

Затухание продольных и сдвиговых акустических волн в структуре с пленками ZnO с прямой и наклонной текстурами

© А.Г. Веселов, В.И. Елманов, О.А. Кирясова, Ю.В. Никулин

Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
410019 Саратов, Россия
e-mail: labstwo@mail.ru

(Поступило в Редакцию 12 апреля 2016 г. В окончательной редакции 8 июня 2016 г.)

Представлены результаты исследования затухания продольных и сдвиговых гиперзвуковых акустических волн в структурах Al/ZnO/Al/ZnO/АИГ (алюмоиттриевый гранат, легированный лютецием) на основе пьезоактивных пленок ZnO с прямой и наклонной текстурой, синтезируемых при температурах подложки $T \approx 25\text{--}400^\circ\text{C}$ в несбалансированной планарной магнетронной распылительной системе. Показано, что аномально высокие значения затухания до 45 dB наблюдаются при прохождении продольных акустических волн через пленки ZnO с прямой текстурой, выращенные при температуре подложки $T \approx 200\text{--}300^\circ\text{C}$, тогда как увеличение температуры осаждения до $T \approx 400^\circ\text{C}$ приводит к снижению величины вносимых акустических потерь на 30–40 dB.

DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44253.1849

Введение

Многослойные периодические структуры на основе пьезоактивных пленок ZnO относятся к классу метаматериалов, открывающих фундаментальные возможности при разработке устройств обработки информации нового поколения [1,2] и приборов СВЧ акустики — линий задержки, моно- и многоканальных фильтров, резонаторов, конвольверов, усилителей, являющихся незаменимыми в бортовых навигационных системах. Перспектива практического применения приборов СВЧ акустики на основе пленок ZnO, а также уникальные свойства гиперзвуковых волн (бездисперсность, стойкость к внешним воздействиям) обуславливают необходимость создания и развития технологий синтеза как отдельных пьезоактивных пленок ZnO, обладающих малой величиной акустических потерь, так и многослойных структур на их основе. Нужно отметить, что многослойные структуры имеют ряд преимуществ по сравнению с отдельными пленками ZnO, так как обладают меньшими значениями емкостной составляющей импеданса, что облегчает согласование, и более высокими пробивными напряжениями, что позволяет увеличить мощность входного сигнала.

Возможность формирования пьезоактивных пленок ZnO с прямой или наклонной текстурой, способных работать в качестве акустических преобразователей для генерации продольных и сдвиговых гиперзвуковых волн в диапазоне частот до 18 GHz, ранее была показана в работах [3,4]. Для пленок ZnO, получаемых магнетронным распылением, были изучены структурные [5], оптические [6,7] и пьезоактивные свойства [8]. Однако оценка вносимых акустических потерь пленками ZnO с прямой или наклонной текстурой не проводилась. Также не была показана возможность совмещения слоев ZnO с прямой и наклонной текстурами и создания

многослойных структур на основе текстурированных пленок ZnO, получаемых магнетронным осаждением.

В настоящей работе приведена схема конструкции управления факелом зоны рекомбинационного горения, обеспечивающая формирование пьезоактивных пленок ZnO с прямой или наклонной текстурой и позволяющая создавать на их основе многослойные структуры, в которых каждый из слоев ZnO может иметь как прямую, так и наклонную текстуру. Для текстурированных пленок ZnO, синтезированных в интервале температур $T \approx 25\text{--}400^\circ\text{C}$, исследовано затухание продольных и сдвиговых акустических волн.

Эксперимент

Синтез текстурированных пленок ZnO производился в планарной несбалансированной магнетронной распылительной системе с факельной формой зоны рекомбинационного горения плазмы [4]. В качестве рабочего газа использовалась смесь ОСЧ газов — 70% кислорода и 30% аргона. Осаждение пленок ZnO производилось при давлении рабочего газа $P \approx 0.24\text{--}0.26\text{ мТорр}$, токе разряда $I \approx 100\text{ мА}$, напряжении $U \approx 600\text{ В}$ и температуре подложки $T \approx 300^\circ\text{C}$. Пленки ZnO осаждались от 5 до 30 min, что соответствовало толщинам $d \approx 470\text{--}1650\text{ нм}$. Однородность продольной компоненты магнитного поля в зоне эрозии мишени Zn (диаметр — 40 mm, толщина — 1 mm) составляла $\pm 2\%$. Подложка из алюмоиттриевого граната, легированного лютецием (АИГ), являющаяся звукопроводом, размещалась на расстоянии $L \approx 20\text{ мм}$ от мишени, где зона рекомбинационного горения плазмы имела наименьший диаметр (область кроссовера). Как было показано в работе [8], в области кроссовера формируется поток частиц распыляемого материала, перпендикулярный подложке, интенсивностью и направлением которого

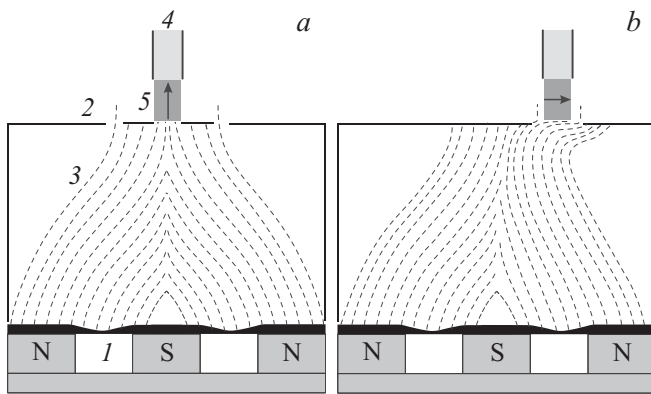


Рис. 1. Геометрия расположения подложки для получения пленок ZnO с прямой (*a*) и наклонной текстурой (*b*): 1 — магнитная система с мишенью Zn, 2 — анод из алюминия с отверстиями для размещения подложки, 3 — зона горения плазмы (штриховыми линиями схематически показана светящаяся область рекомбинационного горения), 4 — подложка АИГ с нагревателем, 5 — пленка ZnO (стрелкой показано направление оси текстуры пленки, формирующейся в данной геометрии осаждения).

можно управлять. Интенсивность потока, определяемая давлением рабочих газов в системе и током разряда, приводящая к синтезу текстурированных пленок, могла быть реализована только в узком диапазоне давлений рабочего газа $P \approx 0.24\text{--}0.26\text{ мТорг}$, соответствующего переходу разряда из таунденсовского в фарадеевский [8]. Для используемой в работе магнетронной распылительной системы стехиометрия состава формирующейся пленки ZnO определялась расстоянием L между мишенью и подложкой [3], которое для давления рабочего газа $P \approx 0.24\text{--}0.26\text{ мТорг}$ должно было поддерживаться с точностью $0.1\text{--}0.2\text{ мм}$ [3]. Ключевым техническим решением для рассматриваемой магнетронной распылительной системы, позволяющим с высокой повторяемостью получать пленки ZnO с прямой и наклонной текстурой [4] и многослойные структуры на их основе, стало использование специальной конструкции управления факелом (рис. 1).

Анод изготавливался из алюминия (рис. 1), боковая поверхность квазизамкнутого объема была образована кварцевым стаканом.

В геометрии, показанной на рис. 1, *a*, подложка расположена по центру магнетрона в зоне кроссовера (области сужения факела) [3]. В этом случае осаждаемые на подложке атомы имеют компоненту скорости, перпендикулярную к поверхности подложки, что приводит к формированию в пленках ZnO прямой текстуры (ось кристаллографической текстуры ZnO(002) направлена перпендикулярно поверхности подложки). Как было показано в [4], такие пленки могут быть использованы в качестве преобразователя для возбуждения продольных акустических волн. Для синтеза пленок ZnO с наклонной текстурой (ось кристаллографической текстуры ZnO(100) направлена перпендикулярно поверхности

подложки), используемых в качестве преобразователя для возбуждения сдвиговых волн, использовалась геометрия осаждения, показанная на рис. 1, *b*. В такой геометрии подложка располагалась на расстоянии 15 мм относительно оси магнетрона по центру отверстия в аноде таким образом, что интенсивность свечения (оцениваемая визуально) справа и слева от подложки-звукопровода была одинакова. Для такой геометрии осаждения атомы распыленного материала в области подложки могут иметь значительную составляющую скорости, параллельную подложке, что способствует формированию наклонной текстуры в пленках ZnO.

Отметим, что в пленках ZnO наклонная текстура, позволяющая возбуждать сдвиговые волны, также может быть сформирована осаждением при наклонном расположении подложки к оси магнетрона. Однако возникающая в этом случае неоднородность толщины пленки ZnO неприемлема для использования геометрии наклонного осаждения при создании многослойных структур. В нашем случае неоднородность толщины пленки, определяемая методом профилометрии (Dektak 150, Veeco), для обеих геометрий осаждения не превышала 1–2% на длине пленки 5 мм и зависела от юстировки положения подложки.

Показанные на рис. 1 способы расположения подложки реализовывались механическим переносом подложки-звукопровода относительно оси магнетронной системы. Это позволяло создавать в одном процессе двухслойные структуры на основе текстурированных пленок ZnO, при этом каждый слой ZnO мог формироваться как с наклонной, так и с прямой текстурой. На рис. 2 представлены изображения исследуемых в настоящей работе структур с различными вариантами текстур в нижнем и верхнем слоях ZnO. Для всех структур верхний слой ZnO ($d \approx 1650\text{ нм}$, температура осаждения $T \approx 300^\circ\text{C}$) являлся активным — сверху и снизу имел металлические электроды (Al, Cr) толщиной $d \approx 20\text{--}30\text{ нм}$ (температура осаждения $T \approx 300^\circ\text{C}$) и использовался для возбуждения продольных или сдвиговых акустических волн. Нижний слой ZnO ($d \approx 1650\text{ нм}$, температура осаждения $T \approx 25\text{--}400^\circ\text{C}$) являлся пассивным (электрическое поле в нем отсутствовало) и

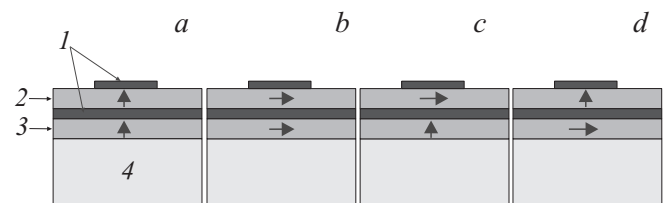


Рис. 2. Варианты ориентации оси текстуры (показаны стрелками) верхнего и нижнего слоев ZnO в исследуемых структурах: 1 — металлические электроды (Al, Cr), 2 — активная пленка-преобразователь ZnO (с прямой или наклонной текстурой), на которую подавалось СВЧ поле, 3 — пассивная пленка ZnO (с прямой или наклонной текстурой), дающая дополнительный вклад в общие потери, 4 — подложка-звукопровод (АИГ).

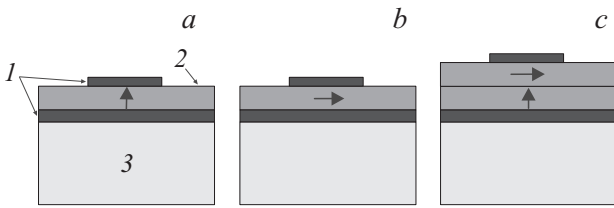


Рис. 3. Изображения тестовых структур на основе пленок ZnO с прямой (a) и наклонной (b) текстурой (направление оси текстуры обозначено стрелками): 1 — металлические электроды (Al, Cr), 2 — пленка-преобразователь ZnO (с прямой или наклонной текстурой), на которую подавалось СВЧ поле, 3 — подложка-звукопровод (АИГ); c — двуслойная структура на основе текстурированных пленок ZnO (без разделяющего металлического слоя между пленками ZnO). Толщина пленок ZnO для структур (a–c) — $d \approx 1650$ nm.

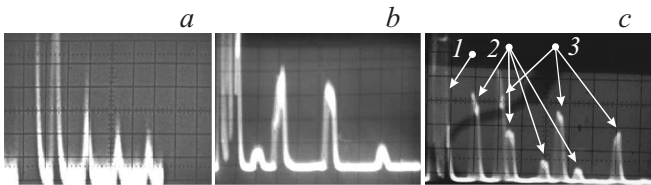


Рис. 4. Осциллограммы эхо-сигналов продольных (a) и сдвиговых (b) акустических волн, возбуждаемых в пленках ZnO с прямой (a) и наклонной (b) текстурой; c — осциллограмма эхо-сигналов продольных и сдвиговых акустических волн в двуслойной структуре (см. рис. 3, c) на основе пленок ZnO с прямой и наклонной текстурой: 1 — зондирующий сигнал, 2 — сетка эхо-импульсов продольных волн, 3 — сетка эхо-импульсов сдвиговых волн. Масштаб для осциллограмм (a–c) — $2 \mu\text{s}/\text{cm}$.

выступал в качестве источника дополнительных потерь при прохождении звука.

В эксперименте оценивались общие потери звука для структур, представленных на рис. 2. Для измерения затухания сдвиговых и продольных акустических волн использовалась измерительная установка, состоящая из импульсного СВЧ генератора, усилителя и осциллографа. Мощность СВЧ поля (845 MHz), подводимого непосредственно к пьезоактивному преобразователю (рис. 2) через коаксиальный проводник с центральным электродом диаметром $100 \mu\text{m}$, составляла 100 mW.

Для проверки изменения текстуры пленок ZnO при осаждении в геометриях (рис. 1) были созданы однослойные преобразователи (рис. 3) для продольных волн (геометрия, рис. 1, a) и сдвиговых волн (геометрия, рис. 1, b) соответственно. Результаты по возбуждению продольного и сдвигового звуков для них представлены на рис. 4, a, b, из осциллограмм которого видно, что получаемые при выбранных режимах осаждения пленки ZnO с прямой текстурой возбуждают продольные волны, а пленки ZnO с наклонной текстурой возбуждают сдвиговые волны. Величина общих потерь для структур, изображенных на рис. 3, a, b, находилась в диапазоне 45–53 dB.

На рис. 3, c представлено изображение двуслойного преобразователя (без разделяющего металлического слоя), где нижний слой выращен в геометрии (a), а верхний слой — в геометрии (b) (рис. 1). Оба слоя ZnO выращивались в одном цикле за счет последовательного перемещения подложки-звукопровода. Для такой структуры на рис. 4, c представлена осциллограмма, состоящая из двух сеток эхо-импульсов — продольных и сдвиговых. Величина общих потерь в такой структуре составляла 46–57 dB. Вид осциллограммы и распределение амплитуд эхо-сигналов продольных и сдвиговых волн не менялись при возбуждении любой точки поверхности образца площадью 4×4 mm (диаметр СВЧ зонда $100 \mu\text{m}$), что подтверждает наличие двух независимых слоев с прямой и наклонной текстурой, а также высокую микрокристаллическую однородность текстурированных пленок ZnO по всей площади образца. Приведенная осциллограмма также подтверждает возможность совмещения двух текстур в многослойном акустическом преобразователе, создаваемом при использовании технологии переноса подложки относительно оси магнетронной системы (рис. 1).

Необходимо отметить, что осциллограммы эхо-импульсов продольных и сдвиговых волн, похожие на представленную на рис. 4, c, наблюдаются также для нетекстурированных поликристаллических пленок ZnO, в которых сосуществуют кристаллиты как с прямой, так и с наклонной кристаллической ориентацией. Но для нетекстурированных поликристаллических пленок ZnO характер и распределение амплитуд эхо-сигналов изменяются от точки к точке на поверхности пленки из-за неоднородности распределения по образцу кристаллических фаз.

Результаты и обсуждение

На рис. 5 представлены зависимости величины общих потерь в структурах типа (a) и (c) (рис. 2) от температуры синтеза нижнего слоя ZnO. Кривая 1 на рис. 5 соответствует прохождению через нижний слой ZnO с прямой текстурой продольных волн, кривая 2 — сдвиговых. Как следует из рисунка, большая величина потерь наблюдается при прохождении продольных волн для структуры с нижним слоем ZnO, имеющим прямую текстуру (рис. 2, a), тогда как для сдвиговых волн увеличение общих потерь (относительно структуры, представленной на рис. 3, b) не превышает 4–5 dB. Максимальные потери звука (до 45 dB) наблюдаются для структур типа рис. 2, a, получаемых при температурах синтеза $T \approx 200$ – 300°C , тогда как при увеличении температуры синтеза до $T \approx 400^\circ\text{C}$ или снижении до $T \leq 100^\circ\text{C}$ наблюдается уменьшение потерь почти на 30–40 dB. Отметим, что пленки, синтезируемые при температуре подложки $T \leq 100^\circ\text{C}$, не являются пьезоактивными, тогда как при температурах $T \approx 200$ – 400°C обладают пьезоактивными свойствами. При $T \approx 400^\circ\text{C}$ для представленной на рис. 1 конструкции управления факелом

процесс синтеза пленок ZnO не является устойчивым из-за термической нестабильности геометрии системы, приводящей к невозможности поддержания с требуемой точностью расстояния между мишенью и подложкой на протяжении всего цикла осаждения. Из этого следует, что для синтеза пьезоактивных текстурированных пленок ZnO с малой величиной затухания температура подложки должна поддерживаться на уровне $T \geq 400^\circ\text{C}$. Для улучшения термической стабильности геометрии системы конструкция управления факелом должна изготавливаться из металлов с низким коэффициентом теплового расширения (тантал, титан, молибден).

Отметим, что для структур типа (рис. 2, *b–d*) увеличение общих потерь при прохождении как продольных, так и сдвиговых волн через неактивную пленку ZnO не превышало 4–5 dB. Вид зависимости общих потерь от температуры синтеза нижнего слоя ZnO с наклонной текстурой был аналогичен кривой 2 на рис. 5.

Можно предполагать, что аномально высокие значения диссипации звука в нижнем слое ZnO с прямой текстурой при прохождении через него продольных волн (структура на рис. 2, *a*) могут быть обусловлены неоднородностью микрокристаллического строения пленки ZnO — размером и геометрией кристаллитов, а также величиной шероховатости поверхности пленки σ .

Для определения влияния микроструктурного строения пленок ZnO с прямой текстурой на затухание акустических волн были исследованы шероховатость поверхности и скол пленок ZnO с прямой текстурой толщиной $d \approx 470–1650$ nm, осажденных при температуре подложки $T \approx 300^\circ\text{C}$, когда величина затухания была максимальная. Исследование шероховатости поверхности и микроструктуры пленок производилось методами атомно-силовой микроскопии (Solver P-47, NT-MDT) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Auriga, Carl Zeiss).

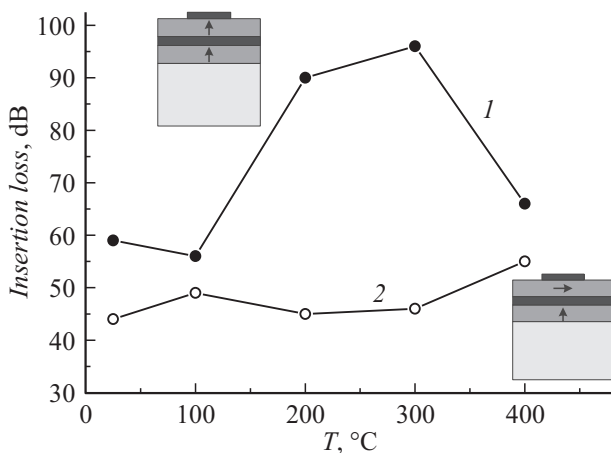


Рис. 5. Зависимость величины общих потерь от температуры синтеза нижнего слоя ZnO для продольных (кривая 1) и сдвиговых волн (кривая 2), распространяющихся в структурах с нижним слоем ZnO, имеющим прямую текстуру. Температура осаждения пленки-преобразователя $T \approx 300^\circ\text{C}$. Толщина пленок ZnO — $d \approx 1650$ nm.

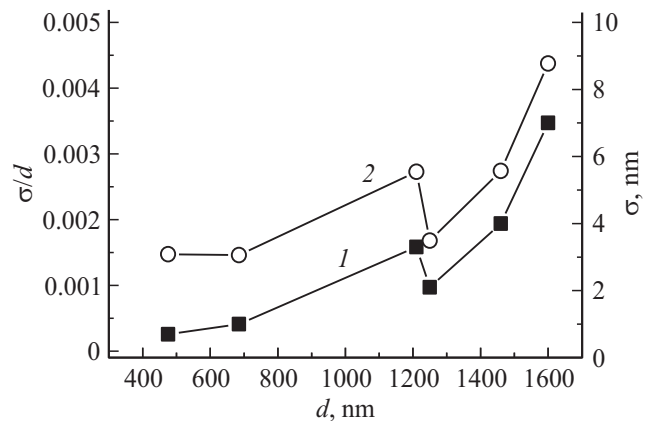


Рис. 6. Зависимости среднеквадратичной шероховатости поверхности σ (кривая 1) и отношения σ/d (кривая 2) от толщины d для пленок ZnO с прямой текстурой. Температура осаждения $T \approx 300^\circ\text{C}$.

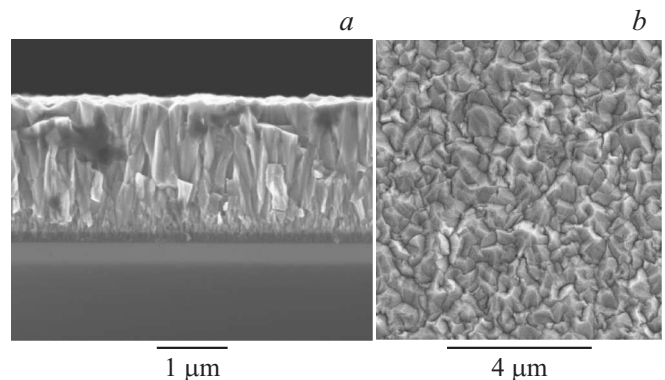


Рис. 7. СЭМ изображения поперечного сечения (*a*) и поверхности (*b*) пленки ZnO с прямой текстурой толщиной $d \approx 1650$ nm. Температура осаждения $T \approx 300^\circ\text{C}$.

На рис. 6 приведены зависимости среднеквадратичной шероховатости поверхности σ пленки ZnO с прямой текстурой от толщины пленки d . Из рисунка видно, что с ростом толщины пленки происходит увеличение параметра σ с 1 до 7 nm, при этом отношение шероховатости поверхности пленки к ее толщине σ/d в диапазоне толщин $d \approx 470–1650$ nm составляет тысячные доли. Принимая это во внимание, вкладом шероховатости поверхности в затухание можно пренебречь.

На рис. 7 представлены СЭМ изображения поперечного сечения и поверхности пленки ZnO с прямой текстурой толщиной $d \approx 1650$ nm, из которых видно, что пленка имеет столбчатую микроструктуру. Средний латеральный размер столбиков составляет 50–500 nm (в зависимости от толщины пленки), а средний размер неоднородностей на поверхности пленки не превышает 300–500 nm.

Принимая во внимание структурную неоднородность пленок ZnO с прямой текстурой (рис. 7), можно предполагать, что различный характер смещения кристаллитов

пленки относительно межкристаллитных границ (объемных дефектов) и относительно друг друга при прохождении через такие пленки продольных и сдвиговых волн будет вызывать наблюдаемую разницу во вносимых слоем ZnO с прямой текстурой потерях для сдвиговых и продольных волн. Так, при распространении продольных волн происходит сжатие и растяжение структуры пленки в направлении, перпендикулярном подложке (вдоль столбчатой структуры), при этом существенную роль в диссипации энергии акустической волны играет сдвиг кристаллитов относительно друг друга. Для сдвиговых волн (кривая 2 на рис. 5), когда диссипация звука оказывается существенно меньше, происходит колебание структуры в направлении, параллельном подложке, при этом происходит одновременное смещение всех кристаллитов вместе с межкристаллитными границами в направлении, параллельном подложке („трение“ между кристаллитами отсутствует).

Заключение

Обнаружено, что при прохождении продольных волн через слой ZnO с прямой текстурой толщиной $d \approx 1650$ nm, осажденный при $T \approx 200\text{--}300^\circ\text{C}$, наблюдаются аномально высокие значения потерь звука (до 45 dB), которые снижаются при увеличении температуры синтеза до $T \approx 400^\circ\text{C}$. Принимая во внимание полученный результат, развитие технологии синтеза многослойных структур на основе пьезоактивных пленок ZnO с прямой или наклонной текстурой должно основываться на высокотемпературном плазмохимическом синтезе с температурой подложки $T \geq 400^\circ\text{C}$.

Отметим, что, несмотря на достаточно высокий уровень потерь (около 4–5 dB) в однослойных структурах с прямой и наклонной текстурами, создание пьезоактивных преобразователей, состоящих из нескольких слоев ZnO (синтезируемых по представленной в работе методике), является актуальным, если число слоев ZnO не будет превышать 4–5. Такой многослойный преобразователь будет иметь меньшее (предположительно в 3–4 раза) значение емкостной составляющей импеданса (упрощается согласование) и соответственно более высокое пробивное напряжение (увеличение подводимой к структуре мощности). Таким образом, линии задержки, построенные на основе многослойных структур ZnO, будут лишены перечисленных недостатков, присущих однослойным пленкам.

Принимая во внимание, что при разработке СВЧ устройств гиперзвукового диапазона наиболее востребованы пьезоактивные пленки ZnO толщиной менее 1 μm , полученные в настоящей работе результаты исследования могут выступать в качестве „стартовой“ основы для дальнейшего развития технологии синтеза пьезоактивных пленок ZnO с прямой и наклонной текстурами толщиной $d < 1 \mu\text{m}$ и создания на их основе многослойных структур.

Список литературы

- [1] Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. // Вестник РАН. 2008. Т. 78. Вып. 5. С. 438–457.
- [2] Maldovan M. // Nature. 2013. Vol. 503. P. 209–217.
- [3] Бурылин 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.
- [4] Веселов А.Г., Джумалиев А.С. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 118–122.
- [5] Сердобинцев А.А., Веселов А.Г., Кирясова О.А. // ФТП. 2008. Т. 42. Вып. 4. С. 496–499.
- [6] Сердобинцев А.А., Бурылин Е.И., Веселов А.Г., Кирясова О.А., Джумалиев А.С. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 3. С. 83–85.
- [7] Сердобинцев А.А., Веселов А.Г., Кирясова О.А., Портнов С.А., Барташов Д.Н. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 6. С. 859–861.
- [8] Александров В.А., Веселов А.Г., Кирясова О.А., Сердобинцев А.А. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 18. С. 41–44.