

Инфракрасные фоточувствительные элементы на основе МЭМС

Е.А. Фетисов^{1,2}, Р.З. Хафизов¹, А.М. Белин², Г.А. Рудаков⁴, В.И. Золотарев², В.А. Федирко^{2,3},
Д.Б. Рыгалин^{1,2}

¹ООО «Элем Инфо», fetisov@unicm.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

³Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

⁴НПК Технологический центр МИЭТ

Аннотация — Рассмотрены особенности проектирования фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на основе МЭМС для создания многоэлементных ИК-приемников, функционирующих при комнатной температуре.

Ключевые слова — микроэлектромеханическая система (МЭМС), инфракрасный фоточувствительный элемент (ИК ФЧЭ), биморфная консоль, транзистор с подвешенным затвором (suspended gate transistor).

I. ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасные сенсоры, не нуждающиеся в криогенном охлаждении, имеют широкие перспективы применения – как в коммерческих, так и в специальных областях. ИК МЭМС ФЧЭ [1-3] обладают целым рядом преимуществ перед обычными неохлаждаемыми тепловыми сенсорами, в частности, перед болометрическими приемниками, а по своим предельным характеристикам функционирования могут успешно конкурировать с охлаждаемыми фотоприемниками. Особый интерес представляет создание на основе таких элементов интеллектуальных ИК датчиков для систем удалённого мониторинга, для чего необходимо предусмотреть первичную обработку сигнала термосенсоров на кристалле. Существенные успехи в этой области могут быть достигнуты с развитием технологий, обеспечивающих создание на одном кристалле МЭМС элементов и КМОП схем считывания и обработки сигналов.

Физические принципы функционирования МЭМС ФЧЭ изучены в [1, 2, 4]. В [3, 5] обсуждаются различные подходы к организации электрического считывания термоотклика чувствительного элемента МЭМС.

Одна из основных задач при проектировании сенсорных МЭМС-элементов состоит в разработке интегрированных схем считывания сверхмалых механических деформаций под воздействием теплового излучения. В настоящей работе рассмотрены некоторые особенности проектирования многоэлементных ИК ФЧЭ с электрическим (в

частности, ёмкостным) считыванием сигнала и рассмотрены ограничения, возникающие при совмещении МЭМС- и КМОП-технологий.

II. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЭМС ИК ЭЛЕМЕНТОВ С ЁМКОСТНЫМ СЧИТЫВАНИЕМ

Разработанная нами схема считывания строилась на основе делителя из двух конденсаторов, один из которых представляет собой МДП структуру на кремниевой подложке, а другой — реализован в виде «подвешенной» МЭМС мембраны. Незначительное количество тепла, поглощенное мембраной, изменяет емкость МЭМС конденсатора, что приводит к изменению потенциала в средней точке делителя. Формирование интегрированной схемы считывания в непосредственной близости с делителем обеспечивает возможность считывания достаточно слабых изменений температуры (менее 0,1С) на чувствительной поверхности ФЧЭ.

Теоретическое исследование и моделирование ёмкостного ИК ФЧЭ проведено в [6-8].

На рис. 1 показана электрическая схема ёмкостного МЭМС-элемента.

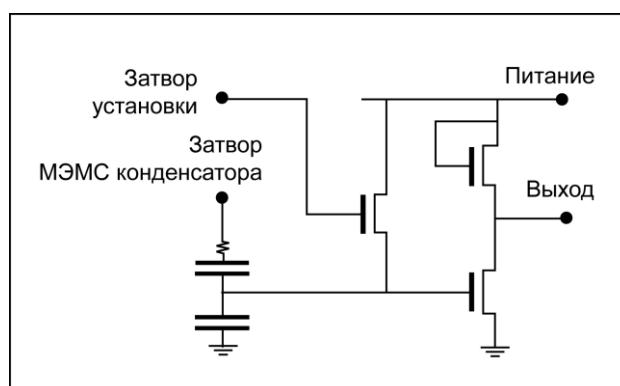


Рис. 1. Электрическая схема ячейки ИК МЭМС на основе ёмкостного делителя

Основным элементом фоточувствительной ячейки служит несущая мембрана из нитрида кремния

толщиной ~ 400 мкм, которая «подвешена» на биморфных консолях.

На рис. 2 приведено изображение фрагмента экспериментального образца ФЧЭ, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

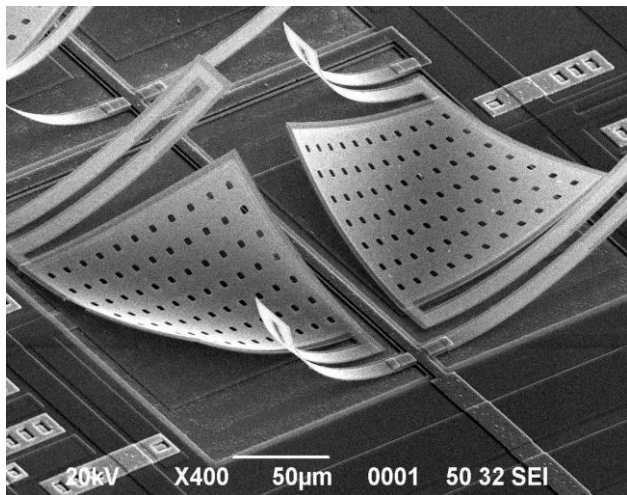


Рис. 2. Фрагмент ИК МЭМС-фоточувствительных элементов с емкостным делителем

Изменение температуры мембраны за счет поглощения тепла вызывает изгиб консолей, обеспечивая пространственное смещение мембраны относительно подложки. Важнейшее условие, которое необходимо реализовать при проектировании таких элементов, состоит в достижении максимально возможной термической изоляции мембраны от подложки, что требует, в частности, вакуумирования чувствительных элементов. Желательным условием является также стабилизация температуры подложки.

Одна из проблем, которую пришлось решать в ходе разработки и изготовления таких ФЧ МЭМС, состояла в минимизации термических деформаций элементов, возникающих в ходе их изготовления. С одной стороны, обрабатывались маршруты с использованием низкотемпературных технологических операций, с другой — применялись специальные конструкторские решения при проектировании. Так, топология биморфных консолей обеспечивала термокомпенсацию деформаций для достижения минимально возможной величины вакуумного зазора между мембраной и подложкой. Было также применено армирование мембраны, что позволило существенно снизить технологическую деформацию мембраны.

На рис. 3 представлена топология основных технологических слоев термочувствительной мембраны МЭМС-конденсатора и структура емкостного делителя, сформированного на кремниевой пластине.

Вывешивание (освобождение) мембраны из нитрида кремния осуществлялось путем удаления жертвенного слоя оксида кремния методом газофазного травления. Для улучшения условий травления в мембране предусмотрены отверстия, равномерно распределенные по ее поверхности.

Мембрана «висит» над поверхностью кристалла на расстоянии ~400 нм на узких (8мкм) двухплечевых консолях. Двухплечевая конструкция консолей обеспечивает компенсацию изгиба, образующегося в результате охлаждения структуры после осаждения металла.

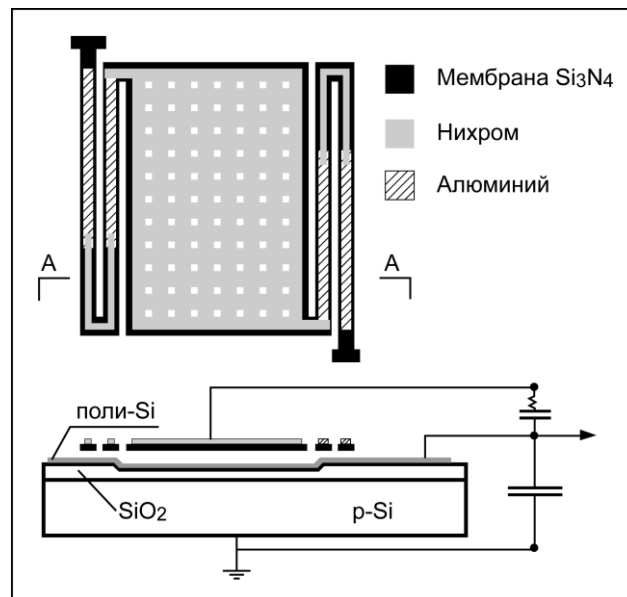


Рис. 3. Топология МЭМС-конденсатора и структура емкостного делителя

Слой алюминия формирует биморфные участки консолей. Двухплечевая конструкция консолей обеспечивает компенсацию изгиба, образующегося в результате охлаждения структуры после осаждения металла. Проводящий электрод на мембране и электрические перемычки между биморфными участками консолей образованы тонким слоем нихрома, который обеспечивает хорошее поглощение теплового излучения и не создает высокого дополнительного теплообмена между мембраной и подложкой. На рис. 4 показаны основные технологические операции формирования мембраны.

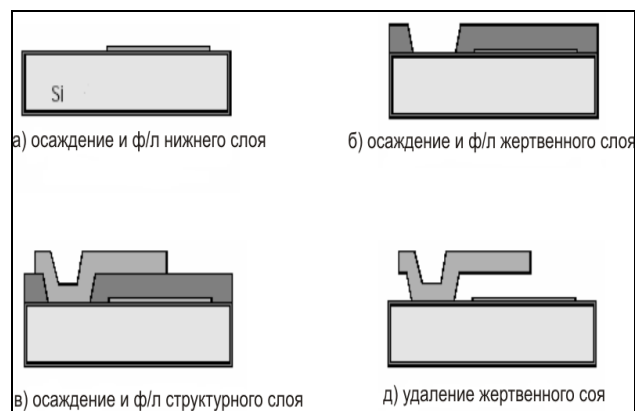


Рис. 4. Схема формирования ФЧЭ МЭМС

Тепловое излучение поглощается мембраной, что приводит к изменению ее температуры, которое передается на ближние биморфные участки консолей,

вызывая их деформацию. Возникающее в результате этого изменение вакуумного зазора и, соответственно, электрической емкости, между мембраной и поликремниевым электродом нижнего опорного конденсатора может быть измерено схемой считывания. Схема должна быть спроектирована так, чтобы уменьшить влияние паразитных емкостей, уменьшающих выходной сигнал. Мы использовали истоковый повторитель на n-МОП транзисторах, который располагался в непосредственной близости от теплового сенсора.

Нами изготовлены экспериментальные образцы емкостных тепловых МЭМС-сенсоров с количеством элементов 2x8 и шагом следования элементов 200 мкм. Проверка сенсора на функционирование осуществлялась на автоматизированном стенде, обеспечивающем термическую стабилизацию и вакуумирование образцов, считывание и обработку выходных сигналов по всем 16-ти каналам путем многократной выборки и усреднения во временном диапазоне 1-100 мс. Оптическая система стенда позволяла осуществлять регулируемые тепловые воздействия на поверхность сенсора с целью оценки его чувствительности. Рис. 5 иллюстрирует диаграмму выходного сигнала одного из каналов сенсора при воздействии на него изменяющегося теплового потока от модели абсолютно черного тела.

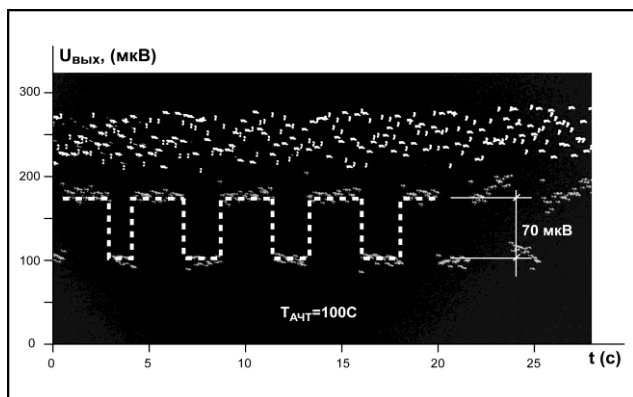


Рис. 5. Диаграмма выходного сигнала емкостного МЭМС-сенсора

III. ФЧЭ НА ОСНОВЕ МЭМС-ТРАНЗИСТОРА

Перспективная возможность построения МЭМС-сенсора, чувствительного к тепловому излучению и обеспечивающего электрическое считывание сигнала, состоит в использовании полевого транзистора с подвижным «подвешенным» затвором [5]. Ток в канале такого транзистора может модулироваться тепловым излучением за счет микромеханического перемещения затвора, которое приводит к изменению электрического потенциала на поверхности полупроводника. Экспериментальная оценка возможности построения ИК МЭМС на основе такой транзисторной структуры представляется чрезвычайно актуальной.

На рис.6 приведена возможная схема ИК ФЧЭ на основе транзистора с «подвешенным затвором», а на рис. 7 – его топология и структура.

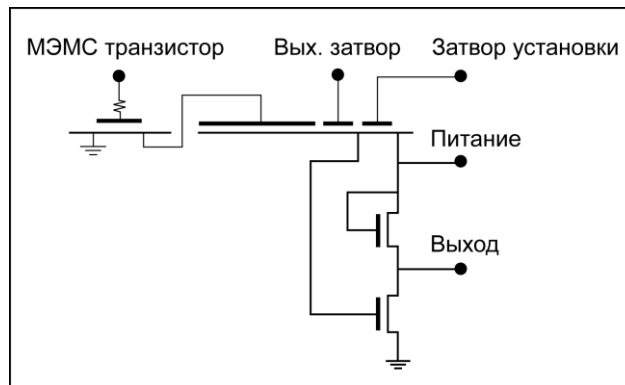


Рис. 6. Электрическая схема ИК МЭМС на основе транзистора с «подвешенным» затвором

При проектировании транзисторного элемента использовались те же подходы, что и для МЭМС-конденсатора. Отличия состоят в том, что мембрана закреплена на консолях лишь с одной стороны и имеет специальный выступ, формирующий «подвешенный» полевой затвор транзистора.

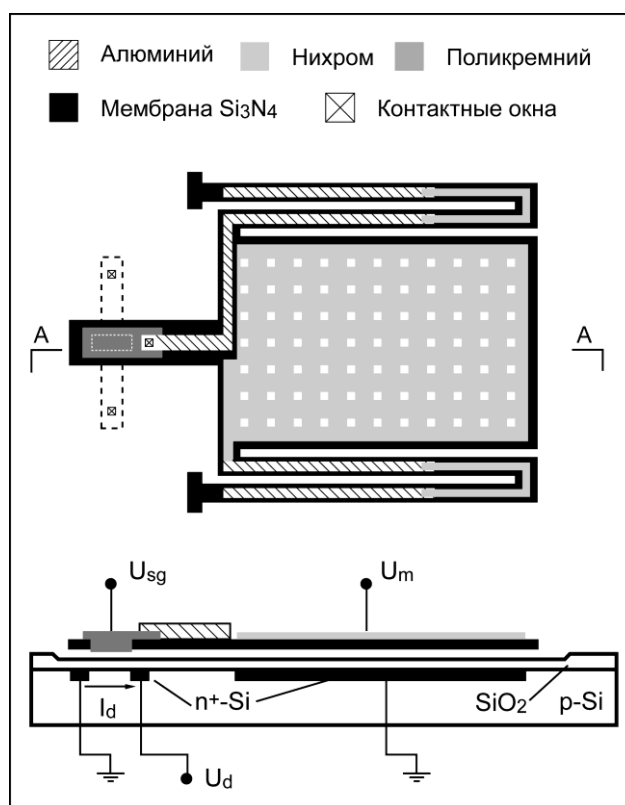


Рис. 7. Топология и структура МЭМС-транзистора

Применение специальной последовательности технологических операций, позволило создать затвор, размещенный внутри мембраны, что способствовало достижению минимального зазора между полевым электродом и поверхностью проводящего канала. Для уменьшения деформаций, возникающих после проведения технологических операций с высокой температурой, мембрана дополнительно армировалась более толстыми полосками нитрида кремния.

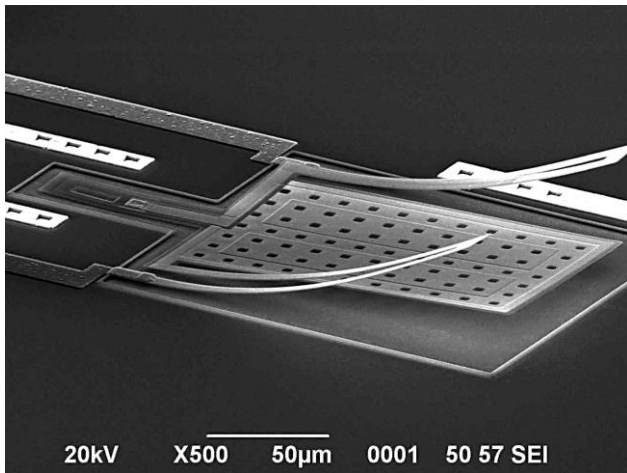


Рис. 8. ИК МЭМС-транзистор с «подвешенным» затвором

На рис. 8 показано РЭМ-изображение изготовленного экспериментального образца транзисторного элемента. Прикладывая потенциал U_m к дополнительному проводящему электроду мембраны можно за счет сил электростатического притяжения регулировать ее исходное положение. Это дает дополнительные преимущества для достижения оптимальных условий работы транзистора.

На рис. 9 приведен график зависимостей тока I_d канала от потенциала стока U_d при $U_m=20В$ для различных значений полевого потенциала U_{sg} . Значения токов канала лежат в диапазоне от нескольких нА до 45 мкА и регулируются потенциалами U_{sg} и U_m .

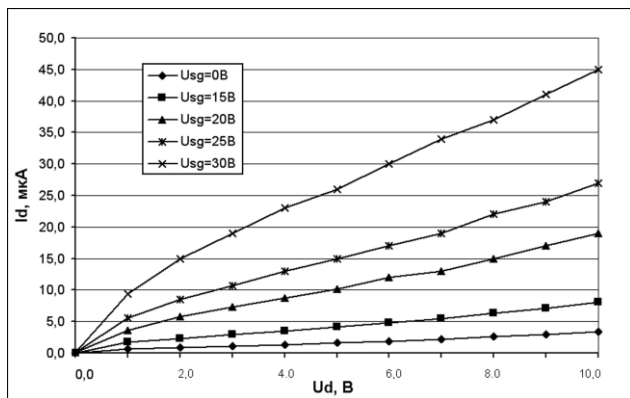


Рис. 9. Выходные ВАХ МЭМС-транзистора

Результаты измерений подтверждают возможность создания эффективных тепловых сенсоров с интегрированными на кристалле КМОП-схемами считывания и обработки выходных сигналов на основе МЭМС-транзистора с подвешенным затвором.

IV. ВЫВОДЫ

Выработаны и экспериментально проверены основные конструктивные решения, которые могут

использоваться при проектировании тепловых МЭМС-сенсоров.

Изготовлены и исследованы первые образцы многоэлементных МЭМС ИК фоточувствительных элементов с электрическим считыванием сигнала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Кириленко Е.П. и Лапшину В.А. за проведение аналитических исследований образцов ИК МЭМС на РЭМ и оптическом нанопрофилометре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Федирко, Е.А. Фетисов и В.А. Беспалов, Приемники ИК изображения на основе термомеханических наноразмерных мембран // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 66–72.
- [2] Федирко В.А., Фетисов Е.А. Вакуумные опто-механические приемники ИК изображения // XVI научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» / под ред. проф. Д. В. Быкова. М.: МИЭМ, 2009. С. 155–158.
- [3] Е.А. Фетисов, В.А. Федирко, Р.З. Хафизов, В.И. Золотарёв, Д.А. Зенюк, Г.А. Рудаков. Нанозлектромеханические термочувствительные элементы // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанозлектронных систем – 2010 / под общ ред. акад РАН А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 638-641.
- [4] Федирко В.А., Зенюк Д.А. Моделирование термоотклика мультиморфных микроантителей. Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2009. № 4(8). С. 75-81.
- [5] Патент ООО «ЭЛЕМ ИНФО» «Термочувствительный полевой прибор» (регистрационный № 2009115467 от 24.04.2009 г.), МПК: G01J5/40, G01J5/34. / Беспалов В.А., Золотарев В.И., Рудаков Г.А., Рыгалин Д.Б., Федирко В.А., Фетисов Е.А., Хафизов Р.З.
- [6] Федирко В.А., Зенюк Д.А. Математическое моделирование микроэлектромеханического конденсатора с подвешенным электродом // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3 (15). С. 126-131.
- [7] В.А. Федирко, Д.А. Зенюк. Математическое моделирование емкостного элемента МЭМС // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 4 (17). С. 53-58.
- [8] Д.А. Зенюк, В.А. Федирко. Моделирование микроэлектромеханического термосенсора // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 4 (17). С. 64-68.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственные контракты № 16.426.11.0039 и 16.426.11.0045) и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере