

# Алгоритм автоматизации проектирования ячеек неохлаждаемого матричного ИК – сенсора на основе термопары

Н.И. Кураедов,  
kuraedov@mail.ru,  
НИУ «МИЭТ», Зеленоград, г. Москва

Рассмотрен процесс автоматизированного проектирования конструкции фоточувствительного элемента (ФЧЭ) микрооптоэлектромеханической системы (МОЭМС) неохлаждаемого приёмника изображения в инфракрасном диапазоне на основе термопары. Результатом работы алгоритма является топология с заданными заказчиком характеристиками.

Using the microoptoelectromechanical (MOEM) devices and microelectromechanical systems (MEMS) allows to create conditions for the interaction between the virtual environment and physical objects. An example of such interaction is the Internet of things, which is becoming increasingly popular in both domestic and industrial applications.

## Введение

Тенденция усложнения разрабатываемых устройств приводит к необходимости увеличивать затраты на их производство (приходится нанимать более квалифицированных сотрудников, увеличивать количество производственных линий). Эти и многие другие факторы стали основой для разработки программного обеспечения, позволяющего разрабатывать и выполнять математическое моделирование различных устройств. Развитие микроэлектроники, а также необходимость в минимизации затрат на производство, привели к созданию комплексов программного обеспечения, необходимого для разработки, и, впоследствии, моделирования устройств [1]. Использование микрооптоэлектромеханических (МОЭМ) устройств и микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволяет создать условия для взаимодействия виртуальной среды и физических объектов.

Принцип работы МЭМС и МОЭМ устройств основан на применении различных физических эффектов (например, электрических, механических или оптических). Так как создание образцов для исследования таких устройств представляет собой довольно сложный процесс, исследования таких МЭМС и МОЭМ устройств требуют больших временных затрат. По этой причине создание алгоритмов автоматизированного проектирования и моделирования данных устройств является актуальной задачей [2].

Таким образом, возможность комплексного моделирования МОЭМ устройств в специализированном программном пакете, позволит существенно снизить финансовые и временные затраты на разработку микросистем, при этом увеличив процент выхода годных микросистем на производстве. Однако существующие САПР для проектирования МОЭМ устройств требуют больших вычислительных затрат, вызванных необходимостью решения систем уравнений высокого порядка.

Инфракрасные сенсоры, не нуждающиеся в криогенном охлаждении, имеют широкие перспективы применения - как в коммерческих, так и в специальных областях. ИК МЭМС ФЧЭ [1-2] 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

Математическое моделирование должно позволять моделировать сложные системы, которые сочетают в себе такие физические эффекты, как, например, электрические, оптические или механические [3]. Однако существующие САПР не позволяют выполнять моделирование этих эффектов в пределах одного программного комплекса. Решением данной проблемы может стать разработка маршрута автоматизации проектирования МОЭМ систем, который позволит осуществлять комплексное моделирование разрабатываемого устройства независимо от его входных параметров и в результате получать структуру разрабатываемого устройства.

## 1. Физико-математическая модель термопарного ИК-сенсора

Опираясь на первую отечественную работу в области анализа многоэлементных ИК МЭМС-сенсоры с термопарными преобразователями теплового излучения [4] можно сделать вывод, что проектирование матричного ИК-сенсора начинается с определения количества ячеек матрицы для требуемого разрешения, времени кадра, минимальной разности температур. Количество элементов матрицы (N) напрямую зависит от площади (S), отведенной под фоточувствительные части. Время кадра зависит от времени отклика сигнала с ячеек сенсора. Минимальное разрешаемое изменение температуры объекта определяет требуемые шумовые характеристики: задаёт NETD – эквивалентную шуму разность температур на объекте наблюдения [5].

Важнейшей характеристикой для разработки оптимизированной конструкции термопары служит напряжение холостого хода (термо-ЭДС).

$$\Delta V = \alpha \cdot \Delta T_t \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Зеебека термопары,  $\Delta T_t$  – разность температур, созданная на термопаре.

При переходе на субмикронные технологии аналитическая модель подвергнется изменениям в силу вносимых деформаций при прочих равных условиях.

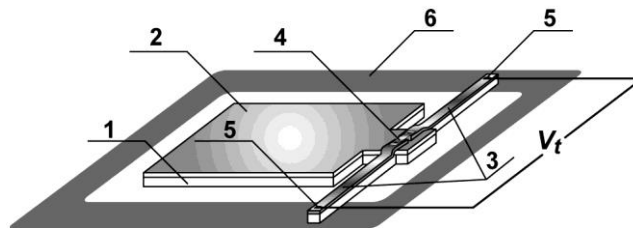


рис. 1. [5] Схема МЭМС элемента приёмника ИК-изображения: 1 – мембрана, 2 – поглощающий слой, 3 – консоли с термопарой, 4 – «горячий спай» термопары, 5 – «холодные» контакты термопары, 6 – подложка

Конструкция фотоприёмной матрицы с термопарой показана на рис. 1. Мембрана выполнена из нитрида кремния. Роль консолей выполняет оксид кремния. На поверхности консоли сформирована термопара, материалом для которой послужил поликристаллический кремний. [5] Считывание возникающей при нагревании мембраны термо-ЭДС осуществляется КМОП ИС, расположенной непосредственно на кристалле. Отличительной особенностью выбранных материалов является совместимость со стандартным технологическим процессом проектирования КМОП ИС.

Для составления параметризованной модели ячейки сенсора появилась необходимость в проведении анализа оптимизации конструкции. Из материала статьи «Оптимальное проектирование МЭМС-элемента приёмника ИК изображения на основе термопары» [5] было выяснено, что активной частью ячейки делится между площадью фотоприёмной мембраны  $A$  и площадью консоли  $A_c$  с заданными соотношениями (2) и (3):

$$S = A + A_c; \quad A_c = 2\mu w_t \cdot l, \quad (2)$$

$$A = \frac{2}{3} S, \quad A_c = \frac{1}{3} S, \quad l = \frac{S}{6\mu w_t}. \quad (3)$$

где  $w_t$  – ширина одного плеча термопары,  $l$  – длина консоли,  $\mu$  – коэффициент «смежности», учитывающий наличие необходимых зазоров.

Для получения наименьшего значения параметра чувствительности для ячейки термопары и наибольшего значения напряжения холостого хода необходимо соблюдение оптимальных отношений площади мембраны и консолей [5]. Необходимые условия были получены из выражения (4):

$$S = S_{opt} = 3 \cdot \sqrt{2k_t \mu w_t^2 h_t \tau_k / \pi c} \quad (4)$$

где  $k_t$  – коэффициент теплопроводности материала термопары;  $h_t$  – толщина материала термопары, сформированной на консоли,  $t_k$  – время кадра

Для нахождения оптимального значения параметра эквивалентной шуму разницы температур необходимо соблюдение соотношению  $NETD < \delta T$ . Поэтому используя выражение (5) можно найти наибольшее технологически допустимое значения ширины одного плеча термопары.

$$\frac{k_t w_t \sqrt{\mu \rho_t h_t}}{\alpha \eta q} < \frac{j \tau_k^{1/2} \delta T_m \left( \frac{S_c}{N} \right)^{3/2}}{6 \sqrt{6 k_B T}} \quad (5)$$

где  $\rho_t$  – удельное сопротивление материалов термопары,  $\eta$  – доля поглощаемого теплоприёмной мембраной падающего излучения,  $q$  – оптический фактор:  $q = H t_o / 4$ , где  $H$  – светосила, а  $t_o$  – пропускание объектива,  $S_c$  – площадь кристалла,  $N$  – количество элементов.

Для технологического процесса 90 нм с учетом выбранного разрешения в 320x240 ячеек и размера пикселя 20 мкм при параметрах:  $h_t = 150 \text{ нм}$ ;  $w_t = 0.25 \text{ мкм}$ ;  $\mu = 2.5$ ;  $r_o = 10 \text{ Ом}/\square$ ;  $k_t = 25 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ;  $\alpha = 300 \text{ мкВ}/\text{К}$ ; [7]  $\tau_k = 0.1$ ;  $j = 2.63$ ;  $\eta = 0.8$ ;  $H = 1$ ;  $t_o = 0.9$ ,  $\delta T = 15 \text{ мК}$ , получим, что максимальная ширина плеча термопары должна быть не более 320 нм. Для разрешения в 320x240 ячеек и размера пикселя 30 мкм ширина плеча термопары должна быть не более 1.11 мкм.

Тогда для полученных ширин плеч термопары оценим значение эквивалентной шуму разницы температур (NETD) используя выражение (6) [5]:

$$\begin{aligned} NETD &= \frac{6(k_t w_t h_t) \sqrt{6 \mu k_B T r_o}}{\alpha \eta q j \cdot S_{opt}^{3/2} \tau_k^{1/2}} = \\ &= \frac{2 \cdot \sqrt{k_B T \rho_t}}{\alpha \eta q j \tau_k^{5/4}} \cdot (\pi c)^{3/4} \cdot \left( \frac{k_t}{2 \mu w_t^2 h_t} \right)^{1/4} \end{aligned} \quad (6)$$

При размере пикселя в 20 мкм получим  $NETD = 7.68 \text{ мК}$ , а при 30 мкм –  $NETD = 4.12 \text{ мК}$ .

## 2. Автоматизация проектирования термопарного ик-сенсора

Для автоматизации проектирования используется скриптовый язык Tcl. На начальном этапе работы алгоритма подгружаются технологический tech-файл. В файле содержится информация по необходимым переменным: коэффициент теплопроводности материала  $k_t$ ; коэффициент «смежности» ( $\mu$ ); удельное сопротивление материалов термопары ( $\rho_t$ ); толщина термопары ( $h_t$ ); коэффициент Зеебека ( $\alpha$ ); оптический фактор ( $q$ ); время кадра  $t_k$ . Для значения ширины плеча термопары задается разброс допустимых параметров ( $w_t$   $0.23e-6$   $25e-6$ ). Кроме технологического файла погружается еще тар-файл, в котором находится информация по соответствию названия слоя и номеру его фотшаблона.

В пользовательском диалоговом окне указываются требуемые параметры: теплового разрешения, размера пикселя, минимальное разрешаемое изменение температуры объекта  $\delta T_m$ .

Используя математическую модель, сформированную на базе выражения (5) происходит вычисление максимального значения для ширины плеча термопары. Если полученное значение выходит за пределы заданного технологического разброса параметра  $w_t$ , то необходимо либо изменить технологию, либо требуемые параметры теплового разрешения или размера пикселя.

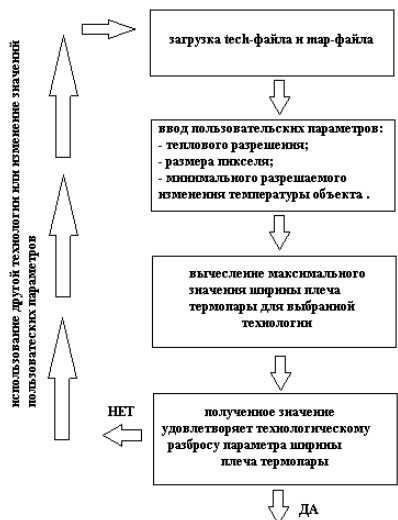


рис. 2. Блок-схема работы первичной части алгоритма

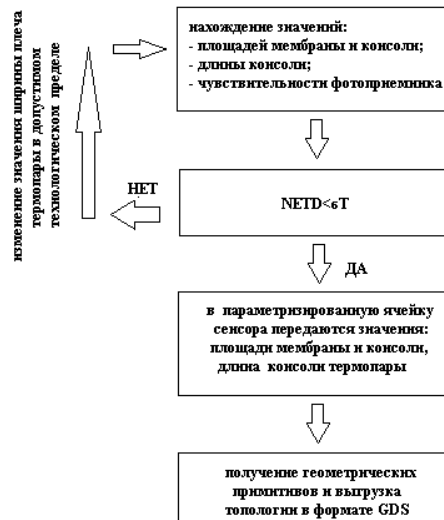


рис. 3. Блок-схема финальной части алгоритма

Полученное максимальное значение  $w_t$ , используется для нахождения из выражений (2), (3), (4) значений площади мембраны, площади и длины консоли, а также, используя выражение (6), чувствительности сенсора (NETD).

При удовлетворении выражению  $NETD < \delta T$  передаются значения: площади мембраны, площади и длины консоли в параметризованную ячейку сенсора, написанную на языке Skill. При удовлетворении отношению  $NETD < \delta T$  значение ширины плеча термопары меняется на некоторое значение относительно максимального.

В PCell ячейки содержится информация по слоям и их параметрам для получения топологического представления в формате gds. Для этого производится расчёт геометрической конструкции ячейки сенсора и распределения всех примитивов по слоям, полученный набор примитивов преобразуется в gds, используя тар-файл. Для работы данного этапа алгоритма используется программное обеспечение Cadence Virtuoso.

При расположении элементов ячейки необходимо учитывать специфику каждого слоя для получения на выходе качественной топологии. При проектировании физической модели МЭМС – сенсора важнейшими правилами являются согласованность, симметричность и компактность в расположении элементов. Согласование требуется для снижения влияния разброса характеристик элементов, вызванного флуктуацией параметров технологического процесса. Симметричное расположение элементов необходимо как для их согласования, так и для выравнивания паразитных составляющих в шинах. Как правило, шины, предназначенные для дифференциальной передачи сигналов, должны располагаться симметрично относительно общего центра и иметь одинаковую длину. Различие паразитных элементов в таких шинах может привести к значительному ухудшению динамических характеристик схемы. Расположение элементов влияет как на их согласование, так и на занимаемую ими площадь.

Выполнение этих правил позволяет уменьшить влияние паразитных составляющих, эффектов, связанных с технологическими процессами, что обеспечивает сохранение характеристик схемы. Таким образом, для того чтобы программа, позволяющая автоматически располагать элементы на кристалле, могла быть использована, в ней должны быть заложены приведенные выше правила с целью получения на выходе требуемого расположения элементов. Для этого необходимо введение ограничений для различных аналоговых структур.

Алгоритм проектирования ячейки МЭМС-сенсора, направленный на получение на выходе топологии, удовлетворяющей заданным характеристикам. Для этого перед генерацией топологии элементов и их размещением определяются характеристики, которым должна соответствовать ячейка сенсора посредством моделирования. Также проводится анализ структуры для определения минимальной ширины шин. Эта информация используется для оценки паразитных емкостей и сопротивлений. Кроме того, анализируется чувствительность характеристик к рассогласованию элементов и паразитным составляющим. В результате, генерируется список возможных вариантов построения топологии каждого элемента схемы, после чего с помощью алгоритма выполняется их размещение в соответствии с характеристиками ячейки. Для описания плана размещения без разделения на секции использовались абсолютные координаты, ориентация и варианты построения топологии каждого элемента (или кластера элементов) в качестве переменных в алгоритме. При размещении элементов учитываются следующие ограничения: симметричное расположение элементов, согласование элементов, влияние паразитных емкостей и резисторов, объединение выводов элементов.

На основе разработанного алгоритма был спроектирован оптимизированный элемент ИК-фотоприёмной матрицы 320x240, с шагом 20 мкм, а также спроектирован оптимизированный элемент ИК-фотоприёмной матрицы 320x240, с шагом 30 мкм ориентированные на имеющиеся технологические возможности. Мембрана и консоли выполняются из оксида кремния толщиной 0,24 мкм [8], ширина консоли  $w_c = 0.32$  мкм и  $w_m = 658$  мкм соответственно. В качестве поглощающего используется слой нитрида кремния толщиной 0,6 мкм [6]. Термопара формируется только на одной консоли осаждением анизотипных слоёв поликристаллического кремния толщиной 0,15 мкм, поверхностное сопротивление слоёв  $\rho_s = 10 \text{ Ом}/\square$ . Фотоприёмник проектировался на частоту 10 кадров в секунду для пикселя в 20 мкм и 15 кадров в секунду для пикселя в 30 мкм.

Оптимизация элемента осуществлялась, разумеется, по активной части структуры, состоящей из мембраны и термпары, что приводит к результатам (6), которые и реализованы в конструкциях, представленных на рис. 4

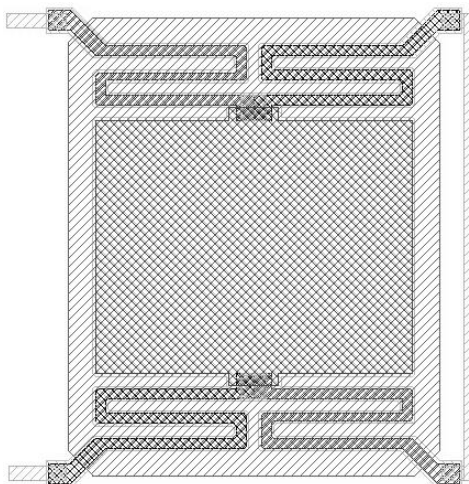


рис. 4. Топология ячейки ИК-сенсора с шагом в 20 мкм

### Заключение

В работе сформулированы требования к параметрам конструкции и используемых материалов, которые предоставляют принципиальную возможность реализовать заданные характеристики. Представлена конструкция оптимизированного элемента, проведено её численное моделирование и оценка его характеристик. Рассмотрен процесс автоматизированного проектирования конструкции фоточувствительного элемента (ФЧЭ) микрооптоэлектромеханической системы (МОЭМС) неохлаждаемого приёмника изображения в инфракрасном диапазоне на основе термпары.

Проведённый анализ показывает, что в настоящее время на имеющейся отечественной кремниевой технологии МЭМС возможно создание неохлаждаемых термомеханических фотоприёмников в ИК диапазоне, которые могут являться конкурентно способными на мировом рынке. Полученные результаты показывают, что представленный алгоритм может быть положен в основу создания простых систем автоматизированного проектирования тепловых микросенсоров.

### Литература

1. Косолапов И.А., Кишиневский А.Г., Паршина А.А., Многомасштабное моделирование на основе иерархического подхода на примере микрооптоэлектромеханического акселерометра на основе интерферометра Фабри-Перо, Сборник трудов Третьей Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия» – Калуга, 2010, с.273-276.
2. Шалумов А.С. Моделирование механических процессов в конструкциях РЭС на основе МКР и аналитических методов: Учебное пособие. Ковров: Ковровская государственная технологическая академия, 2001. -296с.
3. Фадеев О.А., Ваченко А.С., Постникова В.А., Шалумов А.С. Автоматизация проектирования технических систем с учетом моделирования механических процессов//“Современные проблемы радиоэлектроники”: Сборник научных трудов IV Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 107-й годовщине Дня радио/ Под ред. Ю.В. Коловского. Красноярск: КГТУ, 2002. - С.353-356.
4. Р.З. Хафизов. Многоэлементные ИК МЭМС-сенсоры с термпарными преобразователями теплового излучения/ Сб. трудов VI Всероссийской научно-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014», под общ ред. акад. РАН А. Л. Стемпковского. Часть II. М.: ИППМ РАН, 2014, С. 193-196.
5. Федирко В.А., Хафизов Р.З., Фетисов Е.А. Оптимальное проектирование МЭМС-элемента приёмника ИК изображения на основе термпары // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2016. №4. С. 59-64.
6. A.A. Sigarev, G.A. Rudakov, R.V. Lapshin, and E.A. Fetisov. Study of optical properties and surface structure of thin films of nonstoichiometric silicon nitride formed by means of low-temperature plasmachemical deposition for an implementation in MEMS-structures // RJPBCS, 2015, v.6, No 1, pp. 1815–1824.
7. J. Xie, C. Lee, M. Wang, Y. Liu and H. Feng, Characterization of heavily doped polysilicon films for CMOS-MEMS thermoelectric power generators // J. Micromech. Microeng, 2009, v. 19, №. 12, pp. 125029–125036.
8. Jun-Qi Wang, Chih-Hsiung Shen, An Offset Reduction Infrared Tracking System with Winner-Take-All Implementation for CMOS Thermal Microsensor / IEEE SENSORS Conference, 2009, pp. 1701–1704.