cm}$), $P \approx 0.44$ mTorr (масштаб осциллограммы — $1.5 \mu\text{s}/\text{cm}$) и $P \approx 0.54$ mTorr (масштаб осциллограммы — $1 \mu\text{s}/\text{cm}$). Величина погрешности для кривых 1, 2 — 2%; *b* — зависимости величины вносимых пленкой потерь от толщины пленки d для пленок ZnO, выращенных при $P \approx 0.24$ (кривая 1), ≈ 0.44 (2), ≈ 0.54 (3) и ≈ 0.74 mTorr (4). Штриховой линией 5 показана экспоненциальная аппроксимация кривой 1. Величина погрешности для кривой 1–2%.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования пьезоакустических свойств выращенных пленок ZnO толщиной $d \approx 450$ – 1200 nm показали, что во всем диапазоне давлений рабочего газа $P \approx 0.14$ – 0.74 mTorr формируются пьезоактивные пленки ZnO с наклонной текстурой, при этом созданные на их основе пьезоакустические преобразователи способны эффективно возбуждать сдвиговые волны при толщинах пленки менее $0.7 \mu\text{m}$. На рис. 2, *a* приведены зависимости величины вносимых потерь (кривая 1) и толщины пленки d (кривая 2) от P для пленок ZnO, синтезируемых в течение $t \approx 20$ min (серия № 1). На вставках к рис. 2 приведены типичные осциллограммы эхо-импульсов, наблюдаемые для пленок, синтезируемых при $P \approx 0.14$ – 0.24 , ≈ 0.44 и ≈ 0.54 mTorr. Из рисунка видно, что увеличение P с 0.14 до 0.54 mTorr приводит к уменьшению толщины пленок с 750 до 570 nm и росту вносимых пленкой потерь с 47 до 70 dB. Кроме того, с ростом P наблюдается снижение эффективности возбуждения звука, которое проявляется в уменьшении числа N наблюдаемых эхо-импульсов с ~ 40 до ~ 10 – 13 (см. вставки на рис. 2, *a*). Наблюдаемое уменьшение толщины пленки d с ростом давления P связано со снижением скорости роста с $v \approx 40$ до $v \approx 20$ nm/min при переходе из бесстолкновительного в близкий к диффузионному режим за счет возрастающего рассеяния атомов распыляемой мишени на атомах рабочего газа, тогда как уменьшение числа эхо-импульсов вызвано изменением микроструктуры пленки и ухудшением однородности текстуры по площади пленки.

Для определения различий в эффективности возбуждения звука и наклоне текстуры для пленок ZnO с близкой по значению толщиной, но выращенных при разных P , было проведено сравнение пьезоакустиче-

ских свойств и микроструктуры пленок серии № 2. На рис. 2, *b* приведена зависимость величины вносимых потерь от толщины d для пленок ZnO, синтезируемых при $P \approx 0.24$ mTorr (кривая 1) в течение $t \approx 12$ – 30 min. Из рисунка видно, что зависимость величины потерь от толщины пленки d близка к экспоненциальной (экспоненциальная аппроксимация кривой 1 показана штриховой линией 5 на рис. 2, *b*). Отдельными точками рядом с кривой 1 обозначены значения вносимых потерь для пленок, выращенных при $P \approx 0.44$ (2), ≈ 0.54 (3) и ≈ 0.74 mTorr (4) в течение $t \approx 20$, 30 и 40 min. Сравнение данных показывает, что в пленках толщиной $d \leq 600$ nm наименьшими потерями обладают пленки, осажденные при низком давлении рабочего газа $P \approx 0.24$ mTorr (рис. 2, *b*, кривая 1). В пленках толщиной $d > 700$ nm, выращенных при $P \approx 0.24$ – 0.54 mTorr, величина потерь почти не зависит от P и составляет 47–50 dB, тогда как для пленок, осажденных при $P \approx 0.74$ mTorr, величина потерь оказывается на 12 dB больше (~ 60 dB), чем у пленок при $P \approx 0.54$ – 0.24 mTorr.

Наблюдаемое изменение величины потерь и эффективности возбуждения звука пленками ZnO с ростом P связано со структурными различиями пленок, осажденных при высоких ($P \approx 0.54$ mTorr) и низких ($P \approx 0.14$ – 0.24 mTorr) давлениях рабочего газа, а именно с различием в угле наклона α столбчатой структуры относительно нормали к пленке. На рис. 3 приведены типичные изображения сколов и осциллограммы пленок ZnO, осажденных при $P \approx 0.24$, 0.54 и 0.74 mTorr. Видно, что при всех P пленки характеризуются столбчатой структурой, угол наклона α которой линейно зависит от P и уменьшается с $\alpha \approx 25^\circ$ при $P \approx 0.24$ mTorr до $\alpha \approx 7^\circ$ при $P \approx 0.74$ mTorr. Уменьшение угла наклона α приводит к тому, что эффективность возбуждения сдви-

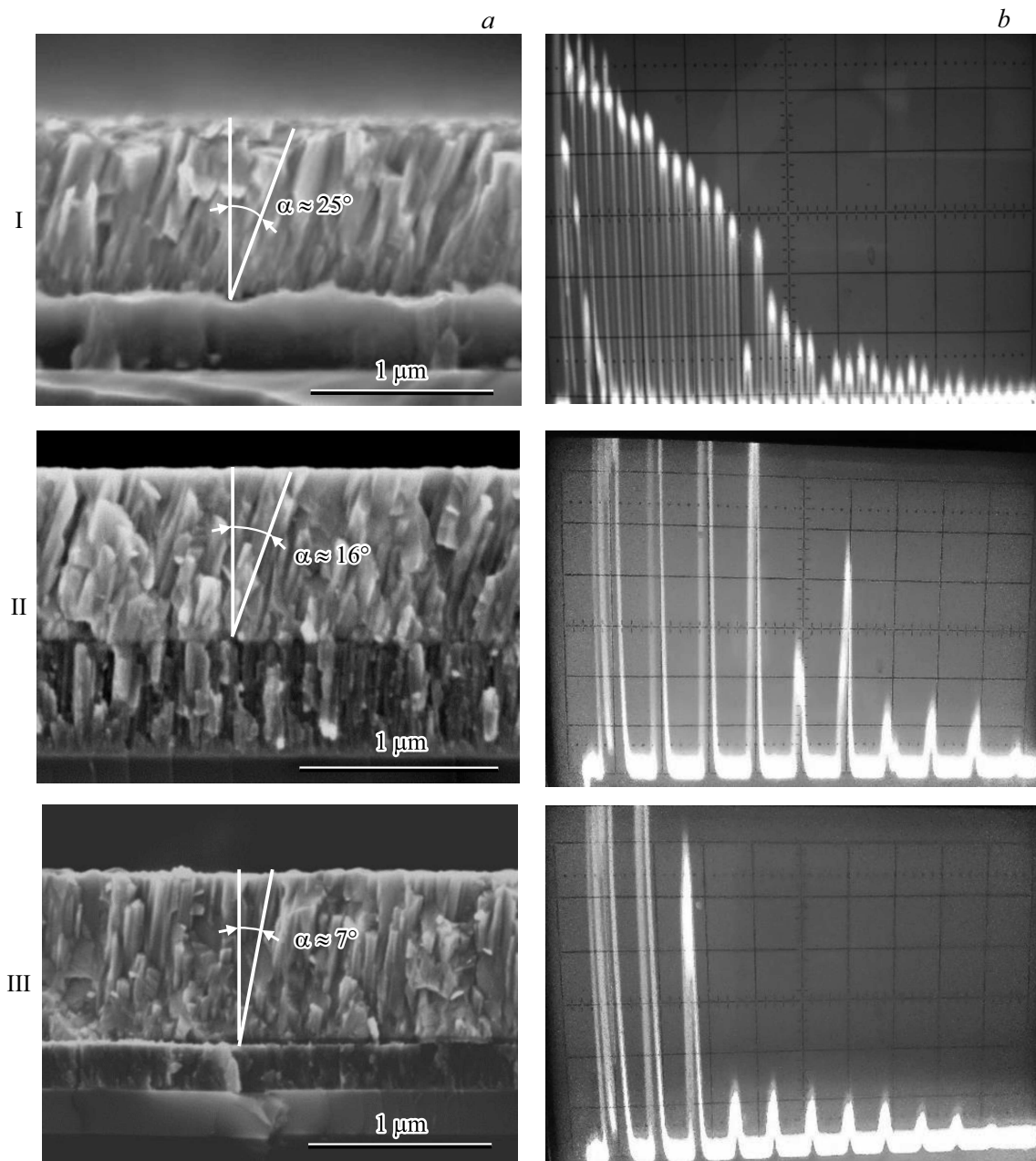


Рис. 3. СЭМ-изображения сколов (а) и осциллограммы сдвиговых эхо-импульсов (б) для пленок ZnO с наклонной текстурой, выращенных при $P \approx 0.24$ mTorr (I), $P \approx 0.54$ mTorr (II) и $P \approx 0.74$ mTorr (III). Масштаб для осциллограмм: I — 4, II — 1, III — 1 μ s/cm.

говых волн снижается с ростом P . Так, в пленке толщиной $d \approx 750$ nm, выращенной при $P \approx 0.24$ mTorr, на осциллограмме наблюдается однородная по поверхности пленки сетка из ~ 40 эхо-импульсов (рис. 3, а), при этом потери между соседними эхо-импульсами по порядку величины равны потерям на один проход в кристалле-звукопроводе. Для пленки такой же толщины, выращенной при $P \approx 0.54$ – 0.74 mTorr, сетка состоит не более чем из 10–13 эхо-импульсов (рис. 3, б, в) и является достаточно неоднородной по площади пленки. В нашем случае под неоднородностью сетки эхо-импульсов мы

подразумеваем различие числа N эхо-импульсов, наблюдаемых на разных участках пленки. Как правило, для пленок, выращенных при $P \approx 0.74$ mTorr, разброс N составлял 4–5 эхо-импульсов, тогда как для пленок, осаждаемых при $P \approx 0.14$ – 0.24 mTorr, разброс не превышал 1–2 эхо-импульса.

Полученные результаты позволяют с учетом зависимости $\alpha(P)$, близкой к линейной (рис. 4), оценить давление рабочего газа P и угол α , при которых пленки ZnO будут проявлять максимальную и минимальную эффективность возбуждения сдвиговых волн.

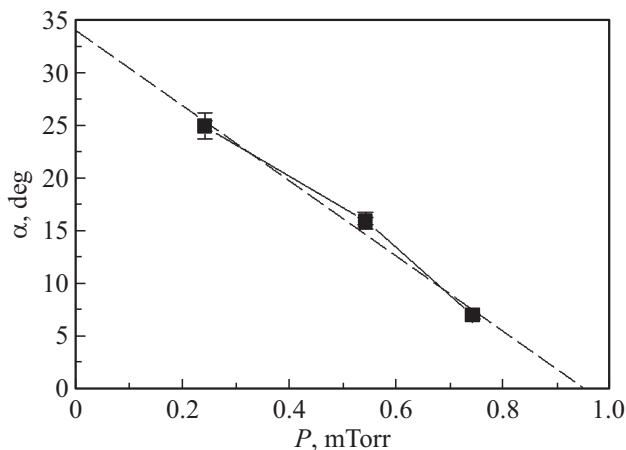


Рис. 4. Зависимость угла наклона столбчатой текстуры от давления рабочего газа P . Штриховой линией обозначена среднеквадратичная аппроксимация зависимости $\alpha(P)$. Величина погрешности измерения угла α — 5%.

Из линейной аппроксимации, представленной на рис. 4, следует, что давление, при котором угол наклона $\alpha \approx 0$ (минимальная эффективность возбуждения звука), соответствует $P \approx 0.95$ mTorr, а наименьшее давление рабочего газа, соответствующее порогу зажигания плазмы ($P \approx 0.1$ – 0.12 mTorr), дает значение угла наклона столбчатой структуры $\alpha \approx 29$ – 30° (наибольшая эффективность возбуждения сдвиговых волн).

Заключение

Для пленок ZnO с наклонной текстурой, осажденных методом МРПТ в сдвиговой геометрии, установлено существенное влияние давления рабочего газа ($P \approx 0.14$ – 0.74 mTorr) на угол наклона α текстуры пленки, толщину пленки d и эффективность возбуждения звука. Показано, что эффективность возбуждения сдвиговых волн, определяемая по величине вносимых пленкой потерь и числу наблюдаемых эхо-импульсов, снижается с ростом P за счет уменьшения угла наклона текстуры пленки с $\alpha \approx 25$ – 27° при $P \approx 0.24$ – 0.14 mTorr до $\alpha \approx 7^\circ$ при $P \approx 0.74$ mTorr. Причиной изменения угла наклона текстуры в зависимости от давления рабочего газа является переход режима осаждения от бесстолкновительного к диффузному, при котором имеет место существенное рассеяние атомов распыляемого материала мишени на атомах рабочего газа и соответственно изменяется угол их подлета к подложке. Наиболее эффективно возбуждают звук пленки ZnO, синтезированные при P , близком к порогу зажигания плазмы $P \approx 0.14$ – 0.24 mTorr. Получаемые при этих P пленки ZnO толщиной $d \approx 0.45$ – 0.75 μm имеют наибольший угол наклона кристаллитов $\alpha \approx 25$ – 27° , характеризуются однородной текстурой на всей площади пленки и позволяют наблюдать отраженный звук

с задержкой до $80 \mu\text{s}$ при длине кристалла-звукопровода 1 см.

Полученные в работе результаты могут представлять интерес для развития технологии синтеза тонких ($d < 0.5 \mu\text{m}$) пьезоактивных пленок ZnO с наклонной текстурой, перспективных при разработке акустоэлектронной элементной базы устройств обработки информации СВЧ-диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-37-60052, 16-29-14058.

Список литературы

- [1] *Rughoobur G., De Miguel-Ramos M., Mirea T., Clement M., Olivares J., Díaz-Durán B., Sangrador J., Miele I., Milne W.I., Iborra E., Flewitt A.J.* // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 108. P. 034103–1–5. DOI: 10.1063/1.4940683
- [2] *Rughoobur G., García-Gancedo L., Flewitt A.J., Milne W.I., De Miguel-Ramos M., Clement M., Mirea T., Olivares J., Iborra E.* // Europ. Frequency and Time Forum (EFTF). 2014. P. 297–300. DOI:10.1109/EFTF.2014.7331491
- [3] *Yoshino Y.* // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 061623–1–7. DOI: 10.1063/1.3072691
- [4] *Prasad M., Sahula V., Khanna V.K.* // IEEE Trans. On Device and Mat. Reliability. 2014. N 1. P. 545–553. DOI: 10.1109/TDMR.2013.2271245
- [5] *Link M., Schreiter M., Weber J., Gabl R., Pitzer D., Primig R., Wersing W., Assouar M.B., Elmazria O.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 2006. Vol. 24. P. 218–220. DOI: 10.1116/1.2165658
- [6] *Nalamwar A.L., Wagers R.S., Epstein M.* // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. N 6. P. 2175–2178. DOI: 10.1063/1.324017
- [7] *Yan Z., Zhou X.Y., Pang G.K.H., Zhang T., Liu W.L., Cheng J.G., Song Z.T., Feng S.L., Lai L.H., Chen J.Z., Wang Y.* // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. P. 143503–1–3. DOI: 10.1063/1.2719149
- [8] *Qin L., Chen Q., Cheng H., Chen Q., Li J.-F., Wang Q.-M.* // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. P. 094511–1–11. DOI: 10.1063/1.3657781
- [9] *Dwivedi M., Bhargava J., Sharma A., Vimal V., Eranna G.* // IEEE Sensors Journ. 2014. Vol. 14. N 5. P. 1577–1582. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2298879
- [10] *Алексеев С.Г., Гуляев Ю.В., Котелянский И.М., Мансфельд Г.Д.* // УФН. 2005. Т. 175. № 8. С. 895–900.
- [11] *Hickernell F.S.* // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 5. С. 70–76.
- [12] *Coldren L.A.* // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 5. С. 246–249.
- [13] *Özgür Ü., Alivov Ya. I., Liu C., Teke A., Reshchikov M.A., Doğan S., Avrutin V., Cho S.-J., Morkoç H.* // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 041301–1–103. DOI: 10.1063/1.1992666
- [14] *Ching K.-L., Li G., Ho Y.-L., Kwok H.-S.* // Cryst. Eng. Comm. 2016. Vol. 18. P. 779–786. DOI: 10.1039/C5CE02164B
- [15] *Djurisic A.B., Ng A.M.C., Chen X.Y.* // Progress in Quantum Electronics. 2010. Vol. 34. P. 191–259. DOI:10.1016/j.pquantelec.2010.04.001
- [16] *Fujimura N., Nishihara T., Goto S., Xu J., Ito T.* // J. Crystal Growth. 1993. Vol. 130. P. 269–279.
- [17] *Kawamoto T., Yanagitani T., Matsukawa M., Watanabe Y.* // Japan. J. Appl. Phys. 2007. Vol. 46. N 7B. P. 4660–4664. DOI: 10.1143/JJAP.46.4660

- [18] *Takayanagi S., Yanagitani T., Matsukawa M., Watanabe Y.* // IEEE Intern. Ultrason. Sympos. Proceed. 2010. P. 1060–1063. DOI: 10.1109/ULTSYM.2010.5935655
- [19] *Takayanagi S., Yanagitani T., Matsukawa M., Watanabe Y.* // IEEE Intern. Ultrason. Sympos. Proceed. 2011. P. 2317–2320. DOI: 10.1109/ULTSYM.2011.0575
- [20] *Yanagitani T., Mishima N., Matsukawa M., Watanabe Y.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics and Frequency Control. 2007. Vol. 54. N 4. P. 701–704. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.303
- [21] *Yanagitani T., Kiuchi M., Matsukawa M., Watanabe Y.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics and Frequency Control. 2007. Vol. 54. N 8. P. 1680–1686. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.439
- [22] *Lehmann H.W., Widmer R.* // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 9. P. 3868–3879. DOI: 10.1063/1.1662864
- [23] *Zhao Z., Pan C., Gao C., Wang C.* // IEEE Intern. Vacuum Electron. Conf. (IVEC). 2015. P. 1–2. DOI: 10.1109/IVEC.2015.7224023
- [24] *Веселов А.Г., Елманов В.И., Кирясова О.А., Никулин Ю.В.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 3. С. 448–452. DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44253.1849
[*Veselov A.G., Elmanov V.I., Kiryasova O.A., Nikulin Yu.V.* // Tech. Phys. 2017. Vol. 62. N 3. P. 470–474. DOI: 10.1134/S1063784217030264]
- [25] *Веселов А.Г., Елманов В.И., Кирясова О.А., Никулин Ю.В.* // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 1. С. 98–106. DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47484.289-18
[*Veselov A.G., Elmanov V.I., Kiryasova O.A., Nikulin Yu.V.* // Tech. Phys. 2018. Vol. 63. N 1. P. 95–103. DOI: 10.1134/S1063784218010279]
- [26] *Minakata M., Chubachi N., Kikichi Y.* // Japan. J. Phys. 1973. Vol. 12. N 3. P. 474–475.
- [27] *Yanagitani T., Kiuchi M.* // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102. P. 044115–1–6. DOI: 10.1063/1.2772589
- [28] *Yanagitani T., Kiuchi M.* // IEEE Ultrason. Sympos. 2007. P. 1413–1416.
- [29] *Somekh R.E.* // J. Vac. Sci. Tech. A. 1984. Vol. 2. P. 1285–1291. DOI: 10.1116/1.572396