

УДК 533.9.07

Характеристики плазмы несбалансированной магнетронной распылительной системы и их влияние на параметры покрытий ZnO:Ga

© 2009 А.А.Соловьев, А.Н.Захаров, С.В.Работкин, К.В.Оскомов, Н.С.Сочугов

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: andrewsol@mail.ru
Поступила в редакцию 16 сентября 2008 г.*

Экспериментально изучены характеристики магнетронной распылительной системы с электромагнитной катушкой, позволяющей реализовывать различные конфигурации магнитного поля над поверхностью катода. Исследовано влияние режимов магнетронного распыления на свойства легированных галлием пленок оксида цинка. Установлено, что использование несбалансированных магнетронных распылительных систем позволяет уменьшить удельное сопротивление покрытий до $5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см при температуре подложки 90°C.

Ключевые слова: магнетронное распыление, параметры плазмы, покрытия, проводящие оксиды.

Characteristics of magnetron sputtering system with electromagnetic coil allowing to realize the various configurations of a magnet field above a surface of the cathode have been studied. Effect of the mode of magnetron sputtering on the properties of ZnO films alloyed with Ga was investigated. It is shown that the use of unbalanced magnetron sputtering systems allows to reduce the resistivity of the coatings down to $5 \cdot 10^{-4}$ Ohm·cm at the substrate temperature 90°C.

Keywords: magnetron sputtering, plasma parameters, coatings, conductive oxides.

Введение

Магнетронные распылительные системы широко применяются для нанесения тонких пленок различного функционального назначения. Одним из основных достоинств магнетронного распыления является возможность изменять и контролировать в широком диапазоне параметры плазмы в процессе нанесения покрытий. Для достижения оптимальной структуры и свойств покрытий необходимо иметь возможность регулировать плотность ионного тока на подложку J_i и энергию бомбардирующих ионов E_i [1]. Эта задача

может быть решена с помощью магнетронов, оснащенных электромагнитными катушками, которые позволяют гибко управлять величиной и конфигурацией магнитного поля [2,3]. Однако на сегодняшний день такие магнетроны не получили широкого распространения из-за сложности их изготовления и отсутствия исчерпывающей информации о влиянии конфигурации магнитного поля на рабочие характеристики магнетронного разряда. Данных о пространственном распределении характеристик плазмы, особенно в магнетронах с несбалансированной конфигурацией магнитного поля, явно недостаточно.

В связи с этим, одной из задач данной работы была разработка конструкции магнетронной распылительной системы с электромагнитной катушкой, позволяющей в широких пределах изменять конфигурацию магнитного поля над поверхностью катода, и экспериментальное определение распределения характеристик генерируемой плазмы и его связь с распределением индукции магнитного поля. Возможность контроля над параметрами плазмы в процессе нанесения покрытий позволяет выбирать оптимальные параметры осаждения для любых тонкопленочных покрытий.

Прозрачные проводящие покрытия на основе оксидов металлов широко используются для изготовления плоских дисплеев, прозрачных электродов, нагревательных элементов, а также применяются в качестве антистатических, антиотражающих и барьерных покрытий. Прозрачность в видимом диапазоне длин волн и высокое отражение в ИК-диапазоне делают перспективным их применение в качестве низкоэмиссионных покрытий на архитектурных стеклах [4].

Оксид цинка, электрофизические свойства которого улучшаются легированием различными химическими элементами, рассматривается как наилучшая альтернатива дорогостоящим покрытиям оксида индий-олова. Легированный алюминием или галлием оксид цинка ($ZnO:Al$, $ZnO:Ga$) обладает более низким удельным сопротивлением и лучшими оптическими свойствами, чем легированный фтором оксид олова [5]. Известно, что свойства покрытий на основе оксида цинка существенно зависят от температуры подложки, на которую они наносятся, и для упрощения технологии их получения необходимо снижать эту температуру. Достичь этой цели и получать прозрачные и проводящие пленки $ZnO:Ga$ при относительно низкой температуре подложки (до $100^{\circ}C$) можно путем магнетронного распыления при оптимальных параметрах плазмы (плотность и энергия бомбардирующих ионов).

Методика эксперимента

Схема разработанной магнетронной распылительной системы с электромагнитной катушкой представлена на рис. 1. Исследования проводились в вакуумной камере из нержавеющей стали размером $600 \times 600 \times 600$ мм. Конструкция магнетрона предусматривает его наружную установку на вакуумную камеру посредством крепежного фланца, который, как и стенки вакуумной камеры, является анодом магнетронного разряда. Катод магнетрона представляет собой диск диаметром 95 мм и тол-

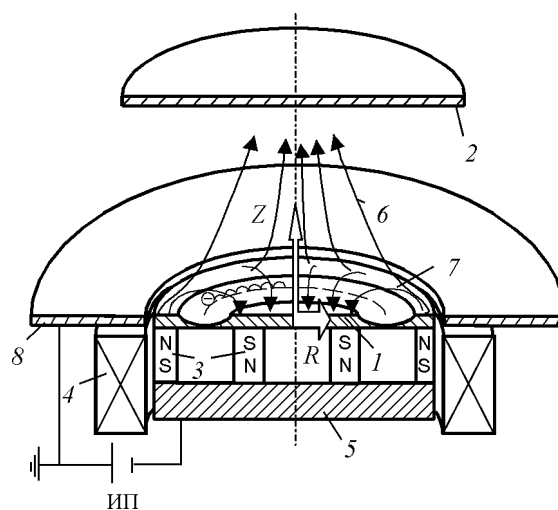


Рис. 1. Схема магнетронной распылительной системы: 1 — катод; 2 — подложка; 3 — постоянные магниты; 4 — соленоид; 5 — магнитопровод; 6 — несбалансированные линии магнитного поля; 7 — сбалансированные линии магнитного поля; 8 — анод; ИП — источник питания магнетрона.

щиной 6 мм с прямым водяным охлаждением. Катод подсоединялся к источнику питания постоянного тока, работающему в режимах стабилизации мощности, тока или напряжения и снабженному системой дугогашения, ограничивающей выделяющуюся в дуге энергию величиной 50 мДж. Аксиально-симметричная магнитная система состояла из кольцевых центрального и периферийного постоянных магнитов ($NdFeB$), магнитопровода и коаксиально расположенной электромагнитной катушки (3500 витков медного провода, ток до 1 А).

Создаваемое в пространстве над поверхностью катода магнитное поле рассчитывалось методом конечных элементов с помощью программы ELCUT, а также экспериментально измерялось с помощью измерителя магнитной индукции РШ 1-10.

Основными контролируемыми во время проведения экспериментов параметрами были давление аргона, мощность разряда и ток в электромагнитной катушке. Давление в вакуумной камере регулировалось изменением расхода напускаемого в камеру рабочего газа и составляло от 0,08 до 0,3 Па. Мощность разряда изменялась от 0,1 до 2 кВт, а ток в электромагнитной катушке регулировался в пределах от 0 до 1 А.

Для измерения потока ионов на подложку использовался коллектор площадью 330 см^2 , расположенный на расстоянии 23 см от магнетрона. На коллектор подавалось импульсное отрицательное напряжение смещения амплитудой 100 В с частотой 18 кГц и скважностью импульсов 50%.

Плотность ионного тока J_i на подложке и величина плавающего потенциала V_{pl} определялись с использованием плоского зонда. Центральный электрод зонда, изготовленный из нержавеющей стали, имел диаметр 11,8 мм и для минимизации краевых эффектов был окружен охранным кольцом, находящимся под тем же, что и электрод, потенциалом [6]. Поверхность зонда лежала в плоскости подложки.

Измерения потенциала плазмы V_{pl} проводились с помощью эмиссионного зонда по методике [7]. При пропускании через зонд тока накала его температура и, соответственно, эмиссия электронов возрастала. В случае равенства тока эмиссии и тока из плазмы на зонд потенциал зонда считается равным потенциалу плазмы. С помощью зондов проводились измерения радиального распределения параметров плазмы на различном расстоянии от катода.

Важным параметром, определяющим влияние ионной бомбардировки на процесс магнетронного осаждения покрытий, является распределение бомбардирующих ионов по энергиям. Энергетические спектры ионов Ag^+ в магнетронном разряде измерялись с помощью 45-градусного электростатического анализатора HIDEN EQP. Измерительное устройство располагалось на оси магнетрона на расстоянии 13,5 см от его катода, диаметр отверстия, в котором анализировались извлеченные из плазмы ионы, составлял 0,1 мм.

Покрытие ZnO:Ga наносилось путем распыления проводящего керамического катода ZnO, содержа-

щего 3,5% оксида Ga_2O_3 . В качестве подложек использовались стеклянные пластины, подогреваемые нихромовым нагревателем. Температура подложек контролировалась с помощью термопар с точностью $\pm 5^\circ C$. Подложки располагались параллельно поверхности катода на расстоянии от него от 50 до 100 мм. Прозрачность покрытий в видимом диапазоне длин волн определялась спектрометром USB 2000-VIS-NIR, толщина пленок измерялась с помощью микроинтерферометра МИИ-4. Измерения удельного сопротивления и концентрации носителей зарядов в покрытии проводились на образцах размером 17×17 мм методом Ван-дер-Пау в магнитном поле 0,61 Тл при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Конфигурация магнитного поля магнетрона

Результаты расчета конфигурации магнитного поля над поверхностью катода представлены на рис.2. Так как расчетная модель была симметрична относительно оси Z (рис.1), то на рис.2 изображены только левые половины картин магнитного поля. Как видно, в зависимости от величины и направления тока I_c в электромагнитной катушке над поверхностью катода может реализовываться как сбалансированная, так и несбалансированная (тип 1 или тип 2) по классификации [8] конфигурации магнитного поля. Несбалансированная конфигурация магнитного поля типа 1 не получила широкого распространения, так

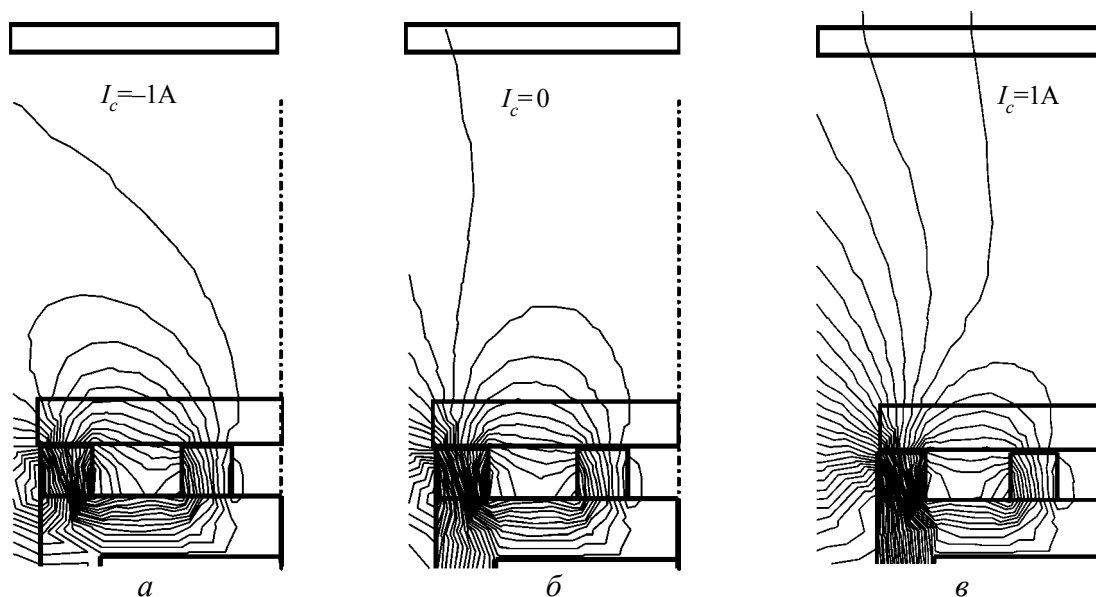


Рис.2. Конфигурации магнитного поля над поверхностью катода в зависимости от величины и направления тока I_c в электромагнитной катушке: *a* — несбалансированный магнетрон (тип 1); *б* — слабо несбалансированный магнетрон (тип 2); *в* — сильно несбалансированный магнетрон (тип 2).

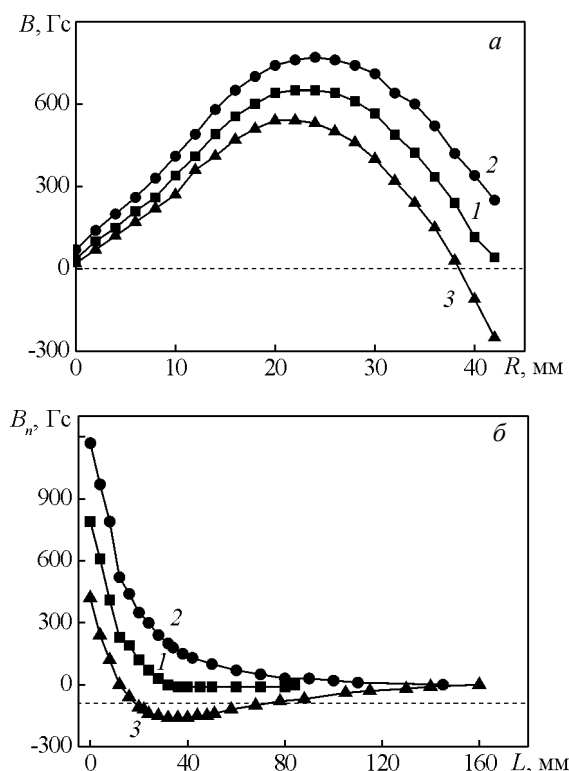


Рис.3. Распределения тангенциальной (а) и нормальной (б) компоненты магнитного поля в радиальном R (над поверхностью катода) и аксиальном L (в центре магнетрона) направлениях в зависимости от тока электромагнитной катушки.

как в этом случае несбалансированные силовые линии направлены в сторону стенок камеры, и плотность плазмы у подложки невелика. Поэтому для генерации ионов в области подложки более подходящей представляется несбалансированная конфигурация магнитного поля 2-го типа, которая реализуется в случае, когда магнитное поле соленоида совпадает по направлению с магнитным полем, создаваемым внешними магнитами магнетрона ($I_c=1$ А). Именно такая конфигурация магнитного поля и использовалась в наших экспериментах при нанесении покрытий.

Результаты измерений магнитного поля приведены на рис.3. При $I_c=1$ А тангенциальная составляющая магнитного поля над поверхностью катода минимальна (550 Гс), при этом минимальным является и радиус зоны распыления. Объясняется это тем, что в сильно несбалансированном режиме (тип 2) магнитная ловушка над поверхностью катода поджимается несбалансированными линиями магнитного поля к его центру. Неоднородность магнитного поля над поверхностью катода (рис.3а)

приводит к локализации плазмы в области максимального магнитного поля и формированию узкой эрозионной канавки. Вследствие арочной формы магнитного поля коэффициент использования катода составляет, как правило, 25-30%. Для его увеличения часто используют перемещение магнитов вдоль поверхности плоских катодов или вращение цилиндрических катодов вокруг неподвижных магнитных систем, что приводит к увеличению распыляемой площади катода, однако значительно усложняет конструкцию магнетрона. Поэтому в некоторых случаях более простым способом перемещения зоны распыления по поверхности катода представляется не механическое перемещение магнитов или катода, а питание электромагнитной катушки переменным током. В этом случае радиус зоны распыления будет зависеть от конкретной магнитной системы и от частоты тока в соленоиде.

В несбалансированном режиме 1-го типа ($I_c=-1$ А) нормальная составляющая магнитного поля на оси системы экспоненциально спадает до 0 (рис.3б). При выключенной электромагнитной катушке магнетрон работает в слабо несбалансированном режиме (тип 2). Увеличение тока в соленоиде до 1 А увеличивает степень несбалансированности силовых линий магнитного поля, а максимальная величина поля на оси магнетрона достигает 180 Гс.

Характеристики магнетронного разряда

На рис.4 представлены вольтамперные характеристики разряда, измеренные при различном давлении аргона в камере. При токе разряда в диапазоне от 0,1 до 5 А напряжение горения разряда составляло 300-520 В. С уменьшением давления ВАХ сдвигаются в область большее высоких напряжений. При включении электромагнитной катушки напряжение горения разряда возрастает, а ВАХ, как и в случае уменьшения давления, сдвигаются в область более высоких напряжений, что объясняется искажением формы магнитной ловушки у поверхности катода в несбалансированном режиме.

Ионный ток на коллекторе при подаче на него отрицательного напряжения достигает насыщения при напряжении ~ 60 В. При увеличении тока магнетронного разряда с 1 до 4 А происходит пропорциональное увеличение ионного тока на коллекторе от 80 до 250 мА. Включение электромагнитной катушки значительно повышает ионный ток на коллекторе (рис.5), что связано, очевидно, с удлинением траектории ионизирующих электронов в аксиальном магнитном поле.

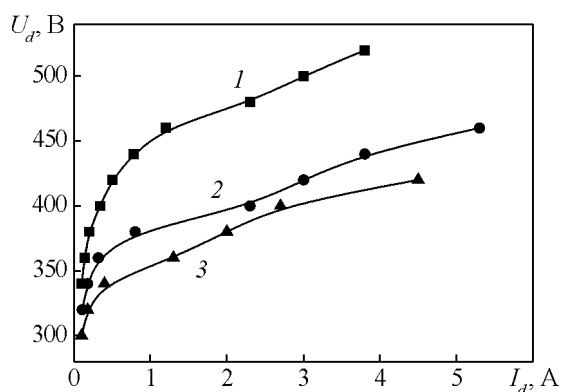


Рис. 4. Вольтамперные характеристики разряда при различных давлениях рабочего газа (электромагнитная катушка выключена): 1 — $P_{Ar}=0,08$ Па; 2 — $P_{Ar}=0,2$ Па; 3 — $P_{Ar}=0,3$ Па.

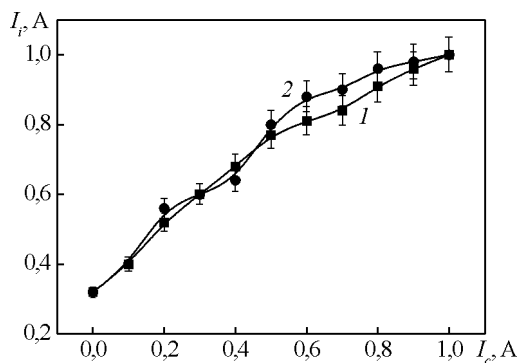


Рис. 5. Зависимость ионного тока на коллекторе I_i от тока в электромагнитной катушке I_c ($P_{Ar}=0,3$ Па, $U_{смещ}=-100$ В, мощность разряда 2 кВт) при частоте импульсов напряжения смещения: 1 — $f=18$ кГц; 2 — $f=100$ кГц.

Результаты измерения плотности ионного тока насыщения на зонде, находящемся на расстоянии $L=150$ мм от катода, при разных значениях тока в электромагнитной катушке приведены на рис. 6. Мощность разряда поддерживалась постоянной и составляла 0,6 кВт. Увеличение тока в электромагнитной катушке сопровождается значительным увеличением плотности ионного тока, наиболее выраженным на оси системы, что объясняется увеличением степени несбалансированности магнитного поля, силовые линии которого, направляясь в сторону подложки, ограничивают поперечную подвижность электронов и заставляют их двигаться по оси системы. При этом электроны перемещаются совместно с ионами из-за необходимости поддержания электронейтральности плазмы [9]. Визуально увеличение тока в соленоиде сопровождается уменьшением радиуса светящейся области на катоде и появлением на оси системы потока плазмы, направленного на подложку.

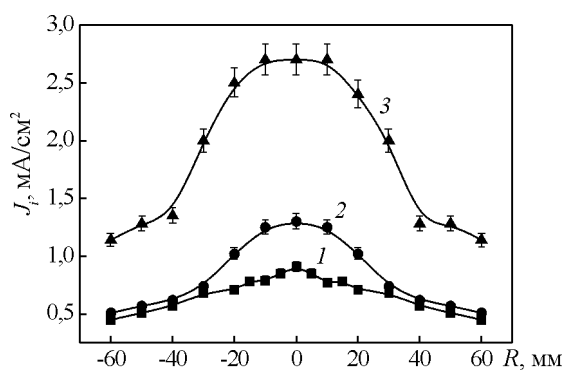


Рис. 6. Радиальное распределение плотности ионного тока на расстоянии 150 мм от катода (мощность разряда 0,6 кВт) при токе соленоида: 1 — $I_c=0$; 2 — $I_c=0,5$ А; 3 — $I_c=1$ А.

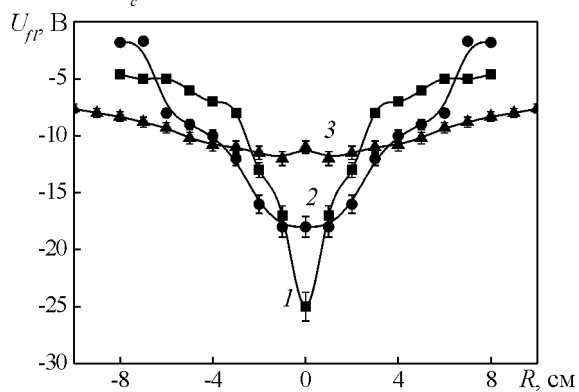


Рис. 7. Радиальное распределение плавающего потенциала ($P_{Ar}=0,2$ Па, $I_c=1$ А, мощность разряда 0,5 кВт) при расстоянии от катода: 1 — $L=6$ см; 2 — $L=10$ см; 3 — $L=22$ см.

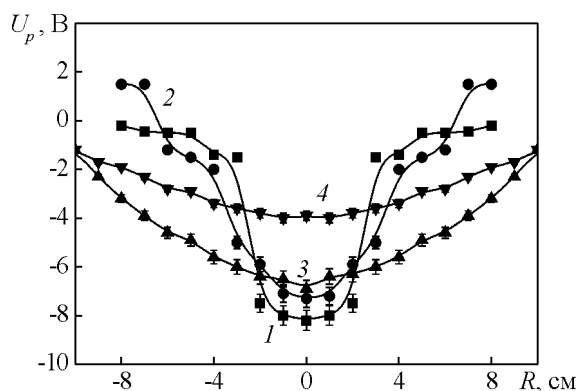


Рис. 8. Радиальное распределение потенциала плазмы ($P_{Ar}=0,2$ Па, $I_c=1$ А, мощность разряда 0,5 кВт) при расстоянии от катода: 1 — $L=6$ см; 2 — $L=10$ см; 3 — $L=15$ см; 4 — $L=22$ см.

Измерения плавающего потенциала и потенциала плазмы в максимально несбалансированном режиме ($I_c=1$ А) на разном расстоянии от катода показали их крайне неравномерное изменение в пространстве (рис. 7, 8). При удалении от катода

радиальные распределения V_{fl} и V_{pl} становятся более плоскими без ярко выраженных экстремумов на оси системы.

Наибольшее (до -25 В) значение плавающего потенциала наблюдается вблизи катода и на оси системы. По мере удаления от катода и оси системы значения плавающего потенциала уменьшаются до единиц вольт. Плавающий потенциал, как известно, определяется потоком ионов и электронов, который, в свою очередь, зависит от плотности и энергии соответствующих частиц. Поскольку плазма считается квазинейтральной, а подвижность электронов значительно превышает подвижность ионов, то плавающий потенциал зависит, в основном, от энергии электронов, что было подтверждено измерением пространственного распределения плавающего потенциала и температуры электронов цилиндрическим ленгмюровским зондом [10]. Области с высокой температурой электронов соответствуют областям с высоким плавающим потенциалом. Было показано, что в сбалансированном магнетроне максимальная температура электронов наблюдается вблизи магнитной ловушки у поверхности катода, а по мере удаления от катода температура уменьшается. Таким образом, можно предположить, что и в нашем случае температура электронов максимальна вблизи катода, а также на оси магнетрона, и уменьшается в области слабого магнитного поля.

Вблизи катода и на оси системы наложение дополнительного магнитного поля приводит, во-первых, к понижению потенциала плазмы за счет магнитного удержания электронов, и, во-вторых, к образованию радиальной потенциальной ямы для ионов, препятствующей их уходу в радиальном направлении. Отрицательный потенциал плазмы в магнетронном разряде с несбалансированным магнитным полем объясняется ограничением плазмы силовыми линиями магнитного поля между катодом, находящимся под отрицательным потенциалом, и подложкой [11].

На рис.9 представлено распределение по энергии ионов Ar^+ при различном давлении аргона в камере (0,08-0,32 Па). Энергетический спектр ионов имеет максимум при $\sim 3,5$ эВ, а также высокоэнергетический хвост в диапазоне 5-25 эВ. Максимум соответствует термализованным ионам, энергия которых равняется разнице между потенциалом плазмы и анодным потенциалом, которая, в свою очередь, в магнетронном разряде составляет единицы вольт [12]. Наличие ионов с энергией до 20-30 эВ может объяснить либо отраженными от катода нейтрализованными ионами [3], либо атомами газа,

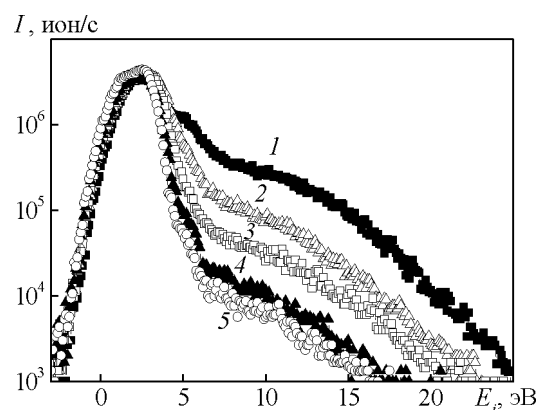


Рис.9. Энергетические спектры ионов аргона ($I_c=0$, мощность разряда 0,5 кВт) при давлении аргона в камере: 1 — 0,08 Па; 2 — 0,14 Па; 3 — 2 Па; 4 — 2,6 Па; 5 — 3,2 Па.

которые приобрели энергию в соударениях с распыленными атомами катода. В обоих случаях высокоэнергетические нейтральные атомы затем ионизируются в плазме между магнитной ловушкой у поверхности катода и подложкой.

Покрyтия ZnO:Ga, нанесенные методом магнетронного распыления

Покрyтия ZnO:Ga наносились при мощности магнетронного разряда 130-150 Вт. В зависимости от тока в электромагнитной катушке разрядное напряжение изменялось от 330 до 380 В.

Так же, как и при осаждении ZnO:Al пленок [13], электрические свойства пленок ZnO:Ga существенно зависели от положения подложки относительно распыляемого катода. Наименьшее удельное сопротивление $\rho=(4,6-8,2)\cdot 10^{-4}$ Ом·см имели пленки, напыленные на подложки, отстоящие на 5 см от оси магнетрона в области над зоной эрозии катода.

Температура подложки является основным фактором, влияющим на свойства ZnO:Ga пленок, осаждаемых магнетронным распылением керамических катодов из оксида цинка. На рис.10 показана зависимость удельного сопротивления ZnO:Ga пленок от температуры подложки. Расстояние от магнетрона до подложки составляло 6 см, электромагнитная катушка была выключена. Как видно, при увеличении температуры подложки от 40 до 170°C удельное сопротивление пленки уменьшается от $1\cdot 10^{-3}$ до $4,6\cdot 10^{-4}$ Ом·см.

Были проведены эксперименты по осаждению пленки ZnO:Ga при температуре подложки $T=90^\circ\text{C}$. Такая температура была выбрана для возможности использования в качестве подложек не только стекла, но и легкоплавких полимерных материалов.

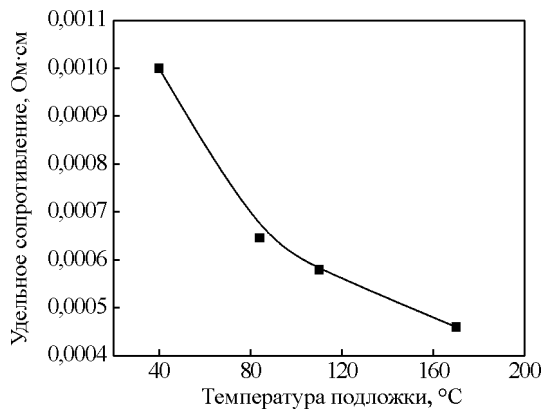


Рис.10. Зависимость удельного сопротивления покрытий ZnO:Ga от температуры подложки.

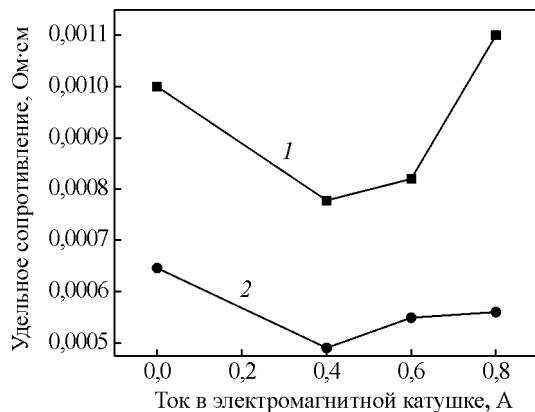


Рис.11. Зависимость удельного сопротивления покрытий ZnO:Ga от тока в электромагнитной катушке при температуре подложки: 1 — 20°C; 2 — 90°C.

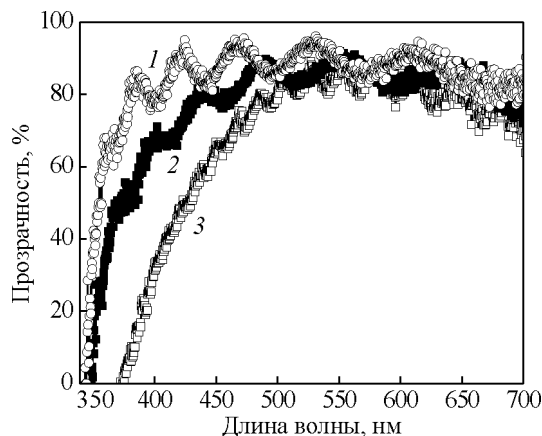


Рис.12. Спектры пропускания в видимом диапазоне длин волн ZnO:Al и ZnO:Ga покрытий: 1 — ZnO:Ga покрытие, полученное в режиме постоянного тока ($I_c=0,4$ А); 2 — ZnO:Al покрытие, осажденное при использовании биполярного источника питания магнетрона; 3 — ZnO:Al покрытие, полученное в режиме постоянного тока.

Зависимость удельного сопротивления покрытий от величины тока I_c в электромагнитной катушке магнетрона при двух температурах подложки показана на рис.11. Как видно, существует оптимальное значение тока ($I_c=0,4$ А), при котором удельное сопротивление пленки минимально, при этом эффект более заметен при комнатной температуре подложки.

На рис.12 приведены сравнительные данные по оптической прозрачности в видимом диапазоне длин волн пленок ZnO:Ga и ZnO:Al [13]. Край полосы поглощения пленки ZnO:Ga и пленки ZnO:Al, нанесенной с использованием импульсного биполярного источника питания магнетрона, сдвинут в коротковолновую область вследствие увеличения концентрации носителей заряда в покрытии [14]. Измерения концентрации носителей заряда в покрытии показали, что она составляет $(2-4) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в покрытии ZnO:Al и возрастает до $(5-8) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в пленках ZnO:Ga, полученных в режиме постоянного тока.

Выводы

Разработана конструкция магнетронной распылительной системы с электромагнитной катушкой, позволяющей реализовывать различные конфигурации магнитного поля. Исследовано пространственное распределение генерируемой этой системой плазмы. Показано, что для увеличения плотности плазмы в области подложки необходимо в пространстве между подложкой и магнетроном создать аксиальное магнитное поле, достаточное для эффективного удержания электронов и предотвращения их ухода на стенки камеры. При этом потенциал плазмы может понижаться до отрицательных величин, а характеристики плазмы в пространстве магнетрон-подложка распределяются неравномерно.

Область с наибольшей плотностью ионного тока и плавающим потенциалом находится на оси магнетрона. При удалении от магнетрона и оси системы эти параметры уменьшаются. Энергетическое распределение ионов Ar^+ в магнетронном разряде является неравновесным и имеет максимум, соответствующий термализованным частицам, ионизованным при потенциале плазмы, и высокоэнергетический хвост в диапазоне энергий до 20-30 эВ, интенсивность которого зависит от рабочего давления в камере.

Разработанная конструкция магнетронной распылительной системы позволила получить прозрачные проводящие пленки оксида цинка, легированного галлием, на стеклянных подложках,

нагретых до температуры 90°C. Использование магнетронных распылительных систем с несбалансированной конфигурацией магнитного поля позволяет улучшить электрические и оптические свойства пленок ZnO:Ga, наносимых при низких температурах подложки.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, ГК №02.516.11.6117, и Российского фонда фундаментальных исследований, грант №08-08-99107.

Литература

1. Zhang X.B., Xiao J.Q., Pei Z.L., et al. Influence of the external solenoid coil arrangement and excitation mode on plasma characteristics and target utilization in a dc-planar magnetron sputtering system. *J.Vac.Sci.Technol.A*, 2007, v.25, p.209-214.
2. Petrov I., Abibi F., Greene J.E., et al. Use of an externally applied axial magnetic field to control ion/neutral flux ratios incident at the substrate during magnetron sputter deposition. *J.Vac.Sci.Technol.A*, 1992, v.10, p.3283-3287.
3. Ivanov I., Kazansky P., Hultman L., et al. Influence of an external axial magnetic field on the plasma characteristics and deposition conditions during direct current planar magnetron sputtering. *J.Vac.Sci.Technol.A*, 1994, v.12, p.314-320.
4. Hong R.J., Jiang X., Szyszka B., et al. Comparison of the ZnO:Al films deposited in static and dynamic modes by reactive mid-frequency magnetron sputtering. *J.Cryst. Growth*, 2003, v.253, p.117-128.
5. Szyszka B., Jiang X., Hong R.J., et al. Transparent and conductive ZnO:Al films deposited by large area reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 2003, v.442, p.179-183.
6. Engström C., Berlind T., Birch J., et al. Design, plasma studies and ion assisted thin film growth in an unbalanced dual target magnetron sputtering system with a solenoid coil. *Vacuum*, 2000, v.56, p.107-113.
7. Pickova I., Marek A., Tichy M., et al. Measurements with the emissive probe in the cylindrical magnetron. *Czech.J.Phys.*, 2006, v.56, p.1002-1008.
8. Window B., Savvides N.J. Unbalanced magnetrons as sources of high ion fluxes. *Vac.Sci.Technol.A*, 1986, v.4, p.453-456.
9. Window B., Harding G.L. Ion-assisting magnetron sources: Principles and uses. *J.Vac.Sci.Technol.A*, 1990, v.8, p.1277-1282.
10. Field D.J., Dew S.K., Burrell R.E. Spatial survey of a magnetron plasma sputtering system using a Langmuir probe. *J.Vac.Sci.Technol.A*, 2002, v.20, p.2032-2041.
11. Kadlec S., Quaeqhaegens C., Knuyt G., Stals L.M. Energy distribution of ions in an unbalanced magnetron plasma measured with energy-resolved mass spectrometry. *Surf.Coat.Technol.*, 1997, v.89, p.177-184.
12. Misina M., Shaginyan L.R., Macek M., Panjan P. Energy resolved ion mass spectroscopy of the plasma during reactive magnetron sputtering. *Surf.Coat.Technol.*, 2001, v.142-144, p.348-354.
13. Захаров А.Н., Оскомов К.В., Работкин С.В., Сочугов Н.С. Низкотемпературное магнетронное осаждение прозрачных проводящих пленок легированного алюминием оксида цинка. *ФХОМ*, 2006, №3, с.35-41.
14. Chang J.F., Hon M.H. The effect of deposition temperature on the properties of Al-doped zinc oxide thin films. *Thin Solid Films*, 2001, v.386, p.79-86.