

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУКТУРНОГО ZnO<La> СЕНСОРА ПАРОВ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА

Г.Э. ШАХНАЗАРЯН, Г.А. ШАХАТУНИ*, М.С. АЛЕКСАНИЯН,
З.Г. СИМОНЯН, В.М. АРУТЮНЯН, А.Г. САЮНЦ

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: gevshahkhatuni@ysu.am

(Поступила в редакцию 5 апреля 2022 г.)

Изготовлен наноструктурный сенсор для обнаружения паров перекиси водорода. Газочувствительная пленка сенсора на основе легированного 2 ат.% La металлоксида ZnO получена методом высокочастотного магнетронного распыления. В области температур от комнатной до 200°C исследованы импедансные и вольт-амперные характеристики ZnO<La> сенсора как до, так и после воздействия паров перекиси водорода. На основе анализа частотных характеристик комплексного импеданса предложена эквивалентная электрическая цепь для исследуемой сенсорной структуры, оценены параметры составляющих ее элементов и рассчитаны аппроксимирующие кривые. Показано, что основной вклад в чувствительность изготовленного сенсора дают процессы, протекающие на поверхности полупроводниковой пленки. Исследовано влияние изменения концентрации целевого газа на чувствительность ZnO<La> сенсора.

1. Введение

Для обнаружения в окружающей атмосфере токсичных и взрывоопасных газов, а также определения их концентрации используются оптические, электрохимические, резистивные и другие типы сенсоров. Однако для изготовления многих из них требуются технологически сложные и дорогостоящие процессы. В последние десятилетия в качестве рабочего материала резистивных газовых сенсоров широкое применение получили тонкие полупроводниковые пленки на основе металлоксидов. Сенсоры на основе полупроводниковых металлоксидов просты в изготовлении, сравнительно недорогостоящие, имеют малую потребляемую мощность, легко совместимы с интегральными микросхемами. При использовании резистивных сенсоров обычно контролируется электрическое сопротивление чувствительной пленки, в качестве сигнала-отклика регистрируется изменение сопротивления сенсора в результате воздействия целевого газа [1–6].

Перекись водорода широко используется в медицине, фармацевтике, а также в пищевой и текстильной промышленности благодаря своим антибактериальным свойствам, низкой токсичности и экологической чистоте. Она легко

растворяется в воде, что позволяет безопасно хранить ее в необходимых концентрациях. Однако, чистая перекись водорода (H_2O_2) взрывоопасна, ее высококонцентрированные растворы при попадании на кожу и проникновении в дыхательные пути могут вызвать ожоги. Перекись водорода относится к категории опасных для человека веществ с определенной предельно допустимой концентрацией. Поэтому сенсоры для обнаружения в окружающей среде паров H_2O_2 и определения их точной концентрации представляют большой интерес для многих специалистов [7–12].

Несмотря на достигнутые результаты, продолжается поиск новых чувствительных к парам перекиси водорода материалов. В то же время продолжают работы, направленные на оптимизацию параметров созданных сенсоров. В частности, интенсивно исследуются возможности снижения рабочей температуры сенсора, улучшения его быстродействия, стабилизации параметров. Много делается и для того, чтобы прояснить механизм чувствительности сенсоров. С этой точки зрения наиболее информативным рабочим методом является импедансная спектроскопия, широко применяемая сегодня в электрохимии, физике, материаловедении. Востребованность метода импедансной спектроскопии в последние десятилетия возросла в связи с возросшим уровнем технического и программного обеспечения метода, что позволило сократить временные затраты на получение и обработку экспериментальных данных. За счет проведения измерений на переменном токе импедансная спектроскопия позволяет исследовать механизмы переноса заряда как на фазовой границе раздела двух сред, так и в объеме пленки, выявить происходящие на поверхности полупроводника физико-химические процессы, а за счет варьирования в широком диапазоне частот переменного сигнала наблюдать процессы, протекающие с разными скоростями [13–20].

В данной работе изготовлен чувствительный к парам перекиси водорода сенсор, активной рабочей частью которого является полученная методом высокочастотного магнетронного распыления наноструктурная пленка на основе полупроводникового легированного 2 ат.% La металлоксида ZnO. Характеристики изготовленного ZnO<La> сенсора исследованы методом импедансной спектроскопии при разных рабочих температурах в среде чистого воздуха и при воздействии разных концентраций паров перекиси водорода.

2. Методика эксперимента

2.1. Технология изготовления сенсора

Методом твердофазной реакции была синтезирована полупроводниковая мишень из ZnO, легированной 2 ат.% La. Соответствующие количества порошков исходных металлосидов ZnO и La_2O_3 взвешивались и тщательно перемешивались. Спрессованная из полученной смеси таблетка была подвергнута ступенчатому отжигу последовательно при температурах 300°C (2 часа), 900°C (2 часа), 1100°C (4 часа), 1200°C (2 часа) и 1300°C (4 часа) на воздухе в программируемой печи Nabertherm HT 04/16 с контроллером C42. Затем синтезированная поликристаллическая мишень подвергалась механической обработке для

устранения поверхностных дефектов [21]. Таким образом была изготовлена керамическая плоскопараллельная мишень диаметром 40 мм и толщиной 2 мм.

Методом высокочастотного магнетронного напыления была получена наноразмерная пленка ZnO<La>, используя синтезированную n-типа полупроводниковую мишень. Мощность высокочастотного магнетронного генератора во время напыления составляла 60 Вт, процесс напыления длился 23 минуты, температура подложки равнялась 200°C. В качестве подложки сенсора использовалась мультисенсорная платформа (TESLA BLATNÁ), на которой созданы платиновые электроды, нагреватель и датчик температуры (Pt 1000). Схематически вид сенсора с общими размерами 5.25 × 6.2 мм² представлен на рис. 1а. Газочувствительная пленка напыляется на гребенчатые электроды. Площадь пленки составляет 4.76 мм². Нагреватель и датчик температуры покрыты слоем изолирующего стекла. Отметим также, что электроды состоят из 200 гребенчатых контактов, толщина и межконтактное расстояние между которыми составляет ~15 мкм. Когда на активную область платформы наносится газочувствительная пленка, мультисенсорная платформа превращается в газовый сенсор.

На поверхность изготовленной полупроводниковой ZnO<La> пленки методом DC магнетронного напыления наносились каталитические частицы палладия. Продолжительность процесса осаждения каталитических частиц равнялась 3 секундам [22]. На последнем этапе изготовления для получения однородных пленок, устранения механических напряжений и недостатков кристаллической решетки, а также стабилизации базового сопротивления сенсорная структура

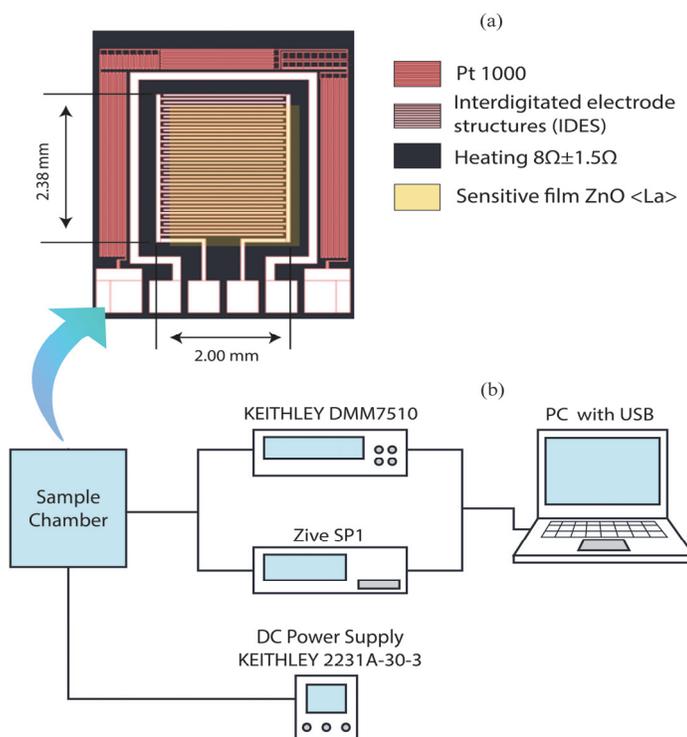


Рис.1. Схематическое представление сенсора (а) и измерительной установки (б).

подвергалась отжигу на воздухе в соответствии со следующей программой: подъем температуры от комнатной до 300°C в течении 1 часа, выдержка при 300°C в течении 3 часов, понижение до комнатной температуры в течении 1 часа.

2.2. Методика измерений

Исследования характеристик изготовленного ZnO<La> сенсора были проведены в чистом воздухе и при наличии в окружающей атмосфере разных концентраций паров перекиси водорода при разных температурах нагрева газочувствительной пленки. На рис. 1b схематически представлена используемая измерительная система. Изготовленный сенсор для исследования помещался в герметически закрывающуюся камеру, в которой заранее созданы все необходимые соединения. Данные измерений регистрировались с помощью двух устройств. Мониторинговые данные об электрическом сопротивлении исследуемого сенсора регистрировались с помощью программы KickStart 2 цифрового мультиметра KEITHLEY DMM7510 7 ½. Измерения как вольт-амперных характеристик, так и частотных зависимостей комплексного импеданса исследуемой структуры проводились с помощью потенциостата Wonatech Zive SP1. Результаты этих исследований регистрировались с помощью программы Smart Manager 6 устройства Zive SP1. Исследования вольт-амперных характеристик сенсора проводились в диапазоне от –5 В до 5 В со скоростью сканирования 50 мВ/с. Измерения комплексного импеданса проводились в диапазоне частот 1 Гц–1 МГц, при этом на сенсор подавалось напряжение смещения 1 В, на которое накладывался синусоидальный сигнал с амплитудой 300 мВ. Для нагрева сенсора на нагреватель подавалось соответствующее напряжение от источника питания KEITHLEY 2231A-30-3.

После термостабилизации исследуемой структуры при заданной температуре в экспериментальную камеру вводилось определенное количество водного раствора перекиси водорода, которое выпаривалось на горячей (100°C) платформе, находящейся в камере. Таким образом перекись водорода из жидкой фазы преобразовывалась в газообразную. Для обеспечения в измерительной камере необходимых концентраций паров перекиси водорода заранее были проведены расчеты, определяющие концентрацию перекиси водорода в газовой фазе, соответствующую заданному количеству водного раствора перекиси водорода определенной концентрации.

Измерения как вольт-амперных, так и импедансных характеристик исследуемого ZnO<La> сенсора были проведены в температурном диапазоне от комнатной до 200°C. Концентрация целевого газа изменялась в пределах от 17.5 до 350 ppm.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измерения с помощью профилометра Alpha-Step D-100 (KLA Tencor) показали, что изготовленная методом магнетронного напыления ZnO<La> пленка имела толщину ~70 нм. Исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira 3 LMH (Tescan) позволили оценить средний диаметр равномерно распределенных зерен около 20 нм. Согласно результатам химического

анализа, проведенном с использованием NitonTM XL 3t GOLDD + XRF Analyzer, в газочувствительном слое изготовленного нами сенсора содержится 1.47 ат.% La, т.е. реальный состав полученной пленки может быть представлен формулой $Zn_{0.9853}La_{0.0147}O$ [23].

На рис.2а приведены результаты измерений вольт-амперных характеристик исследуемого ZnO<La> сенсора, проведенных на воздухе в диапазоне температур от комнатной до 200°C. Полученные линейные зависимости указывают на омическое поведение контактов. Повышение рабочей температуры сенсора, как и ожидалось, сопровождалось увеличением тока, связанным, вероятно, с увеличением числа электронов проводимости как за счет ионизации донорных центров, так и за счет увеличения числа электронов, имеющих энергию, достаточную для преодоления энергетического барьера между зернами.

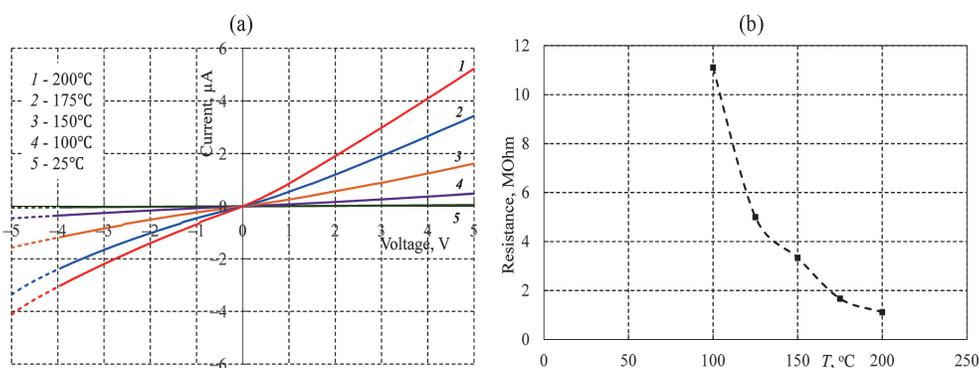


Рис.2. Вольт-амперные характеристики исследуемого сенсора при разных температурах на воздухе (а) и зависимость сопротивления ZnO<La> сенсора от рабочей температуры (б).

Из полученных вольт-амперных характеристик было рассчитано сопротивление исследуемого сенсора при разных температурах (рис.2б). Сопротивление ZnO<La> сенсора при комнатной температуре ~250 МОм. Повышение температуры до 100°C приводит к резкому уменьшению сопротивления почти в 20–25 раз. Однако при дальнейшем повышении температуры, вероятно, параллельно с процессами теплового возбуждения начинают играть роль процессы хемосорбции кислорода, когда молекулы кислорода адсорбируются на поверхности metal-оксида и захватывают электроны проводимости, в результате чего наблюдается замедление роста проводимости.

Как уже выше было отмечено, исследования сенсорной структуры могут быть проведены на переменном токе методом импедансной спектроскопии. Сущность этого метода состоит в подаче возмущающего синусоидального сигнала малой амплитуды на исследуемую структуру и изучении вызванного им сигнала-отклика на выходе. Эти исследования, как и измерения на постоянном токе, позволяют получить информацию о таких характеристиках сенсора, как

чувствительность, селективность, быстродействие. Однако, кроме этой информации, измерения на переменном токе могут дать количественную оценку вкладам объема, поверхностей и границ раздела, границ зерен, электродных контактов, подложки, высоты и ширины барьеров при разных рабочих температурах и в разных окружающих средах, а также избежать теплового влияния постоянного тока, приводящего к нестабильности и невоспроизводимости характеристик сенсора.

Нами были проведены исследования комплексного импеданса изготовленной сенсорной структуры в диапазоне частот $1-10^6$ Гц в чистом воздухе в той же температурной области, в которой были проведены измерения вольт-амперных характеристик. Отклик исследуемой системы на переменный сигнал обусловлен совокупностью многих явлений, поэтому для выделения интересующих факторов импедансные данные могут быть представлены в разных координатах. На рис.3 результаты проведенных на воздухе при разных температурах импедансных измерений представлены в виде зависимостей действительной и мнимой компонент комплексного импеданса исследуемого ZnO<La> сенсора от частоты переменного сигнала.

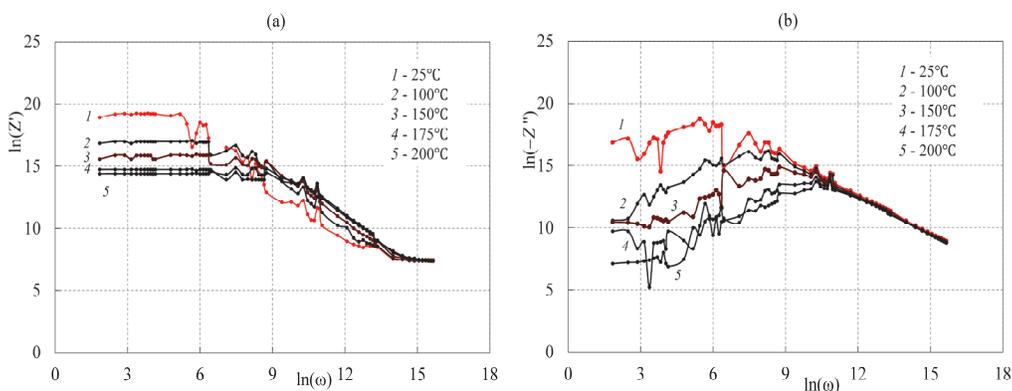


Рис.3. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) компонент комплексного импеданса ZnO<La> сенсора, полученные на воздухе при разных рабочих температурах.

Ход полученных характеристик (в частности, наличие одного пика на частотной зависимости мнимой компоненты и выход частотной зависимости действительной компоненты на плато на краях исследуемого диапазона частот) позволил предположить, что исследуемая сенсорная структура может быть описана эквивалентной электрической цепью, представленной на рис.4а, действительная и мнимая компоненты комплексного импеданса для которой рассчитываются по формулам:

$$Z'(\omega) = R_0 + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}, \quad (1)$$

$$Z''(\omega) = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}. \quad (2)$$

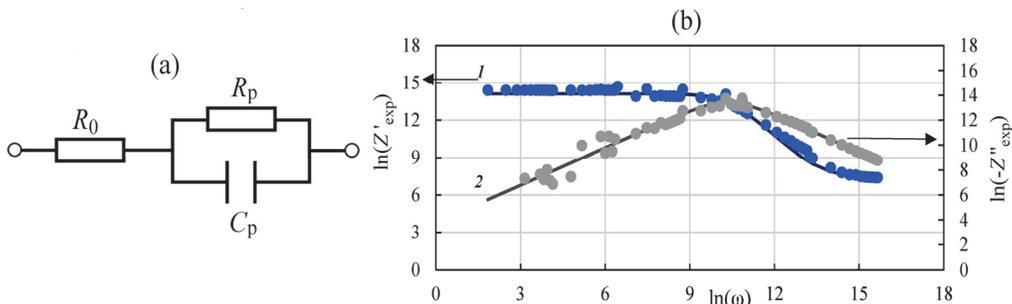


Рис.4. Предлагаемая для исследуемой сенсорной структуры эквивалентная электрическая цепь (а) и экспериментальные (точки) и теоретически рассчитанные (непрерывные линии) частотные зависимости реальной и мнимой компонент импеданса $ZnO<La>$ сенсора при $200^{\circ}C$ (b).

Исходя из экспериментальных частотных зависимостей, мы оценили значения элементов предложенной эквивалентной электрической цепи: величина R_0 оценивалась как значение, к которому стремится действительная компонента импеданса при бесконечном увеличении частоты, величина R_p равна удвоенному значению действительной компоненты импеданса на частоте, соответствующей пику мнимой компоненты, величина C_p оценивалась из соотношения $\omega_{max}R_pC_p = 1$. Далее, используя программное обеспечение для подгонки параметров эквивалентной электрической цепи ZMAN 2.3, проводилось уточнение исходных данных до оптимальных значений. Полученные результаты представлены в таблице 1. Используя формулы (1) и (2) и данные таблицы 1, были рассчитаны аппроксимирующие зависимости действительной и мнимой компонент импеданса от частоты. На рис.4b для сравнения представлены экспериментальные и рассчитанные кривые. Очевидно, что хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретически рассчитанными зависимостями доказывает правильность выбранной эквивалентной электрической цепи для описания процессов, протекающих в изготовленной $ZnO<La>$ сенсорной структуре.

Табл.1. Значения параметров эквивалентной электрической цепи, моделирующей исследуемый $ZnO<La>$ сенсор

Рабочая температура	Измерения на воздухе			Измерения под действием 105 ppm паров перекиси водорода		
	$T, ^{\circ}C$	$R_0, \text{ Ом}$	$R_p \cdot 10^6, \text{ Ом}$	$C_p, \text{ пФ}$	$R_0, \text{ Ом}$	$R_p \cdot 10^6, \text{ Ом}$
25	1791	231.554	20.9	-	-	-
100	1687	22.652	23.2	1681	40.508	22.799
125	1795	6.856	21.4	1791	85.755	23.112
150	1702	5.297	23.3	1698	190.3	24.482
175	1772	2.118	23.7	1775	251.02	24.826
200	1710	1.345	24.3	1705	18.813	21.643

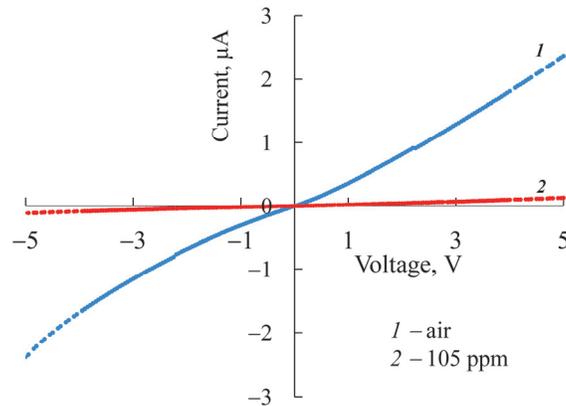


Рис.5. Вольт-амперные характеристики ZnO<La> сенсора, полученные при температуре 175°C до и после воздействия 105 ppm паров перекиси водорода.

Приведенные в таблице 1 данные свидетельствуют о том, что изменение температуры нагрева сенсора приводит к существенному изменению параметра R_p , в то время как величины R_0 и C_p практически не зависят от температуры. Заметим, что предварительно нами были исследованы импедансные характеристики подложки, на которую осаждалась наноструктурная ZnO<La> пленка. Как указывалось в разделе 2.1, сенсорная платформа представляет собой структуру, состоящую из пластины Al_2O_3 , на которую были осажжены платиновые гребенчатые контакты. Сопротивление подложки во всей исследуемой температурной области превышает 1.2 ГОм, вследствие чего при измерениях на постоянном токе она не дает вклада в процесс проводимости. Однако исследования показали, что при воздействии переменного сигнала высокой частоты (превышающей 1000 Гц) проявляются емкостные свойства подложки. При этом величина емкости подложки практически не зависит ни от температуры, ни от величины напряжения смещения, ни от амплитуды малого синусоидального возмущения. Это особенно важно учитывать при исследовании изготовленной нами структуры, в которой емкость наноразмерной ZnO<La> пленки может быть значительно меньше по сравнению с емкостью подложки, что не позволяет выявить в чистом виде емкость металлооксидной пленки [14–17]. Приведенная в таблице 1 емкость C_p является, вероятно, «паразитной» емкостью, обусловленной подложкой. Сопротивление R_0 также было выявлено при измерении импеданса подложки. Вероятно, оно связано с активным сопротивлением кабелей и электродов. Отметим, что температурная зависимость параметра R_p хорошо согласуется с температурной зависимостью активного сопротивления ZnO<La> пленки, полученной из исследований вольт-амперных характеристик сенсора.

Исследования как вольт-амперных, так и импедансных характеристик ZnO<La> сенсора были проведены при воздействии паров перекиси водорода с концентрацией 105 ppm в области температур от комнатной до 200°C. Из приведенной на рис.5 вольт-амперной характеристики, полученной при температуре 175°C, следует, что воздействие 105 ppm паров перекиси водорода приводит к

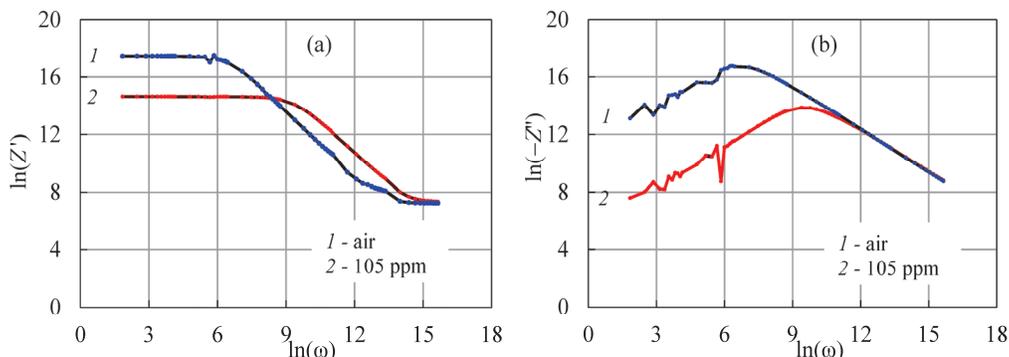


Рис.6. Импедансные характеристики ZnO<La> сенсора, полученные при температуре 175°C до и после воздействия 105 ppm паров перекиси водорода.

резкому возрастанию (на 2 порядка) активного сопротивления исследуемой структуры. Это, как известно, обусловлено тем, что молекулы кислорода, образованные при расщеплении молекул перекиси водорода на поверхности пленки, захватывают электроны из решетки полупроводника, превращаясь в ионы кислорода, в результате чего сопротивление сенсора увеличивается [23,24].

На рис.6 представлены результаты измерений импедансных характеристик ZnO<La> сенсора, проведенных в содержащей 105 ppm паров перекиси водорода среде при рабочей температуре 175°C. Для описания импедансных характеристик исследуемой сенсорной структуры при воздействии паров перекиси водорода была использована та же эквивалентная электрическая цепь (рис.4а). Рассчитанные аналогичным образом значения характеризующих ее параметров приведены в таблице 1, данные которой ясно указывают, что воздействие целевого газа, также как и изменение температуры, приводит главным образом к изменению значения сопротивления R_p . Величины R_0 и C_p практически не зависят от воздействия паров перекиси водорода, также как и от температуры нагрева сенсора. Целевой газ главным образом воздействует на поверхностный слой сенсора, изменение сопротивления которого фиксируется параметром R_p , а независимая от воздействия газа емкость подложки скрывает изменение емкости пленки. Основной вклад в чувствительность исследуемого сенсора дают процессы, протекающие на поверхности полупроводниковой пленки.

Было исследовано влияние разных концентраций паров перекиси водорода на импедансные характеристики ZnO<La> сенсора. Результаты этих исследований представлены на рис.7 в виде кривых Найквиста. Как видно, увеличение концентрации целевого газа приводит к увеличению радиуса полукруга Найквиста, что означает увеличение величины R_p , а пиковая частота, соответствующая максимуму мнимой части импеданса, сдвигается в сторону более низких частот. Используя оцененные значения для параметров эквивалентной электрической цепи, были рассчитаны аппроксимирующие кривые. Наблюдается достаточно хорошее соответствие между экспериментальными и аппроксимирующими зависимостями.

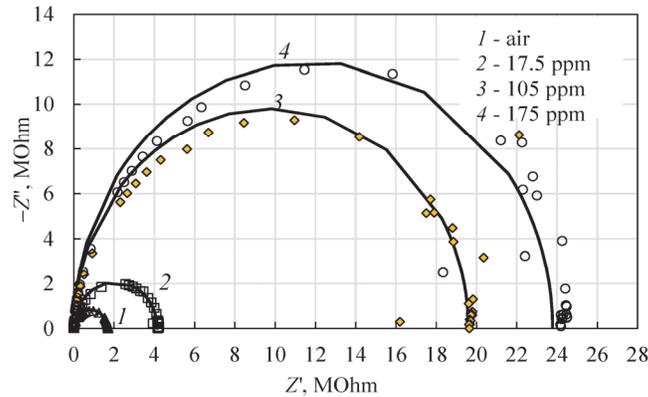


Рис.7. Импедансные характеристики $\text{ZnO}\langle\text{La}\rangle$ сенсора, измеренные при воздействии разных концентраций паров перекиси водорода при рабочей температуре 175°C . Точками представлены экспериментальные данные, непрерывные линии рассчитаны теоретически.

Чувствительность (S) исследуемого сенсора определялась как отношение действительных составляющих комплексного импеданса:

$$S = Z'(\omega)_{\text{газ}}/Z'(\omega)_{\text{воздух}}, \quad (3)$$

где $Z'(\omega)_{\text{воздух}}$ и $Z'(\omega)_{\text{газ}}$ – действительные части комплексного импеданса в атмосфере чистого воздуха и в среде паров перекиси водорода. Определенная таким образом чувствительность $\text{ZnO}\langle\text{La}\rangle$ сенсора представлена на рис.8 как функция от частоты и концентрации паров перекиси водорода при рабочей температуре 175°C . Как видно, чувствительность исследуемого сенсора остается постоянной в диапазоне низких частот (от 1 Гц до 100 Гц). Это говорит о том, что сенсор может быть настроен на достижение максимальной чувствительности выбором подходящего диапазона рабочих частот. Отметим, что наблюдается близкая к линейной зависимость чувствительности исследуемого сенсора от концентрации целевого газа.

Вклад каждого из многочисленных, определяющих импеданс системы факторов выражается на эквивалентной электрической схеме посредством какого-либо элемента или соответствующего соединения элементов. Поэтому реальная эквивалентная электрическая цепь сенсорной структуры может быть довольно сложной. Выбранная нами эквивалентная электрическая цепь является

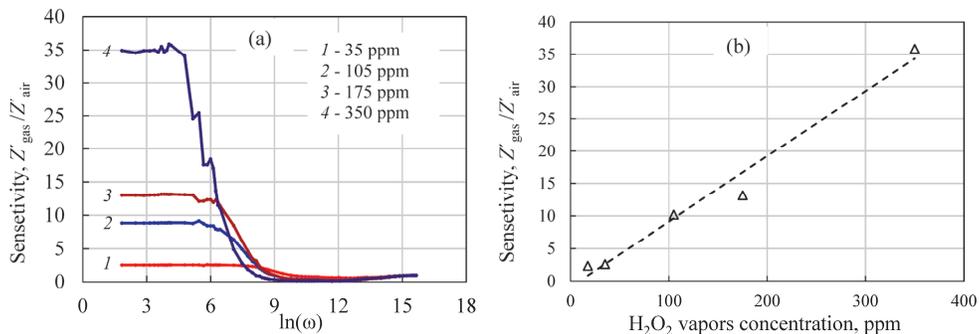


Рис.8. Зависимость чувствительности $\text{ZnO}\langle\text{La}\rangle$ сенсора от частоты (а) и от концентрации паров перекиси водорода (б) при рабочей температуре 175°C .

упрощенным вариантом реальной схемы для случая, когда и при изменении температуры, и при воздействии целевого газа доминируют процессы на поверхности полупроводниковой пленки. Полученные интересные результаты показывают необходимость проведения исследований комплексного импеданса в более широком частотном и температурном интервалах для более полного моделирования сенсора, что позволит получить более полное представление о механизмах протекающих процессов.

4. Заключение

Был изготовлен резистивный газовый сенсор с чувствительной к парам перекиси водорода пленкой на основе полупроводникового металлоксида ZnO, легированного 2 ат.% La. Наноструктурная ZnO<La> пленка была получена методом высокочастотного магнетронного напыления, используя синтезированную нами керамическую мишень. Полученные при разных температурах и под действием разных концентраций паров перекиси водорода линейные вольт-амперные характеристики исследуемого ZnO<La> сенсора свидетельствуют об отсутствии контактного барьера. Были проведены исследования импедансных характеристик ZnO<La> сенсора в частотном диапазоне от 1 Гц до 10^6 Гц. Для описания процессов проводимости в исследуемой сенсорной структуре на основе анализа частотных характеристик комплексного импеданса предложена эквивалентная электрическая цепь, состоящая из сопротивления R_0 , последовательно соединенного с параллельно соединенными сопротивлением R_p и емкостью C_p . Проведена оценка характеризующих эквивалентную электрическую цепь параметров, рассчитаны аппроксимирующие импедансные кривые. Наблюдаемое хорошее соответствие между экспериментальными точками и расчетными кривыми доказывает правильность выбранной эквивалентной электрической цепи. Установлено, что практически постоянные сопротивление R_0 и емкость C_p , связанные со сложной структурой подложки сенсора, не позволяют выявить в чистом виде емкость полупроводниковой пленки. Как изменение температуры, так и воздействие паров перекиси водорода приводит к изменению сопротивления R_p , которое обусловлено протекающими на поверхности полупроводниковой пленки процессами. Механизм проводимости в изготовленном ZnO<La> сенсоре контролируется поверхностными реакциями. Чувствительность ZnO<La> сенсора становится постоянной на частотах ниже 100 Гц и при изменении концентрации паров перекиси водорода в диапазоне от 17.5 ppm до 350 ppm увеличивается линейно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке РА в рамках научного проекта № 21Т-2J062.

ЛИТЕРАТУРА

1. **L. Zhu, W. Zeng.** Sensors and Actuators A: Phys., **267**, 242 (2017).
2. **Z. Li, Z.J. Yao, A.A. Haidry, T. Plecenik, L.J. Xie, L.C. Sun, Q. Fatima.** Intern. J. Hydrogen Energy, **43**, 21114 (2018).
3. **S. Tian, Y. Zhang, D. Zeng, H. Wang, N. Li, C. Xie, C. Pan, X. Zhao.** Phys. Chem. Chem. Phys., **17**, 27437 (2015).
4. **M. Breedon, M.J.S. Spencer, I. Yarovsky.** J. Phys. Chem. C, **114**, 16603 (2010).

5. **S. Tian, Y. Zhang, D. Zeng, H. Wang, N. Li, C. Xie, C. Pan, X. Zhao.** *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 27437 (2015).
6. **Q. Yuan, Y.P. Zhao, L. Li, T. Wang.** *J. Phys. Chem. C*, **113**, 6107 (2009).
7. **V.M. Aroutiounian.** *Armenian Journal of Physics*, **11**, 39 (2018).
8. **A.A. Ensafi, F. Rezaei, B. Rezaei.** *Sensors Actuators B Chem.*, **231**, 239 (2016).
9. **C.Y. Lin, C.T. Chang.** *Sensors and Actuators B: Chem.*, **220**, 695 (2015).
10. **C.-C. Hsu, Y.-R. Lo, Y.-C. Lin, Y.-C. Shi, P.-L. Li, C.-C. Hsu, Y.-R. Lo, Y.-C. Lin, Y.-C. Shi, P.-L. Li.** *Sensors*, **15**, 25716 (2015).
11. **S. Chen, R. Yuan, Y. Chai, F. Hu.** *Microchim. Acta*, **180**, 15 (2013).
12. **W. Chen, S. Cai, Q.-Q. Ren, W. Wen, Y.-D. Zhao.** *Analyst*, **137**, 49 (2012).
13. **E. Barsoukov, J.R. Macdonald.** *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
14. **F. Schipani, D.R. Miller, M.A. Ponce, C.M. Aldao, S.A. Akbar, P.A. Morris.** *Advanced Sciences and Engineering*, **5**, 86 (2016).
15. **N.H. Al-Hardan, M.J. Abdullah, A.A. Aziz.** *Intern. J. Hydrogen Energy*, **35**, 4428 (2010).
16. **F. Hernández-Ramírez, A. Tarancón, O. Casals, J. Arbiol, A. Romano-Rodríguez, J.R. Morante.** *Sensors and Actuators, B: Chem.*, **121**, 3 (2007).
17. **D.V. Adamchuck, V.K. Ksenevich, N.I. Gorbachuk, V.I. Shimanskij.** *Devices and Methods of Measurements*, **7**, 312 (2016).
18. **S. Sumi, P.P. Rao, P. Koshy.** *Ceramics International*, **41**, 5992 (2015).
19. **K. Dutta.** *IEEE Sensors J.*, **21**, 22220 (2021).
20. **T.P. Hüsler, H. Wiggers, F.F. Kruis, A. Lorke.** *Sensors Actuators B*, **109**, 13 (2005).
21. **M.S. Aleksanyan, A.G. Sayunts, G.H. Shahkhatuni, V.M. Aroutiounian, G.E. Shahnazaryan.** *J. Contemp. Phys.*, **56**, 352 (2021).
22. **N. Ma, K. Suematsu, M. Yuasa, T. Kida, K. Shimanoe.** *ACS Applied Materials and Interfaces*, **7**, 5863 (2015).
23. **V. Aroutiounian, V. Arakelyan, M. Aleksanyan, G. Shahnazaryan, P. Kacer, P. Picha, J. Kovarik, J. Pekarek, B. Joost.** *J. Sens. Sens. Syst*, **7**, 1 (2018).
24. **G.H. Shahkhatuni, V.M. Aroutiounian, V.M. Arakelyan, M.S. Aleksanyan, G.E. Shahnazaryan.** *J. Contemp. Phys.*, **54**, 188 (2019).

STUDY OF THE IMPEDANCE CHARACTERISTICS OF A
NANOSTRUCTURED ZnO<La> SENSOR FOR HYDROGEN
PEROXIDE VAPORS

G.E. SHAHNAZARYAN, G.H. SHAHKHATUNI, M.S. ALEKSANYAN,
Z.G. SIMONYAN, V.M. AROUTIOUNIAN, A.G. SAYUNTS

A nanostructured sensor for the detection of hydrogen peroxide vapors was manufactured. A gas sensitive film based on ZnO metal oxide doped with 2 at.% La was obtained by high-frequency magnetron sputtering method. In the temperature range of 25°C to 200°C, the impedance and current-voltage characteristics of the ZnO<La> sensor were studied with and without hydrogen peroxide vapors. The equivalent electrical circuit for the the sensor was suggested and the parameters of its elements were estimated. The fitting curves were calculated based on the analysis of the frequency characteristics of the complex impedance. It was shown that the sensitivity of the manufactured sensor mainly depends on the processes occurring on the surface of the semiconductor film. The effect of the change of the target gas concentration on the sensitivity of the ZnO<La> sensor was studied.