

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЕМБРАННЫХ МИКРО-ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА БАЗЕ ПАКЕТОВ ПРОГРАММ ТСАД И COMSOL MULTIPHYSICS

Н.А. Дюжев, Е.Э. Гусев, П.Ю. Глаголев

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

bubbledouble@mail.ru

Поступила 19.08.2016

Представлен результат моделирования термического напряжения в диэлектрической мембране на кремниевой подложке в среде ТСАД. Показана эпюра напряжений. Продемонстрирован маршрут формирования МДП транзистора, выходная и проходная характеристика, наглядно иллюстрируется распределение механических напряжений в МЭМС устройстве. В среде COMSOL Multiphysics сделано моделирование системы Si подложка – плёнка. Наглядно показана корреляция численного моделирования в программных средах и аналитического расчёта.

УДК 531.78

Введение

В настоящее время технологии микромеханики, или микро-электромеханических систем (МЭМС) является высоковостребованной отраслью с высокими темпами роста [1,2]. Одна из актуальных проблем МЭМС технологий, оказывающей заметное влияние на качество производимых продуктов сводится к определению величин механических напряжений при изготовлении интегральных схем и МЭМС устройств на Si пластинах. Напряжения и деформации, возникающие на подложках, тонких пленках и многослой-

ных структурах оказывает значительное влияние на надежность и динамические характеристики изделий [3,4].

Деформация возникает при градиенте температуры структуры, вследствие разницы между температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР) различных слоёв. Необходимо учитывать также эффект магнитострикции, обратный пьезоэлектрический эффект возникающий в результате действия внешних сил, создающих деформацию. В результате, напряжение растяжения в пленке в составе многослойной структуры, как правило, приводит к растрескиванию или отслаиванию [5,6,7]. С другой стороны, наличие напряжения может повысить предел упругости системы, предел выносливости, коррозионно-механическую стойкость, быстродействие транзисторов. Возможность предвидения и контроля величин напряжений, позволит не только избежать разрушения прибора [3], но и улучшить параметры надежности и устойчивости изделия.

Моделирование термического напряжения в диэлектрической мембране в среде TCAD

Представлен результат моделирования термического напряжения в диэлектрической мембране на кремниевой подложке с кристаллографической ориентацией (100) на базе пакета программ приборно-технологического моделирования TCAD.

В программной среде TCAD в разделе sprocess не предусмотрена возможность задания величины модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν . Однако, присвоив значение модуля подложки K и модуля сдвига G материала, можно рассчитать требуемые величины, решив систему уравнений (1):

$$\begin{cases} K = \frac{E}{3(1-2 \cdot \nu)} \\ G = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{cases} \quad (1)$$

Параметры материала использовались из библиотеки TCAD. Для нитрида кремния величина модуля подложки K составляет $3.240 \cdot 10^{11}$ (Па) и модуля сдвига G $1.495 \cdot 10^{11}$ (Па) соответственно. Решая систему уравнений (1), получено значение модуля Юнга для Si_3N_4 , равное $3.888 \cdot 10^{11}$ (Па). Аналогичные расчёты сделаны для диоксида кремния. Табличное значение модуля подложки K составляет $6.534 \cdot 10^{10}$ (Па) и модуля сдвига G $2.792 \cdot 10^{10}$ (Па) соответственно. Корень уравнения системы (1): модуль Юнга для SiO_2 составляет $7.30 \cdot 10^{10}$ (Па). При вычисления в TCAD температурные коэффициенты линейного расширения материала α составили: кремний с кристаллографической ориентацией (100) $2.5 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$), диоксид кремния $1.0 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$) и нитрид кремния $3.4 \cdot 10^{-6}$ ($1/^\circ\text{C}$). Величина разницы температуры осаждения плёнки и комнатной ΔT : нижний SiO_2 $850(^\circ\text{C})$, нижний Si_3N_4 $400(^\circ\text{C})$, верхний SiO_2 $350(^\circ\text{C})$ и верхний Si_3N_4 $330(^\circ\text{C})$. Учитывая, что в среде TCAD по умолчанию исходные напряжения в материале отсутствуют, то из экспериментальных данных работы [8] величина стресса в кремнии составила (Па). В результате моделирования получена эпо́ра напряжений представленная на рис. 1.

Из рис. 1 можно заключить, что термический стресс создаёт в диоксиде кремния отрицательные напряжения, в нитриде кремния положительные напряжения.

С целью анализа корреляции результатов численного моделирования с данными аналитического расчета, проведено вычисление величины напряжений $\sigma_{\text{терм}}$ [6] по формуле (2):

$$\sigma_{\text{терм}} = E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

где $\Delta\alpha$ – разность ТКЛР слоёв материалов

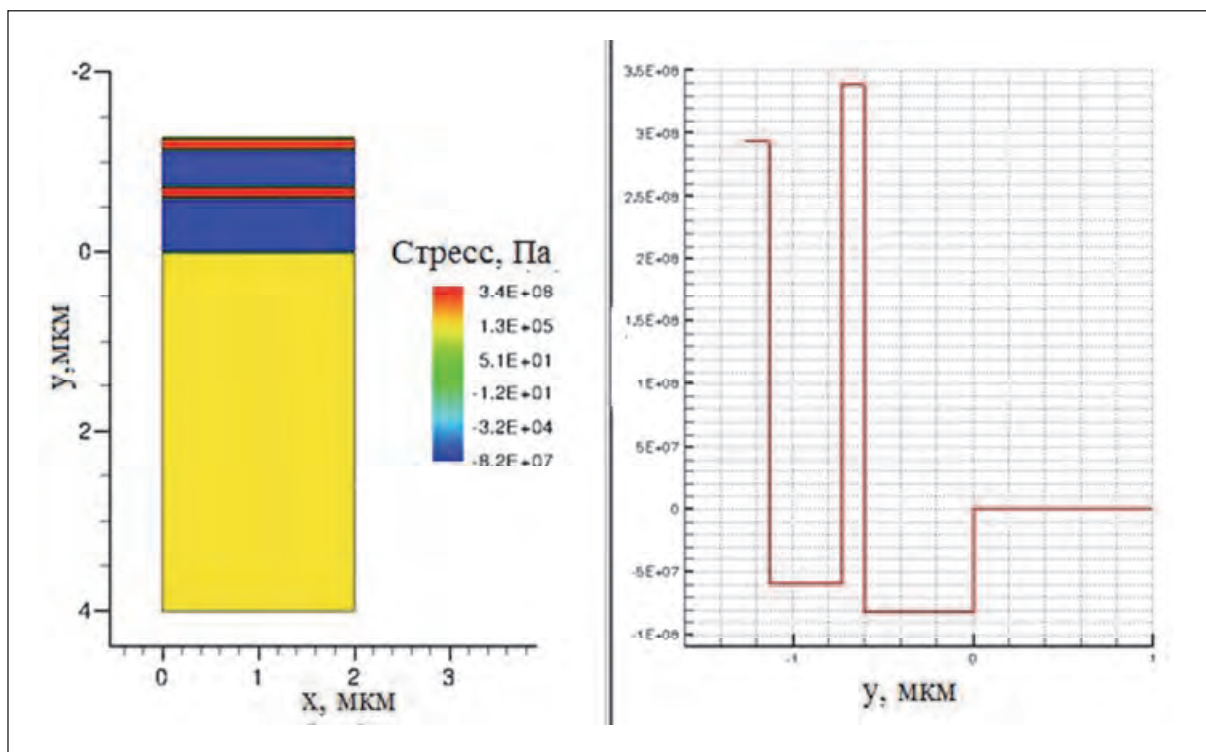


Рис. 1. Эпюра механических напряжений

Таблица 1. Сравнение результатов аналитического расчёта и моделирования в TCAD

плёнка	термический стресс (аналитика), Па	термический стресс (TCAD), Па	относительная погрешность, %
нижний SiO_2	$-9,31E+07$	$-8,20E+07$	12%
нижний Si_3N_4	$3,72E+08$	$3,56E+08$	4%
верхний SiO_2	$-6,13E+07$	$-5,90E+07$	4%
верхний Si_3N_4	$3,07E+08$	$2,93E+08$	5%

Результаты аналитических вычислений и численного моделирования приведены в таблице №1.

Анализируя результаты численного моделирования и аналитических расчетов, можно заключить о хорошей сопоставимости результатов.

Моделирование транзистора металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) в TCAD

Природа механических напряжений многогранна. Общий стресс включает в себя термические напряжения, но не ограничивается ими. Например, при моделировании транзисторной МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структуры с каналом n-типа учёт напряжений позволяет получить более точные данные [9]. С одной стороны пассивация Si_3N_4 позволяет создать слабо залегающие области n-типа [10]. С другой стороны, суммарное отрицательное (сжимающие) напряжение в нитридных спейсерах создаёт растягивающие напряжение в решетке кремниевой подложки, что представлено на рис. 2.

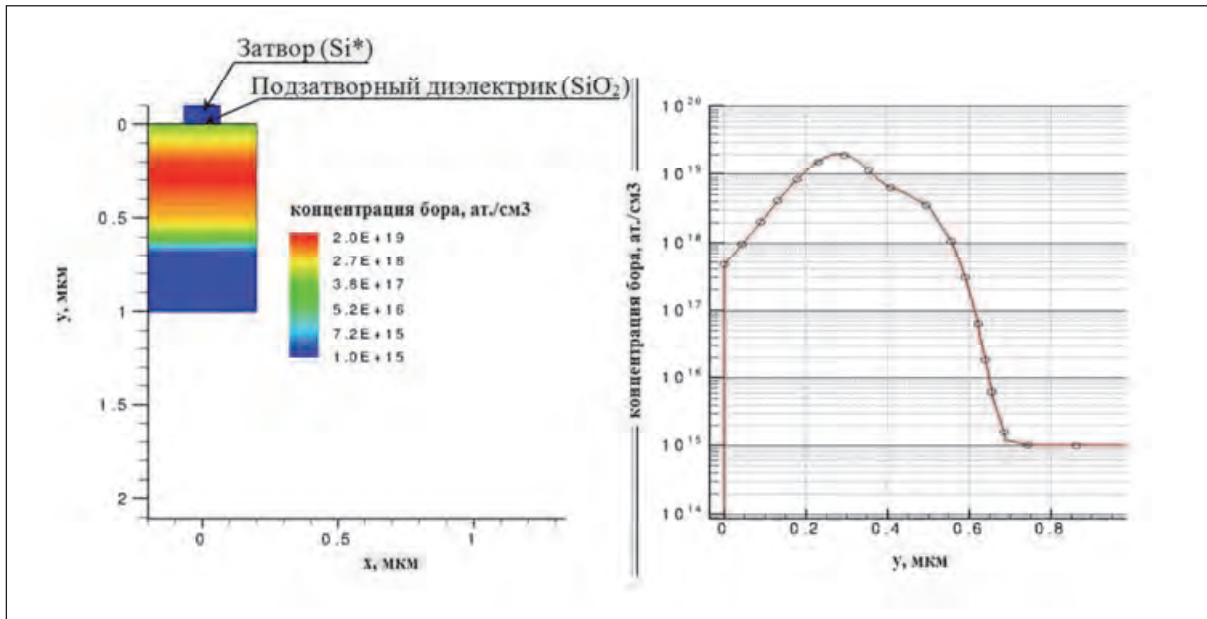


Рис. 2. Вид структуры МДП транзистора и распределение примеси бора после формирования затвора транзистора

Для формирования транзистора МДП типа с проводимостью n-типа используется подложка Si p-типа КДБ12(100), т.е. кремний легированный бором с исходной концентрацией атомов 1×10^{15} ат./см² с кристаллографической ориентацией (100). Подложку подвергают термообработке для формирования защитного слоя оксида кремния и минимизации дефектов вблизи поверхности. Далее следует операция ионной имплантации атомами p-типа (бором) с целью подгонки порогового напряжения до требуемого значения. Затем «дырявый» оксид удаляется жидкостным травлением, и образец повторно окисляется для формирования одного из ключевых элементов - подзатворного диэлектрика. Величина подзатворного SiO₂ составляет несколько нм. Уменьшение толщины подзатворного SiO₂ ведет к возрастанию токов утечки, увеличение толщины – к уменьшению тока стока насыщения транзистора.

Далее формируется затвор транзисторной структуры посредством осаждения поликремния, последующего легирования, литографии и удаления материала Si*, не защищенного маской (рис. 2)

Длина затвора определяется критическими проектными нормами литографии, в данной работе 130 нм. Затем создают слабо легированные области (LDD), легируя образец атомами n-типа с малой энергией, чтобы примесь находилась в приповерхностной области, что представлено на рисунке 3.

После этого, формируются спейсеры в 2 этапа: осаждение плазмохимического нитрида кремния, травление Si₃N₄ жидкостным способом, что показано на рисунке 4.

Таким образом, делается задел для области стока и истока: при последующей имплантации примеси n-типа, атомы фосфора не проникают в область канала благодаря нитридным спейсерам. Следующим этапом создают области стока и истока посредством ионной имплантации с энергией, в несколько раз увеличенной, по сравнению с предыдущей операцией имплантации при формировании LDD областей (рис. 5)

Затем осаждают слой алюминия, проводят литографию и удаляют слой металла незащищенного маской. Таким образом, формируют металлические контакты (рис. 6).

Далее показано распределение механических напряжений в финальной структуре (рис. 7).

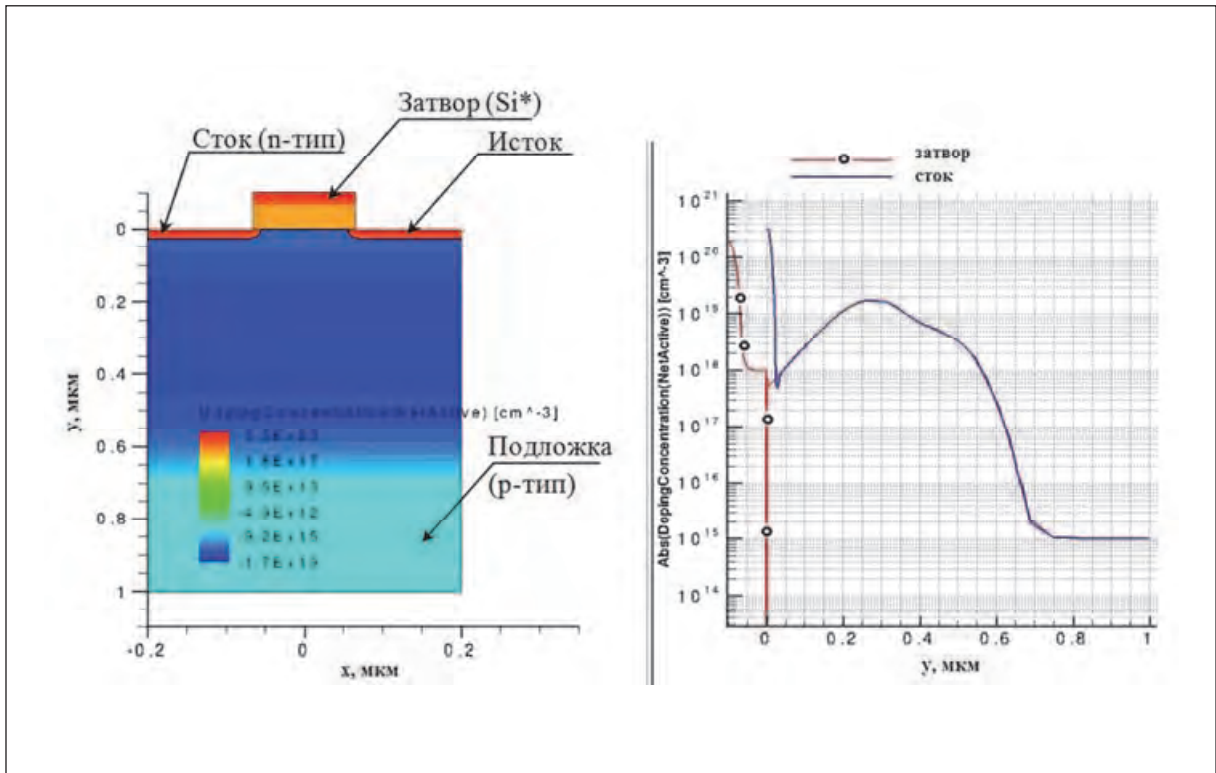


Рис. 3. Вид структуры МДП транзистора и распределение результирующей примеси после формирования LDD-областей

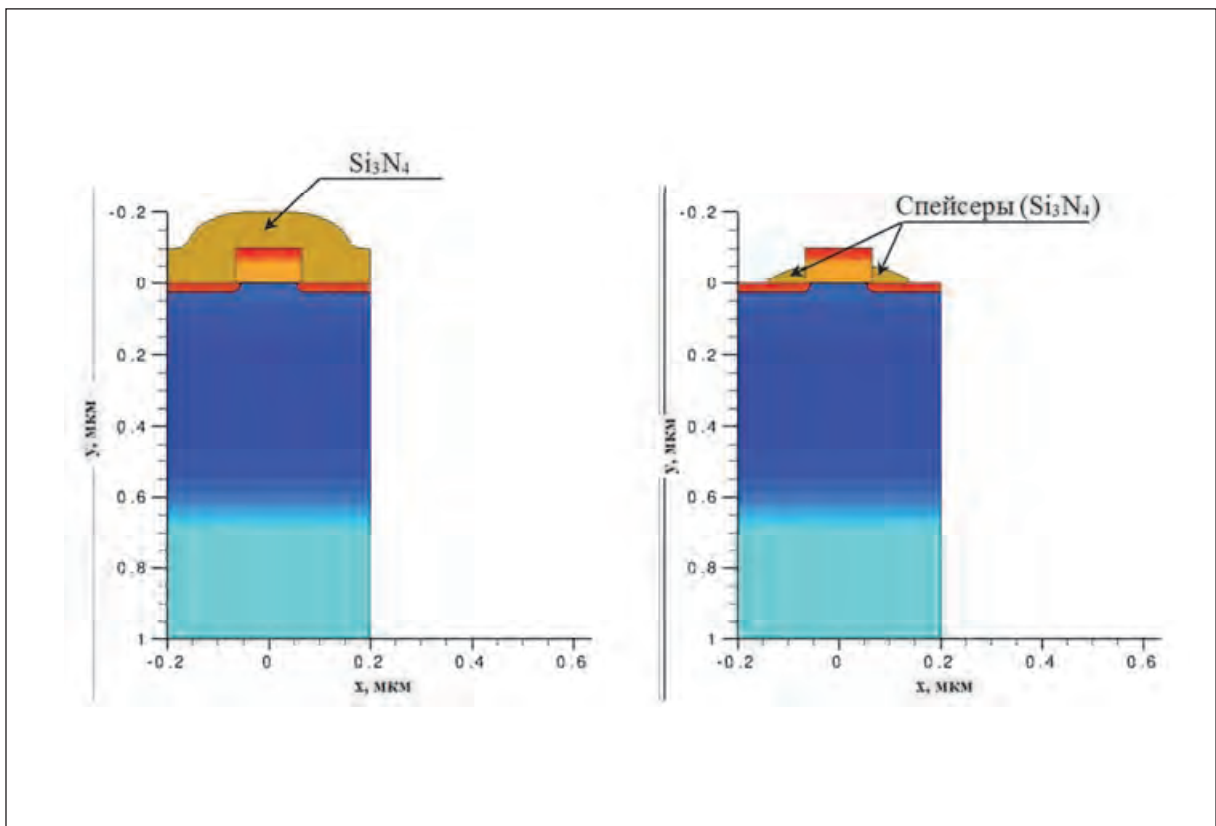


Рис. 4. Вид структуры МДП транзистора после формирования нитридных спейсеров

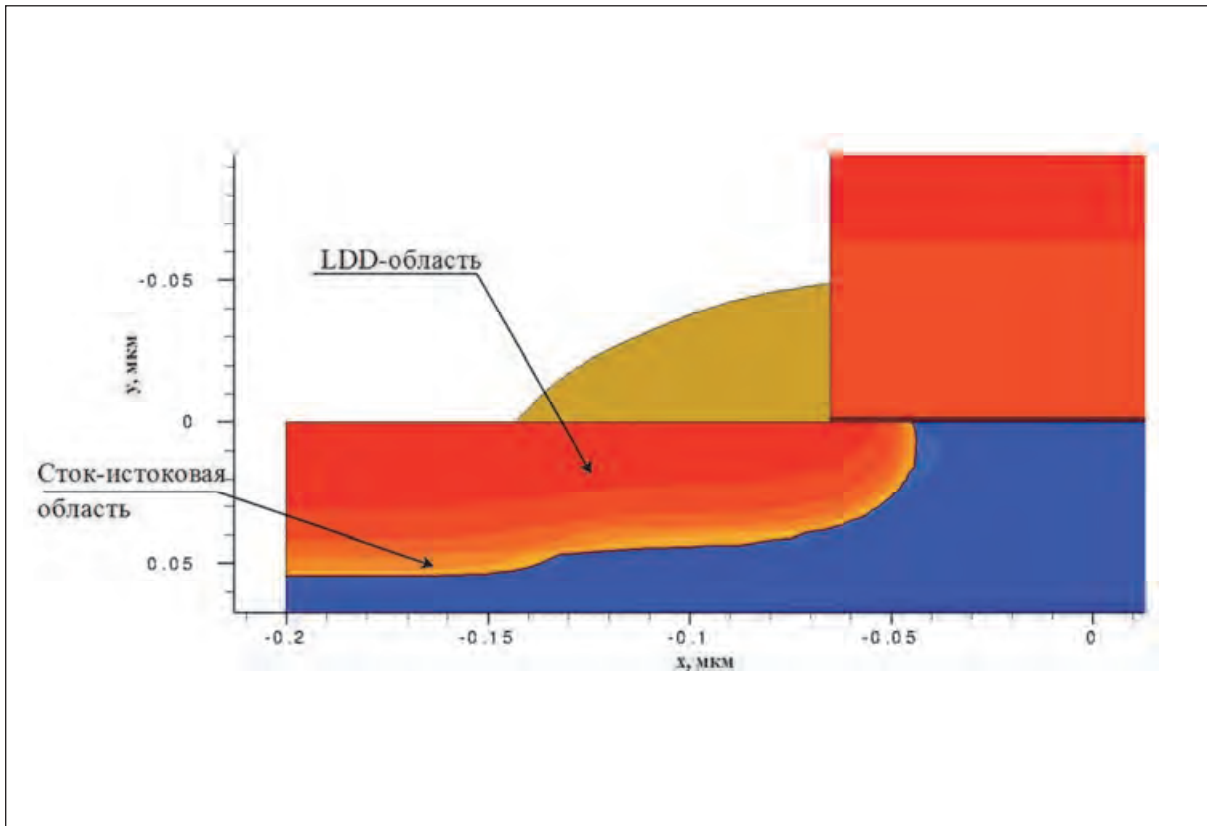


Рис. 5. Область стока-истока p-типа

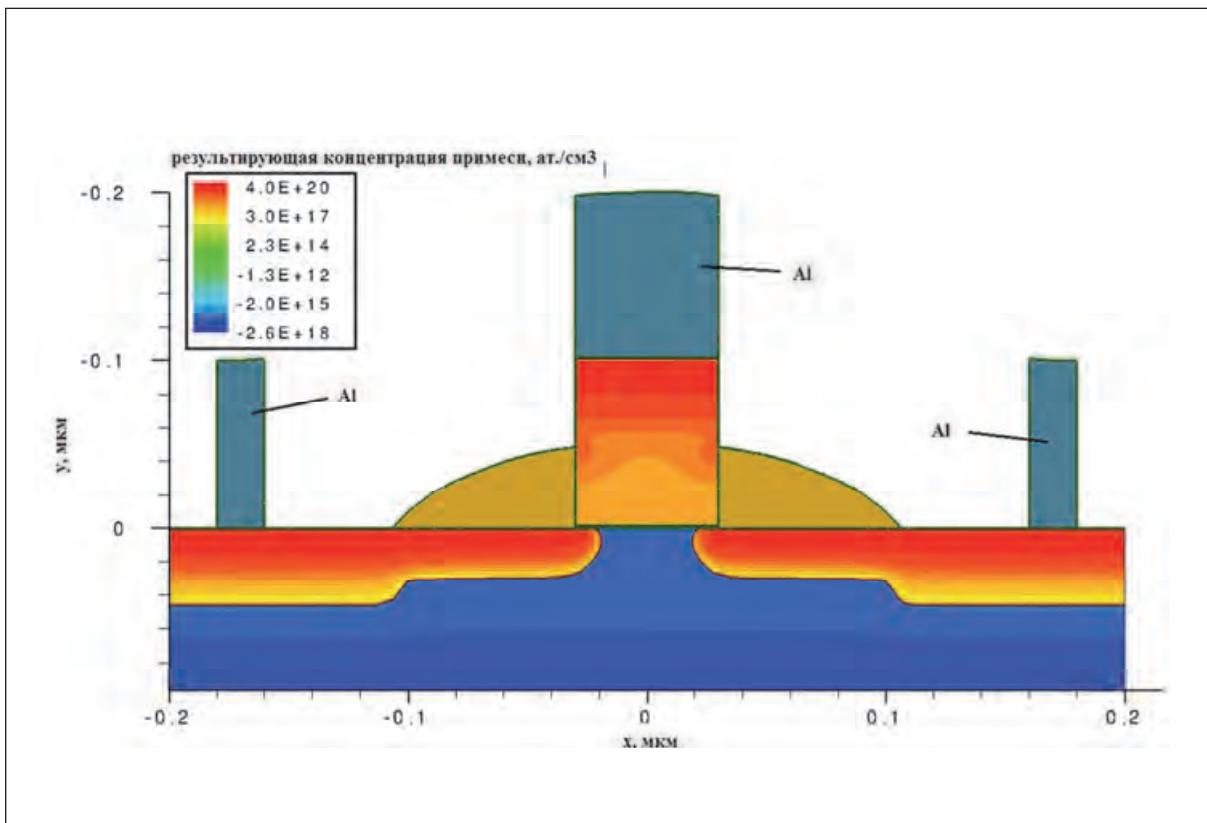


Рис. 6. Финальная структура МДП транзистора

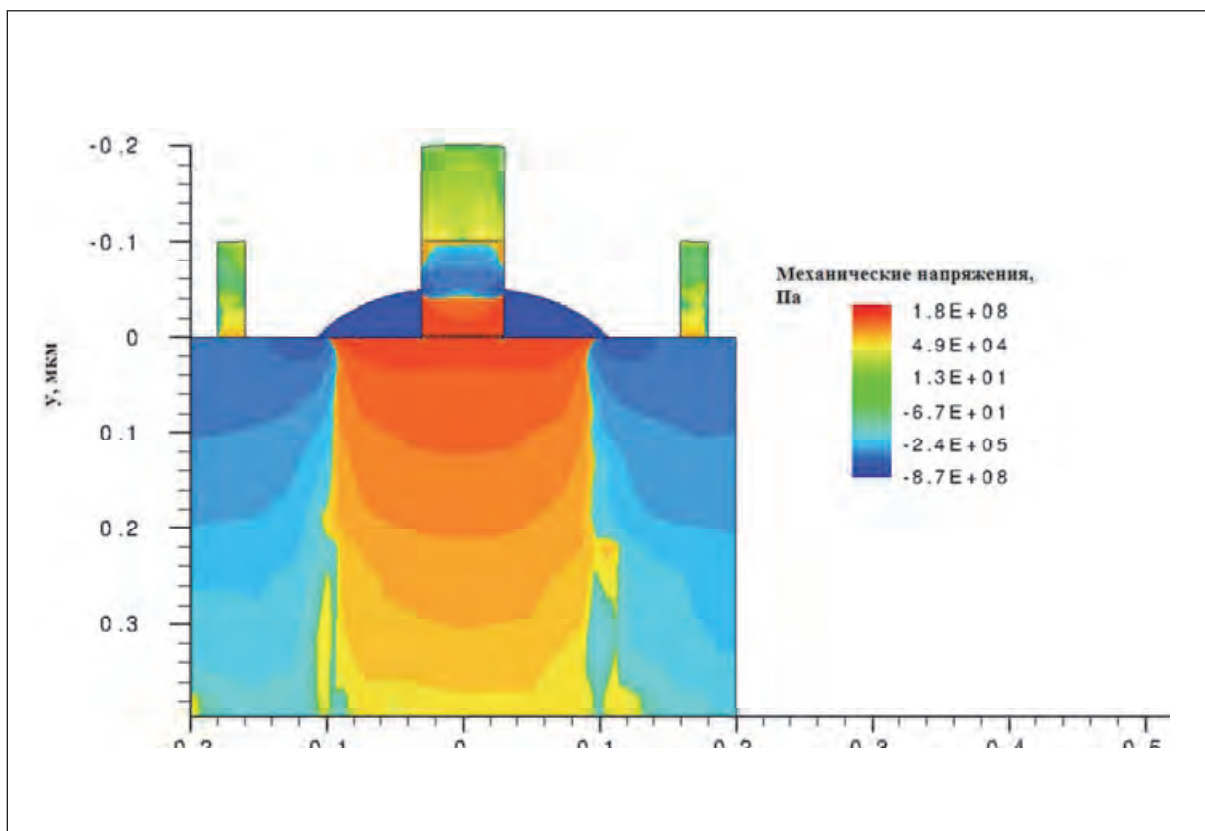


Рис. 7. Распределение механических напряжений в финальной структуре

Затем сделано вертикальное сечение при $x=0$. Распределение механических напряжений показано на рисунке 8.

Из рисунков 7 и 8 можно заключить, что механические напряжения убывают вглубь подложки. Максимальное напряжение сосредоточено в подзатворном диэлектрике и составляет 106 (МПа). Основной вклад в величину напряжений вносится на этапе формирования затвора. Кроме того видно, что область канала транзистора испытывает положительные (растягивающие) напряжения благодаря нитридным спейсерам. Таким образом, варьируя температуру пассивации поверхности можно управлять величиной подвижности носителей [11]. Поэтому, увеличивается межатомное расстояние. Следовательно, увеличивается подвижность носителей заряда, а значит и величина тока стока транзистора.

Проходная характеристика разработанного транзистора представлена на рисунке 9.

Из рисунка 9 видно, что пороговое напряжение составляет 0.45 (В), величина тока стока прямо пропорциональна напряжению сток-исток, что согласуется с n-типом (донорным) проводимости. Далее показан график (рис. 10) с выходной характеристикой транзистора.

Из рисунка 10 можно заключить, что с увеличением величины положительного напряжения подаваемого на затвор возрастает ток стока насыщения транзистора. Это связано с тем, что электроны из областей подложки, стока и истока перемещаются под действием поля в область канала. Также можно заметить увеличение тока стока насыщения в пологой области, что связано с модуляцией длины канала структуры.

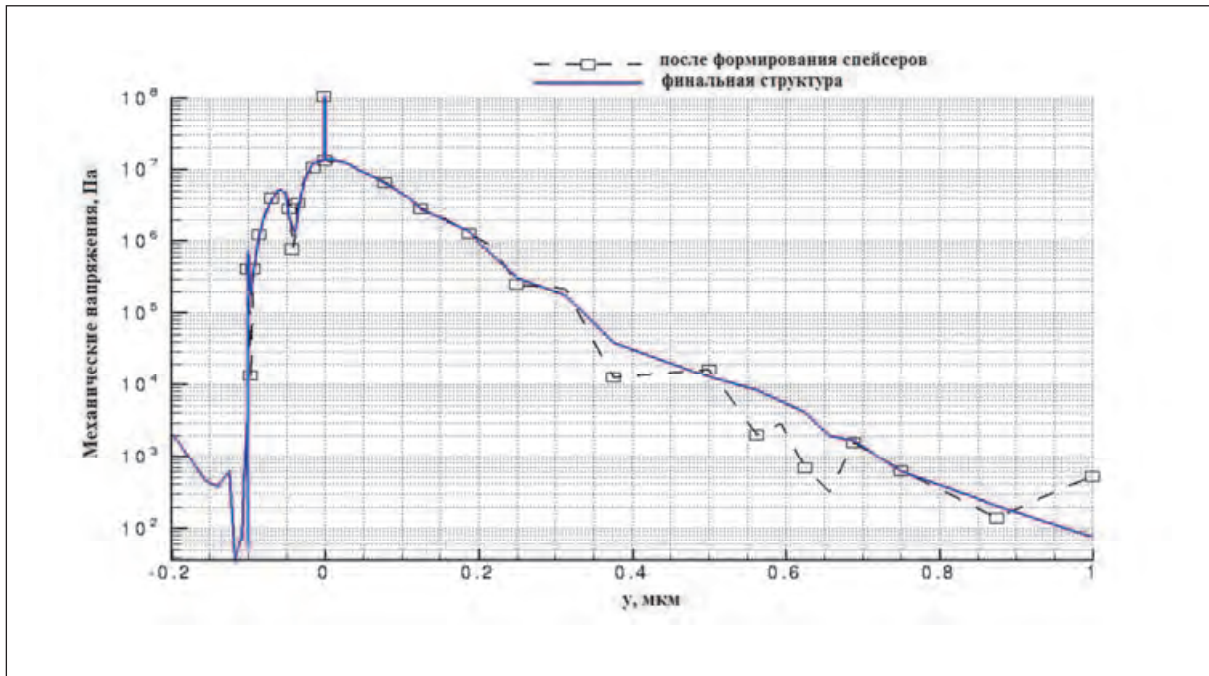


Рис. 8. Распределение напряжений при вертикальном сечении

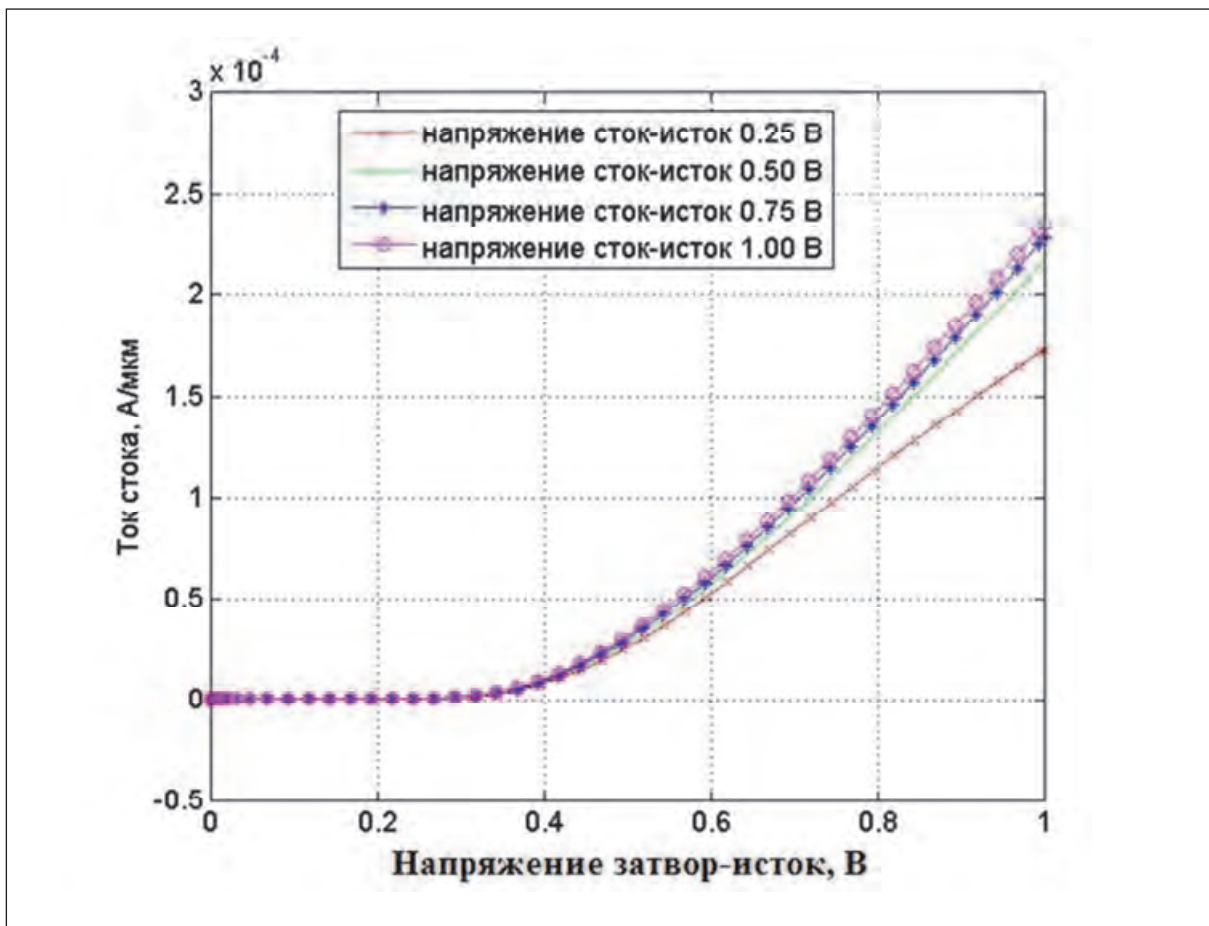


Рис. 9. Проходная характеристика МДП транзистора

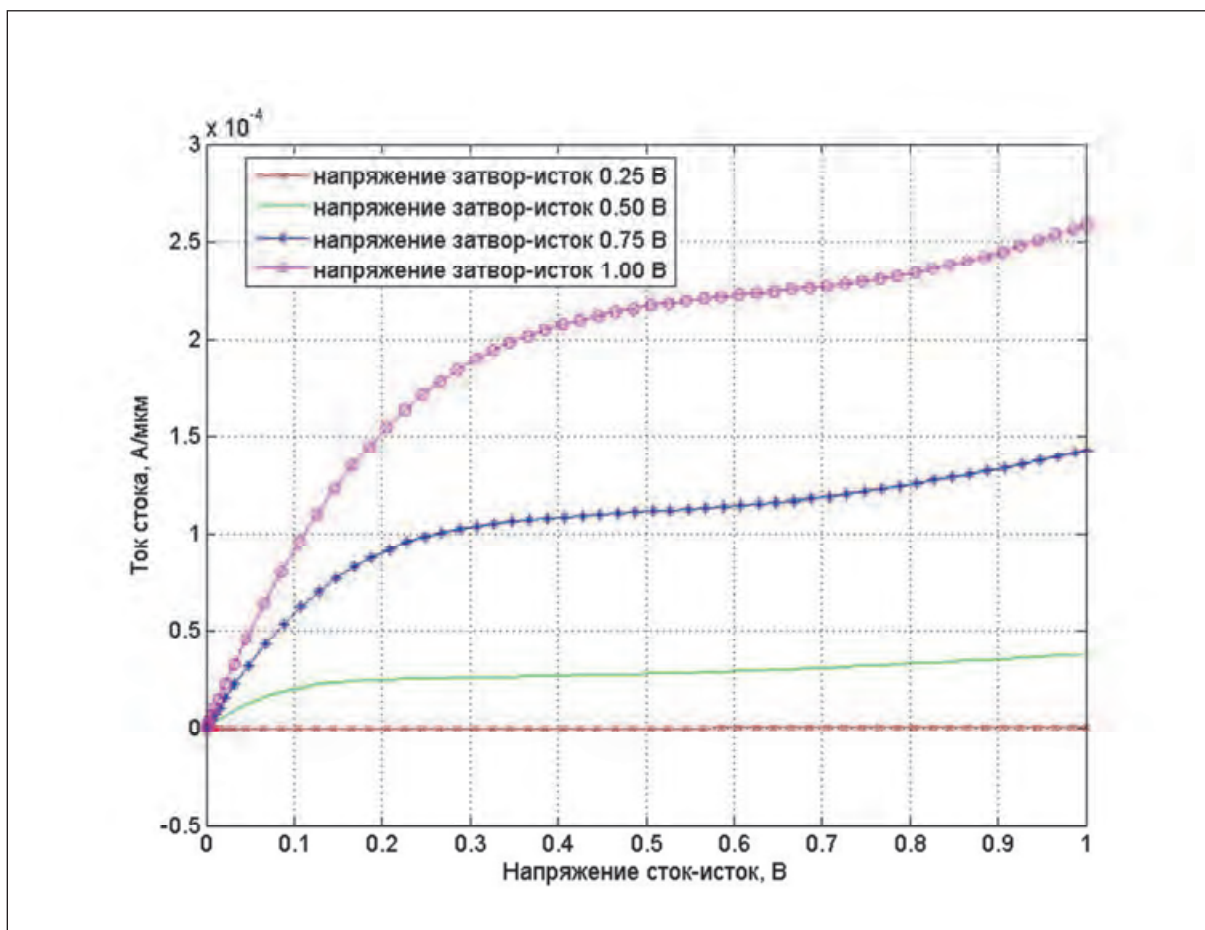


Рис. 10. Выходная характеристика МДП транзистора

Численное моделирование в среде COMSOL Multiphysics

В рамках данной работы проведено численное моделирование с помощью программного пакета для мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. Данный программный пакет позволяет моделировать различные физические процессы, описание которых возможно в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, с помощью метода конечных элементов. Программа имеет полный спектр инструментов для моделирования: построения модели, описания физического процесса, построения сетки разбиения, моделирования и постобработки результатов расчета. Моделирование может учитывать различные свойства материалов, источники воздействия и граничные условия [12].

Описание модели было произведено с помощью блока «Solid Mechanics» (механика твердого тела) в двумерном пространстве. При выборе модели материала была выбрана модель «Linear Elastic Material» (модель линейного упругого материала). Данная модель образует основу для большинства структурных механических моделирований.

Для линейного упругого материала, закон Гука выражает тензор напряжений σ_{ij} через тензор упругой деформации (формула (3)) :

$$\sigma = \sigma_{ex} + C : (\varepsilon - \varepsilon_{inel}), \quad (3)$$

где C – тензор упругости 4-го порядка, «:» - обозначение тензорного произведения, ε - общая деформация, ε_{inel} - неупругая деформация.

Упругая деформация ε_{el} представляет собой разницу между общей деформацией ε и всеми неупругими деформациями ε_{inel} . Дополнительный вклад в общую величину напряжений может внести внешнее напряжение σ_{ex} , вызванное начальным напряжением или вязкоупругим напряжением.

В случае геометрической нелинейности используются второй тензор напряжений Пиолла-Кирхгофа и тензор напряжений Грина-Лагранжа.

В силу симметрии, тензор деформации ε_{ij} можно записать в виде (формула (4)):

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Аналогичное представление применимо к тензору напряжений σ_{ij} (формула 5):

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Вследствие симметрии, тензор упругости 4-го порядка C может быть полностью представлен симметричной матрицей 6 на 6 элементов (формула(6))

$$D = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1112} & C_{1123} & C_{1113} \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2212} & C_{2223} & C_{2213} \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & C_{3312} & C_{3323} & C_{3313} \\ C_{1112} & C_{2212} & C_{3312} & C_{1212} & C_{1223} & C_{1213} \\ C_{1123} & C_{2223} & C_{3323} & C_{1223} & C_{2323} & C_{2313} \\ C_{1113} & C_{2213} & C_{3313} & C_{1213} & C_{2313} & C_{1313} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

которая является матрицей упругости D . В случае изотропного материала матрица упругости имеет вид (формула (7)):

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Существует два различных способа представления ортотропной и анизотропной информации. Стандартное упорядочение данных преобразовывает показатели следующим образом:

$$\begin{bmatrix} 11 \\ 22 \\ 33 \\ 12,21 \\ 23,32 \\ 13,31 \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{bmatrix}$$

Таким образом, закон Гука представляется в форме, включающим матрицу упругости D (формула (8)):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix}_{ex} + D \left(\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \end{bmatrix}_{inel} \right) \quad (8)$$

Так как моделирование производилось в двумерном пространстве, то формула 8 может быть представлена в более простой форме (формула(9)):

$$\sigma_x = \sigma_{xex} + D\sigma_{xel} \quad (9)$$

Учитывая тот факт, что в данной конкретной задаче отсутствуют внешние напряжения, получим следующее выражение для закона Гука (формула(10)):

$$\sigma_x = D\sigma_{xel} \quad (10)$$

Акцент авторов в данной работе был сделан на термическом напряжении, возникающем в пленке после проведения технологической операции. Как было сказано выше, основные параметры, влияющие на механические напряжения пленки: температурный коэффициент линейного расширения материалов, модуль Юнга, коэффициент Пуассона пленки и подложки, а также толщина слоев исследуемой структуры.

Как известно [14], обобщенное выражение для определения термического стресса имеет вид (формула(11)):

$$\sigma_{L1} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T E_1 + [1 + nd + \nu_1 + \nu_2 nd]}{(1 + nd)^2} \quad (11)$$

где α_1 и α_2 – температурные коэффициенты расширения пленки и подложки соответственно, ΔT – разница температур, E_1 – модуль Юнга пленки, $n = \frac{E_1}{E_2}$ – отношение мо-

дулей Юнга пленки и подложки, $d = \frac{t_1}{t_2}$ – отношение толщин пленки и подложки, ν_1 и

ν_2 – коэффициенты Пуассона для пленки и подложки соответственно.

Формула (2), для вычисления термического напряжения, является упрощенным выражением формулы (11) для тонких слоёв материалов с противоположным знаком.

Перед началом двухмерного моделирования были заданы начальные и граничные условия. Разница между температурой осаждения и температурой измерения ΔT составляет $330(^{\circ}\text{C})$. На рисунке 11 показана область поперечного сечения исследуемой структуры, для которой отображены граничные условия. Точке «1» на рисунке соответствует точка фиксированного ограничения (fixed constraint), а точке «2» - точка предписанного перемещения (prescribed displacement). Выбор точек «1» и «2» обусловлен необходимостью задания граничных условий с целью минимального влияния на результат моделирования.

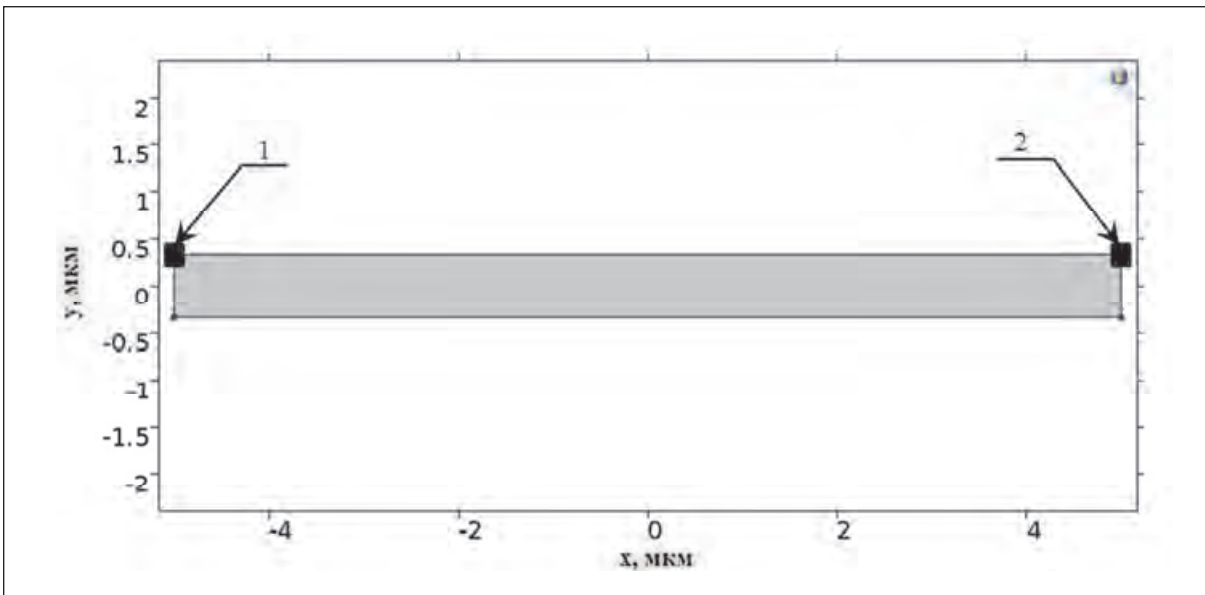


Рис. 11. Отображение граничных условий, необходимых для дальнейшего моделирования

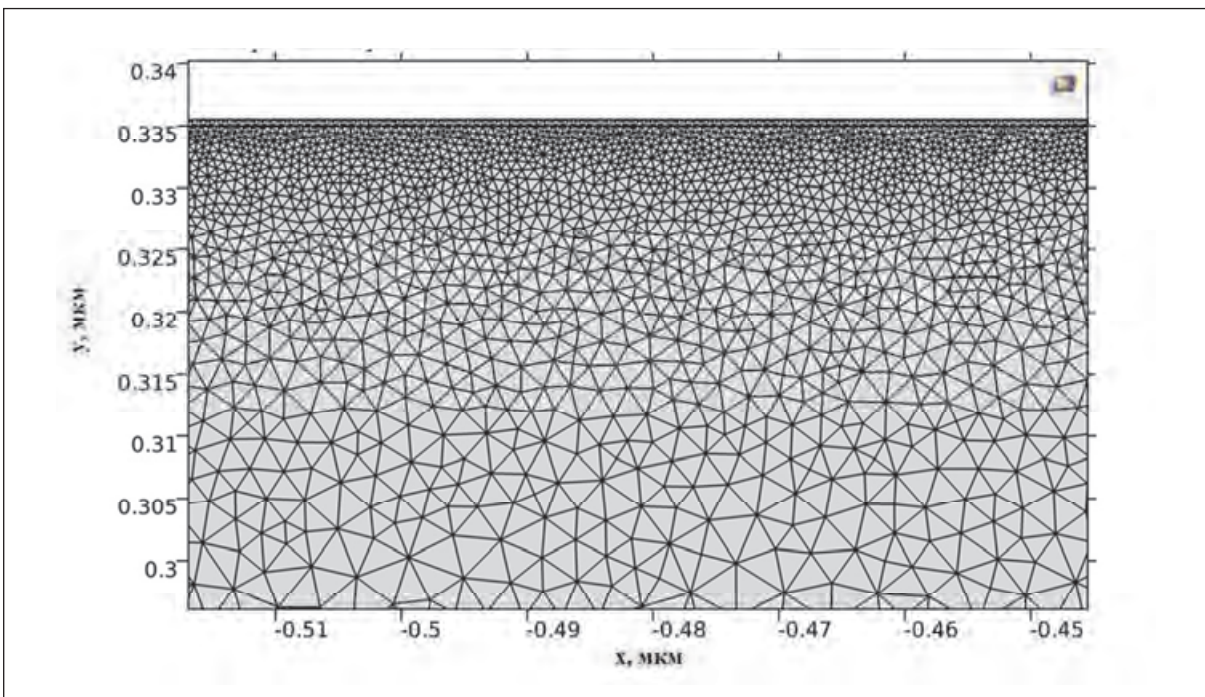


Рис. 12. Построение сетки в программе COMSOL Multiphysics

Далее была построена сетка конечных элементов. Расчетная сетка конечных элементов необходима для двух задач. Первая – разбиение смоделированных в САПР геометрий на меньшие части или элементы. По ним можно записать систему уравнений, описывающую решение главного уравнения. Также сетка используется для отображения области решения физических задач [13]. Кроме того, конечный результат моделирования во многом зависит от частоты, величины и плавности сетки. Очевидно, что чем мельче разбить исследуемую структуру на конечные элементы при построении сетки, тем более точными будут результаты моделирования, но время расчёта будет более продолжительное. На рисунке 12 представлен фрагмент, который отображает метод построения сетки для данного конкретного случая.

После построения сетки было произведено моделирование исследуемой структуры, причём свойства материала были изотропными. На рисунке 13 изображено распределение тензора напряжения всей структуры, а на рисунке 14 отображено распределение тензора напряжения части двухслойной структуры, захватывающую пленку SiO_2 .

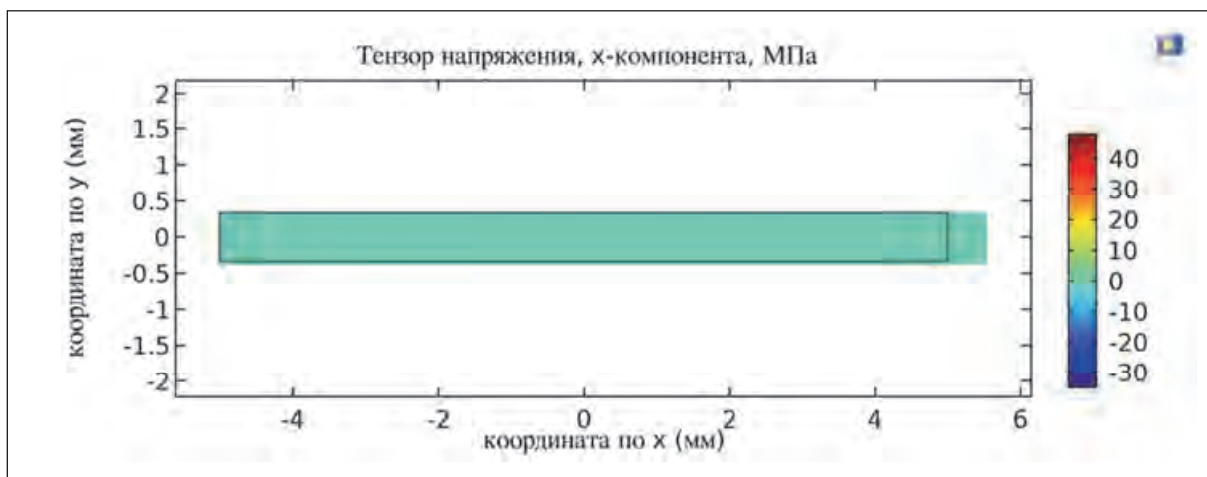


Рис. 13. Распределение тензора напряжения структуры Si/SiO₂

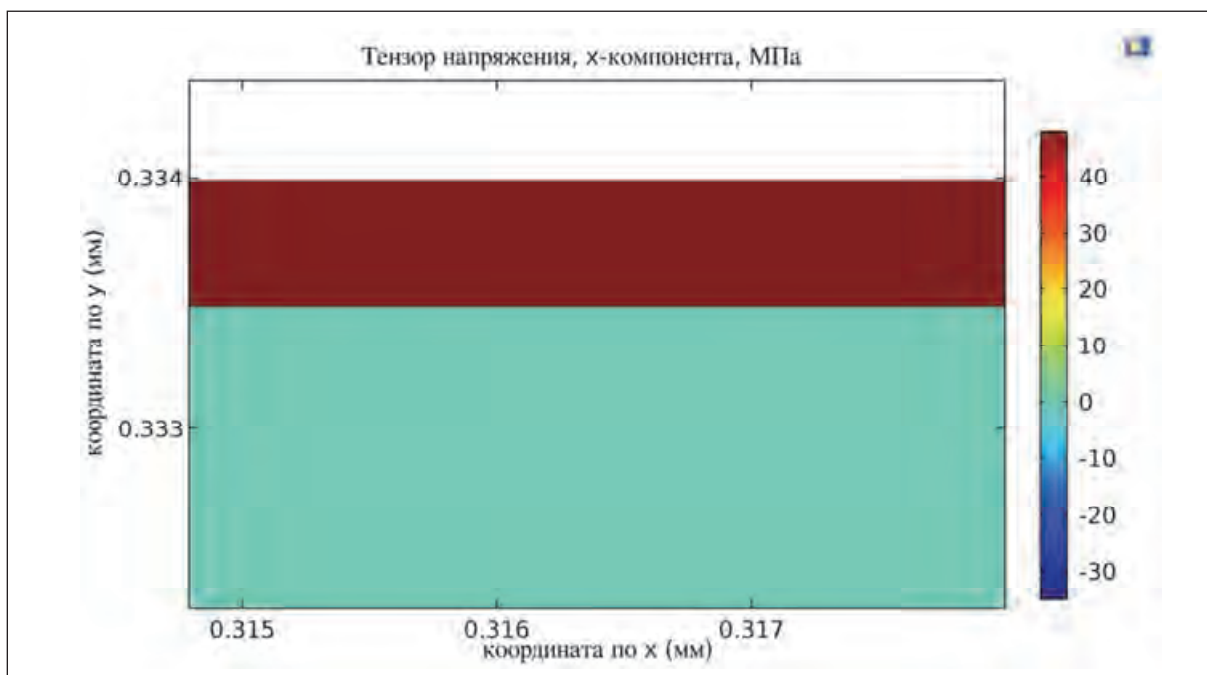


Рис. 14. Распределение тензора напряжения части структуры Si/SiO₂ на границе раздела подложка пленка

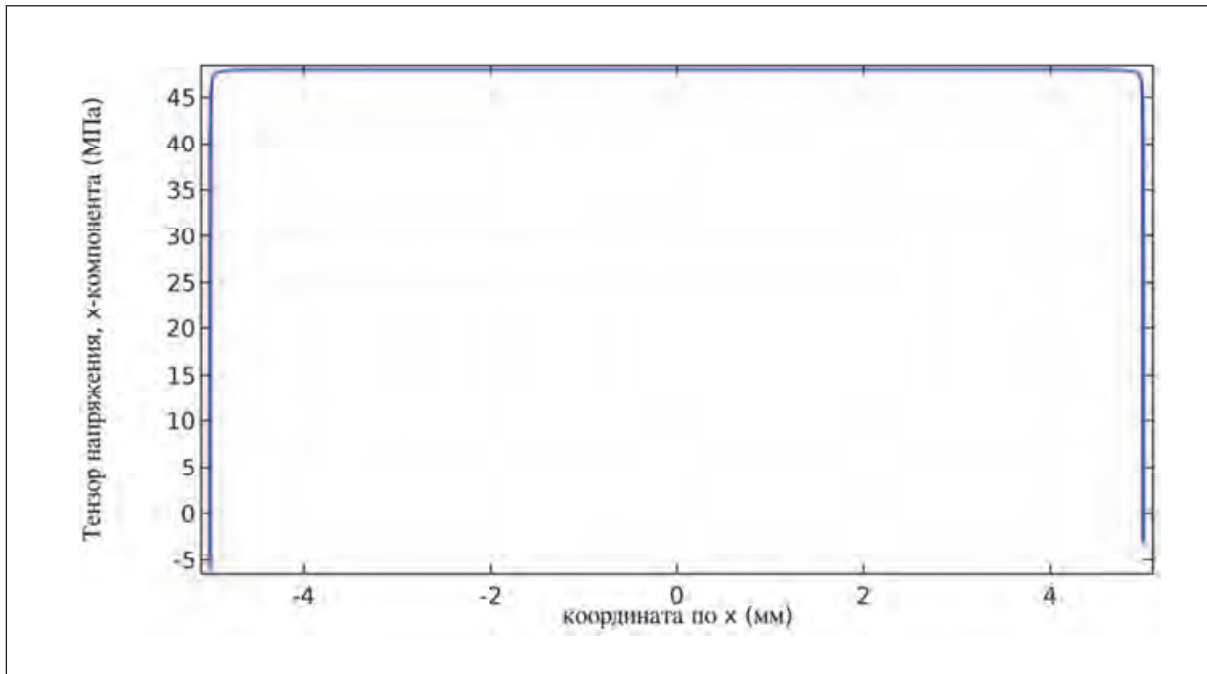


Рис. 15. График зависимости тензора напряжения пленки SiO₂ от положения по x-координате

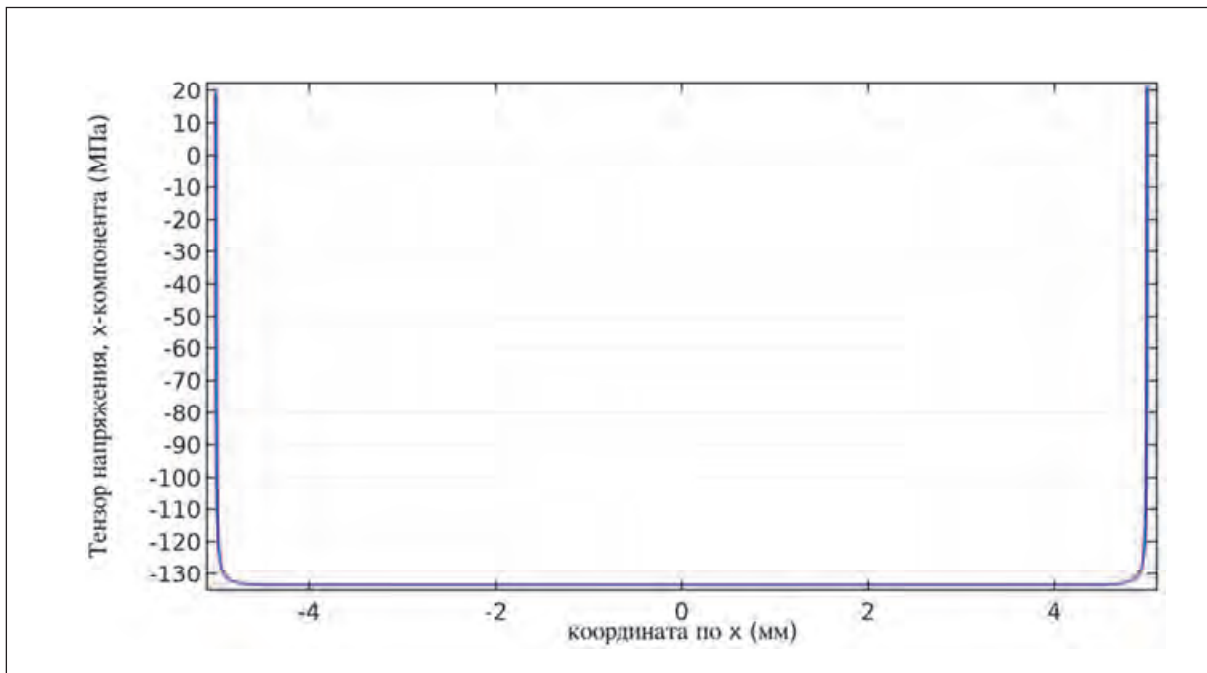


Рис. 16. График зависимости тензора напряжения пленки Si₃N₄ от положения по x-координате

На рисунке 13 видно, что после проведения термообработки образец Si/SiO₂ изменил геометрические размеры.

Также были получены графики тензора напряжения для пленок SiO₂ и Si₃N₄ толщиной 50(мкм). Данные графики показаны на рисунках 15 и 16. С помощью этих графиков было определено значение напряжения для пленок оксида и нитрида, которые составили 47,7(МПа) и -133,6(МПа) соответственно.

Из рисунков 15 и 16, необходимо отметить, что на краях пленки напряжение резко изменяется вследствие краевых эффектов. Также из рисунков 15 и 16 видно, что напряжение пленки SiO_2 имеет положительный знак, тогда как напряжение пленки Si_3N_4 отрицательно.

Результаты моделирования термических напряжений были сравнены с результатами, рассчитанными по формуле (11). Согласно формуле (11) продольное термическое напряжение для нитрида кремния составляет (-115 МПа) , а для оксида кремния 34.6 (МПа) . В таблице 2 представлены значения, вычисленные с помощью теоретической формулы (11) и рассчитанные по результатам моделирования в COMSOL Multiphysics для двух материалов пленок – Si_3N_4 и SiO_2 .

Исходя из формулы 11 одним из параметров, с помощью которого можно повлиять на термическое напряжение является отношение толщин пленки и подложки, так как остальные параметры являются параметрами материала. Пусть толщина подложки остается постоянной. Следовательно, варьируя толщину плёнки, будет изменяться величина механических напряжений, вызванные разницей ТКЛР слоёв материалов.

Произведено параметрическое моделирование для пленок нитрида и оксида, где в качестве параметра выбрана толщина пленки. Также, для сравнения был произведен расчет термического напряжения для разных толщин пленок по теоретической формуле (11). Результаты представлены на рисунках 17 и 18. На рисунке 17 изображены графики зависимостей термического напряжения от толщины пленки Si_3N_4 рассчитанные с помощью COMSOL Multiphysics и по теоретической формуле. На рисунке 18 отображены те же зависимости только для пленок оксида кремния.

Анализируя рисунки 17 и 18 можно сказать, что термическое напряжение пленки уменьшается по модулю с увеличением толщины пленки, что согласует с формулой (11). Также, исходя из данных рисунков видно, что напряжение перестает возрастать по модулю при толщине пленки менее 10 мкм, поэтому можно сделать следующий вывод: при малых толщинах пленки (толщина подложки на несколько порядков больше толщины пленки) термическое напряжение пленки не зависит от ее величины.

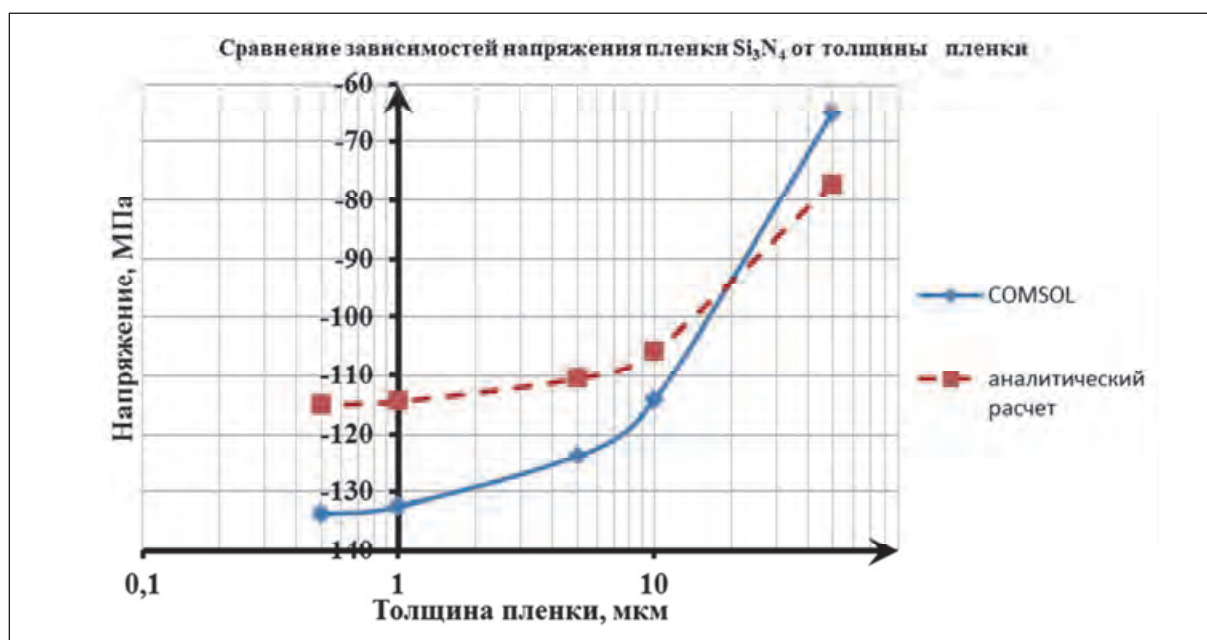


Рис. 17. Сравнение зависимостей термического напряжения пленки Si_3N_4 от толщины пленки (сплошная линия соответствует зависимости, рассчитанной с помощью COMSOL Multiphysics; пунктирная линия соответствует теоретической зависимости)

Таблица 2. Сравнение результатов аналитического расчёта и моделирования в COMSOL

Материал пленки	Термическое напряжение, полученное по результатам моделирования в COMSOL Multiphysics,	Термическое напряжение, вычисленное по формуле (11),	Относительная погрешность,
Si_3N_4	-133,6	-115	14
SiO_2	47,7	34,6	27,5

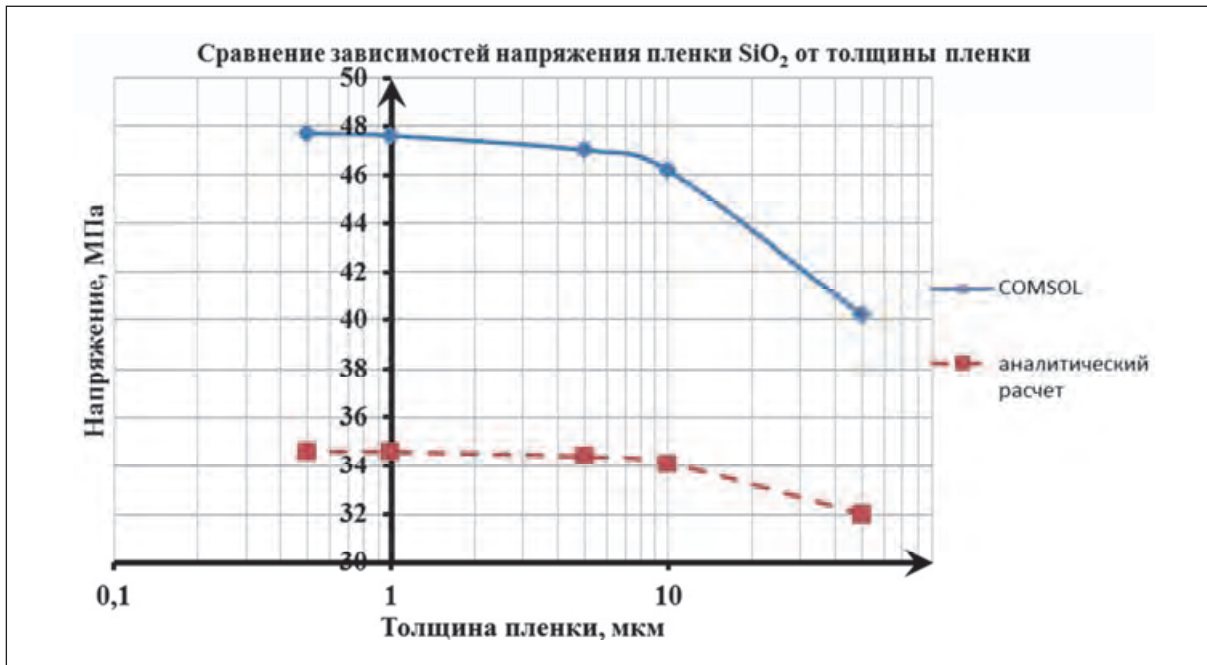


Рис. 18. Сравнение зависимостей термического напряжения пленки SiO_2 от толщины пленки (сплошная линия соответствует зависимости, рассчитанной с помощью COMSOL Multiphysics; пунктирная линия соответствует теоретической зависимости)

Заключение. В среде TCAD рассчитаны термические напряжения в диэлектрической мембране на кремниевой подложке. Продемонстрирован маршрут формирования МДП транзистора, схемотехническое моделирование. С помощью программы COMSOL Multiphysics было произведено математическое моделирование, вследствие которого были рассчитаны термические напряжения пленок Si_3N_4 и SiO_2 в структурах $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4$ и Si/SiO_2 . Получена зависимость термического напряжения от толщины пленки, исходя из которой, сделан вывод о том, что при малых толщинах пленки термическое напряжение пленки не зависит от ее толщины. Результаты моделирования в пакетах TCAD и COMSOL Multiphysics хорошо согласуются с аналитическим расчётом.

Поддержка. Работа была выполнена при поддержке Минобрнауки России, ГК № 3.2501.2014/К, с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.

Литература

1. Беспалов В.А., Васильев И.А., Дюжнев Н.А., Мазуркин Н.С., Новиков Д.В., Попков А.Ф. Моделирование первичного преобразователя скорости потока газа мембранного типа // Известия Вузов, Электроника, 2014, №3, с.50-56.
2. Дюжнев Н.А., Королёв М.А., Катеев М.В., Гусев Е.Э. Моделирование зависимости выходных характеристик первичного преобразователя датчика потока мембранного типа от его конструктивных параметров // Известия Вузов, Электроника, 2015, №6, с. 644-647.
3. Lindroos V., Tilli M., Lehto A., Motooka T. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies // Burlington, Elsevier, 636 p., 2010.
4. Laconte J., Flandre D., Raskin J.-P. Micromachined thin-film sensors for SOI-CMOS Co-Integration // Springer, 294 p., 2006.
5. Sinha A.K., Levinstein H.J., Smith T.E. Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates // Journal of Applied Physics. Vol. 49, p.2423 – 2426, 1978
6. Сайт производителя программного та TCAD // URL: <http://www.synopsys.com/tools/tcad>.
7. Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких плёнок // Москва, Советское радио, том 2, глава 12,768с., 1977
8. Дюжнев Н.А., Дедкова А.А., Гусев Е.Э., Новак А.В. Методика измерения механических напряжений в тонких плёнках на пластине с помощью оптического профилометра // Известия Вузов, Электроника, 2016, №4, с. 367-372.
9. Fantini P. Modeling oriented to Non-Volatile Memory technology platforms // Conference Italy, 2010, 20 January.
10. Королёв М.А., Крупкина Т.Ю., Ревелева М.А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем // Москва, БИНОМ, 2007, часть 1, 397 с.
11. Рубцевич И.И., Соловьев Я.А., Высоцкий В.Б., Дудкин А.И., Ковальчук Н.С. Исследование свойств пленок нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения на кремниевую подложку // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2011, № 4, с. 29 – 32.
12. Сайт производителя программного пакета для мультифизического моделирования Comsol MultiPhysics // URL:<http://www.comsol.com>.
13. Сайт производителя программного пакета для мультифизического моделирования Comsol MultiPhysics // URL:<http://www.comsol.ru>
14. Lehman J. J. and Lakes R. S. Stiff, strong, zero thermal expansion lattices via material hierarchy // Composite Structures, vol. 107, p.654-663, January 2014.

NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL STRESS IN MICROELECTROMECHANICAL STRUCTURES WITH SOFTWARE PACKAGE TCAD AND COMSOL MULTIPHYSICS

N.A. Djuzhev, E.E. Gusev, P.U. Glagolev

National Research University of Electronic Technology, Moscow

bubbledouble@mail.ru

Received 19.08.2016

It shows the result of thermal stress simulation dielectric membrane on a silicon substrate in TCAD environment. It is shown that stress diagram. Demonstrated route formation of MDS transistor, and the output and transfer characteristic, evidently illustrated the distribution of mechanical stresses in the MEMS device. In an environment made COMSOL Multiphysics modeling of the Si substrate - film. It demonstrates the correlation of numerical modeling in software environments and the analytical calculation.