

Т.В. Семикина

ДИОДНЫЕ СТРУКТУРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ZnO, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНОГО ПОСЛОЙНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Разработаны и представлены технологические режимы, позволяющие получать ZnO пленки с концентрацией носителей порядка 10^{16} – 10^{17} см⁻³ методом атомного послойного осаждения (АПО). Проанализированы зависимости концентрации электронов от технологических режимов. Показаны возможности технологии АПО для получения структур с полупроводниковыми ZnO пленками и органическими материалами, а также преимущества использования АПО в прозрачной электронике. Приведен обзор результатов создания гомо- и гетеропереходов на основе полученных полупроводниковых пленок ZnO. Выпрямляющие свойства исследованных *p-n* переходов демонстрируют перспективы их применения в прозрачной электронике.

Ключевые слова: атомное послойное осаждение, полупроводниковые ZnO пленки, гомо- и гетеропереходы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология и изучение свойств пленок оксида цинка продолжают оставаться одними из наиболее востребованных направлений физики полупроводников, что подтверждают тысячи ежегодных научных публикаций и многочисленные конференции, посвященные ZnO. В оптоэлектронике пленки ZnO используются в основном в качестве прозрачного токосъемного контакта в полупроводниковых приборах [1, 2]. В фотовольтаике они применяются как для улучшения токосъема, так и для изменения оптических свойств (например, для согласования коэффициентов преломления), а также в качестве диффузионного барьера [2, 3]. Говоря о перспективах применения пленок ZnO, хочется отметить возможность создания ультрафиолетовых детекторов, поскольку данный широкозонный материал является прозрачным в видимой и инфракрасной областях спектра, термически и химически стабильным элементом [4].

Но особый научный интерес вызывает задача получения *p-n* перехода на основе ZnO для создания прозрачных электронных устройств. Понятие прозрачная электроника, в первую очередь, базируется на использовании прозрачных в видимом диапазоне излучения подложек: стекол, кварца, полимеров. Поэтому составной частью прозрачной электроники является полимерная электроника. В полимерной электронике используют нелегированные или слаболегированные полупроводниковые полимеры. На данный момент считается, что преимуществом полимерных материалов, по сравнению с неорганическими полупроводниками, является дешевизна получения полимерных пленок, их гибкость в сочетании, например, с высокой фоточувствительностью, характерной для поливинилкарбазола, полистирола, поликарбоната и их производных. Основными областями применения прозрачной электроники являются сенсорные дисплеи, гибкие дисплеи, органические светодиоды (OLED), электролюминесцентные излучатели, тонкопленочная фотовольтаика, различные электронные и оптические покрытия [5]. Использование прозрачных органических подложек вносит существенные технологические ограничения, в первую очередь, температурные. Низкотемпературные режимы являются обязательными при осаждении слоев на органические материалы либо гибкие полимерные подложки. Температуры плавления полимеров лежат в диапазоне 80–400 °С в зависимости от материала [6]. Кроме низких сублимационных температур, применение органических материалов вносит дополнительные технологические требования. Свойства органических полупроводников нестабильны во времени и постепенно деградируют. Это связано с

© Т.В. Семикина, 2016

присутствием в атмосфере кислорода и паров воды, вступающих в реакцию с органическим материалом. Поэтому очень важна пассивация поверхности органического материала и его защита от влияния атмосферы. Желательно, чтобы пленки ZnO, выполняющие активную функцию, одновременно выполняли и задачу пассивации.

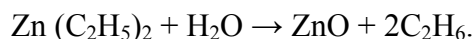
Несмотря на значительное количество технологических методов получения пленок ZnO, в этих методах используются высокие температуры либо во время осаждения, либо при последующих высокотемпературных отжигах. Так, метод импульсного лазерного осаждения требует нагрева подложки до температур 300–750 °С [4]. Пиролитический метод и химическое осаждение из газовой фазы также реализуются при высоких температурах подложки: 450–650 °С для пироллиза, 500–700 °С для химического осаждения из газовой фазы и 350–600 °С для металлоорганического химического осаждения [4]. Недостатком метода магнетронного осаждения является то, что потоки заряженных частиц с высокой энергией являются узконаправленными [7] и действуют на подложку, разрушая ее в случае полимерных и органических материалов. Кроме того, данный метод не позволяет вырастить однородную пленку на большой площади.

Одним из современных методов получения пленок ZnO с использованием низких температур является метод атомного послойного осаждения (АПО). В работе будет дана краткая характеристика метода АПО, а также проанализирована технология получения пленок ZnO этим методом. Приведены результаты влияния технологических режимов на электрические свойства пленок. Сделан обзор результатов получения гомо- и гетеропереходов на основе полученных пленок.

2. МЕТОД АТОМНОГО ПОСЛОЙНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Метод атомного послойного осаждения основан на принципе молекулярной сборки материалов из газовой фазы [8-10]. Процесс нанесения пленки толщиной порядка 1 Å состоит из нескольких шагов – газофазных реакций, протекающих импульсно за очень короткий промежуток времени (около 200 мкс). Окно рабочих температур в технологии АПО составляет 200–400 °С. Однако также можно проводить процессы при температурах 100–200 °С и 400–500 °С (500 °С является верхним температурным пределом). Именно возможность роста пленок при низких температурах 100–150 °С делает этот метод практически незаменимым при использовании органических и стеклянных подложек при одновременном сохранении всех преимуществ вакуумной технологии. Давления, используемые в процессе, составляют 0,1...10 кПа. Метод АПО позволяет получать пленки толщиной от 1 нм (и даже 1 Å) до нескольких микрометров. Типичные толщины пленок, получаемых в результате молекулярной сборки, находятся в диапазоне 10–100 нм. Метод АПО дает очень однородное распределение по толщине пленок. Размер реактора является одним из основных факторов, определяющих длительности стадий. Программно задавая определенное число циклов, мы получаем необходимую нам толщину пленки. При оптимальном подборе технологических режимов зависимость числа циклов и толщины пленки имеет линейный характер. Успех осаждения плотных, малодефектных, однородных пленок методом АПО напрямую связан с синтезом новых прекурсоров, обладающих очень высокой реакционной способностью. Для получения чистой бездефектной пленки чистота прекурсора должна быть не меньше 99,999%. Именно высокая стоимость прекурсоров сдерживает масштабное применение оборудования АПО в микро-, а теперь уже наноэлектронной промышленности. Однако, поскольку толщины получаемых слоев очень малы, а качество пленок уникально высокое, технология АПО уже повсеместно используется при производстве полевых транзисторов компанией Intel [11].

Пленки ZnO выращивались на установке Cambridge NanoTech Savannah-100 с использованием органического прекурсора диэтилцинк DEZn [12]:



Преимуществами использования органических реагентов с содержанием цинка является высокое давление паров (>10 Торр при 300 К), что позволяет уменьшить температуру роста пленки ниже 100 °С. В АПО процессе пары прекурсоров последовательно подаются в камеру роста, где они достигают поверхности растущей пленки. После подачи паров прекурсора, которая длится несколько секунд, проводится очистка камеры за счет напуска нейтрального газа, например азота, и его откачка. Затем в течение десятка миллисекунд идет напуск паров воды и опять очистка камеры нейтральным газом. Таким образом, в результате одного цикла, который состоит из стадии напуска Zn (C_2H_5)₂, откачки, напуска H₂O, откачки, формируется один слой ZnO, толщина которого составляет примерно 1 Å. Полная длительность цикла зависит от времени каждой стадии, которые подбираются экспериментально. В качестве подложек использовались различные материалы: кремний, стекло, кварц, полимерные пленки, органические материалы и др. Рост пленок исследовался в температурном диапазоне 80–250 °С, толщина пленок составляла 100–200 нм, что достигалось путем изменения количества циклов осаждения (500–1000 циклов).

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ZnO

Пленки ZnO имеют *n*-тип проводимости. Предполагается, что вакансии кислорода, а также включения цинка и встроенных молекул водорода определяют высокое значение концентрации электронов в пленке, поскольку они формируют мелкий донорный уровень, расположенный на 10–50 мэВ ниже дна зоны проводимости [13]. В большинстве исследований ставится задача получения пленок с высокой концентрацией носителей заряда, поскольку пленки ZnO чаще всего используются в качестве токосъемных контактов. Для этого необходимо получать пленки с высокой проводимостью ($\sim 10^4$ Ом⁻¹см⁻¹), сравнимой с проводимостью пленок оксида индия, легированного оловом, ИТО (1×10^4 Ом⁻¹см⁻¹). Замена ИТО пленок на другой более дешевый и менее токсичный материал до сих пор остается актуальной задачей [14]. Для увеличения проводимости ZnO используется дополнительное легирование пленок алюминием либо другими элементами III группы. Это ведет к уменьшению сопротивления от $\sim 10^{-3}$ Ом·см для нелегированной пленки до $(2-3) \times 10^{-4}$ Ом·см [14]. Однако для формирования эффективного *p-n* перехода либо диода Шоттки необходимо получать пленки с низкой концентрацией электронов ($n \leq 10^{17}$ см⁻³) [14].

В ходе работы решалась задача нахождения технологических режимов, позволяющих получать пленки с разной проводимостью. Для этого менялась температура осаждения, а также продолжительность операций напуска прекурсоров и время откачки камеры. Было установлено, что температура осаждения является основным фактором, влияющим на концентрацию носителей. А именно, рост пленок при низкой температуре (100 °С и ниже) является обязательным для получения пленок с полупроводниковыми свойствами. Проводимость пленок, концентрация свободных носителей заряда (электронов) и подвижность были получены в результате измерений эффекта Холла при комнатной температуре на измерительном приборе RH 2035 Phys Tech GmbH после нанесения на пленку металлических контактов Ti (100 Å)/Au (400 Å).

На рис. 1 представлены результаты зависимости концентрации электронов от температуры роста. На рисунке показано, что процесс осаждения пленок при температуре $T \leq 100$ °С обеспечивает концентрацию электронов порядка 10^{17} см⁻³. Дальнейшее увеличение температуры до 120–140 °С ведет к существенному изменению электрических свойств [6]. Концентрация свободных электронов увеличивается до $\sim 10^{19}$ см⁻³ и выше. Пленка приобретает металлические свойства. При температуре 200 °С выращенные пленки имели наименьшее значение сопротивления $\sim 10^{-3}$ Ом·см [11] и в дальнейшем использовались в качестве токосъемного контакта при создании солнечных элементов на основе CdS/CdTe [15]. Факт влияния температуры на электрические свойства пленок можно объяснить тем, что высокие температуры (около 200 °С) стимулируют рост пленок с более совершенной кристаллической

структурой, что было подтверждено результатами исследований спектров рентгеновской дифракции [12]. При низких температурах (≤ 120 °C) происходит образование большого числа различных дефектов, уменьшающих количество свободных носителей заряда.

Следующим фактором, влияющим на получение низкой концентрации носителей, было увеличение времени продувки (очистки) камеры нейтральным газом после напуска в камеру паров воды. Это объясняется тем, что в результате удлинения стадии продувки из камеры уходит большее количество гидроксильных групп, которые могли встроиться в пленку и которые ответственны за увеличение концентрации свободных электронов. Режимы, позволяющие получать пленки с полупроводниковыми свойствами, использовались при формировании диодных структур.

На рис. 2 представлены результаты вычисления подвижности зарядов и их зависимость от концентрации электронов. А именно, увеличение концентрации электронов сопровождается увеличением подвижности носителей. Данный результат является необычным, поскольку для пленок ZnO, полученных другими технологическими методами, наблюдается обратная зависимость: увеличение концентрации электронов сопровождается уменьшением подвижности носителей из-за увеличения рассеяния дефектами [6].

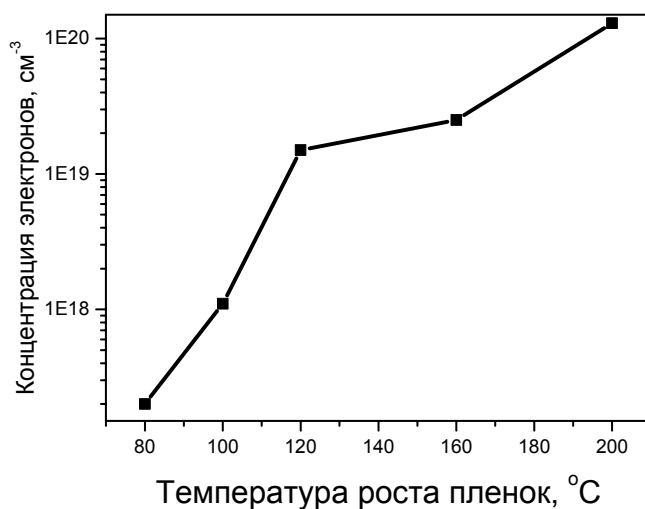


Рис. 1. Зависимость влияния температуры осаждения (температура в камере) на концентрацию носителей в ZnO пленках.

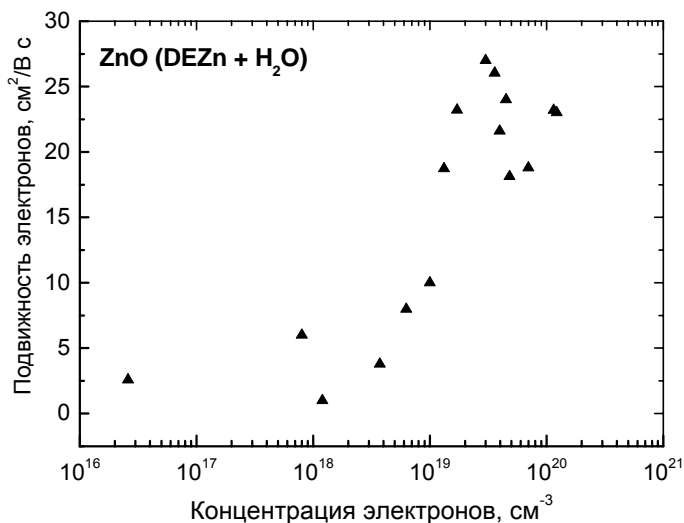


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей от концентрации электронов.

Результат, представленный на рис. 2, можно объяснить тем, что увеличение температуры в камере, ведущее к увеличению концентрации электронов, ведет также к увеличению размеров растущих зерен и формированию более упорядоченной кристаллической структуры [6]. Благодаря этому рассеяние электронов на границах зерен уменьшается так же, как и рассеяние на дислокациях ввиду уменьшения их количества. В результате увеличение температуры процесса ведет к одновременному увеличению количества электронов и их подвижности.

Таким образом, в ходе исследований были найдены технологические режимы, позволяющие получать пленки ZnO с полупроводниковыми свойствами. Так, один из полученных режимов включает следующие операции: пары диэтилцинка DEZn напускались в камеру в течение 1,1 с. Напуск паров воды составлял 2,75 с, температура в камере поддерживалась на уровне 100 °С. При этом получались слои с концентрацией носителей 10^{16} см^{-3} и подвижностью $50 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [13].

4. ДИОДНЫЕ СТРУКТУРЫ С ПЛЕНКАМИ ZnO

Полученные пленки ZnO с низкой концентрацией электронов использовались в качестве *n*-типа полупроводника для изготовления гибридного перехода с *p*-органическим полупроводником [6, 16-17]. В качестве *p*-партнера использовались пентацен и никель фталоцианин (NiPc). Пентацен был выбран для исследования, поскольку этот органический полупроводник широко используется в органических тонкопленочных транзисторах благодаря относительно высокой подвижности носителей заряда, а именно: $>1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [6, 17]. В результате исследований структур с различным расположением слоев ZnO и пентацена было получено, что структура пентацен/ZnO, где слой ZnO (толщина 125 нм, концентрация электронов 10^{17} см^{-3} , подвижность электронов $14 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) наносился методом АПО до осаждения пентацена, обладает диодными свойствами с выпрямлением порядка 10^2 . Вольт-амперная характеристика (ВАХ) этой структуры показана на рис. 3. При этом лучшее значение выпрямления 296 при напряжении $\pm 2,1 \text{ В}$ было получено для следующей конфигурации: на стекло методом высокочастотного магнетронного распыления был нанесен нижний электрод Ti/Au/Ti, затем методом АПО был осажден слой ZnO, методом термического испарения в вакуумной камере наносился пентацен и методом магнетронного распыления последним наносилось золото в качестве омического контакта к пентацену.

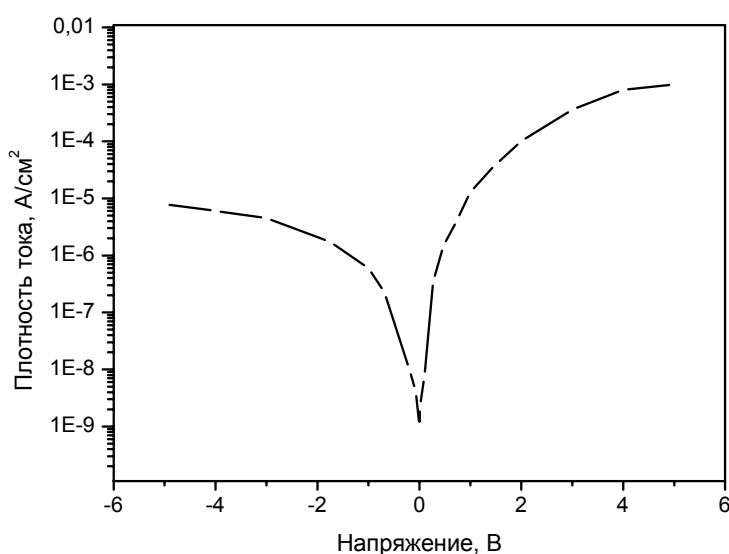


Рис.3. Вольт-амперная характеристика структуры пентацен/ZnO [6, 17].

Следующая гибридная структура на основе органического полупроводника никель фталоцианина (NiPc) и ZnO была изготовлена для фотовольтаического применения [6, 16]. NiPc является органическим полупроводником *p*-типа с подвижностью носителей заряда порядка $0,1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Эта подвижность на порядок ниже, чем у петацена, но является сравнительно высокой при сравнении с другими фталоцианинами. NiPc является фоточувствительным материалом, в связи с чем он нашел применение в органической фотовольтаике. Однако при изготовлении таких органических солнечных элементов существует проблема создания верхнего металлического электрода, наносимого на фталоцианины. Это связано с нестабильностью свойств органических полупроводников и границ раздела между ними и металлическими электродами. Для уменьшения физической и химической деградации NiPc было проведено нанесение слоя ZnO сверху готовой структуры с NiPc. При этом ставилась задача пассивации органического полупроводника и улучшение временной стабильности электрических свойств солнечного элемента. Была изготовлена следующая структура. На стеклянную подложку, покрытую слоем ITO, методом термического испарения был нанесен слой NiPc толщиной 400 нм. Затем низкотемпературным методом АПО (температура $100 \text{ }^\circ\text{C}$) при использовании DEZ и H_2O была нанесена тонкая пленка ZnO толщиной 26 нм. Слой ZnO имел такие характеристики: концентрация электронов была порядка 10^{16} см^{-3} , подвижность $2,9 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, проводимость $0,01 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. И в заключение, верхний алюминиевый электрод (толщина 200 нм) методом термического испарения был нанесен сверху структуры. Активная область такого устройства ITO/NiPc/ZnO/Al составляла 1 см^2 . Для сравнения была изготовлена аналогичная структура, но без пленки ZnO. Темновые ВАХ обеих структур показали следующие свойства: коэффициент выпрямления равный 41 при напряжении $\pm 1 \text{ В}$ для структур с ZnO и равный 2 при $U = \pm 1 \text{ В}$ для структур без слоя ZnO. Структуры с ZnO слоем имели более высокое значение фототока, коэффициент полезного действия выше в 2,5 раза по сравнению с солнечными элементами ITO/NiPc/Al. Анализ энергетических зонных диаграмм, проведенный в работе [16], показал, что диодные свойства обусловлены формированием гетероперехода *p*-NiPc/*n*-ZnO. Генерационно-рекомбинационные процессы происходят главным образом во фталоцианине. При измерении структуры без ZnO (ITO/NiPc/Al) ВАХ, построенные в масштабе $\log(I) \sim \sqrt{U}$, были линейными при обратном напряжении выше 1 В. Авторы предположили, что в данном случае, скорее всего, происходит формирование барьера Шоттки. Присутствие слоя ZnO улучшило временную стабильность исследуемых устройств. Так, ВАХ, измеренные повторно через 30 дней, показали исчезновение выпрямления для структур без ZnO и некоторое ухудшение коэффициента выпрямления до значения 32 для структур с ZnO слоем, что показало перспективность использования пленки оксида цинка.

Для создания следующей структуры использовался органический полупроводник полидиметилсилоксан с добавкой углеродных нанотрубок PDMS:CNT [17]. Полимер PDMS обладает гибкостью и прозрачностью и рассматривается как одна из возможных подложек для будущих гибких электронных устройств. Углеродные трубки были введены в PDMS для улучшения его электрических свойств. Пленки ZnO толщиной 80 нм (концентрация электронов 10^{17} см^{-3} , подвижность электронов $14 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) были нанесены методом АПО на *p*-PDMS:CNT. ВАХ структуры ITO/PDMS:CNT/ZnO/Au показали выпрямление при первом измерении при приложении напряжения от 6 до -6 В . Выпрямление исчезало при следующем измерении от -6 до 6 В , что было объяснено эффектом накопления заряда в структуре, вызванным свойствами PDMS:CNT.

В работе [18] исследовали гибридный выпрямляющий переход на основе поли(3-гексилтиофена) (P3HT) и ZnO. P3HT был выбран в качестве *p*-типа органического соединения, обладающего относительно высокой подвижностью носителей заряда. При создании структуры Au/P3HT/ZnO/Al использовалась кремниевая подложка *n*-типа,

покрытая слоем диоксида кремния. Нижний золотой электрод был нанесен методом электронно-лучевого испарения, РЗНТ (толщина 30 нм) наносился центрифугированием из раствора толуола. Пленки ZnO толщиной 90 нм наносились методом АПО в соответствии с описанными выше режимами, и верхний алюминиевый электрод толщиной 100 нм был получен методом термического испарения. Измерения ВАХ показали, что РЗНТ/ZnO переход обладает выпрямлением с коэффициентом выпрямления 10^5 при напряжении ± 4 В. Наблюдались высокие значения плотности тока 10^4 А/см² при напряжении 4 В. Обратный ток оставался постоянным до напряжения $-3,5$ В, и его значение было ниже по сравнению с током диодов Шоттки Al/ZnO/Ag [18]. На основе построенных зонных диаграмм в работе [18] показано, что полученные диодные характеристики относятся именно к формированию *p-n* перехода между РЗНТ и ZnO, а не перехода Au/ZnO/Al.

В работе [19] анализируются результаты создания гомоперехода на основе ZnO пленок, полученных методом АПО при температурах роста 100–130 °С. В качестве подложки использовался кремний (100) с тонким слоем оксида кремния (1–2 нм). Для нанесения нелегированной пленки *n*-ZnO использовались полученные нами и описанные выше технологические режимы, температура в камере составляла 130 °С. Для создания *p*-типа ZnO проводилось легирование азотом. Азот был введен в технологический цикл путем замещения паров воды на пары аммиачной воды (NH₄OH). Температура в камере 100 °С. После завершения этапа роста пленки структура помещалась в камеру с кислородом для проведения быстрого (3 мин) высокотемпературного отжига для активации *p*-типа проводимости ZnO пленки. Измерения показали следующие значения для *p*-ZnO: сопротивление пленки 6,9 Ом·см, подвижность дырок 6,1 см²/В·с, концентрация дырок $1,5 \times 10^{17}$ см⁻³. В результате была изготовлена следующая структура – Si/*n*-ZnO/Al₂O₃/*p*-ZnO/Al₂O₃/*n*-ZnO/Ti/Au. Тонкие слои (8 нм) Al₂O₃ осаждались методом АПО для предотвращения диффузии азота. Измерения ВАХ показали выпрямление порядка 2×10^2 при напряжении $U = 2$ В в структурах без слоев Al₂O₃ и 4×10^4 при $U = \pm 2$ В при наличии слоев Al₂O₃. Все слои Al₂O₃ и ZnO были получены на одном технологическом оборудовании и являются прозрачными, что позволяет говорить о перспективах их использования в прозрачной электронике.

5. ВЫВОДЫ

Разработаны технологические режимы осаждения ZnO пленок с полупроводниковыми свойствами. Для получения ZnO пленок, имеющих низкую концентрацию электронов $n \leq 10^{17}$ см⁻³, необходимо использовать низкотемпературные режимы осаждения (100 °С) и увеличенное время (~8–10 с) продувки (очистки) камеры после стадии напуска паров воды. Использование азота в процессе осаждения пленки с дальнейшим проведением быстрого высокотемпературного отжига позволило получить ZnO слои с дырочной проводимостью. ZnO пленки с полупроводниковыми свойствами использовались для создания гомо- и гетеропереходов. Вольт-амперные характеристики гомоперехода, полученного на кремниевой подложке, показали выпрямляющие свойства.

Полученные вольт-амперные характеристики гибридных переходов между пленками *n*-ZnO, выращенными при низкотемпературных режимах, и *p*-органическими материалами демонстрируют перспективы применения этих переходов в прозрачной электронике.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор благодарит Фонд Мианевского и профессора М. Годлевского за возможность проведения научной работы в Институте физики Польской Академии Наук (Варшава). Работа была частично профинансирована европейским региональным фондом развития в рамках рационализаторского экономического гранта (POIG.01.01.02-00-108/09).

T.V. Semikina

DIODE STRUCTURES AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ZnO FILMS GROWN USING THE ATOMIC LAYER DEPOSITION METHOD

Technological regimes for growing ZnO films with the carrier concentrations $10^{16} \dots 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ by using atomic layer deposition method (ALD) have been studied and developed. The dependences of electron concentration on the technological regimes have been analyzed. Demonstrated have been ALD method capabilities for preparing the structures with semiconductor ZnO films and organic materials as well as ALD advantages for application in transparent electronics. The results of creation of homo- and heterojunctions based on the obtained semiconductor ZnO films have been presented. The rectifying properties of the studied *p-n* junctions demonstrate their perspectives for application in transparent electronics.

Keywords: atomic layer deposition, semiconductor ZnO films, homo- and heterojunctions.

1. Доброжан О.А., Опанасюк А.С., Гриненко В.В. Оптичні та рекомбінаційні втрати у тонкоплівкових сонячних елементах на основі гетеропереходів n-ZnS(n-CdS)/p-CdTe із струмознімальними контактами ІТО та ZnO. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2014. **6**, № 4. С. 04035–04043.
2. Godlewski M. Zinc oxide for electronic, photovoltaic and optoelectronic application. *Low Temperature Phys.* 2010. **37**, No. 3. P. 235–240.
3. *Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization, and Application*. Eds. Jef Poortmans and Vladimir Archipov. John Wiley and Sons Inc., 2007. 504 p.
4. Євтушенко А.І., Лашкар'юв Г.В., Лазоренко В.Й., Карпина В.А., Храновський В.Д. ZnO-детектори ультрафіолетового випромінювання (огляд). *Фізика і хімія твердого тіла*. 2008. **9**, № 4. С. 869–882.
5. Семикина Т.В., Комащенко В.Н., Шмырева Л.Н. Оксидная электроника как одно из направлений прозрачной электроники. *Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»*. 2010. № 3. С. 20–28.
6. Luka G., Godlewski M., Guziewicz E., Stahira P., Cherpak V. and Volonyuk D. ZnO films grown by atomic layer deposition for organic electronics. *Semicond. Sci. Technol.* 2012. **27**. P. 074006–074013.
7. Huby N., Ferrari S., Guziewicz E., Godlewski M. and Osinniy V. Electrical behavior of zinc oxide layers grown by low temperature atomic layer deposition. *Appl. Phys. Lett.* 2008. **92**. P. 023502–023505.
8. Puurunen R.L. Surface chemistry of atomic layer deposition: A case study for the trimethylaluminum / water process. *J. Appl. Phys.* 2005. **97**. P. 121301-1–121301-52.
9. Ritala M., Leskela M. Handbook of thin film materials. In: *Deposition and Processing of Thin Films*. Vol. 1, Chapter 2, Atomic layer deposition. Nalwa H, editor. New York: Academic Press, 2002. P. 103.
10. Семикина Т.В. Атомное послойное осаждение как нанотехнологический метод для получения функциональных материалов: Обзор. *Учёные записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского*. Серия «Физика». 2009. **22**(61), № 1. С. 116–126.
11. Gieraltowska S., Wachnicki L., Witkowski B.S., Godlewski M. and Guziewicz E. Atomic layer deposition grown composite dielectric oxides and ZnO for transparent electronic applications. *Thin Solid Films*. 2012. **520**. P. 4694–4697.
12. Krajewski T.A., Luka G., Wachnicki L. et al. Electrical parameters of ZnO films and ZnO-based junctions obtained by atomic layer deposition. *Semicond. Sci. Technol.* 2011. **26**. P. 085013–085018.
13. Krajewski T., Guziewicz E., Godlewski M. et al. The influence of growth temperature and precursors' doses on electrical parameters of ZnO thin films grown by atomic layer deposition technique. *Microelectron. J.* 2009. **40**. P. 293–295.
14. Luka G., Krajewski T.A., Witkowski B.S. et al. Aluminum-doped zinc oxide films grown by atomic layer deposition for transparent electrode application. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2011. **22**. P. 1810–1815.
15. Semikina T.V., Mamykin S.V., Godlewski M. et al. ZnO as a conductive layer prepared by ALD for solar cells based on n-CdS/n-CdTe/p-Cu_{1.8}S heterostructure. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2013. **16**, No. 2. P. 111–116.
16. Stahira P.I., Pakhomov G.L., Cherpak V.V., Volonyuk D., Luka G., Godlewski M., Guziewicz E. and Hotra Z.Yu. Photovoltaic cells based on nickel phthalocyanine and zinc oxide formed by atomic layer deposition. *Centr. Eur. J. Phys.* 2010. **8**, No. 5. P. 798–803.
17. Luka G., Krajewski T., Wachnicki L. et al. Hybrid organic/ZnO p-n junctions with n-type ZnO grown by atomic layer deposition. *Acta Physica Polonica A*. 2008. **114**, No. 5. P. 1229–1234.
18. Katsia E., Huby N., Tallarida G. et al. Poly(3-hexylthiophene)/ZnO hybrid p-n junctions for microelectronics applications. *Appl. Phys. Lett.* 2009. **94**. P. 143501.
19. Snigurenko D., Kopalko K., Krajewski T.A., Jakiela R. and Guziewicz E. Nitrogen doped p-type ZnO films and p-n homojunction. *Semicond. Sci. Technol.* 2015. **30**. P. 015001–015007.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкар'юва НАН України,
41, проспект Науки
03680 Київ, Україна

Отримано 04.04.2016