

Влияние материала металлического подслоя и геометрии осаждения на формирование текстуры в пьезоактивных пленках ZnO

© А.Г. Веселов,¹ В.И. Елманов,¹ О.А. Кирысова,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 19 мая 2017 г.)

Исследовано влияние материала металлического подслоя (алюминий, ванадий, хром, железо, кобальт, никель, медь) и геометрии осаждения на формирование наклонной и прямой текстуры в пленках ZnO, синтезируемых в магнетронной распылительной системе на постоянном токе. Установлено, что пьезоактивные пленки ZnO с наклонной текстурой, способные возбуждать сдвиговые волны, формируются на металлических подслоях Cr и V в сдвиговой геометрии осаждения (подложка смещена относительно оси магнетрона в область эрозии мишени). Пьезоактивные пленки ZnO с прямой текстурой, способные возбуждать продольные волны, сформированы в симметричной геометрии осаждения (подложка расположена по центру мишени) на химически чистом Al подслое. Изменение материала подслоя для каждой из геометрий осаждения или предварительное окисление подслоя привело к формированию пьезоактивных пленок ZnO со смешанной текстурой, возбуждающих сетку сдвиговых и продольных волн. С использованием метода химического травления показано, что получаемые пленки ZnO с наклонной текстурой проявляют пьезоактивные свойства и способны возбуждать гиперзвук начиная с толщины $\sim 0.3 \mu\text{m}$, а пленки ZnO с прямой текстурой с толщины $\sim 0.9 \mu\text{m}$.

DOI: 10.21883/JTF.2018.01.45490.2341

Введение

Пьезоактивные пленки ZnO с наклонной и прямой текстурой широко применяются при создании акусто-электронных СВЧ устройств обработки сигналов — резонаторов, фильтров, линий задержки, конвольверов [1–7]. Многообразие функций, выполняемых акусто-электронными устройствами (калибровка расстояния, частотная селекция аналоговых сигналов, параллельный спектральный анализ), а также их устойчивость к вибрациям, электромагнитному излучению, температуре, бездисперсность являются причиной неослабевающего интереса к разработке и оптимизации технологий синтеза пьезоактивных текстурированных пленок ZnO, а также создания однослойных и многослойных [8] структур на их основе.

На сегодняшний день для формирования пьезоактивных пленок ZnO с прямой или наклонной текстурой и создания пьезоакустических преобразователей широко применяются методы магнетронного распыления (высокочастотного [2,3,7,9–12] и на постоянном токе [8,13–15]), а также реактивное [16]) ионно-лучевое [17] и лазерное [18] распыления. При этом большинство работ по методам получения текстурированных пленок ZnO посвящено исследованию условий синтеза пленок с прямой текстурой — ZnO(002). В значительной степени это связано с тем, что кристаллическая фаза ZnO(002) обладает наименьшей поверхностной энергией, поэтому легко формируется как на ориентирующей,

так и на аморфной подложке. Кроме того, синтез пленок оксида цинка с наклонной (лежащей) текстурой является существенно более трудной технической задачей, связанной со сложностью реализации ориентирующих факторов, определяющих наклон оси текстуры.

Для методов высокочастотного, ионно-лучевого и реактивного распылений было показано, что положение подложки относительно центра мишени и давление рабочего газа существенным образом влияют на формирование текстуры в пленках ZnO в отличие от материала металлического подслоя [11,12]. Так, при создании пленок ZnO с прямой текстурой и пьезопреобразователей на их основе используются симметричная геометрия осаждения (подложка расположена по центру мишени) и высокое ($P > 5 \text{ mTorr}$) давление рабочего газа. Для формирования нижнего металлического электрода, как правило, применяются металлы (Al, Cu, Au, Pt) с ГЦК кристаллической структурой, склонные формировать текстуру (111), оказывающую ориентирующее влияние на формирование прямой текстуры ZnO(002) [3,5,10,12,19,20]. Для синтеза пленок ZnO с наклонной или лежащей текстурой (10.0) или (11.0) осаждение происходит при низком давлении рабочего газа ($P < 5 \text{ mTorr}$), подложка размещается параллельно мишени в зоне эрозии (сдвиговая геометрия) [21,16] или под наклоном к мишени [11,12,17], а в качестве материала металлического подслоя могут использоваться металлы Al, Cu, Zn [11,12,17]. Отметим, что наклонная геометрия осаждения пленок ZnO может приводить

к неоднородности по толщине и углу наклона кристаллитов. Неоднородность толщины в свою очередь обеспечивает искажение фронта распространения возбужденной в кристалле акустической волны. Поэтому для формирования пьезоакустических преобразователей на сдвиговых волнах (особенно многослойных [8]) наклонная геометрия не может рассматриваться в качестве эффективного технологического решения.

Метод магнетронного распыления на постоянном токе (МРПТ) также позволяет синтезировать в сдвиговой и симметричной геометриях осаждения пьезоактивные текстурированные пленки ZnO [8,13,15,22], способные возбуждать гиперзвук в диапазоне частот до 18 GHz [14]. При этом реализация в одном технологическом процессе различных геометрий осаждения [8] дает возможность совмещения слоев ZnO с прямой и наклонной текстурой и создания многослойных структур на их основе. На примере двухслойной структуры на основе пленок ZnO с наклонной и прямой текстурой в [8] было показано, что пленки ZnO с наклонной текстурой вносят меньшие акустические потери при распространении как сдвиговых, так и продольных волн по сравнению с пленками ZnO с прямой текстурой.

Однако для пленок ZnO, синтезируемых методом МРПТ, влияние материала металлического подслоя и его чистоты на формирование наклонной и прямой текстуры для разных геометрий осаждения не обсуждалось.

В настоящей работе для пленок ZnO, осаждаемых методом МРПТ, показано, что выбор материала металлического подслоя и его чистота, так же как геометрия осаждения, оказывают решающее влияние на формирование наклонной и прямой текстуры. Установлено, что воспроизводимый и стабильный синтез пьезоактивных пленок ZnO с наклонной текстурой толщиной $d < 1 \mu\text{m}$ возможен только в сдвиговой геометрии на металлических подслоях из хрома (Cr) или ванадия (V). Пьезоактивные пленки ZnO с прямой текстурой формируются только в прямой геометрии осаждения на химически чистом алюминивом (Al) подслое. Изменение материала подслоя для каждой из геометрий осаждения или предварительное окисление подслоя приводит к формированию пьезоактивных поликристаллических пленок (без выделенной кристаллографической ориентации — текстуры). С применением метода химического травления в водном растворе HCl (0.012 M) определена толщина d , при которой происходит потеря пьезоактивности в пленках ZnO с наклонной и прямой текстурой.

1. Эксперимент

Синтез текстурированных пленок ZnO с наклонной ($d \approx 0.88 \mu\text{m}$) и прямой ($d \approx 1.9 \mu\text{m}$) текстурой производился в планарной несбалансированной магнетронной распылительной системе с базовым давлением $P_b \approx 0.01 \text{ mTorr}$ с квазизамкнутым объемом зоны горения плазмы (рис. 1). Квазизамкнутый объ-

ем представлял собой кварцевый стакан диаметром $D \approx 40 \text{ mm}$, нижняя часть которого ограничивалась магнитной системой магнетрона (катод), а верхняя — пластиной из алюминия (анод, находящийся под потенциалом „земли“) с двумя отверстиями в центре и на расстоянии 15 mm от центра (область эрозии мишени). Использование квазизамкнутого объема позволяло стабилизировать по давлению условия синтеза пленок ZnO. В качестве рабочего газа использовалась смесь газов — 70% кислорода (чистота 99.999%) и 30% аргона (чистота 99.999%). В качестве мишени использовалась фольга Zn (диаметр $\approx 40 \text{ mm}$, толщина $\approx 1 \text{ mm}$, чистота 99.99%). Осаждение пленок ZnO производилось при давлении рабочего газа внутри квазизамкнутого объема $P \approx 0.75\text{--}0.77 \text{ mTorr}$ (давление за пределами квазизамкнутого объема $P \approx 0.24\text{--}0.26 \text{ mTorr}$), токе разряда $I \approx 100\text{--}120 \text{ mA}$, напряжении на магнетроне $U \approx -550 \text{ V}$ и температуре подложки $T_s \approx 300^\circ\text{C}$. В качестве подложки—звукопровода использовался монокристаллический алюмоиттриевый гранат, легированный лютецием (АИГ) с площадью поверхности под осаждение пленки $5 \times 5 \text{ mm}^2$.

Возбуждение и регистрация акустических колебаний в пьезопреобразователях на основе текстурированных пленок ZnO производились на измерительной установке, состоящей из импульсного СВЧ генератора (845 MHz, длительность импульса 1 μs), усилителя и осциллографа. Мощность СВЧ электромагнитного поля, подводимого непосредственно к пьезоактивному преобразователю (рис. 2) через коаксиальный проводник с центральным электродом диаметром 100 μm составляла 0.1–0.5 W. В эксперименте измерялись общие потери звука (по величине первого эхо-импульса) для структур, представленных на рис. 2. Отметим, что, поскольку ZnO является полярным кристаллом, с точки зрения эффективности возбуждения звука текстурированными пленками ZnO решающее значение имеет однополярность кристаллитов по всей пленке. Прямым способом оценки однородности текстуры пленки и эффективности возбуждения гиперзвука является наблюдение на осциллограммах однородной по амплитуде сетки продольных или сдвиговых волн, возбуждаемых СВЧ зондом малого диаметра (100 μm) на различных участках пленок с прямой или наклонной текстурой.

Для создания пьезопреобразователей на основе пленок ZnO в качестве материала подслоя использовались металлы (Al, V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu) чистотой 99.99%. Металлический подслой толщиной $d \approx 100 \text{ nm}$ осаждался на подложку АИГ при температуре $T_s \approx 150 \text{ (V)}$ и $\approx 300^\circ\text{C}$ (Al, Cr, Fe, Co, Ni, Cu) термическим осаждением из танталового тигля при давлении остаточной атмосферы $P_b \approx 0.01\text{--}0.03 \text{ mTorr}$. Размеры тигля, навеска материала, скорость нагрева тигля подбирались таким образом, чтобы скорость напыления составляла около 100 nm/s. Это позволяло за время осаждения около 1 s получать металлические пленки с малым содержанием примесей и высокой электропроводностью.

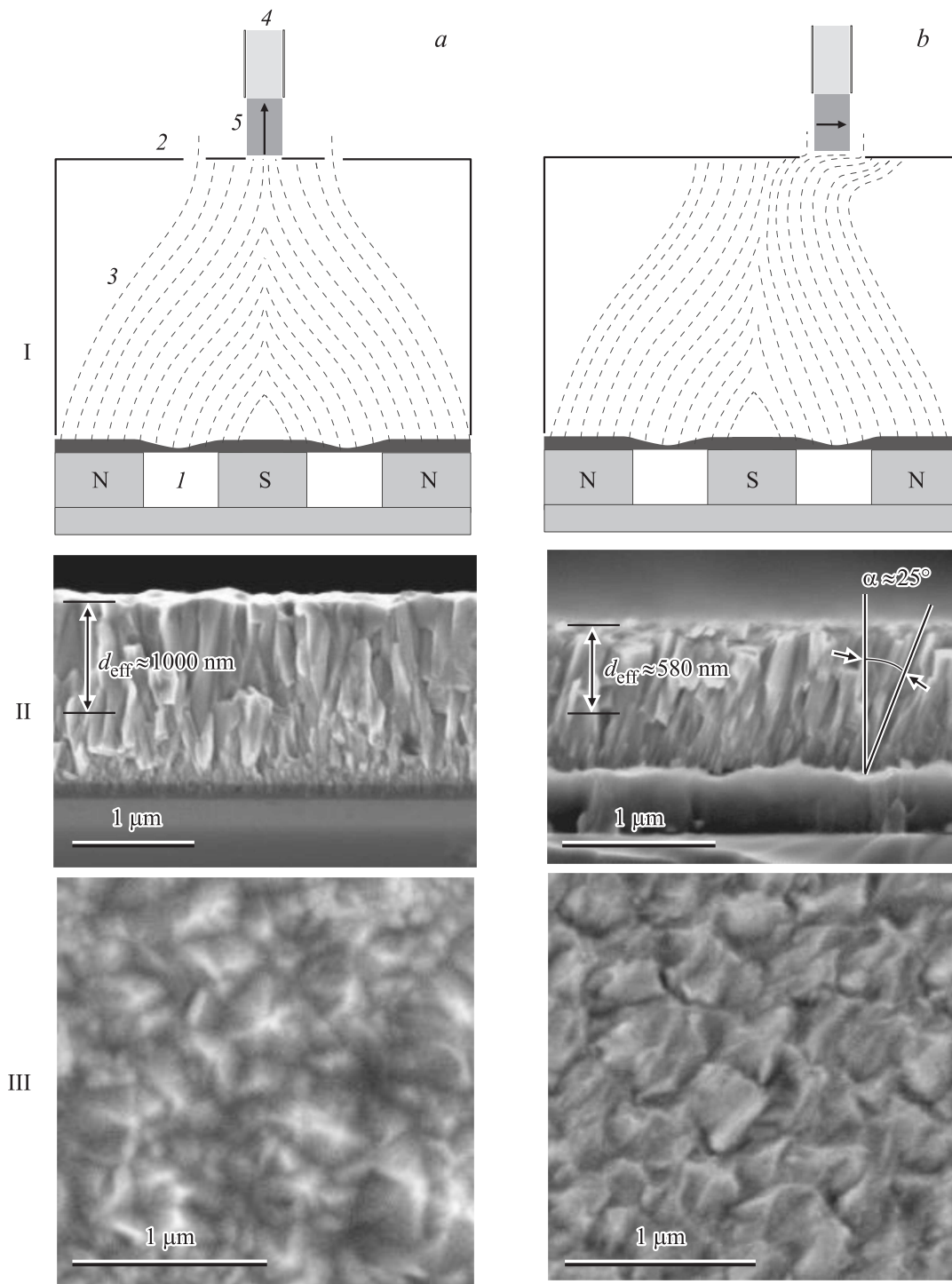


Рис. 1. I — схема расположения подложки–звукопровода для формирования пленок ZnO с прямой (a) и наклонной текстурами (b): 1 — магнитная система магнетрона с мишенью Zn, 2 — квазизамкнутый объем с анодом из алюминия и отверстиями для размещения подложки, 3 — зона горения плазмы (штриховыми линиями схематически показана светящаяся область рекомбинационного горения), 4 — подложка АИГ с нагревателем, 5 — пленка ZnO (стрелкой показано направление оси текстуры пленки, формирующейся в данной геометрии осаждения); II, III — СЭМ изображения поперечного сечения (II) и поверхности (III) пленок ZnO с прямой (a) и наклонной (b) текстурами. Величина d_{eff} обозначает часть пленки, обладающую пьезоактивными свойствами.

После нанесения металлического подслоя подложка без развакууммирования в течение 3–5 s переносилась в область плазмохимического реактора и размещалась

на расстоянии $L \approx 20$ mm, обеспечивающим стехиометричность состава ZnO [14]. После этого зажигалась реакционная плазма и происходило осаждение пленок

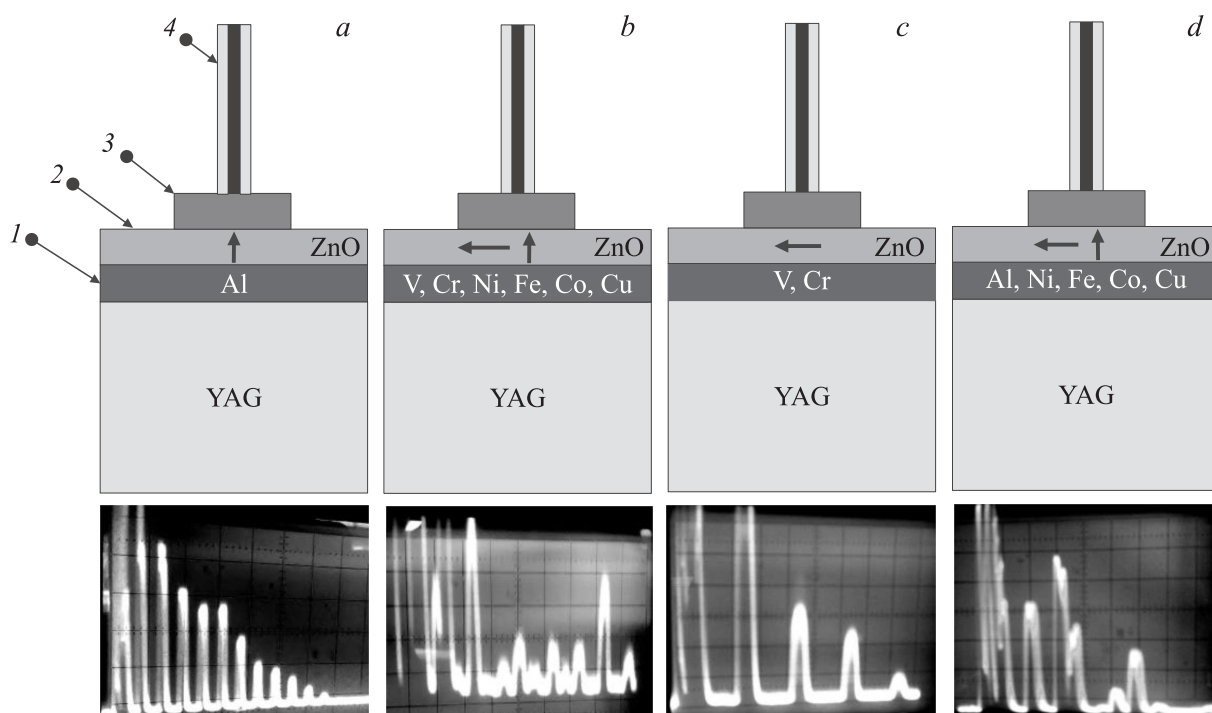


Рис. 2. Схематические изображения пьезоакустических преобразователей на основе текстурированных пленок ZnO (прямая (a) и наклонная (c) текстуры), а также поликристаллических пленок ZnO (b, d), формируемых на различных металлических подслоях на подложке АИГ, расположенной по центру мишени (a, b) и в зоне эрозии мишени (c, d): 1, 3 — металлические электроды, 2 — текстурированная или поликристаллическая пьезоактивная пленка ZnO, 4 — СВЧ зонд диаметром $100\ \mu\text{m}$. Под изображениями пьезопреобразователей приведены осциллограммы ($1\ \mu\text{s}/\text{cm}$) продольных (a) и сдвиговых (c), а также смешанных (b, d) типов волн, возбуждаемых соответствующими пьезопреобразователями.

ZnO. За указанное время переноса и поджига плазмы металлическая пленка не успевала окислиться в остаточной атмосфере вакуумной камеры, что обеспечивало возможность осаждения ZnO на химически чистую поверхность металла. При выбранных ростовых условиях использование конструкции плазмохимического реактора, представленной на рис. 1, а также выбор материала металлического подслоя для каждой из геометрий осаждения позволяли синтезировать пьезоактивные пленки ZnO с наклонной и прямой текстурой при скоростях осаждения $v \approx 60\ \text{nm}/\text{min}$ с высокой стабильностью и воспроизводимостью.

2. Обсуждение результатов

2.1. Прямая текстура

В симметричной геометрии осаждения, показанной на рис. 1, a подложка располагалась по центру магнетрона на расстоянии $L \approx 20\ \text{mm}$ от мишени в области инверсии поперечной составляющей магнитного поля магнетрона (область кроссовера) [14]. Результаты исследования сколов пленок методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Auriga, CarlZeiss) показали, что при выбранных условиях осаждения формируются пленки ZnO со столбчатой структурой по толщине со средним

значением размера зерна в плоскости пленки около $200\text{--}800\ \text{nm}$ (рис. 1, aII, aIII) и среднеквадратичной шероховатостью поверхности около $10\ \text{nm}$.

Установлено, что если в качестве материала металлического подслоя в прямой геометрии используется Al (ГЦК кристаллическая решетка, высокое сродство к кислороду), то на нем формируются пленки ZnO с прямой текстурой. Создаваемые на их основе пьезоакустические преобразователи возбуждают продольные волны (рис. 2, 3) с величиной вносимых потерь около $47\text{--}53\ \text{dB}$. Такая величина потерь обусловлена недостаточным согласованием подводящей СВЧ линии с пленкой ZnO, а также различием акустических импедансов АИГ и ZnO. Отметим, что если после напыления подслоя алюминия подложка АИГ выносилась хотя бы на $1\ \text{min}$ на атмосферу, то на окисленном Al подслое формировались поликристаллические (без текстуры) пленки ZnO. При возбуждении звука, отсутствие текстуры проявлялось на осциллограммах в виде смешанной сетки продольных и сдвиговых волн (рис. 2, b). Если в качестве материала подслоя использовались металлы Cu, Cr, V, Ni, Co, Fe, то на них также формировались пьезоактивные поликристаллические пленки ZnO, возбуждающие смешанную сетку сдвиговых и продольных волн (рис. 2, a). Полученные результаты свидетельствуют о

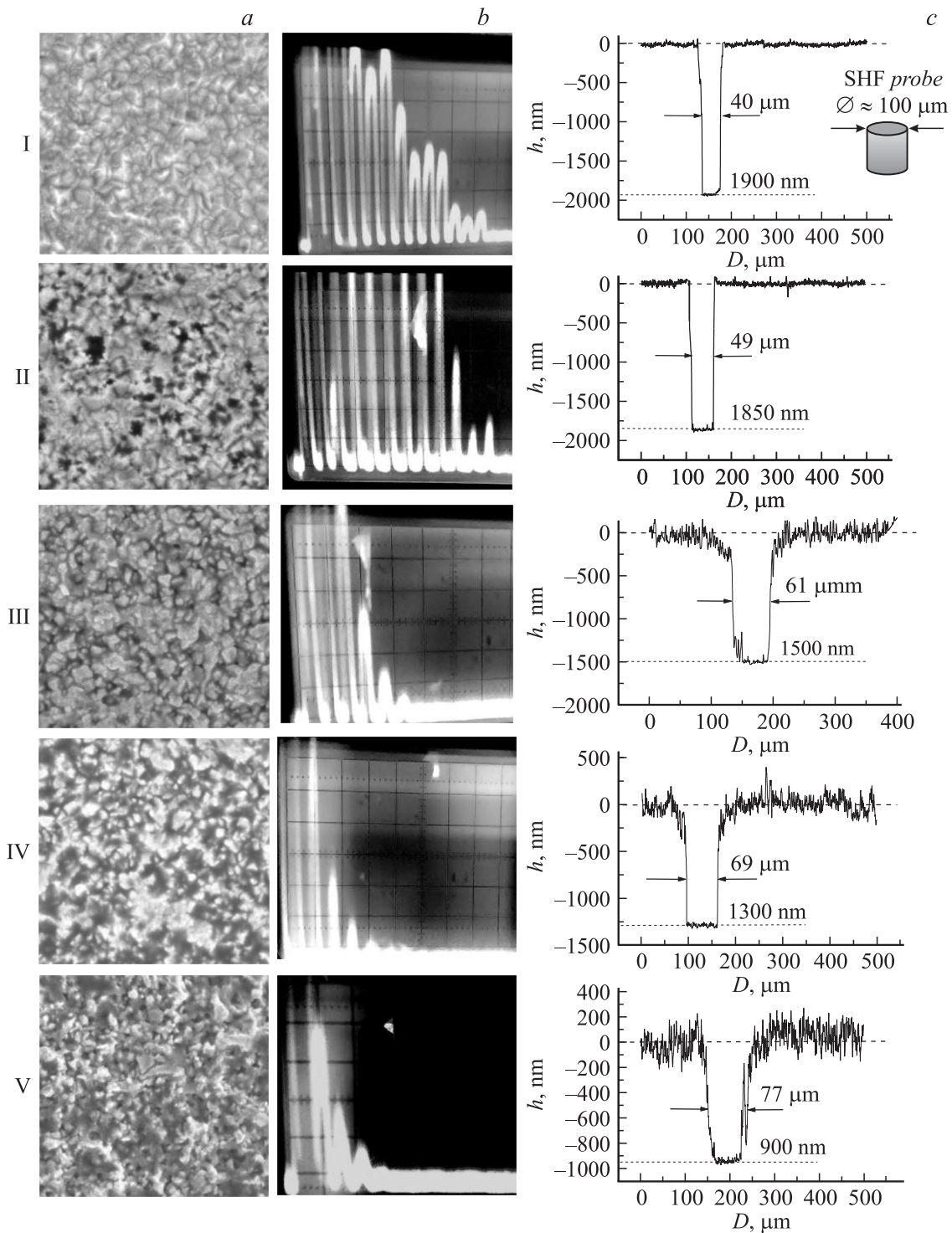


Рис. 3. *a* — СЭМ изображения поверхности ($4 \times 4 \mu\text{m}^2$), осциллограммы (*b*) и профили (*c*) пленок ZnO с прямой текстурой ($d \approx 1900 \text{ nm}$) до и после травления в водном растворе HCl (0.012 M) в течение t, min : 1 — 0, 2 — ≈ 1 , 3 — ≈ 7 , 4 — ≈ 9 , 5 — ≈ 13 . Масштаб для осциллограмм — $1 \mu\text{s/cm}$.

том, что для метода МРПТ материал подложка и его чистота являются одними из решающих факторов для формирования прямой текстуры в пленках ZnO.

Для оценки толщины, при которой пленка ZnO с прямой текстурой теряет пьезоактивные свойства, была

проведена серия экспериментов по травлению в водном растворе HCl (0.012 M [23]) на основе деионизованной воды с удельным сопротивлением $0.06 \mu\text{s/cm}$ при комнатной температуре. До и после травления изучались морфология поверхности пленок (СЭМ), толщина d ,

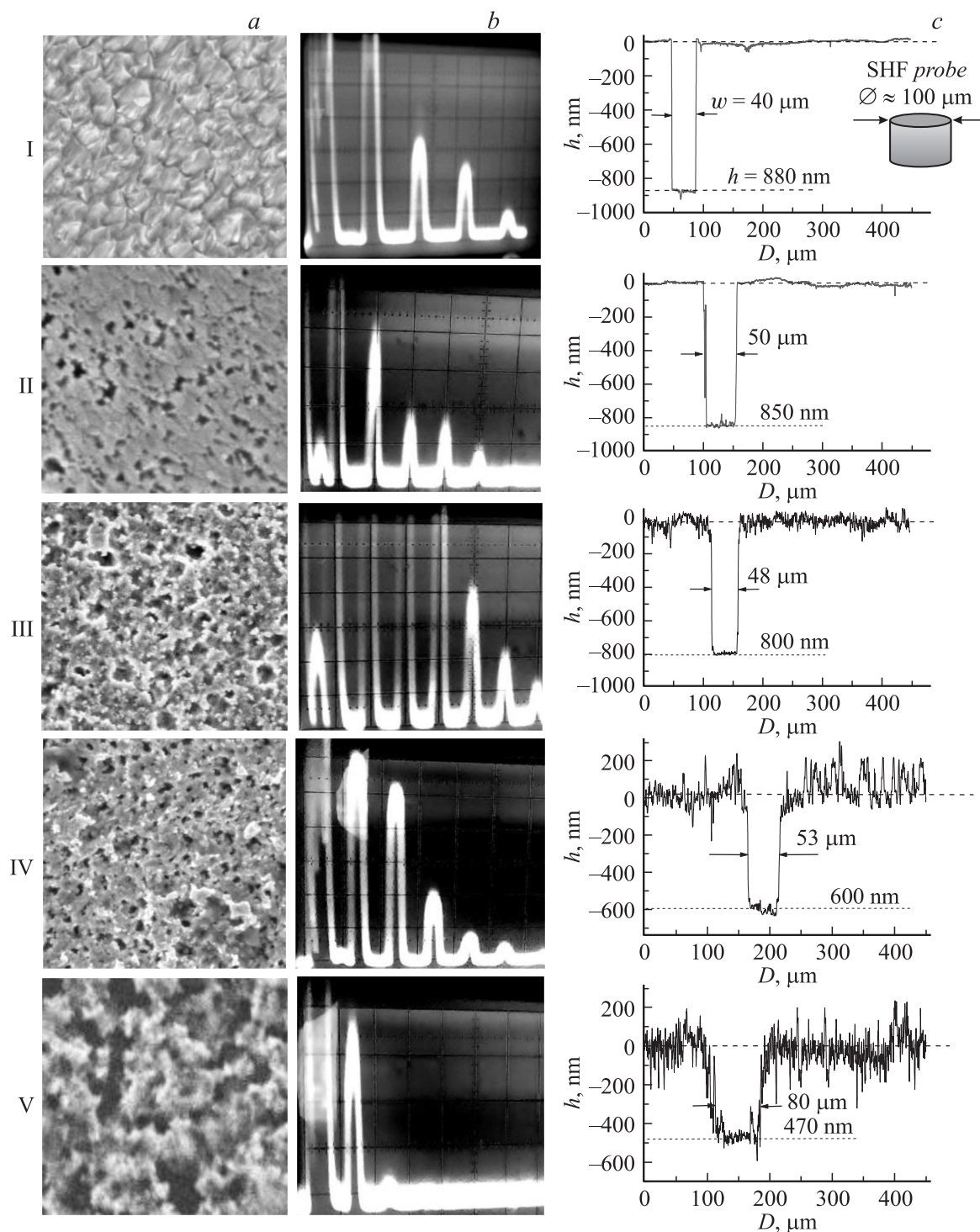


Рис. 4. *a* — СЭМ изображения поверхности ($4 \times 4 \mu\text{m}^2$), осциллограммы (*b*) и профили (*c*) пленок ZnO с наклонной текстурой ($d \approx 880\text{nm}$) до и после травления в водном растворе HCl (0.012 M) в течение t , min: 1 — 0, 2 — ≈ 1 , 3 — ≈ 2 , 4 — ≈ 3 , 5 — ≈ 4 . Масштаб для осциллограмм — $1 \mu\text{s/cm}$.

среднеквадратичная шероховатость поверхности σ и пьезоакустические свойства (вносимые потери, число эхо-импульсов). Профиль пленки ZnO формировался методом скрайбирования (царапина шириной $40 \mu\text{m}$). Оценка толщины d и шероховатости поверхности σ

на площади $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ производилась методом профилометрии (Dectak 150, Veeco). В качестве критерия оценки толщины d , при которой пленка ZnO утрачивает пьезоактивные свойства, была выбрана величина вносимых потерь 90 dB, определяемая по первому

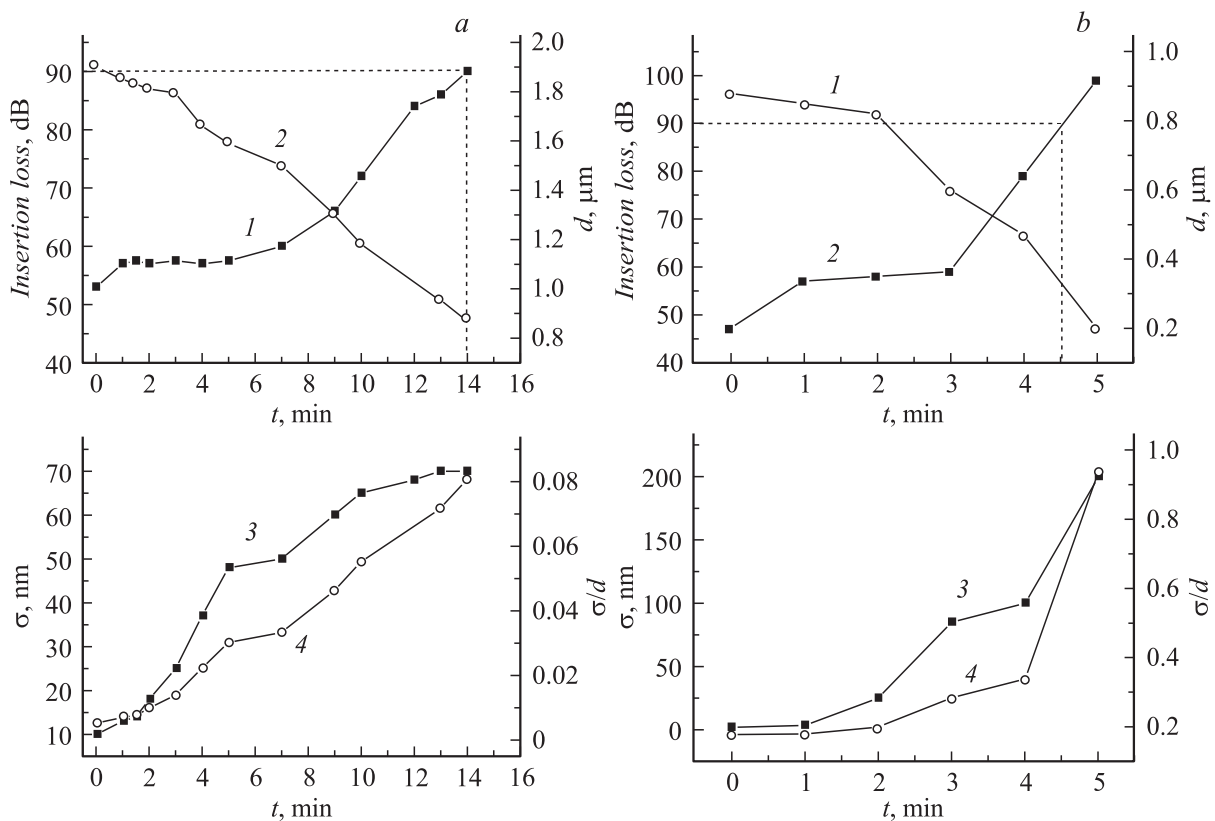


Рис. 5. Зависимости величины вносимых потерь (кривая 1), толщины пленки d (кривая 2), шероховатости поверхности σ (кривая 3) и приеденной шероховатости σ/d (кривая 4) от времени травления t для пленок ZnO с прямой (а) и наклонной (b) текстурами.

эхо-импульсу. При достижении этого значения считалось, что пленка ZnO перестала эффективно возбуждать звук.

На рис. 4 представлены типичные изображения участков поверхности (СЭМ, $4 \times 4 \mu\text{m}^2$), осциллограммы и профили пленок ZnO с прямой текстурой до (рис. 4, а) и после травления (рис. 4, б). На рис. 5, а приведены зависимости вносимых потерь, толщины d , шероховатости поверхности σ и отношения σ/d от времени травления t . Изображения поверхностей и профилей пленок ZnO показывают, что процесс травления характеризуется высокой равномерностью по площади образца (однородная по всей пленке текстура) и происходит преимущественно по границам зерен, о чем говорит значительное увеличение шероховатости поверхности с 10 ($t \approx 0$) до 50–70 nm ($t \approx 5$ –14 min).

Из осциллограмм на рис. 4 и зависимости вносимых потерь от времени травления t (рис. 5) видно, что пьезоакустические свойства пленок с прямой текстурой после травления в течение $1 \leq t \leq 6$ min ($d \approx 1900$ –1550 nm, $\sigma \approx 13$ –50 nm, $\sigma/d \approx 0.007$ –0.03) ухудшаются незначительно — на осциллограммах наблюдается 12–20 эхо-импульсов, величина потерь составляет 53–58 dB. Увеличение времени травления до $7 \leq t \leq 10$ min ($1.4 \leq d \leq 1.15 \mu\text{m}$, $\sigma \approx 50$ –65 nm,

$\sigma/d \approx 0.035$ –0.055) приводит к снижению числа наблюдаемых эхо-импульсов до 6–7 и росту вносимых потерь до 60–72 dB. При $12 \leq t \leq 14$ min ($1 \leq d \leq 0.9 \mu\text{m}$, $\sigma \approx 70$ nm, $\sigma/d \approx 0.08$) пленка все еще остается пьезоактивной — на осциллограммах наблюдаются первые три эхо-импульса, однако величина потерь составляет 84–90 dB. Ухудшение пьезоакустических свойств пленок ZnO при увеличении времени травления t обусловлено уменьшением толщины d_{eff} пьезоактивного слоя ZnO (достигается текстура зарождения, не обладающая пьезоактивными свойствами) и усилением вклада рассеяния звука на поверхностных неоднородностях.

Таким образом, пленки ZnO с прямой текстурой, осаждаемые на алюминиевый подслоя, проявляют пьезоактивные свойства и способны возбуждать звук начиная с толщины $d \approx 0.9 \mu\text{m}$.

2.2. Наклонная текстура

Для синтеза пленок ZnO с наклонной текстурой ($d \approx 0.88 \mu\text{m}$) использовалась геометрия осаждения, показанная на рис. 1, б — сдвиговая геометрия. Подложка АИГ располагалась параллельно мишени при $L \approx 20$ mm на расстоянии $R \approx 15$ mm (область эрозии мишени) относительно оси магнетрона по центру отверстия в аноде

квазизамкнутого объема. В такой геометрии осаждения атомы распыленного материала в области подложки имеют составляющую скорости, параллельную подложке, что способствует формированию наклонной текстуры в пленках ZnO (рис. 2, *d*). Микроструктура пленок ZnO, формируемых в сдвиговой геометрии, является столбчатой с углом наклона кристаллитов относительно нормали к пленке около 25° , средним значением размера кристаллитов в плоскости пленки около 500–800 нм (рис. 1, *aII*, *aIII*) и средней шероховатостью поверхности около 2–3 нм (на площади $100 \times 100 \mu\text{m}^2$).

Для сдвиговой геометрии осаждения установлено, что если нижний электрод изготавливается из металлов Cr и V (ОЦК кристаллическая решетка, малое сродство к кислороду), то на нем формируются пленки ZnO с наклонной текстурой, а пьезоакустические преобразователи на их основе эффективно возбуждают сдвиговые волны с величиной вносимых потерь около 47–53 дБ (рис. 1, *b*). Если для создания металлического подслоя используются Al, Cu, Ni, Co, Fe, то на них формируются пьезоактивные поликристаллические пленки ZnO — на осциллограммах наблюдается смешанная сетка продольных и сдвиговых волн (рис. 2).

Таким образом, полученные для двух геометрий осаждения результаты показывают, что для метода МРПТ выбор материала подслоя и его чистота являются наряду с давлением рабочего газа и температурой подложки [8,22] определяющими технологическими факторами для формирования пьезоактивных пленок ZnO с наклонной и прямой текстурой.

Для оценки толщины, при которой пленка ZnO с наклонной текстурой теряет пьезоактивные свойства, была проведена серия экспериментов по травлению в водном растворе HCl (0.012 M). Структурные и пьезоакустические свойства оценивались аналогично пленкам ZnO с прямой текстурой.

На рис. 4 представлены типичные изображения участков поверхности, осциллограммы и профили пленок до (рис. 4, *a*) и после травления (рис. 4, *b*) в течение $t \approx 1$ –4 мин. Из изображений профилей пленок видно, что травление, так же как и для пленок с прямой текстурой, происходит равномерно по поверхности образца (однородная по всей площади образца наклонная текстура) преимущественно по границам зерен, о чем свидетельствует значительное увеличение шероховатости поверхности: для $t \approx 4$ мин величина σ достигает 100 нм ($\sigma/d \approx 0.2$).

Исследование пьезоакустических свойств пленок ZnO с наклонной текстурой после травления в течение $t \approx 1$ –3 мин ($d \approx 850$ –600 нм, $\sigma \approx 3.5$ –85 нм, $\sigma/d \approx 0.004$ –0.1) показало, что пленки сохраняют пьезоактивность и эффективно возбуждают звук — на осциллограммах наблюдаются 5–10 эхо-импульсов, а величина потерь составляет 57–59 дБ. Увеличение времени травления до $t \approx 4$ мин ($d \approx 470$ нм, $\sigma \approx 100$ нм, $\sigma/d \approx 0.2$) приводит к заметному ухудшению пьезоакустических свойств — пьезопреобразователи возбуждают

сдвиговые волны с величиной потерь около 79 дБ, при этом наблюдаются два–три эхо-импульса. Травление в течение 5 мин приводит почти к полному стравливанию пленки (величина вносимых потерь около 100 дБ, $\sigma \approx 200$ нм, $\sigma/d \approx 1$). Ухудшение пьезоакустических свойств пленок ZnO с наклонной текстурой после травления связано с уменьшением толщины пьезоактивного слоя d_{eff} и значительным увеличением шероховатости поверхности пленки ($\sigma/d \approx 0.2$), приводящего к усилению рассеяния звука на поверхностных неоднородностях.

Таким образом, полученные результаты показывают, что пленки ZnO с наклонной текстурой, осаждаемые на подслоях Cr или V, проявляют пьезоактивные свойства и способны возбуждать звук начиная с толщины $d \approx 0.3 \mu\text{m}$.

Заключение

На примере несбалансированной магнетронной распылительной системы на постоянном токе показано, что возникновение прямой и наклонной текстуры в пленках ZnO определяется не только расположением подложки относительно оси магнетронной системы, но также материалом подслоя и его чистотой. Для стабильного и воспроизводимого синтеза пьезоактивных пленок ZnO с наклонной текстурой и создания пьезоакустических преобразователей на сдвиговых волнах в качестве материала металлического подслоя следует использовать Cr или V, при этом подложка должна быть расположена над зоной эрозии мишени. Для создания пьезоакустических преобразователей на продольных волнах на основе пленок ZnO с прямой текстурой в качестве материала нижнего металлического электрода следует использовать Al, при этом подложка должна быть расположена по центру распыляемой мишени. Показано, что синтезируемые пленки ZnO проявляют пьезоактивные свойства и возбуждают гиперзвук начиная с толщин $d \approx 0.3 \mu\text{m}$ (наклонная текстура) и $d \approx 0.9 \mu\text{m}$ (прямая текстура).

Полученные в настоящей работе результаты могут представлять интерес для развития и оптимизации технологии синтеза методом МРПТ текстурированных пьезоактивных пленок ZnO толщиной менее $1 \mu\text{m}$, перспективных при разработке акустоэлектронной элементной базы для создания защищенных от электромагнитного излучения СВЧ устройств обработки информации гигагерцового диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: гранты № 16-29-14058, 16-37-60052,

Список литературы

- [1] Алексеев С.Г., Гуляев Ю.В., Котелянский И.М., Мансфельд Г.Д. // УФН. 2005. Т. 175. № 8. С. 895–900.
- [2] Corso C.D., Dickherber A., Hunt W.D. // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 054514–1–054514–7.

- [3] *Yoshino Y.* // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 061623–1–061623–7.
- [4] *Qin L., Chen Q., Cheng H., Chen Q., Li J.-F., Wang Q.-M.* // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. P. 094511–1–094511–11.
- [5] *Prasad M., Sahula V., Vinod Kumar K.V.* // IEEE Trans. on Device Mater. Reliability. 2014. Vol. 14. N 1. P.545–554.
- [6] *Hickernell F.S.* // ТИИЭР. 1976. Т. 64. № 5. С. 70–76.
- [7] *Nalamwar A.L., Wagers R.S., Epstein M.* // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. N 6. P. 2175–2178.
- [8] *Веселов А.Г., Елманов В.И., Кирясова О.А., Никулин Ю.В.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 3. С. 448–452.
- [9] *Krupanidhi S.B., Sayer M.* // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 11. P. 3308–3318.
- [10] *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. 143503–1–143503–3.
- [11] *Yanagitani T., Mishima N., Matsukawa M., Watanabe Y.* // IEEE. Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2007. Vol. 54. N 4. P. 701–704.
- [12] *Lehmann H.W., Widmer R.* // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 9. P. 3868–3879.
- [13] *Веселов А.А., Веселов А.Г.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 13. С. 83–87.
- [14] *Бурьлин Е.И., Веселов А.А., Веселов А.Г., Джумалиев А.С., Иванов С.Н., Кирясова О.А.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 7. С. 31–34.
- [15] *Бурьлин Е.И., Веселов А.Г., Джумалиев А.С., Елманов В.И., Истомин С.Н., Кирясова О.А., Пушкарева Т.А., Рябушкин С.Л.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 5. С. 130–132.
- [16] *Rughoobur G., DeMiguel-Ramos M., Mirea T., Clement M., Olivares J., Diaz-Durán B., Sangrador J., Miele I., Milne W.I., Iborra E., Flewitt A.J.* // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 108. P. 034103–1–034103–5.
- [17] *Yanagitani T., Kiuch M.* // IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 1413–1416.
- [18] *Serhane R., Khales H.* // IEEE Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium. 2013. P. 275–278.
- [19] *Hillman G.D., Seguin H.J.J.* // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 11. P. 5053–5055.
- [20] *Kushida K., Takeuchi H.* // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. N 4. P. 1133–1135.
- [21] *Takayanagi S., Yanagitani T., Matsukawa M., Watanabi Y.* // IEEE International Ultrasonic Symposium Proceedings. 2011. P. 2317–2320.
- [22] *Александров В.А., Веселов А.Г., Кирясова О.А., Сердобинцев А.А.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 18. С. 41–44.
- [23] *Tampo H., Fons P., Yamada A., Kim K.-K., Shibata H., Matsubara K., Niki S., Yoshikawa H., Kanie H.* // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87. P. 141904–1–141904–3.