

Рисунок 3 – Зависимость значений КУС и w (мДж/м²) образцов ПЭТФ-50 (а, в) и ПЭТФ-100 (б, з), модифицированных монослоем ПФДК от: а, б – концентрации красителя (время выдерживания 10 мин); в, з – времени выдерживания в 1 мг/мл растворе КО

Адсорбция красителя на поверхности мембран подтверждается и данными измерения смачиваемости поверхности – значения КУС уменьшаются с повышением концентрации КО в растворе. Увеличение времени выдерживания до 1 ч и 1 сут к значительным изменениям смачиваемости не приводит (рис. 3). Таким образом, на основании изучения структуры, локальных механических свойств и КУС показано, что оптимальными условиями формирования селективных тонких слоев на поверхности ПЭТФ ТМ с диаметрами пор 50 и 100 нм для ПФДК-монослоя методом Ленгмюра–Блоджетт является $\pi = 5$ мН/м; условия формирования слоя красителя КО методом послойного осаждения – концентрация 1 мг/мл, время выдерживания от 1 ч до 1 сут.

Полученные модифицированные мембраны могут быть использованы для определения содержания катионов металлов в процессе фильтрации водных растворов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Г22МС-029 от 04.05.2022).

УДК 621.317.39.084.2

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ В СОСТАВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ НА АЛЮМООКСИДНЫХ ПОДЛОЖКАХ

Реутская О.Г.¹, Денисюк С.В.², Куданович О.Н.², Лугин В.Г.³

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

³Белорусский государственный технологический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Формирование газочувствительных слоев на алюмооксидных подложках обеспечивает воспроизводимость и стабильность характеристик, а также низкое энергопотребление сенсоров. Методики выбора режимов отжига и способа нанесения тонких пленок влияют на адгезионные свойства элементов конструкции. Получение развитых сплошных полупроводниковых слоев достигается многослойным нанесением оксидов металлов с применением капельных технологических приемов. Диапазон термообработки поверхности чувствительных элементов составляет от 100 °С до 800 °С.

Ключевые слова: полупроводниковый сенсор, газочувствительный слой, алюмооксидная подложка.

GAS SENSITIVE LAYERS AS PART OF SEMICONDUCTOR SENSORS ON ALUMINUM OXIDE SUBSTRATES

Reutskaya O.¹, Dzenisiuk S.², Kudanovich A.², Lugin V.³

¹Belarusian National Technical University

²SSPA «Optics, Optoelectronics, and Laser Technology»

³Belarusian State Technological University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The formation of gas-sensitive layers on aluminum oxide substrates ensures reproducibility and stability of characteristics, as well as low energy consumption of sensors. The methods of selecting annealing modes and the method of applying thin films affect the adhesive properties of structural elements. The production of developed solid semiconductor layers is achieved by multilayer deposition of metal oxides using drip technological techniques. The range of surface treatment of sensitive elements ranges from 100 °C to 800 °C.

Key words: semiconductor sensor, gas-sensitive layer, aluminium oxide substrate.

Адрес для переписки: Реутская О.Г., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
 e-mail: oreutskaya@bntu.by

Современные тенденции изготовления газовых сенсоров направлены на уменьшение энергопотребления, достижения высокой чувствительности и селективности при анализе окружающей среды. Выбор режимов работы и свойства газочувствительного материала определяют чувствительность и селективность сенсоров. Массовое применение таких устройств ограничено необходимостью обеспечения стабильности их рабочих характеристик при длительной эксплуатации. Миниатюризация полупроводниковых сенсоров позволяет снижать энергопотребление за счет тонкопленочной технологии и уменьшения размеров нагреваемых областей. Применение алюмооксидных подложек расширяет возможности полупроводниковых приборов благодаря широкому диапазону рабочих температур (до 800 °С) и высокой термомеханической прочности. Кроме подложки и газочувствительного слоя важными элементами конструкции сенсора являются нагреватель и измерительные электроды, выполненные в виде проводящих металлических пленок. В качестве материала электродов наилучшей адгезией и долговременной стабильностью выходных параметров обладает платина. Однако, необходимость снижения стоимости сенсоров для массового производства ставит задачу по поиску материалов для выбора другого материала для формирования элементов конструкции.

При проектировании и изготовлении газовых датчиков учитывают особенности полупроводниковых материалов. При формировании газочувствительных слоев следует принимать во внимание сорбционные механизмы, которые «срабатывают» на поверхности анализирующих пленок, а также в их объеме. Важным фактором, влияющим на величину выходного сигнала, является температура осаждения газочувствительного слоя на подложку. Как известно, адсорбция кислорода наиболее активно происходит при температурах 200–300 °С. В результате адсорбированные ионы вступают в реакцию с детектируемым газом и начинается процесс десорбции. Для повышения селективности сенсора необходимо разделять влияние детектируемого газа на электрофизические свойства газочувствительного слоя и других компонентов анализируемого воздуха.

Метод формирования пленок полупроводниковых металлов из золь-гелей относится к наиболее распространенным. Газочувствительные слои создают путем послойного наращивания из паст с последующим высокотемпературным отжигом. Сначала производят конденсацию наночастиц оксидов металлов, а затем наносят на поверхность сенсора слой в виде пасты. После его спекания образуется высокопористая развитая поверхность с хорошей адгезией к подложке [1].

В качестве газочувствительного слоя была выбрана композиция из оксидов олова и индия

($\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$) с 5 % содержанием второго компонента. Нанесение слоя осуществлялось в несколько стадий и слоев капельным путем с промежуточной термообработкой.

На рис. 1 представлена микрофотография сформированной пленки $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ на поверхности алюмооксидной подложки с подслоем в виде пленки из сплава нихром после термосушки и отжига при температуре 700 °С. Температурная обработка проводилась в течение 4 часов.

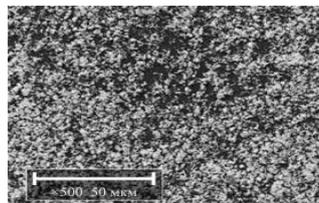


Рисунок 1 – Микрофотография поверхности однослойной пленки $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$

На рис. 2 представлено изображение поверхности газочувствительной пленки, состоящей из восьми слоев. Первый слой также подвергался термообработке (600 °С). Последующие слои высушивали при 100 °С в течение 40 мин. Снижение температуры обработки первого слоя связано с необходимостью достичь однородности пленки при минимальном числе дефектов.

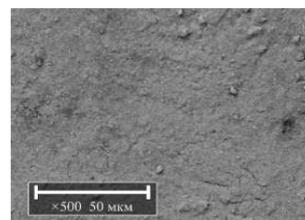
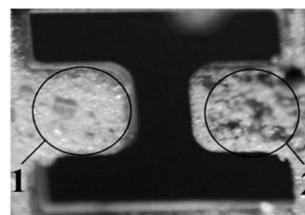


Рисунок 2 – Микрофотография поверхности многослойной пленки $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$



1 – пленка на чувствительном элементе № 1;
2 – неоднородная пленка на чувствительном элементе № 2

Рисунок 3 – Чувствительные элементы двухсенсорной газовой микросистемы с многослойными пленками

При нанесении одиночного слоя (рис. 1) наблюдается значительная неоднородность структуры, что может быть вызвано процессами высыхания капли золь-геля. Многослойная структура (рис. 2), в свою очередь, также содержит дефекты, однако имеет более развитую и однородную поверхность.

На рис. 3 представлено изображение чувствительных элементов полупроводникового сенсора

на алюмооксидной подложке с нанесенными газочувствительными слоями $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ на поверхность информационных электродов из платины, толщиной 0,5 мкм. Данные элементы отличаются числом газоаналитических слоев и режимами высокотемпературного отжига. На элементе № 1 нанесено десять слоев при температуре отжига первого слоя 700 °С, на элементе № 2 – двенадцать слоев (температура отжига первого слоя 850 °С).

Для чувствительных элементов сенсора (рис. 3) применялись разные температуры отжигов и наносилось разное число слоев пленок. В результате наблюдается увеличение числа дефектов на элементе № 2 и частичное разрушение газочувствительного слоя. Нарушение аналитической по-

верхности может приводить к выходу из строя сенсора и оказывать негативное влияние на его работоспособность при долговременной эксплуатации.

Применение золь-гель пасты позволяет получать высокоразвитую поверхность, как в случае полупроводниковой композиции $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$, что приводит к высокой газовой чувствительности сенсора при анализе состава воздуха.

Литература

1. Реутская, О. Г. Разработка газочувствительных сенсоров на основе алюмооксидных структур с низким энергопотреблением / О. Г. Реутская, Н. И. Мухуров, И. А. Таратын // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сб. тр.: в 2 ч. – Минск: БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 119–124.

УДК: 621.315.592

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Шарибаев Н.Ю., Джурраев Ш.С., Турсунов А.А., Муллабоева Н.Ш.

*Наманганский инженерно-технологический институт
Наманган, Республика Узбекистан*

Аннотация. Вероятности опустошения поверхностных состояний зависят от времени и от природы самого центра. Для определения плотности поверхностных состояний приводится сравнение функции вероятности опустошения энергетического уровня $\rho(t, E, T)$ со ступенчатой функцией Ферми-Дирака. Исследуется производная от функции $\rho(t, E, T)$ по энергии, и сравнивается дельта – функцией Дирака. Показано, что производная от вероятности опустошения энергетического уровня по энергии $GN(E_0, E, T)$ при низких температурах превращается в дельта – функцию Дирака. Использование этого факта дало возможность предложить математическую модель определения плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник – диэлектрик в приборах с зарядовой связью ПЗС.

Ключевые слова: МОП-структура, энергетический уровень, дискретные уровни, плотность поверхностных состояний, дельта – функцией Дирака

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF DETERMINING THE DENSITY OF SURFACE STATES

Sharibaev N., Dzhurraev Sh., Tursunov A., Mullaboeva N.

*Namangan Institute of Engineering and Technology
Namangan, Republic of Uzbekistan*

Abstract. The probabilities of emptying surface states depend on time and on the nature of the center itself. To determine the density of surface states, the comparison of the energy level depletion probability function $\rho(t, E, T)$ with the Fermi-Dirac step function is given. The derivative of the function $\rho(t, E, T)$ with respect to energy is investigated and compared with the Dirac delta function. It is shown that the derivative of the probability of depletion of the energy level with respect to energy $GN(E_0, E, T)$ at low temperatures turns into a Dirac delta function. The use of this fact made it possible to propose a mathematical model for determining the density of surface states at the semiconductor-dielectric interface in CCD devices with charge-coupling.

Keywords: MOS structure, energy level, discrete levels, density of surface states, Dirac delta function

*Адрес для переписки: Шаррибаев Н.Ю., ул. Касансай, 7, Наманган, Республика Узбекистан
e-mail: sharibayev_niti@mail.ru*

В идеализированной модели утверждается, что за время генерации $\tau = \tau(E)$, где $E = E_c - E$, из-за тепловой генерации все состояния с энергиями между E_c и E_v полностью освобождаются. И считается, что состояния с энергией ниже E_v полностью заполнены электронами. Вероятность опустошения уровня с энергией E имеет следующий вид [6]:

$$\rho(E) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau(E)}\right) \quad (1)$$

Здесь $\tau(E)$ определяется квантовыми процессами перехода между локализованными поверхностными состояниями и зоной проводимости. В общем случае, она является достаточно сложной функцией энергии и температуры, которая определяется природой исследуемого центра. Расчет