

Численное моделирование характеристик ИК МЭМС сенсоров с микротермопарами

Хафизов Р.З.^{1,2}, Тимофеев А.Е.², Белин М.А.²

¹ООО «ГрафИмпресс», Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия

Разработка неохлаждаемых многоэлементных тепловых приемников потенциально обеспечивает создание компактных и дешевых тепловизионных систем с низким энергопотреблением. Это открывает возможности их широкого использования в целом ряде гражданских приложений [1]. Существенное место в разработках, развиваемых ведущими мировыми электронными компаниями в области тепловых приемников, занимают работы по созданию ИК МЭМС приемников с чувствительными элементами на основе микротермопар. Важнейшим преимуществом термопарных ИК приемников является совместимость технологических процессов изготовления чувствительных сенсоров, входящих в их состав, со стандартной КМОП технологией.

Достигнутый в настоящее время уровень разработок характеризуется, например, коммерческой линейкой оптико-электронных модулей с термопарными матрицами формата 8x8, 32x32, 64x64 и 82x62 фирмы Heimann Sensor GmbH [2]. Японское агентство (Japan Defence Agency) и компания NEC Corporation еще в 1994 г. анонсировали создание термопарной матрицы с числом элементов 128x128 [3]. В [4] представлены результаты разработки матричного термопарного ИК приемника формата 120x90 (компания Nissan Research Center). Состояние и перспективы разработок многоэлементных ИК приемников с термопарными преобразователями теплового излучения рассматривались в [5]. Следует отметить, что круг публикаций в открытой печати на эту тему весьма ограничен.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования характеристик активного сенсора матричного термопарного ИК приемника. Исследуемый сенсор (рис. 1) представляет собой структуру, состоящую из диэлектрической (SiO_2) мембраны с теплопоглощающим слоем (Si_3N_4) и поликремниевой термопары на узких консолях из SiO_2 , обеспечивающих тепловую изоляцию мембраны от кремниевой подложки.

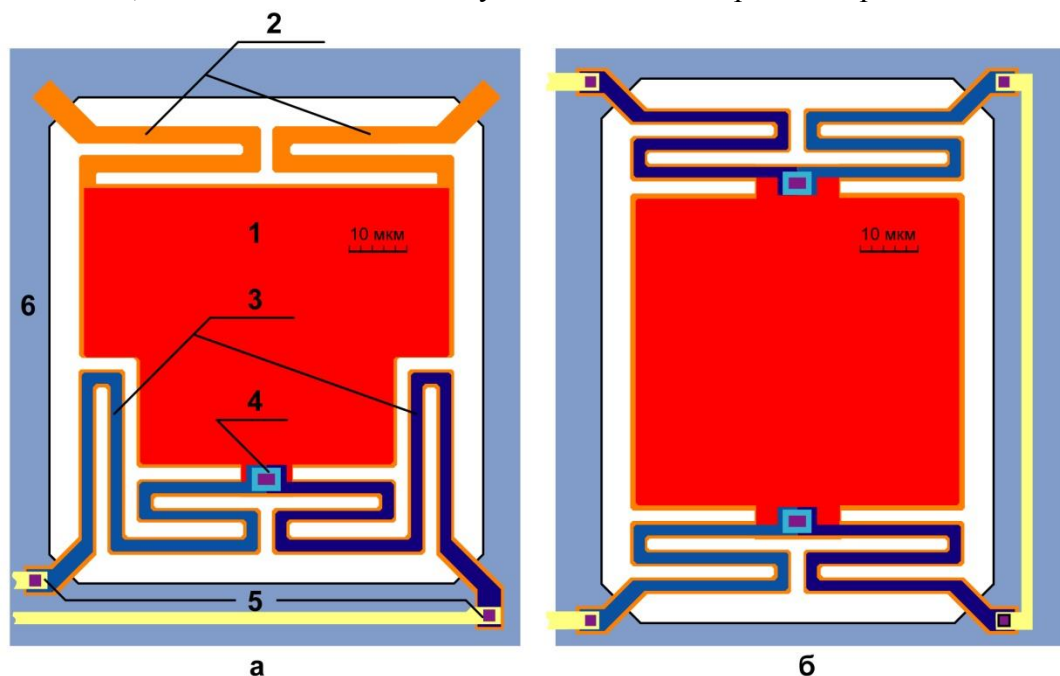


Рис. 1 – Варианты топологии сенсора:

а) с одной термопарой, б) с двумя термопарами,

1 – мембрана с поглощающим слоем, 2 – свободные консоли, 3 – консоли с термопарой,
4 – «горячий» спай термопары, 5 – «холодные» контакты термопары, 6 – подложка

Топология сенсоров разработана с учетом проектных норм 1,2 мкм и проведенного в работе [6] теоретического анализа, выявившего оптимальное соотношение геометрических

параметров элементов, входящих в их состав. Топологические размеры сенсора с одной термопарой (рис.1а) характеризуется следующими значениями: площадь фотоприемной мембраны $A = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$, площадь, занимаемая консолями с термопарами $A_c = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. Аналогичные размеры сенсора с двумя термопарами (рис.1б) составили $A = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ и $A_c = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$. Для обоих типов сенсоров ширина консолей равна 3 мкм, а ширина термопар – 2 мкм.

Моделирование проводилось с использованием программных пакетов Synopsys TCAD и ANSYS с целью определения возможных предельных характеристик сенсора. Исследовались термомеханические деформации, возникающие в структуре сенсора в результате проведения высокотемпературных процессов при изготовлении приемника, динамика реакции сенсора на тепловое излучение и 2D-температурные карты в состоянии теплового равновесия с внешней тепловой средой. Численные значения параметров материалов сенсора, использованные при моделировании, представлены в таблице 1. Проведено сравнение результатов, полученных для различных конструкций сенсора.

Таблица 1

	Толщина, h , мкм	Плотность $\rho \times 10^{-3}$, кг/м ³	Модуль Юнга E , ГН/м ²	Коэфф. Пуассона, ν	Коэфф. расширения $\beta \times 10^{-6}$, К ⁻¹	Теплопро- водность G , Вт/мК	Теплоем- кость c , Дж/кгК	Коэфф. Зеебека α , мкВ/К
SiO ₂	0,9	2,19	75	0,17	0,5	1,0	745	-
Si ₃ N ₄	0,6	2,40	180	0,27	0,8	20	691	-
n-Si*	0,45	2,1	169	0,22	9,4	33,1	700	-140
p-Si*						30,6		160
Al	0,45	2,7	80	0,17	23,6	237	908	-1,7

А. Моделирование деформаций

Технологический процесс изготовления матричных ИК приемников с термопарными сенсорами, интегрированными с КМОП схемами, включает в себя высокотемпературные (до 500С) операции. Формирование слоев структуры сенсора с отличающимися термомеханическими параметрами при таких температурах с последующим охлаждением может вызвать деформации, оказывающие влияние на работоспособность приемника. Важно отметить, что тепловая изоляция чувствительной мембраны сенсора обеспечивается пространственным зазором между ней и подложкой, формируемого путем вытравливания под мембраной жертвенного слоя или сквозного колодца в подложке. При этом мембрана механически связана с подложкой лишь узкими слабо проводящими тепло консолями. Таким образом, мембрана, состоящая из пленок с наноразмерными толщинами, фактически свободно вывешена в пространстве и возникающие в слоях напряжения приводят к деформациям, не компенсируемым массивом подложки [7,8]. Моделирование этих деформаций дает возможность учесть и снизить их отрицательное влияние на работоспособность сенсора при его проектировании.

На рис. 2 приведены результаты моделирования деформаций для типичных сочетаний материалов, которые используются в КМОП технологии и могут быть применены для формирования термопарного сенсора. В качестве моделей взяты биматериальные кантилеверы длиной 100 мкм с шириной нижнего слоя 3 мкм и верхнего – 2 мкм (толщины слоев приведены в таблице 1). Из рисунка видно, что наибольшие деформации возникают в кантилеверах с верхним слоем из Al и поликремния. При этом кантилевер, состоящий из пленок Si₃N₄- SiO₂, практически не деформирован.

Полученные результаты учтены при проектировании термопарных сенсоров матричного ИК приемника формата 64х64 с шагом элементов 125х125 мкм, конструкции которых представлены на рис. 1, а 3D-модели, иллюстрирующие деформации элементов сенсора, – на рис. 3.

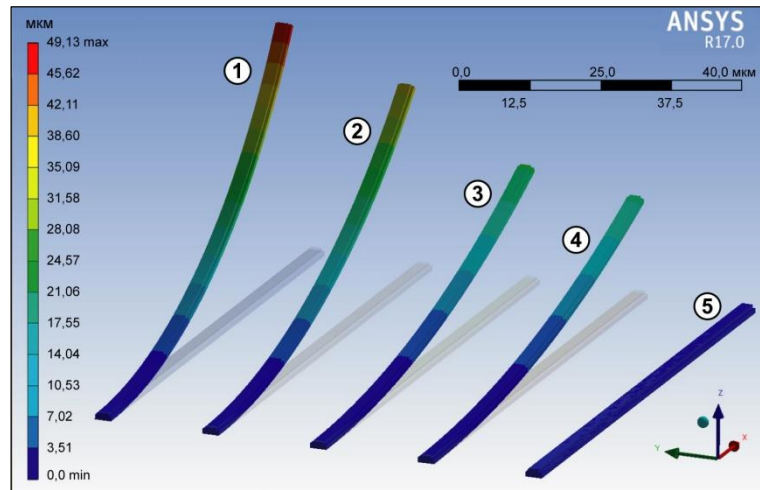


Рис. 2. Результаты моделирования термомеханических деформаций биматериальных кантилеверов (температура формирования 500С) :
1 – Al (верхний)-SiO₂ (нижний), 2 – Al-Si₃N₄, 3 – Si*-SiO₂, 4 – Si*-Si₃N₄, 5 – Si₃N₄- SiO₂

В качестве структуры для мембраны выбрана пара Si₃N₄-SiO₂, которая не приводит к ее существенным деформациям. При этом учтены проведенные в работе [9] спектроскопические исследования пленок Si₃N₄, которые выявили возможность достижения в них высокой (до 85%) эффективности поглощения ИК излучения в диапазоне 8-14 мкм. Деформации в консолях с поликремниевыми термопарами, обладающими высоким коэффициентом Зеебека, минимизированы за счет формирования термопарных шин в виде меандра, в котором встречные участки консолей взаимно компенсируют возникающие нормальные пространственные отклонения. Латеральные сдвиги при этом не существенны, поскольку протяженность участков консолей на вершинах меандра минимальна. Продольно-осевая симметрия топологии сенсора минимизирует угловые сдвиги мембраны. Деформация мембраны от Al-контакта, обеспечивающим омическое соединение анизотипных слоёв поликристаллического кремния на «горячем» спае термопары, может быть снижена за счет выбора минимально допустимых размеров контактной структуры.

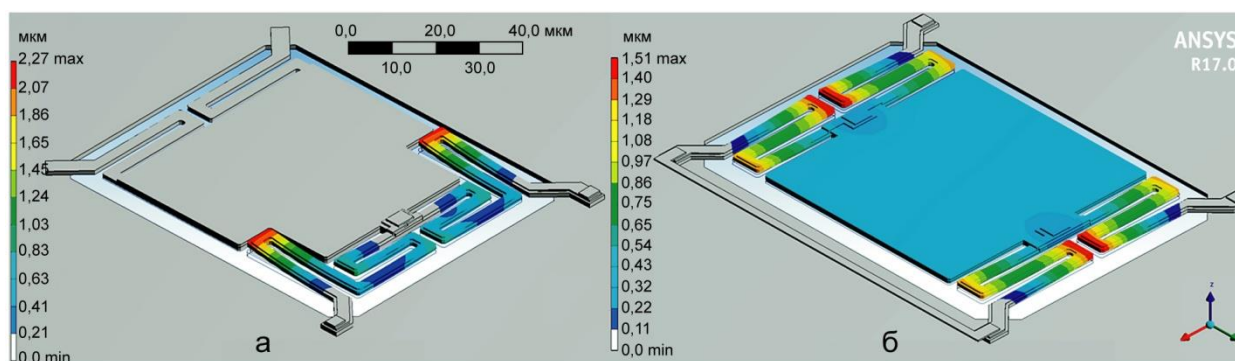


Рис. 3 – Моделирование термомеханические деформаций элементов сенсора, возникающих в процессе формирования структуры при 500С:
а) с одной термопарой, б) с двумя термопарами.

Как видно на рис.3, незначительные деформации на уровне 1,5-2,3 мкм в структуре сенсора, возникают на сгибах термопарных шин. При этом сама мембрана практически не деформирована. В сенсоре с двумя термопарами деформации в 1,5 раза меньше, что связано с меньшей длиной термопар (рис. 3б), при этом мембрана приподнята относительно подложки примерно на 0,5 мкм.

Б. Моделирование переходного процесса теплопереноса

Благодаря хорошей тепловой изоляции и малой тепловой массе мембраны термопарного сенсора создаются предпосылки создания на его основе неохлаждаемых многоэлементных ИК приемников с высокой чувствительностью, линейностью преобразования, малой потребляемой мощностью и высокой скоростью реакции на тепловое воздействие.

Чувствительность сенсора зависит от возможности достижения максимальной термоЭДС между горячим и холодным контактами термопары за конечный временной интервал, ограниченный кадровой частотой ИК приемника, и минимального уровня теплового шума термопары, определяемого ее электрическим сопротивлением [6]. На динамику тепловой релаксации сенсора под действием ИК излучения оказывают влияние два процесса – поглощение тепла мембраной и его перенос к подложке по термопарным консолям. Время выхода сенсора в стационарное состояние определяется теплоемкостью мембраны C и теплопроводностью термопары G_t и должно быть меньше времени кадра τ_f :

$$\tau \approx \frac{C}{G_t} \leq \tau_f. \quad (1)$$

Моделирование процесса тепловой релаксации сенсора позволяет оценить его основные параметры – разность температур между холодным и горячим контактами термопары и, соответственно, термоЭДС, вольт-ваттную чувствительность и минимально разрешимую разность температур (NETD) с учетом ограничений, определяемых кадровой частотой, площадью сенсора, электрофизическими и геометрическими параметрами слоев, входящих в его структуру.

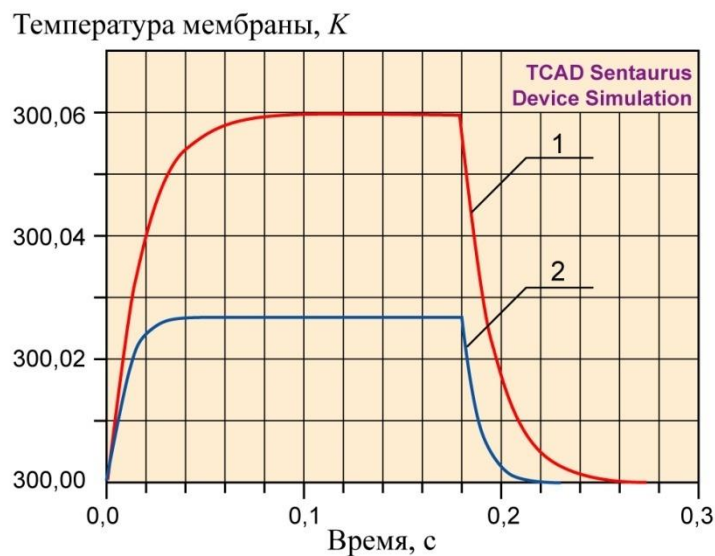


Рис. 4 – Тепловая релаксация мембраны сенсора под действием импульса теплового излучения с интенсивностью 10^{-3} Вт/см² и длительностью 0,2 с:
1 – сенсор с одной термопарой, 2 – сенсор с двумя термопарами.

На рис. 4 представлены результаты моделирования релаксации температуры мембраны под действием импульса теплового излучения с интенсивностью 10^{-3} Вт/см² и длительностью 0,2 с для двух конструкций сенсора. Сенсор с двумя термопарами релаксирует быстрее и показывает меньшую стационарную температуру, что связано с большими тепловыми утечками через термопары. Двукратное увеличение термоЭДС для этой конструкции, однако, приводит к возрастанию общего электрического сопротивления термопар, за счет чего увеличивается NETD.

Оценки параметров термопарных сенсоров, связанные с их реакцией на тепловое излучение, необходимо проводить с учетом возникающих при этом градиентов температуры по площади мембраны. На рис. 5 представлена температурная карта однотермопарного сенсора под действием нагрева тепловым излучением с интенсивностью 10^{-3} Вт/см² при температуре подложки 300К. Видно, что температура «горячего» спая термопары ниже температуры мембраны примерно на 4%.

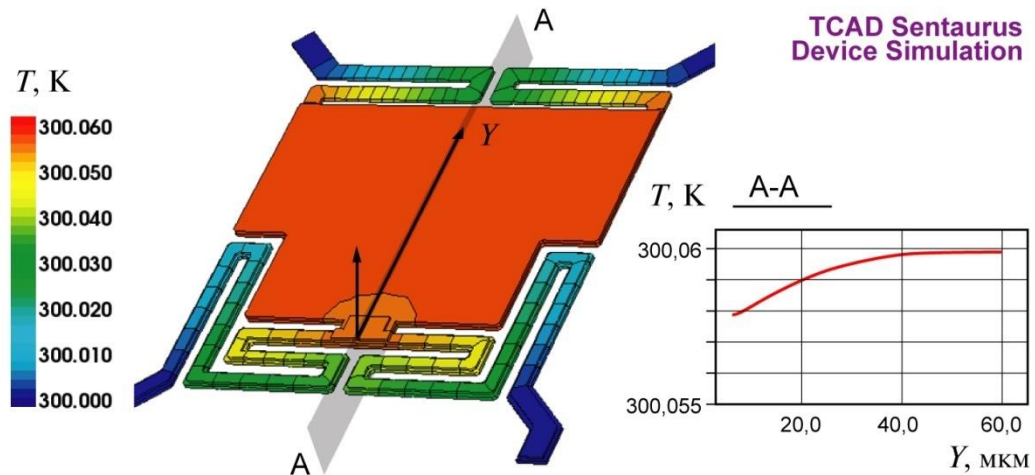


Рис. 5 – Распределение температуры по площади сенсора под действием нагрева тепловым излучением с интенсивностью 10^{-3} Вт/см² при температуре подложки 300К

Результаты моделирования переходного процесса теплопереноса позволяют провести оценку характеристик чувствительности сенсора.

Ниже приведены исходные данные, принятые для оценок рассматриваемых конструкций сенсоров:

- термоЭДС $\Delta V = \alpha \Delta T_t$, где α – коэффициент Зеебека термопары ($\alpha = 300$ мкВ/К), а ΔT_t – разность температур, созданная на термопаре;
- мощность теплового излучения, поглощаемого мембраной сенсором, $P = A \cdot I$, где A – площадь фотоприемной мембраны, а I – использованное при моделировании значение интенсивности теплового излучения ($I = 10^{-3}$ Вт/см²);
- изменение температуры объекта $\Delta T_o = I / \eta q j$, где η – эффективность поглощения ($\eta \approx 0,9$), q – параметр оптики ($q < 0,25$), $j \approx 2,62$ Вт/м²·К (для диапазона 8 ÷ 14 мкм);
- тепловой шум термопары $V_n = \sqrt{4k_B T B R_t}$, где k_B – константа Больцмана, T – температура, B – ширина полосы считывающего тракта ($B = 2/\tau_f$, τ_f – время кадра), R_t – электрическое сопротивление термопар ($R_t = R_{sq} l/w$), $R_{sq} = 20$ Ом/кв, w и l – ширина и общая длина термопар, соответственно.

С учетом данных моделирования основные параметры чувствительности рассмотренных конструкций МЭМС сенсоров с микротермопарами дали следующие оценки.

Для сенсора с одной термопарой:

- вольт-ваттная чувствительность $\Delta V / \Delta P \approx 620$ В/Вт;
- вольтовая чувствительности к изменению температуры объекта $\Delta V / \Delta T_o \approx 1,0$ мкВ/К;
- эквивалентная шуму разность температур на объекте наблюдения при $\tau_f = 0,1$ с

$$NETD = V_n \frac{\Delta T_o}{\Delta V} \approx 28,7 \text{ мК.}$$

Для сенсора с двумя термопарами:

- вольт-ваттная чувствительность $\Delta V / \Delta P = 455$ В/Вт;

- вольтовая чувствительность к изменению температуры объекта $\Delta V/\Delta T_o \approx 0,9$ мкВ/К;
- эквивалентная шуму разность температур на объекте наблюдения при $\tau_f = 0,1$ с $NETD \approx 38,4$ мК.

Авторы выражают благодарность В.А. Федирко за полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор Соглашения о субсидировании RFMEFI57814X0009.

[1] *Paul W. Kruse, David D, Editors. Skatrud, Uncooled Infrared Imaging, Arrays and Systems // Semiconductors and Semimetals, Vol. 47, Academic Press, USA, 1997*

[2] www.heimannsensor.com/products_imaging.php

[3] *T. Kanno, M. Saga, S. Matsumoto, M. Uchida, N. Tsukamoto, A. Tanaka, S. Itoh, A. Nakazato, T. Endoh, S. Tohyama, Y. Yamamoto, S. Murashima, N. Fujimoto, N. Teranishi, Uncooled infrared focal plane array having 128x128 thermopile detector elements // Proc. SPIE, 1994, 2269, pp. 450–459.*

[4] *M. Hirota, Y. Nakajima, M. Saito, F. Satou, M. Uchiyama, 120x90 element thermopile array fabricated with CMOS technology // Proc. SPIE. 2003 V. 4820. pp. 239–249.*

[5] *Р.З. Хафизов, Многоэлементные ИК МЭМС-сенсоры с термопарными преобразователями теплового излучения // Сборник трудов VI Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014», Часть II, М.: ИППМ РАН 2014, С. 193-196.*

[6] *В.А. Федирко, Р.З. Хафизов, Е.А. Фетисов, Оптимальное проектирование МЭМС-элемента приёмника ИК изображения на основе термопары // Сб. трудов VII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2016», под общ ред. акад. РАН А. Л. Стемпковского. Статья принята к печати.*

[7] *В.А. Федирко, Е.А. Фетисов, В.А. Беспалов, Приемники ИК изображения на основе термомеханических наноразмерных мембран // Прикладная физика, 2010, № 1, С. 66–72.*

[8] *В.А. Федирко., Д.А. Зенюк, Моделирование термоотклика мультиморфных микрокантилеверов // Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2009, № 4(8), С.75-81. Изд. Центр МГТУ «Станкин», М, 2009.*

[9] *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. P. 1815-1824.*