

ков нагрева (11 – 131 мА, наибольший  $S = 18\%$  при 131 мА для СО и 3 % для  $C_3H_8$  при 111 мА).

Все исследованные датчики характеризуются также низким энергопотреблением (не более 30 мВт при токе нагрева 51 мА).

**Выводы.** Высокая газовая чувствительность ( $S \leq 2 \times 10^5\%$ ) полученной золь-гель методом оксидной композиции  $WO_3-In_2O_3$ , превышающая чувствительность исходных оксидов, позволяет её применение для формирования чувствительных элементов селективных газовых датчиков  $NO_2$  с низким порогом чувствительности (1 ppm и менее), рабочей температурой  $< 200^\circ C$ , низкой чувствительностью к газам-восстановителям. По сравнению с чистыми  $WO_3$  и  $In_2O_3$  композиция обладает значительно большей чувствительно-

стью и селективностью к  $NO_2$ , а также существенно меньшей рабочей температурой.

1. Khatko, V. Gas sensing properties of nanoparticle indium-doped  $WO_3$  thick films / V. Khatko, E. Llobet, X. Vilanova, J. Brezmes, J. Hubalek, K. Malysz, X. Correig // Sens. Actuators B. Chem. – 2012. – Vol. 111 – 112. – P. 45 – 51.
2. Гайдук Ю.С., Реутская О.Г., Таратын И.А., Савицкий А.А., Стрижаков Д.А. Газовые сенсоры на основе композиций  $WO_3$  с  $Co_3O_4$  и многостенными углеродными нанотрубками: Материалы 8 Междунар. конф. «Приборостроение–2015», Минск, 25–27 ноября 2015 г. Т. 1 / Белорусский национальный технический университет; под ред. О.К. Гусев [и др.]. – Мн., 2015. С. 67 – 69. – 320 с.

УДК 519.63

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛЕНКАХ TiAlN ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Гацкевич Е.И.<sup>1</sup>, Ивлев Г.Д.<sup>2</sup>, Людчик О.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Одними из наиболее перспективных покрытий, используемых для упрочнения режущего инструмента, являются покрытия на основе TiAlN [1]. В частности, эти покрытия обладают высокой тепло- и износостойкостью, а также более высокой стойкостью к окислительному износу по сравнению с существующими покрытиями [1]. Для оптимизации свойств указанных покрытий используют различные способы их нанесения и последующей обработки [2,3]. Недавно [4] было проведено экспериментальное исследование эффектов модификации тонких пленок TiAlN на кремнии воздействием интенсивного наносекундного излучения рубинового лазера. Установлено, что в определенном интервале плотностей энергии лазерного облучения системы TiAlN/Si ниже установленного порога разрушения/абляции субмикронной пленки TiAlN наблюдается изменение морфологии покрытия. Наблюдаемая трансформация строения/морфологии пленки является следствием релаксационных процессов, происходящих в поле значительных (термостимулированных) механических напряжений, которые обусловлены нагревом пленки во время действия лазерного импульса.

Цель настоящей работы заключается в анализе методом численного моделирования применительно к экспериментальной ситуации [4] термостимулированных процессов лазерного воз-

действия, приводящих к модификации структурного состояния пленок TiAlN/Si.

Для моделирования процессов нагрева и остывания численно решалось нелинейное уравнение теплопроводности. В условиях эксперимента [4] плотность энергии падающего излучения равномерно распределена по облучаемой зоне образца (радиус зоны облучения  $r_0=4$  мм), что позволяет ограничиться одномерным приближением. Временная форма (гаусс) и длительность лазерного импульса (70 нс по уровню 0,5) соответствовали эксперименту. Конкретные расчеты проводились для образца TiAlN/Si с толщиной пленки нитрида 0,5 мкм.

В расчете учитывались температурные зависимости теплофизических параметров пленки и подложки. Для коэффициентов отражения и поглощения TiAlN использовались экспериментальные данные, полученные в работе [4], отражательная способность  $R=28\%$  и коэффициент поглощения  $\alpha=1,7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ .

Уравнение теплопроводности для системы пленка – подложка решалось в конечных разностях методом прогонки по неявной разностной схеме. В результате вычислений получены данные о пространственно-временной эволюции температуры в нагреваемом слое системы TiAlN/Si при ряде плотностей энергии лазерного облучения. На рисунке 1 представлено распределение температуры по глубине в момент достижения пиковой температуры поверхности и в

момент окончания импульса (140 нс) при облучении образцов лазерными импульсами с различными плотностями энергии  $W$ .

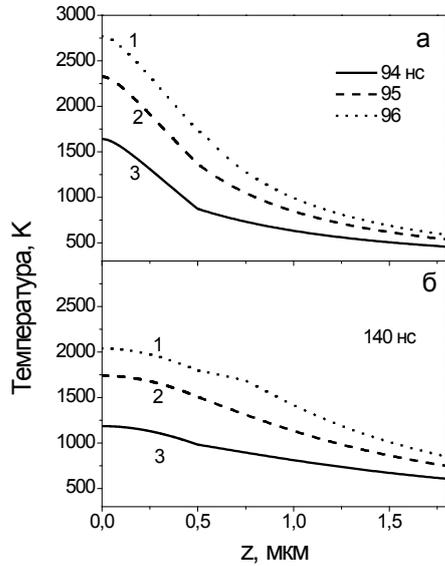


Рисунок 1- Распределение температуры по глубине в момент достижения максимальной температуры (а) и в момент окончания импульса (б) при плотностях энергии облучения 1(1), 0,8 (2) и 0,9 Дж/см<sup>2</sup> (3)

Согласно [4] при  $W=0,5$  Дж/см<sup>2</sup> каких-либо изменений в морфологии плёнки не наблюдается. В этом режиме лазерного воздействия расчётная пиковая температура поверхности составляет 1640 К. На границе пленка-подложка максимальная температура равна 1020 К. При увеличении  $W$  до 0,6 Дж/см<sup>2</sup> происходит морфологическое изменение состояния пленки с образованием системы латеральных ячеек микронных размеров (в среднем 1,8 мкм), превышающих толщину самой плёнки TiAlN, причём средний размер ячеек уменьшается примерно в 2 раза с увеличением  $W$  до 0,8 – 0,9 Дж/см<sup>2</sup> [4].

Для оценки термоупругих напряжений, возникающих при наносекундном лазерном нагреве, воспользуемся аналитическими выражениями из работы [5]. В центре зоны облучения ( $r=0$ ) для составляющих тензора напряжений  $\sigma$  можно использовать выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}(z) = \sigma_{\varphi\varphi}(z) = & -\frac{E\alpha_T}{(1-\nu)} [T'(z) \\ & - \frac{(\nu-1)r_0^2}{3} \int_0^D \frac{dz'T'(z)\mu\pi}{(z^2+r_0^2)^{\frac{3}{2}}} \\ & + \frac{3z^2r_0^2}{2(z^2+r_0^2)^{\frac{5}{2}}} \int_0^D dz'T'(z)], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E$  и  $\nu$  - модули Юнга и Пуассона,  $\alpha_T$  - коэффициент линейного расширения,  $D$  - глубина прогрева.  $T'(z)=T(z)-T_0$ ,  $T_0=300$  К – начальная температура. Расчетные данные для рассмотренных выше режимов облучения, полученные по формуле (1), показаны на рисунке 2.

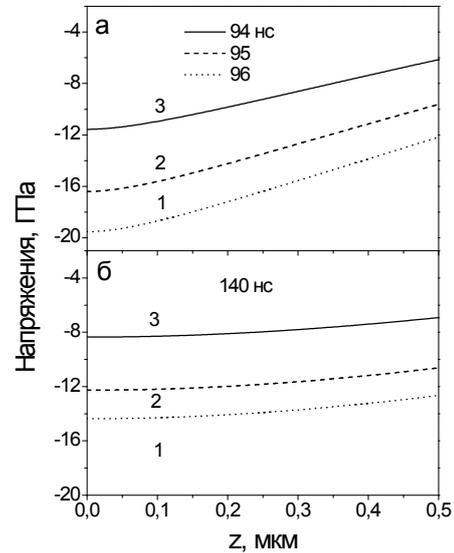


Рисунок 2 – Распределение термоупругих напряжений по оси лазерного пучка в пленке TiAlN. Обозначения те же, что на рисунке 1

Наряду с термоупругими напряжениями в пленке будут также присутствовать напряжения несоответствия, обусловленные различием между параметрами решетки пленки и подложки. Согласно справочным данным параметр кристаллической решетки пленки  $a_f = 0,423$  нм [6], для кремниевой подложки  $a_s = 0,543$  нм. Напряжения несоответствия можно оценить по формуле [7]

$$\sigma_f = \frac{E}{(1-\nu)} \frac{(a_s - a_f)}{a_f}. \quad (2)$$

Внутренние напряжения в пленке действуют в плоскости параллельно её свободной поверхности и являются напряжениями сжатия, как и термоупругие напряжения. Расчетное значение  $\sigma_f$  соответствует значению порядка 200 ГПа. Указанная оценка является завышенной, то есть соответствует верхнему пределу внутренних напряжений. В действительности в значения внутренних напряжений будут вносить вклад дополнительные напряжения, возникающие в пленке в результате пластической деформации. Релаксационные процессы, связанные с пластической деформацией, существенно снижают внутренние напряжения в пленке.

Экспериментальные значения предела текучести  $\sigma_T$  соответствуют значению 12,26 ГПа [6].

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 зернограничной 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.<sup>1</sup>, Захлебаева А.И.<sup>1</sup>, Ткач А.Н.<sup>1</sup>, Реутская О.Г.<sup>2</sup>, Хатько В.В.<sup>2</sup>, Таратын И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

<sup>2</sup>Белорусский 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  $\text{Si}_x\text{N}_y$ , фотолитография и локальное плазмохимическое травление  $\text{Si}_x\text{N}_y$  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-