

Д.В. Жежеленко, В.Г. Логачёв

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЫ С ТРАНЗИСТОРАМИ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ (ТВПЭ)

Статья посвящена моделированию и анализу электро-механического датчика давления в ПО Ansys на основе 3-D модели пьезоэлектрической мембраны с AlGaIn/GaN транзисторами с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ). Рассмотрен механизм функционирования транзисторов с высокой подвижностью электронов. Представлены результаты статического пьезоэлектрического анализа. Определено оптимальное расположение транзисторов и требования к финальной модели.

Датчик давления, мембрана, пьезоэлектричество, модель.

Статья посвящена моделированию и анализу электро-механического датчика давления в ПО Ansys на основе 3-D модели пьезоэлектрической мембраны с AlGaIn/GaN транзисторами с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ). Подобные датчики дифференциального давления широко применимы в нефтегазовой отрасли, в особенности в качестве датчиков регистрации сигнала от забойной телеметрии с гидравлическим каналом связи, а также, благодаря высокой устойчивости к экстремальным условиям эксплуатации, в качестве датчика забойного давления в составе модульных телеметрических систем.

Представлены результаты статического пьезоэлектрического анализа. Фиксировалась разница между кривыми интенсивности электрического поля и изменение заряда электродов затвора при различных значениях давления. Нитридные полупроводники характеризуются повышенной механической и термо- устойчивостью и значительными пьезоэлектрическими коэффициентами. Благодаря уникальному набору характеристик, эти материалы обладают великолепным потенциалом в использовании в МЕМС (микроэлектромеханические системы), в особенности при эксплуатации в экстремальных условиях. Они устойчивы к высоким температурам и механическому воздействию.

Гетероструктура AlGaIn/GaN полупроводника или другими словами гетеропереход создается эпитаксиальной технологией и является структурой из материалов с неравными запрещенными зонами. GaN это вещество с двумя устойчивыми состояниями из III группы нитридов, которым характерна спонтанная поляризация. Кроме того, оно обладает высокой химической и механической устойчивостью, которая сохраняется в широком температурном диапазоне. Увеличение содержания Al в эпитаксиальном росте GaN (Ga атомы замещаются Al атомами) обуславливает возникновение трехкомпонентного материала $Al_xGa_{1-x}N$ (x представляет молярный коэффициент алюминия) с различными запрещенными зонами. Содержание алюминия играет большую роль в увеличении общей поляризации. Гетероструктура AlGaIn/GaN является комбинацией этих двух материалов. [1].

При соединении широкой и узкой запрещенной зоны, возникает разница потенциалов между зоной проводимости и зоной валентности. Эта разница вызывает колебания энергетического слоя на поверхности, таким образом создается проводящий канал.[1]

Спонтанная и пьезоэлектрическая поляризация в материалах GaN и AlN более чем в 10 раз больше чем в общеприменяемых III–V и II–VI полупроводниковых материалах. Заряд поляризации на граничной зоне может возникнуть из двух источников: из пьезоэлектрического эффекта AlGaN слоя, при механическом воздействии на него, и из разницы спонтанной поляризации между GaN и AlGaN. [2]

Результатом общей поляризации является положительный заряд, электроны начинают двигаться из более широкой запрещенной зоны (AlGaN слой) к более узкой (GaN слой) и возникает двумерный электронный газ (2DEG) с высокой концентрацией и высокой способностью переносить заряд в граничной зоне. Благодаря этой особенности AlGaN/GaN гетероструктура имеет свойства пьезоэлектрика. [3]

Упомянутая многослойная структура, а также двумерный электронный газ (2DEG) являются ключевыми особенностями транзисторов с высокой подвижностью электронов. Конечные ТВПЭ структуры создаются тремя электродами (исток, затвор, сток), которые формируются на поверхности слоя AlGaN при помощи барьеров Шоттки и омических контактов (рис. 4). Подача напряжения на затвор позволяет контролировать проводимость канального слоя, а следовательно ток между истоком и стоком (ТВПЭ является разновидностью полевого транзистора). При подходящем входном напряжении, ток течет по проводящему каналу формируемому двумерным электронным газом (2DEG), проводимость канала зависит от концентрации и подвижности носителей заряда. В модели используется схема подключения с общим затвором (ОЗ) (рис. 1).

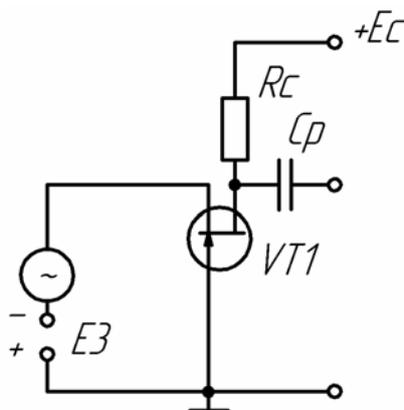


Рис.1. Схема включения полевого транзистора с общим затвором

Датчик основан на гетероструктурной модели мембраны, созданной на подложке из карбида кремния (SiC), прикрепленной к стальной основе при помощи пористого стекла (рис. 3). Основные размеры: $\varphi = 8\text{mm}$, $A = 0.1\text{mm}$, $B = 2\text{mm}$. Толщина отдельных слоев мембраны: сталь = $100\ \mu\text{m}$, пористое стекло = $100\ \mu\text{m}$, SiC = $350\ \mu\text{m}$, GaN = $2.85\ \mu\text{m}$, AlGaN = 20nm , ширина затвора = $10\ \mu\text{m}$. Модель датчика и моделирование выполнено в ПО Ansys.

ТВПЭ транзисторы расположены на поверхности AlGaN слоя, в соответствии с рис. 4.

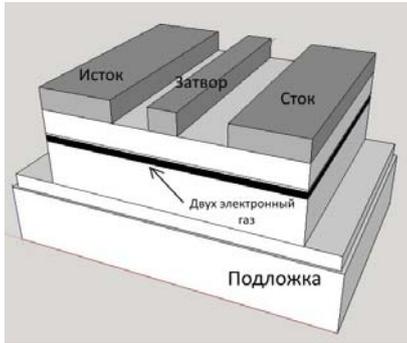


Рис. 2. Схематическая модель ТВПЭ

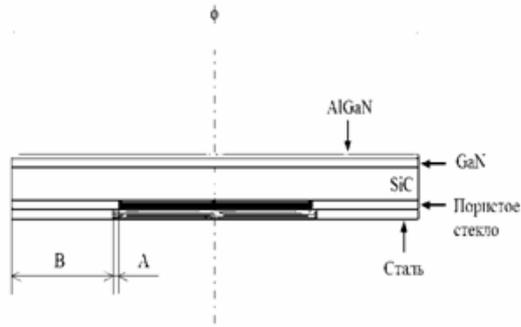


Рис. 3. Структура мембраны датчика

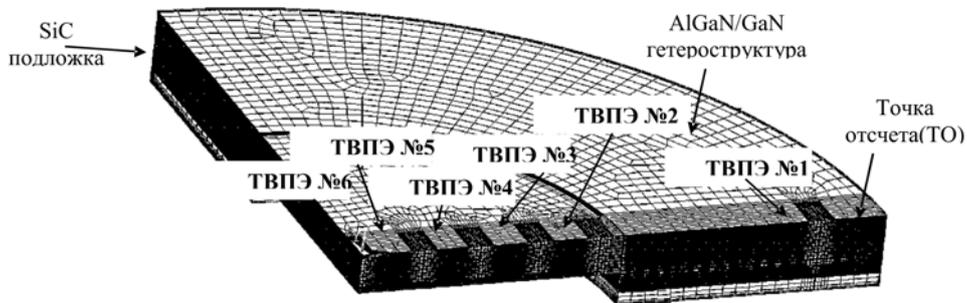


Рис. 4. 3-D Модель мембраны (четверть) в Ansys, указаны позиции транзисторов

Задача сравнительного анализа заключается в выборе оптимального расположения транзистора на поверхности мембраны, критерием оптимальности в данном случае будут чувствительность, зависимость от температуры, отсутствие паразитных зарядов, способных оказать влияние на протекание тока. Для выполнения задачи сравнительного анализа предлагается расположить 6 ТВПЭ на поверхности мембраны, расположение данных транзисторов зависит от распределения электрического поля, расстояние от точки отсчета указано в таблице 1.

Таблица 1

Расположение ТВПЭ относительно точки отсчета

| Расстояние от точки отсчета (ТО), μm | | | | | | |
|---|-----|------|------|------|------|------|
| № ТВПЭ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Расстояние, μm | 500 | 2180 | 2635 | 3090 | 3520 | 4000 |

Благодаря симметричности мембраны для анализа достаточно создать модель ее четверти. Результаты анализа напряженности при различных уровнях давления представлены на рис. 5. Также отмечены позиции ТВПЭ на мембране относительно ее центра.

Из графика видно, что напряженность имеет отрицательное значение при расстоянии меньше 2000 μm . $\sigma_{ij} = C_{ijkl}^E \delta_{kl}$

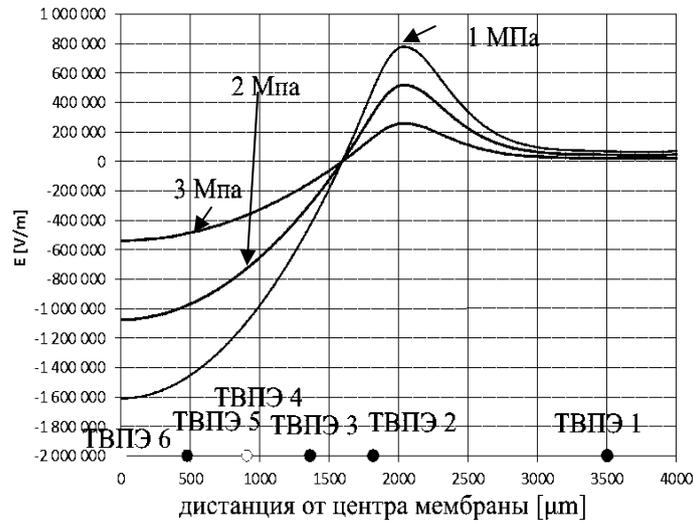


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля

Сущность пьезоэффекта можно описать законом Гука (1.1):

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1.1)$$

σ_{ij} и ε_{kl} — тензоры напряжения и деформации. Так как эти тензоры являются симметричными, то тензор модулей упругости обладает необходимой степенью симметрии для того, чтобы его возможно было записать в матричном виде.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ \cdot & C_{22} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ \cdot & \cdot & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ \cdot & \cdot & \cdot & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & C_{1313} & C_{1312} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{44} \\ \varepsilon_{55} \\ \varepsilon_{66} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Закон Гука записывается в матричной форме при помощи нотации Фойгта (матричная форма записи симметричного тензора 4-го ранга). Если тензор 4-го ранга обладает симметрией по первой и второй паре индексов

$$C_{ijkl} = C_{ijki} \quad (1.3)$$

$$C_{ijkl} = C_{ijlk},$$

то его элементы могут быть записаны в виде матрицы 6×6, используя следующую подстановку индексов:

$$\begin{aligned} 11 &\rightarrow 1 \\ 22 &\rightarrow 2 \\ 33 &\rightarrow 3 \\ 23, 32 &\rightarrow 4 \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$13,31 \rightarrow 5$$

$$12,21 \rightarrow 6$$

Объединив закон Гука в матричной форме при помощи нотации Фойгта с материальным уравнением электрического поля (1.5)

$$D_i = \epsilon_{ik} E_k \quad (1.5)$$

получим:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^E \epsilon_{kl} - e_{ijk} E_k \quad (1.6)$$

$$D_i = e_{tki} \epsilon_{kt} + \epsilon_{ij}^E E_k \quad (1.7)$$

где C_{ijkl}^E являются компонентами тензора эластических свойств материала в постоянном электрическом поле, ϵ_{ij}^E являются компонентами тензора проницаемости при постоянной механической нагрузке, а e_{tki} является компонентами пьезоэлектрического тензора, который в обоих уравнениях описывает связь между механическим воздействием и электрическим полем. D_i и E_k это трехкомпонентные векторы. Тензор механического напряжения σ и механического натяжения ϵ сокращаются до векторов с 6 компонентами. Используемые материалы (GaN, AlGaN и SiC) являются однородными в поперечном направлении, следовательно имеется ось симметрии, а плоскость перпендикулярная ей является изотропной плоскостью, в которой свойства материала неизменны во всех направлениях. Вследствие этого, общее кол-во констант упругости сокращается до 5, а кол-во пьезоэлектрических коэффициентов сокращается до 3.

Матричная форма материальных уравнений дана ниже:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{15} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{13} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s_{11} & 0 & 0 \\ 0 & s_{11} & 0 \\ 0 & 0 & c_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Свойства используемых материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства используемых материалов

| Слой | Коэффициенты упругости, ГПа | | | | | Плотность (кг/м ³) |
|-------|-----------------------------|-----|--------|--------|-----|--------------------------------|
| | C11 | C12 | C13 | C33 | C44 | |
| SiC | 501 | 111 | 52 | 553 | 163 | 3211 |
| GaN | 390 | 145 | 103 | 405 | 105 | 6150 |
| AlGaN | 395 | 146 | 104.25 | 386.26 | 110 | 5190 |

Сталь и стекло — это изотропные материалы, их свойства определяются модулем упругости коэффициентом Пуассона (табл. 3).

Таблица 3

Свойства используемых материалов

| Слой | Модуль упругости, ГПа | Коэффициент Пуассона | Плотность, кг/м ³ |
|--------|-----------------------|----------------------|------------------------------|
| Сталь | 60 | 0.3 | 2800 |
| Стекло | 210 | 0.3 | 8100 |

Пьезоэлектрические коэффициенты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Пьезоэлектрический коэффициент

| Слой | Пьезоэлектрический коэффициент | | | Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r , Ф/м |
|--------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
| | e_{13} , Кл/м ² | e_{33} , Кл/м ² | e_{15} , Кл/м ² | |
| Сталь | -0.36 | 1 | -0.3 | 2800 |
| Стекло | -0.51 | 0.67 | 0.375 | 8100 |

Зависимость от температуры представлена на рис.6.

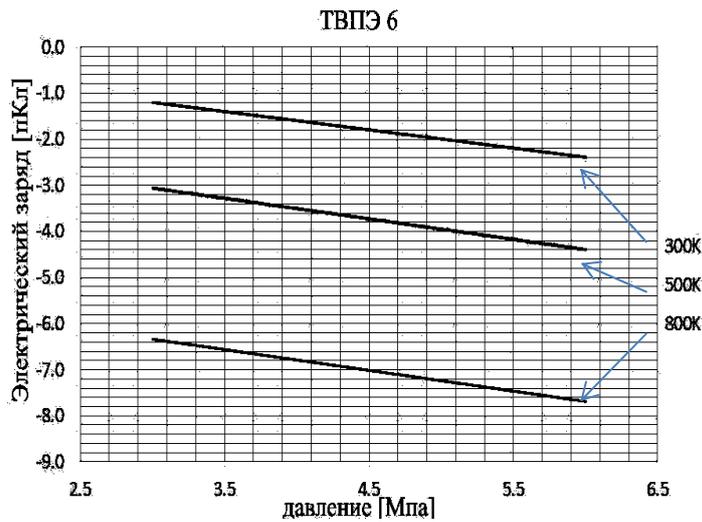


Рис.6. Зависимость от температуры

Разница зарядов на затворах транзисторов представлена на рис. 7.

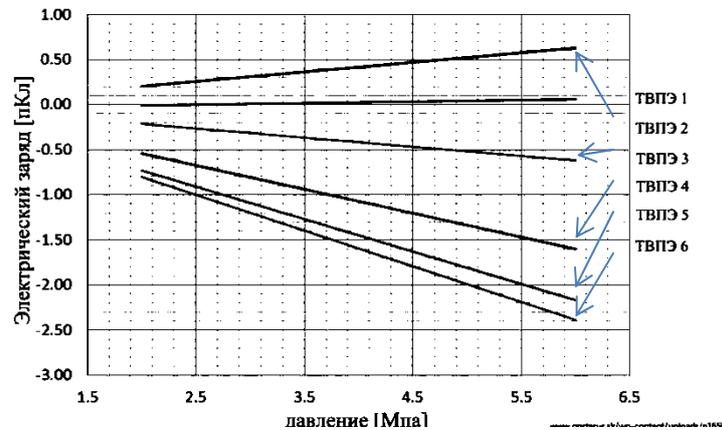


Рис. 7. Разница зарядов на затворе транзисторов

Заключение

При помощи ПО Ansys было оценено распределение напряженности электрического поля на поверхности мембраны. На основании этих данных (рис. 5), рекомендуется расположить ТВПЭ 2 ближе к фиксированной зоне (<2000 μm от центра мембраны), что позволит добиться большей чувствительности. Был произведен анализ разницы электрических зарядов на затворах транзисторов. В результате анализа установлено, что кроме ТВПЭ 2, все транзисторы генерировали отрицательный электрический заряд, который через канал двухэлектронного газа (2DEG) негативно сказывался на протекании тока. При механическом воздействии с обратной (нижней) стороны мембраны, мы получим более эффективную систему, т.к. так как на транзисторах ТВПЭ 3, ТВПЭ 4, ТВПЭ 5, ТВПЭ 6 будет создаваться положительный заряд. Установлено влияние повышения температуры на пьезоэлектрические свойства и возникновение отрицательного заряда. При положительном заряде, ТВПЭ 6 будет демонстрировать наибольшую чувствительность (рис. 6), а следовательно, данное расположение транзистора наиболее оптимально для создания датчика дифференциального давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Javorka P. Fabrication and characterization of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors, PhD dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen, 2004.
2. Ambacher O. Growth and applications of group III-nitrides. Journal of physics D: Applied physics, 1998, 24, 2653-2710.
3. Pearton S., Ren F., Zhang A., Lee K. Fabrication and performance of GaN electronic devices. Materials science and engineering. 2000, 12, 12-24.

Тюменский государственный нефтегазовый университет
 dzhezhenko@slb.com
 t-park@tsoгу.ru

Zhezhelenko D.V., Logachev V.G.

PRESSURE TRANSDUCER DESIGN BASED ON HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR

Following article is devoted to designing and analysis of electro-mechanical pressure transducer based on 3 dimensional model in Ansys software. Piezoelectric membrane of pressure transducer is based on AlGaIn/GaN HEMT. Results of piezoelectric analysis are reviewed. Transistors positions are defined and requirements for a final model are proposed.

Transistor, HEMT, Ansys, piezoelectric, transducer, membrane.