

Таким образом, возникающие в пленке TiAlN на кремниевой подложке термоупругие напряжения при импульсных лазерных воздействиях сравнимы по величине с пределом текучести TiAlN покрытий, что может быть причиной морфологических изменений в пленке.

1. Локтев, Д. Основные виды износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин // Наноиндустрия.-2007.-№5.-С.24-30.
2. Получение и свойства покрытий TiAlN на стали / Ф.Ф. Комаров [и др.]// Ползуновский альманах.-2014.-№2.-С.10-15.
3. Влияние структуры напыляемых слоев TiN и AlN на свойства нанокompозитного TiAlN покрытия/ А.Н. Броздниченко [и др.]// Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. -2006. –Т.6, №15.-С. 64-68.
4. Воздействие наноимпульсного лазерного излучения на тонкие пленки TiAlN/Si /

Г.Д.Ивлев [и др.] // Взаимодействие излучений с твёрдым телом. Материалы 11-й Международной конференции. Минск, Беларусь, 23-25 сентября 2015 г. Минск, Издательский центр БГУ, 2015.- С.33-35.

5. Гацкевич, Е.И. Термоупругие напряжения в поверхностных слоях при наносекундном нагреве // ИФЖ.-1991.-Т.60, №2.-С.344.
6. Табаков, В.П. Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана / В.П. Табаков, А.В. Чихранов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010.-Т.12, №4.-С.292-297.
7. Овидько, И.А. Релаксация напряжений несоответствия путем зернограницной диффузии в нанокристаллических пленках / И.А. Овидько, Н.В. Скиба, А.Г. Шейнерман // Materials Physics and Mechanics.-2009.-V.8. – P.149-154.

УДК 681

ГАЗОВЫЙ СЕНСОР С НИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ НА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЕ

Горох Г.Г.¹, Захлебаева А.И.¹, Ткач А.Н.¹, Реутская О.Г.², Хатько В.В.², Таратын И.А.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

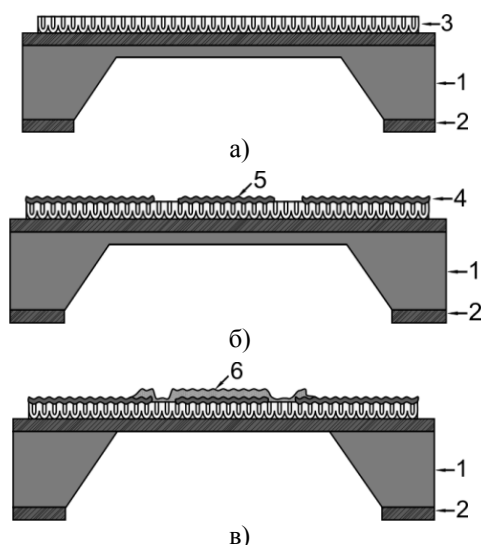
Исследован газовый сенсор с низким энергопотреблением на двухслойной диэлектрической мембране с тонким слоем анодного оксида алюминия. Представлена технология изготовления газового сенсора на наноструктурированной мембране $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$. Исследованы отклики сенсора к 1 ppm CO при различных температурах нагрева чувствительного слоя. Определен оптимальный режим работы сенсора

Для минимизации потребляемой мощности полупроводниковых газовых сенсоров их изготавливают на тонких диэлектрических мембранах, формируемых в кремниевых подложках по МЭМС-технологии [1]. Стандартная технология формирования мембран на основе оксида и нитрида кремния обладает рядом недостатков, среди которых можно выделить плохое согласование термомеханических свойств используемых материалов и их плохую адгезию к нитриду кремния [2]. Одним из способов решения данных проблем является формирование двухслойных мембран с высокоупорядоченным диэлектрическим слоем на основе анодного оксида алюминия (АОА), который за счет пористой структуры обеспечивает высокую адгезию и хорошее согласование термомеханических свойств используемых материалов [3]. Изготовление газовых сенсоров на двухслойных $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{АОА}$ мембранах позволяет уменьшить тепловые потери на нагрев

сенсоров до рабочих температур за счет упорядоченной структуры АОА, ограничивающей распространение тепла по подложке [4]. В настоящей работе представлена технология изготовления тонкопленочного сенсора на комбинированной $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{АОА}$ мембране, исследованы его структурные и функциональные характеристики.

Технологический маршрут изготовления сенсора на комбинированной мембране включает в себя три технологических блока. Первый блок объединяет операции формирования мембраны $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{АОА}$ (рис. 1, а): очистка поверхности Si, осаждение слоя Si_xN_y , фотолитография и локальное плазмохимическое травление Si_xN_y с непланируемой стороны подложки до Si, анизотропное щелочное травление Si, напыление Al и его двухстадийное электрохимическое анодирование. Ко второму блоку относятся операции по изготовлению платинового нагревателя и информационных электродов к чувствительному слою (рис. 1, б): напыление слоя Pt на поверхность АОА и его ионно-лучевое травление. Хорошая адгезия платины к пленке оксида алюминия позволяет избежать применения адгезионных слоев, что в свою очередь улучшает стабильность Pt нагревателя, работающего при высокой температуре, по сравнению с Si микронагревателями [4]. Третий блок включает в себя операции нанесения и термооб-

работки полупроводникового чувствительного слоя $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaO}_2$ (рис. 1, в).



1 – Si подложка; 2 – Si_xN_y ; 3 – АОА; 4 – Pt электроды; 5 – Pt нагреватель; 6 – $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaO}_2$

Рис. 1 – Технология изготовления газосенсора на двухслойной мембране $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{AOA}$

Разработанная конструкция сенсора представляет собой Si подложку площадью $1,35 \times 1,35$ мм и толщиной 0,38 мм, в центре которой сформирована диэлектрическая мембрана размером $400 \times 400 \times 1,7$ мкм (рис. 2, а), состоящая из 0,8 мкм слоя Si_xN_y и 0,9 мкм слоя АОА (рис. 2, б). На планарной стороне мембраны сформирован Pt нагреватель и информационные электроды к чувствительному слою $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaO}_2$.

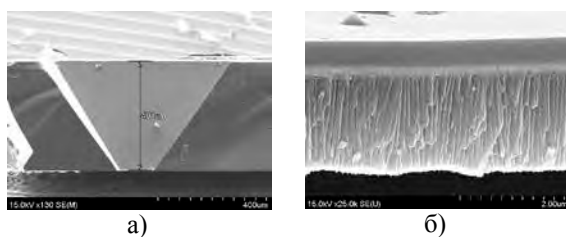


Рис. 2 – Микрофотографии поперечного сечения Si подложки с мембраной (а), мембраны $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ (б)

Изучение теплопроводности изготовленных структур показало, что при нагреве сенсора максимум температуры локализован в области чувствительного элемента и не выходит за пределы мембраны (рис. 3). При этом температура края кремниевой подложки, а также контактных площадок для АОА пористостью 10% в 2 раза, а для АОА пористостью 70% в 3 раза ниже температуры чувствительного слоя [4].

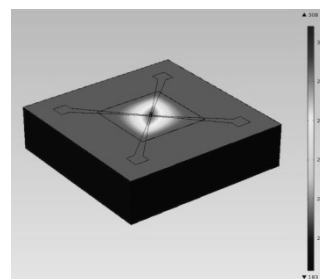


Рис. 3 – Распределение температурного поля в конструкции сенсора на двухслойной мембране

Исследования вольт-амперных характеристик сенсоров на двухслойной мембране показали снижение потребляемой мощности сенсоров на 21% с увеличением пористости АОА до 70% [4].

Сформированные сенсорные структуры исследовали на чувствительность к воздействию 1 ppm CO. На рис. 4 представлены временные зависимости сенсорного отклика сформированных структур при температурах нагрева чувствительного слоя 300°C (кривая 1) и 340°C (кривая 2). Температуре нагрева чувствительного слоя 300°C соответствовала величина потребляемой мощности сенсора 14,0 мВт, а температуре 340°C – 15,4 мВт.

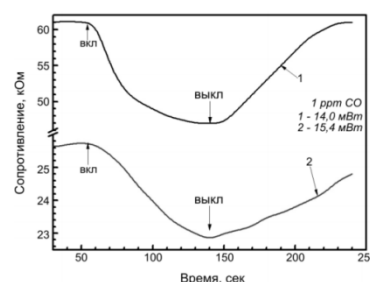


Рис. 4 – Отклики сенсора, сформированного на двухслойной мембране $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{AOA}$, на 1 ppm CO

Величину сенсорного отклика определяли как разность между сопротивлением сенсора при воздействии активного газа (R_{gas}) и сопротивлением сенсора в воздухе (R_{air}). Чувствительность сенсора 1 ppm CO была рассчитана как процентное отношение R_{gas} и R_{air} : $S = [(R_{air} - R_{gas}) / R_{gas}] \times 100\%$ и составила 23,08% для потребляемой мощности сенсора 14,0 мВт и 9,73% для потребляемой мощности сенсора 15,4 мВт. Нагрев чувствительного слоя до температур свыше 300°C приводит к уменьшению чувствительности сенсора, увеличению его потребляемой мощности и ухудшению вида кривой сенсорного отклика (рис. 4).

Формирование газовых сенсоров на наноструктурированных двухслойных диэлектрических мембранах из нитрида кремния и анодного оксида алюминия позволяет решить проблему адгезии и согласования термических и механических свойств используемых материалов, повысить чувствительность и уменьшить потребляе-

мую мощность. Изготовленные структуры показали хорошие отклики на 1 ppm CO, при этом для работы сенсора в оптимальном режиме температура нагрева чувствительного слоя не должна превышать 300°C. Чувствительность сенсора к 1 ppm CO в этом случае составляет 23,08% при потребляемой мощности 14,0 мВт. Нагрев чувствительного слоя до температур выше 300°C приводит к уменьшению чувствительности сенсора, увеличению его потребляемой мощности и ухудшению вида кривой сенсорного отклика.

1. Semiconductor type MEMS gas sensor for real-time environmental monitoring applications / S.E. Moon, N.-J. Choi, H.-K. Lee [et al.] // ETRI Journal. – 2013. – Vol. 35. – Iss. 4. – P. 617-624.
2. Васильев, А.А. Технология «Нано-на-микро». Улучшение характеристик газовых сенсоров / А.А. Васильев, И.М. Олихов,

Н.Н. Сомтаев // Электроника. Наука, технологии, бизнес. – 2011. – №1(00107). – С. 36-44.

3. Пути снижения потребляемой мощности тонкопленочных химических сенсоров / Г.Г. Горох, А.И. Захлабаева, И.А. Таратын, О.Г. Реутская, В.В. Хатько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: КрыМиКо`2015: Материалы 25-й Международной Крымской конференции, Севастополь, 6–12 сентября 2015 г. : в 2 т. – Севастополь, 2015. – Т. 1. – С. 645–648.
4. Маломощный газовый сенсор на наноструктурированной диэлектрической мембране / Е.А. Белогуров, В.В. Хатько, Г.Г. Горох, А.И. Захлабаева, О.Г. Реутская, И.А. Таратын // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 6. – С. 34–42

УДК 519.210

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ТРЕЩИНЫ ОБЩЕГО ВИДА

Гундина М.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Рассматривается неподвижная трещина в бесконечной пластине, материал которой предполагается упругопластическим, упрочняющимся по степенному закону, несжимаемым, в условиях плоской деформации. Исследуется напряженно-деформированное состояние в малой окрестности конца трещины общего вида.

Заметим, что под трещиной общего вида понимается прямолинейная неподвижная трещина-разрез, произвольно ориентированная по отношению к нагрузкам на бесконечности.

Задача решается методом асимптотических разложений по малому параметру, где в качестве малого параметра используется расстояние от вершины трещины. При рассмотрении процесса разрушения необходимо находить асимптотики полей напряжений и деформаций, которые являются предельным представлением решений краевых задач у вершины трещины. В этом случае, напряжения и деформации представляются в виде разложений по степеням расстояния от вершины трещины. Единственной возможностью построения таких разложений для упругопластических задач является реализация итерационного процесса: вначале задача решается для нахождения первого члена ряда, затем находится второй член разложения и т.д.

С целью исследования основных закономерностей деформирования упругопластического материала для сравнения используем решение упругопластической задачи в рамках деформационной теории методом конечных элементов.

С целью исследования основных закономерностей деформирования упругопластического материала у вершины трещины при растяжении используем решение упругопластической задачи в рамках деформационной теории методом конечных элементов. Построим модель для задачи о растяжении плоскости, ослабленной прямолинейной трещиной.

Бесконечную плоскость заменим квадратом достаточно большого размера. Размеры квадрата будем выбирать так, чтобы была возможной замена бесконечной области конечной. Можно рассматривать квадрат $-a \leq x \leq a, a \leq y \leq a$. Проанализировав аналитическое решение задачи, можно сделать вывод, что при удалении от края отверстия на величину a концентрация напряжений быстро уменьшается. Локальный характер оправдывает возможность сравнения решений, полученных для бесконечной пластины и пластины конечных размеров. В задачах теории упругости и пластичности [1,2], если ширина пластины превышает на порядок длину трещины, то разница в решениях по наиболее чувствительному параметру σ_φ не превысит 6%.

Объектом численного исследования служила пластина высотой 200 мм, длиной 200 мм с трещиной длиной $l = 20$ мм. Размеры пластины были приняты схожими как в [1].

Поскольку в пакете SolidWorks плоский образец представляем, как приближение пространственного с малой толщиной пластины. Толщина