

Краткие сообщения

06;07;08;12

Синтез пленок оксида цинка с прямой и наклонной текстурой в неоднородной газоразрядной плазме

© А.Г. Веселов, А.С. Джумалиев

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН,
410019 Саратов, Россия

(Поступило в Редакцию 15 марта 1999 г.)

Представлены результаты роста пленок оксида цинка с нормальной и наклонной текстурой на протяженных аморфных подложках. Показана возможность формирования требуемой текстуры путем управления потоками заряженных частиц при сохранении положения подложки в плоскости параллельной мишени в планарной магнетронной распылительной системе на постоянном токе в смеси аргона и кислорода. Исследование текстуры пленок проводилось методом рентгеновской дифракции и методом возбуждения продольных и сдвиговых объемных акустических волн.

Введение

Тонкие пленки оксида цинка находят широкое применение для возбуждения объемных и поверхностных акустических волн в различных устройствах акусто- и оптоэлектроники. Это объясняется высоким коэффициентом электромеханической связи пленок оксида цинка, совместимостью технологии их получения с любой планарной технологией, а также небольшими затратами энергии и времени при их получении, что определяет низкую стоимость устройств на их основе.

Вопросы ориентации текстуры пленок оксида цинка занимают основное место в работах, посвященных изучению технологических особенностей получения пьезоактивных слоев. В большинстве из них анализируются возможные связи между кристаллографическими свойствами пленок и условиями их роста. Обсуждается влияние скорости осаждения пленки, температуры подложки, конфигурации электродов в распылительной камере, соотношения аргона и кислорода в смеси, направления движения и энергии распыляемых частиц, величины и конфигурации магнитного поля [1–6]. В работах [5,6] многослойные структуры, образованные слоями оксида цинка с различной ориентацией текстуры, представляются единственным способом продвижения акустики в диапазон миллиметровых волн.

Особо следует остановиться на работах, посвященных напылению пленок оксида цинка с наклонной текстурой для возбуждения сдвиговых волн. Пленки с наклонной текстурой получают изменением положения подложки относительно плоскости параллельной плоскости мишени. Так, пленки с осью текстуры под углом 40° к плоскости подложки кремния достигались расположением подложки под углом 15° относительно плоскости магнетрона [7]. Аналогичные результаты приводятся в работе [8], где исследуется влияние различных параметров процесса напыления на ориентацию текстуры

пленок. В работе [6], сообщается о напылении пленок ZnO с наклонной текстурой в планарной магнетронной распылительной системе при расположении подложки кремния под углом 40° к плоскости, параллельной плоскости мишени. При наклонном положении подложки отмечается изменение угла наклона текстуры пленки в зависимости от ее положения над зоной эрозии мишени.

Во всех случаях [6–8] формирование наклонной текстуры происходит при касательном поступлении осаждаемого вещества на подложку. Пленки, выращенные в таких условиях, неоднородны по толщине и имеют большой угол разориентации оси текстуры.

Сложность описания процессов, происходящих в газоразрядной плазме, и множество технологических параметров, влияющих на свойства осаждаемых пленок, затрудняют выделение определяющего фактора и понимание причин, приводящих к росту пленок с различной текстурой. Все вышеперечисленное делает обоснованным поиск ориентирующих факторов при росте пленок оксида цинка. Анализируя основные результаты представленных выше работ, своей задачей мы поставили исследование роста текстуры пленок в прямых и наклонных потоках, образуемых в свою очередь путем изменения конфигурации так называемой области отрицательного свечения, иначе говоря, зоны горения плазмы.

В настоящей работе экспериментально изучены особенности ориентации текстуры пленок оксида цинка на протяженных аморфных подложках в плазме тлеющего разряда, формируемого в планарной магнетронной распылительной системе на постоянном токе. Показано влияние формы области отрицательного свечения на формирование областей пленки с наклонной текстурой и способ расширения зоны с нормальной текстурой. Проводится сопоставление данных рентгеновских исследований текстуры пленок с результатами возбуждения сдвиговых и продольных объемных акустических волн той же текстурой.

Экспериментальная часть

Для получения пленок оксида цинка использовалось планарное магнетронное устройство, предназначенное для ионно-плазменного распыления цинковой мишени в смеси газов аргона и кислорода на постоянном токе (рис. 1). Устройства такого типа хорошо изучены и широко распространены в промышленности [9]. Особенностью нашей системы является легкость управления областью отрицательного свечения, что достигалось изменением характера неоднородности магнитных полей.

В качестве мишени использовался диск из химически чистого цинка диаметром 100 мм. Для улучшения теплового контакта диск припаивался к медному цилиндру, охлаждаемому водой, внутри которого располагались кольцевые магниты. Толщина мишени от полюса магнитов в распыляемой поверхности составляла 6 мм. Анод представлял собой кольцо из алюминия диаметром 100 мм, расположенное на расстоянии 15 мм от поверхности мишени. Рабочее напряжение на аноде составляло +300 В (магнетронный узел заземлен) при токе 200 мА. Давление газовой смеси в распылительной камере (75% Ar и 25% O₂) в пределах от 0.4 до 1.33 Па поддерживалось подачей газов через прецизионный натекатель.

Так как наряду с рентгеновскими исследованиями для контроля пьезоэлектрических свойств пленок использовалось возбуждение объемных акустических волн, в качестве подложки был выбран плавленный кварц диаметром 60 мм и толщиной 11 мм. Температура подложки в процессе напыления составляла 620 К и поддерживалась с помощью высокоточного регулятора температуры ВРТ-3. Расстояние между мишенью и подложкой 35 мм.

Вышеперечисленные технологические параметры были найдены как оптимальные с точки зрения получения высокой воспроизводимости пленок по толщине

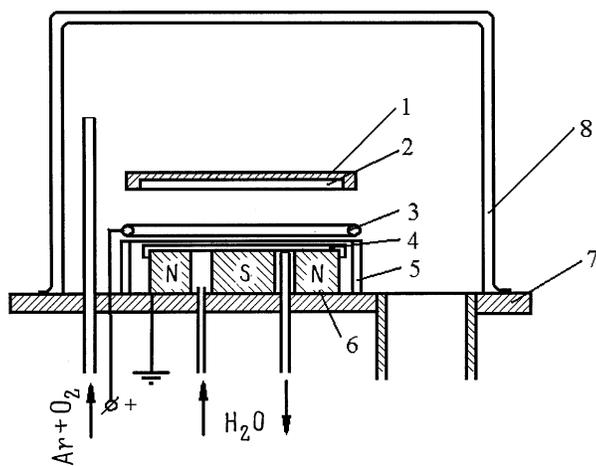


Рис. 1. Схема планарной магнетронной распылительной камеры: 1 — держатель подложек, 2 — подложка, 3 — анод, 4 — мишень, 5 — кварцевый стакан, 6 — магнитная система, 7 — базовая плоскость вакуумной системы, 8 — колпак распылительной системы.

и пьезоактивности. Получаемые пленки были оптически прозрачными и скорость их роста составляла 0.7–0.8 nm/s. Единственной характеристикой, которая изменялась при проведении экспериментов, была форма области отрицательного свечения газоразрядной плазмы в распылительной камере. На рис. 2 приведены наиболее характерные формы областей отрицательного свечения. Такое изменение формы области отрицательного свечения в планарной магнетронной распылительной системе осуществляется изменением величины и конфигурации магнитных полей. Следует отметить, что каждой форме области отрицательного свечения соответствует своя характерная зона эрозии. В плазме, приведенной на рис. 2, *a*, область отрицательного свечения (тип I) имела форму факела с диаметром ~ 40 мм, сужающегося по мере удаления от мишени. Зона эрозии имела форму круга с диаметром также ~ 40 мм. Для второго случая (рис. 2, *b*) светящаяся область имела форму тора прижатого к мишени вблизи ее края (тип II области отрицательного свечения). Зона эрозии представляла собой кольцо с внешним диаметром ~ 80 мм и внутренним — ~ 40 мм.

Предварительная, качественная оценка ориентации текстуры пленок проводилась методом возбуждения объемных акустических волн (ОАВ) [10]. При указанной выше толщине подложки с поверхности пьезоактивной пленки возможно возбуждение ОАВ и раздельное наблюдение эхо-сигналов, соответствующих продольным (нормальная текстура) и сдвиговым (наклонная текстура) ОАВ. Временная задержка эхо-сигнала в первом случае составляет $\sim 3 \mu\text{s}$, а во втором $\sim 7 \mu\text{s}$. Для возбуждения и приема ОАВ в режиме "на отражение" использовался встречно-штыревой преобразователь (ВШП), изготовленный из металлической фольги на отделенном диэлектрическом основании. Шаг структуры равен $150 \mu\text{s}$, длина штыря 2 мм, количество штырей 10. Рабочая частота такого ВШП при возбуждении поверхностных акустических волн, например, в ниобате лития составляет ~ 10 МГц, а в нашем случае он использовался на частоте 400 МГц. В таком режиме в подложке формируется ряд лучей ОАВ с плоским фронтом, что позволяет наблюдать отраженные эхо-сигналы. Ограниченность размеров решетки, подвижность, возможность возбуждения различных типов волн благодаря наличию неоднородных электрических полей позволяют рассматривать такой преобразователь как зонд, дающий возможность быстро и эффективно оценивать пьезоактивность пленки и качественно определять ориентацию текстуры.

При таком подходе мерой пьезоактивности может служить относительная мощность первого эхо-сигнала. Зависимость именно такого параметра от расстояния по радиусу подложки приведена на последующих рисунках.

Наиболее просто качественно оценить направление текстуры по результатам таких измерений можно в том случае, если пленка выращена на металлическом

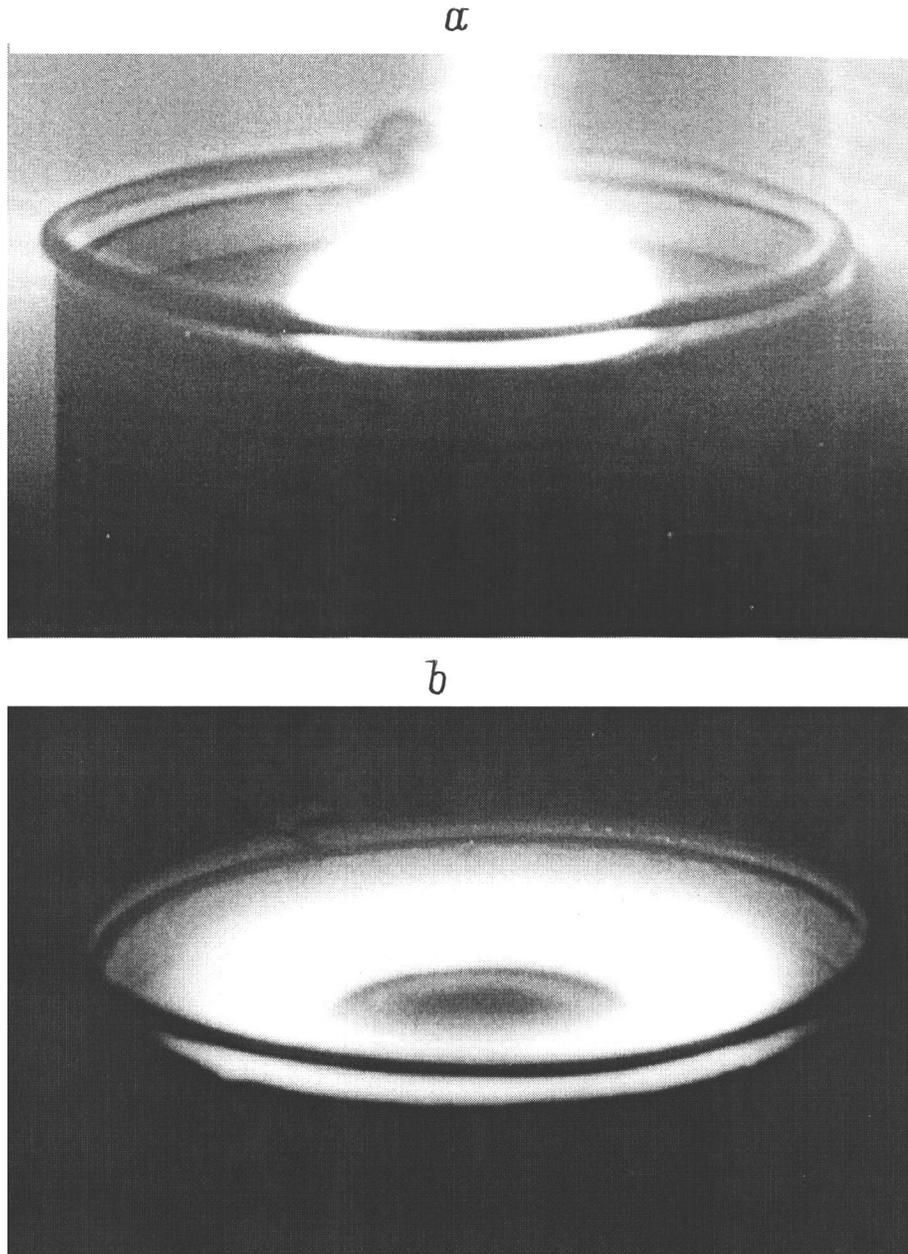


Рис. 2. Области отрицательного свечения для различных вариантов магнитных систем: *a* — тип *I*, *b* — тип *II*.

подслое. В этом случае возбуждение ОАВ происходит только нормальной компонентой электрического поля. Все исследуемые в эксперименте пленки оксида цинка осаждались на подслою из алюминия, предварительно напыленный на кварцевую подложку.

На рис. 3 представлены зависимости эффективности возбуждения ОАВ в образцах, полученных в газоразрядной плазме с различной формой области отрицательного свечения (ООС). Как видно из рис. 3, *a*, в центре подложки наблюдается круговая зона возбуждения продольных ОАВ, диаметр которой растет при переходе от формы ООС типа *I* к форме ООС типа *II* (рис. 3, *b*). За этой зоной возбуждения продольных ОАВ расположена зона

возбуждения сдвиговых ОАВ, особенно ярко выраженная для формы ООС типа *I*.

Структурные исследования пленок, выполненные на рентгеновском дифрактометре "ДРОН-2", подтверждают описанные выше результаты качественного анализа структуры осаждаемых пленок. Так, для формы ООС типа *I* зона наблюдения дифракционных максимумов (002) имела диаметр 10–15 мм и совпадала с зоной наблюдения продольных ОАВ. Эта зона увеличивалась до ~ 35 мм для формы ООС типа *II*. В области, соответствующей возбуждению сдвиговых ОАВ, наблюдались дифракционные максимумы (100). В переходной области наблюдались ди-

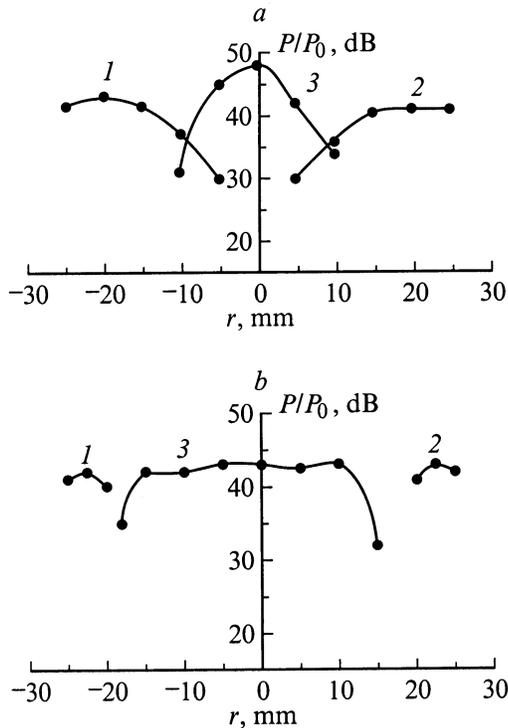


Рис. 3. Зависимость эффективности возбуждения продольных (3) и сдвиговых (1, 2) объемных акустических волн по диаметру подложки: *a* — тип I, *b* — тип II.

фракционные максимумы (002), (100) и (101), что свидетельствует о смешанной текстуре. Дифракционным максимумам (002) соответствует нормальная текстура пленок, дифракционным максимумам (100) — наклонная.

В планарной магнетронной распылительной системе на формирование ООС решающее влияние оказывают величина и конфигурация магнитных полей. Способы изменения характера неоднородности магнитных полей достаточно просты [8], и по этой причине мы не останавливаемся на их описании, а приводим лишь форму факела, существенно влияющего на текстуру пленок. Отметим, что кроме магнитного поля на форму факела оказывает влияние давление в распылительной камере. Для облегчения понимания процессов, происходящих в ООС, были проведены зондовые измерения распределения потенциала в пространстве над мишенью во время ее распыления. На рис. 4 приведены результаты этих измерений, что подтверждает наличие потоков заряженных частиц вдоль подложки, что, по всей видимости, и приводит к росту пленок с наклонной текстурой.

В случае ООС типа I значительное катодное падение потенциала в центральной части мишени (круговая зона эрозии) ведет к формированию в этой области потока заряженных частиц, рекомбинирующих при своем движении к подложке. Плотность этого потока колоколообразно спадает к краю мишени [11]. Этот неоднородный по плотности поток частиц, бомбардирующий подложку,

приводит, с одной стороны, к градиенту температуры вдоль радиуса подложки, с другой стороны, к миграции адатомов из области с повышенной плотностью падающих частиц в область с пониженной плотностью. По-видимому, этими причинами объясняется формирование зоны с наклонной текстурой. Для случая ООС типа II распыление происходит из кольцевой зоны эрозии. Распыление из такой зоны также неоднородно и имеет колоколообразную форму с максимумом примерно в центре зоны эрозии, т. е. на диаметре мишени существует две зоны колоколообразного распыления. Если рассмотреть суммарное действие двух диаметрально противоположных зон распыления, то можно допустить существование такого варианта, когда потоки, складываясь, формируют однородную центральную зону с результирующим нормальным падением частиц на подложку. При этих условиях поток частиц, падающих на подложку, не создает градиента температуры в центральной области и условий для миграции адатомов вдоль радиуса подложки. В этом случае наблюдается рост пленок с нормальной текстурой. Дальнейшее увеличение диаметра зоны эрозии приводит нас к традиционной распылительной системе, где подложка практически удалена из зоны рекомбинации. Хорошо известно, что в этом случае реализуется только нормальная текстура.

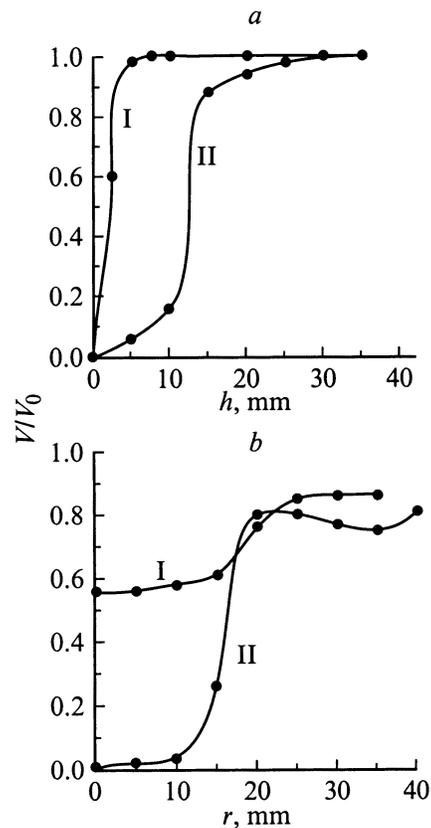


Рис. 4. Результаты зондовых измерений относительного потенциала по радиусу (*a*) и по высоте (*b*) для форм ООС типа I и типа II.

Заметим, что достигнутая нами простота создания значительных по размеру областей со сдвиговой текстурой (10×30 mm) позволяет использовать эти пленки для возбуждения поверхностных акустических волн (ПАВ). При использовании ВШП в этом случае не требуется напыление металлического подслоя, что упрощает конструкцию. Это позволило впервые создать макеты на структурах ZnO–Si с высокой эффективностью возбуждения ПАВ без металлического подслоя.

Выводы

Показана возможность управления текстурой пленок оксида цинка в планарной магнетронной распылительной системе путем создания касательных и нормальных к подложке потоков заряженных частиц. Показана связь изменения текстуры пленки с наличием градиента потенциала вдоль подложки. Представленные результаты могут быть использованы для получения пленок с заданной ориентацией текстуры на протяженных подложках. Приведенные экспериментальные данные позволяют формировать многослойные структуры оксида цинка с чередованием слоев с нормальной и наклонной текстурой простым смещением подложки относительно оси распылительной камеры. При этом угол наклона подложки относительно мишени не изменяется. Важным практическим результатом также является возможность эффективного возбуждения ПАВ в пленках оксида цинка с наклонной текстурой.

Работа поддержана грантом федеральной программы "Интеграция" (№ 696.3).

Список литературы

- [1] Aita G.R. // *Ultrason. Symp. Proc.* 1980. P. 795–800.
- [2] Kikuo Tominaga, Satoshi Iwamura, Iwao Fujita et al. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1982. Vol. 21. N 7. P. 999–1002.
- [3] Anderson A.C., Oates D.E. // *Ultrason. Symp. Proc.* 1982. P. 329–333.
- [4] Miura M. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1982. Vol. 21. N 2. P. 264–271.
- [5] Hadimioglu B., La Comb L.J., Jr., Wright D.R. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1987. Vol. 50. N 23. P. 1642–1644.
- [6] Howell D., Goddard L., Khuri-Yakub B.T. // *Ultrason. Symp.* 1987.
- [7] Wang J.S., Lakin K.M. // *Ultrason. Symp. Proc.* 1982. P. 480–483.
- [8] Krishnaswamy S.V., McAvoy B.R., Takei W.J. // *Ultrason. Symp. Proc.* 1982. P. 476–479.
- [9] Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.
- [10] Веселов А.Г., Джумалиев А.С. Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. 1988. С. 71–75.
- [11] Kikuo Tominaga, Nozomu Ueshiba, Yoshihiro Shintani et al. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 20. N 3. P. 519–526.