

# Многоэлементные ИК МЭМС-сенсоры с термопарными преобразователями теплового излучения

Р.З. Хафизов

ООО «ГрафИмпресс», [imagelab@mail.ru](mailto:imagelab@mail.ru)

**Аннотация** — Рассмотрены состояние и перспективы разработок многоэлементных ИК МЭМС-сенсоров с термопарными преобразователями теплового излучения. Проанализированы возможности оптимизации параметров чувствительных термопарных МЭМС-элементов с использованием материалов и процессов КМОП-технологии.

**Ключевые слова** — эффект Зеебека, тепловое излучение, микроэлектромеханическая система (МЭМС), приемник инфракрасного (ИК) изображения, ИК МЭМС-сенсор.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в связи с активным развитием МЭМС-технологий открылись новые возможности создания эффективных многоэлементных сенсоров, чувствительных к тепловому излучению. Успешные продвижения в этом направлении обусловлены результатами разработок технологических процессов формирования микро- и наноразмерных мембран. Совместимость этих процессов с современной кремниевой КМОП технологией обеспечивает МЭМС-сенсорам достижение высоких характеристик преобразования теплового излучения, прежде всего таких, как чувствительность и быстродействие.

Тонкие (100–400 нм) диэлектрические мембраны, с хорошей тепловой изоляцией относительно кремниевой подложки, с одной стороны, выполняют функцию теплоприемника, а с другой – играют роль несущего основания, на котором формируются элементы, преобразующие изменения тепла в информационные сигналы. Возможности размещения в одном чипе как чувствительных элементов, так и схем усиления и мультиплексирования сигналов, позволяют достичь предельно возможных рабочих характеристик. Важнейшим обстоятельством, выводящим многоэлементные МЭМС преобразователи ИК излучения в особую потребительскую нишу, является то, что они не требуют для своей работы дорогостоящих систем глубокого охлаждения, чем принципиально отличаются от полупроводниковых квантовых ИК фотоприемников. Низкий ценовой уровень при конкурентных характеристиках функционирования стимулирует ускоренный темп разработок, подогреваемый потребностями рынка в недорогих малогабаритных инфракрасных оптико-электронных системах для автоматизированных устройств ИК технического зрения широкого спектра практических применений.

Особое место среди многоэлементных ИК МЭМС приемников занимают сенсоры с чувствительными элементами на основе микротермопар. Такие элементы включают в себя диэлектрическую мембрану с высоким поглощением тепла и несколько последовательно соединенных микротермопар, «горячие» спаи которых расположены на мембране, а «холодные» – имеют хороший тепловой контакт с подложкой. Считывание возникающего при нагревании мембраны термоэлектрического потенциала (эффект Зеебека) осуществляется КМОП схемами, расположенными непосредственно на кристалле.

Благодаря хорошей тепловой изоляции и минимизации тепловой массы термопарных МЭМС элементов создаются предпосылки создания на их основе неохлаждаемых многоэлементных ИК приемников с высокой чувствительностью, линейностью преобразования, малой потребляемой мощностью и высокой скоростью реакции на тепловое воздействие.

## II. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАЗРАБОТОК МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ТЕРМОПАРНЫХ ИК МЭМС СЕНСОРОВ

На основе возможностей использования для построения термопарных ИК МЭМС сенсоров стандартной КМОП технологии в сочетании с современными методами формирования МЭМС структур открываются перспективы решения актуальной проблемы ИК техники – создание дешевой и достаточно эффективной тепловизионной оптико-электронной аппаратуры. Это подтверждается интенсивными работами, которые проводятся ведущими мировыми электронными корпорациями и исследовательскими центрами, и уже полученными к настоящему времени результатами [1-7].

Для достижения высокой чувствительности таких сенсоров необходимы термопары из материалов с высоким коэффициентом термоЭДС, низкой теплопроводностью и низким удельным объемным электрическим сопротивлением. Такие хорошо электропроводящие материалы, как золото, медь и серебро характеризуются относительно слабой термоэлектрической способностью. Наиболее известными термоэлектриками являются сурьма и висмут, которые способны генерировать высокую термоЭДС и обладают низкой тепло- и высокой

электропроводностью. Однако эти материалы не применяются в КМОП технологии и возможности их использования для создания тепловых приемников сопряжены с высокой ценой производства.

Современное электронное производство для создания микротермопар эффективно использует поликристаллический кремний, который по сравнению с сурьмой и висмутом обеспечивает большие величины термоЭДС, хотя и характеризуются более высокими значениями теплопроводности и электрического сопротивления. Вместе с тем, электропроводность и термоЭДС поликремниевых микротермопар можно регулировать путем соответствующего подбора концентрации легирующих примесей. При этом главное преимущество поликристаллического кремния состоит в том, что он является технологически отработанным и широко используемым материалом в производстве КМОП интегральных схем.

В работе [1] представлен многоэлементный тепловой приемник, разработанный с использованием процесса глубинного тылового локального объемного травления кремниевой пластины. Применение указанного процесса обеспечивает возможность интегрирования чувствительных элементов из микротермопар, размещенных на диэлектрических мембранах, с КМОП схемами считывания. Для формирования термопар использовались тонкие шины п-поликремния и алюминия, обеспечивающие коэффициент Зеебека, равный 108 мкВ/К. При размерах элемента 250x250 мкм приемник демонстрировал вольтовую чувствительность 5,83 В/Вт и значение  $D^* = 1,5 \times 10^7 \text{ см Гц}^{-1/2} \text{ Вт}^{-1}$ .

О создании матричного термопарного МЭМС приемника среднего формата (120x90) сообщила компания Nissan Research Center [2]. Чувствительные элементы с шагом 100x100 мкм формировались с использованием термопар из п- и р-поликремния. Приемник изготовлен с помощью стандартной КМОП технологии уровня 0,8 мкм с добавлением семи специальных технологических операций для создания интегрированных МЭМС элементов. При размещении приемника в вакуумном корпусе достигнута чувствительность 2000 В/Вт с возможностью усиления до 3900 В/Вт.

Среди коммерчески реализуемых на рынке изделий с многоэлементными термопарными приемниками необходимо отметить тепловизионную камеру (рис.1) с матрицей 48x47 компании OMEGA Engineering, inc. [3] и модули с матрицами НТРА (Heimann Thermopile Array) с количеством элементов 32x31 и 64x62 фирмы Heimann Sensors GmbH [4]. Компания OMEGA Engineering, inc. указывает для своих камер следующие значения основных параметров:

- диапазон регистрируемых температур, С.....-20 ÷ 300;
- температурное разрешение, С.....0,5;
- рабочая температура, С.....-10 ÷ 50;
- поле зрения, град.....60x60;
- кадровая частота, Гц.....3.



Рис. 1. Камера компании OMEGA Engineering, inc.

В матрицах фирмы Heimann Sensors GmbH в качестве термоэлектрических пар используются узкие поликремниевые шины п- и р-типа. Матрицы собираются в газонаполненные (Xe) или вакуумные корпуса с входной оптикой в виде двойной асферической Ge-линзы. Основные параметры матриц приведены в таблице 1 [5]:

Таблица 1

Основные параметры матриц НТРА фирмы Heimann

Параметры	НТРА 32x31	НТРА 64x62
Шаг элементов, мкм	220	110
Чувствительная площадь, мкм <sup>2</sup>	150x150	60x60
Чувствительность, В/Вт	40	250...1500
Частота кадров, Гц	>20	~5 ÷ 10
Время реакции элемента, мс	< 4	5...80
Суммарный шум, нВ/Гц <sup>1/2</sup>	50	50
Тип интерфейса	SPI	SPI

Фотография НТРА32x31 представлена на рис. 2.



Рис. 2. Фотография модуля с матрицей НТРА32x31

Многоэлементные МЭМС сенсоры с термопарами уже могут использоваться в тепловизионной аппаратуре. На рис. 3 представлен пример теплового изображения, полученный модулем НТРА64х62.



Рис. 3. Пример тепловизионного изображения

К сожалению, в России работы в области термопарных ИК сенсоров не проводятся. Однако результаты отечественных разработок термомеханических МЭМС ИК сенсоров [9], в конструкции которых также используются теплочувствительные диэлектрические мембраны, являются неплохой основой для эффективного развития этого направления.

### III. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОПАРНЫХ МЭМС СЕНСОРОВ

На рис. 4 представлена фотография чувствительного элемента термопарного МЭМС сенсора [6]. Представленный элемент имеет конструкцию, максимально адаптированную к возможностям КМОП технологии. Характерной особенностью топологической конфигурации элемента является то, что большую часть его площади занимает теплоприемная мембрана. При этом только две очень узкие консоли, на которых расположены микротермопары, обеспечивают ее удержание в подвешенном состоянии над кремниевой подложкой кристалла. Важно отметить, что в отличие от традиционных конструкций, где для увеличения термоЭДС в элементе стремились разместить несколько десятков термопар, соединенных последовательно в батарею, этот элемент содержит всего четыре термопары.

Указанные особенности, отражающие современный подход к разработкам многоэлементных термопарных МЭМС сенсоров на базе КМОП технологии, становятся понятными при анализе основных конструктивно-технологических факторов,

влияющих на параметры функционирования данного типа сенсоров.

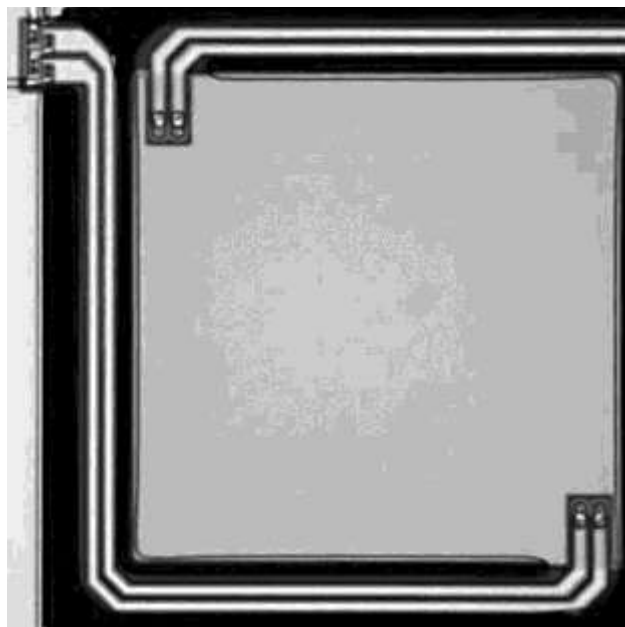


Рис. 4. Фотография чувствительного элемента термопарного МЭМС сенсора

С целью достижения максимальной разности температур между теплыми и холодными концами термопар и, соответственно, получения высокого выходного напряжения, необходимо обеспечить хорошую термическую изоляцию диэлектрической мембраны, воспринимающей тепловое излучение. Операция удаления «жертвенного» слоя между мембраной и подложкой, в результате которой мембрана подвешивается над подложкой на узких консолях на высоте порядка микрометра, и последующее вакуумирование сенсора обеспечивают устранение теплотерь, обусловленных тепловой проводимостью газовой атмосферы. Тепловые потери за счет собственного излучения мембраны, как показывают оценки, оказываются существенно ниже утечек тепла через консоли с размещенными на них слоями материалов термопар. Поэтому понятно, что основная задача при разработке оптимальной конструкции ячейки сенсора и выборе материалов для ее создания состоит в минимизации тепловых утечек через консоли. Для этого слои материалов, которые используются для создания термопар, должны обладать низкой теплопроводностью. Вместе с тем, они также должны характеризоваться высокими значениями коэффициентов Зеебека и хорошей электропроводностью. Это следует из соотношений (1) для термоЭДС  $V_{AB}$  и (2) для теплового шума  $V_N$ , ограничивающего минимальную обнаружимую разность температуры ИК сенсора:

$$V_{AB} = \alpha_{AB} \Delta T = (\alpha_A - \alpha_B)(T_H - T_C), \quad (1)$$

где  $\alpha_A$  и  $\alpha_B$  – коэффициенты Зеебека материалов А и В,  $\alpha_{AB}$  – коэффициент Зеебека термопары,  $T_H$  и  $T_C$  – температуры теплового и холодного концов термопары,

соответственно,  $\Delta T$  – разность температур между этими концами.

$$V_N = \sqrt{4kT\Delta fR}, \quad (2)$$

где  $k$  – константа Больцмана,  $T$  – температура в градусах Кельвина,  $\Delta f$  – полоса частот в Гц,  $R$  – электрическое сопротивление термопары в Ом.

Эти требования конфликтуют друг с другом, их сочетание можно лишь оптимизировать за счет выбора материалов и конструктивно-технологических параметров приемника. Соотношение этих параметров (коэффициент качества), позволяющее оценить эффективность термопарного ИК сенсора, выглядит следующим образом:

$$z = \alpha^2 / \rho\theta, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент Зеебека,  $\rho$  – удельное сопротивление,  $\theta$  – удельная теплопроводность.

График на рис. 5 дает наглядное представление зависимости коэффициента качества термопарного ИК приемника от электрофизических параметров материала [7].

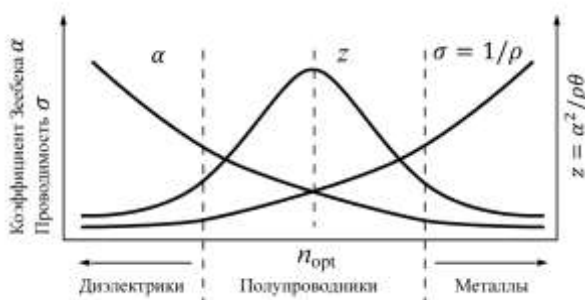


Рис. 5. Термoeлектрические параметры материалов

Из графика видно, что полупроводниковые материалы являются предпочтительными для формирования термопар сенсора, более того, можно определить концентрацию легирующей примеси для получения оптимального значения электрического сопротивления полупроводниковой термопары, которая для поликристаллического кремния составляет  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , что вполне соответствует возможностям стандартной КМОП технологии. Именно в совместности процессов формирования элементов термопарного варианта теплового МЭМС сенсора с КМОП технологией и заключается одно из основных его преимуществ.

Поскольку коэффициент Зеебека у полупроводников существенно выше, чем у металлов, полупроводниковые, в частности поликремниевые, термопары генерируют более высокие значения термоЭДС. При этом величина и знак термоЭДС (и коэффициента Зеебека) зависят от величины концентрации и типа легирующей примеси. При этом, чем ниже электрическая проводимость, тем выше коэффициент Зеебека [8]:

$$\alpha = \pm 0,263 \cdot 10^{-3} \rho \ln(\rho/\rho_0), \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление кремния в Ом\*см, а  $\rho_0 \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом*см}$ . Здесь  $\alpha$  выражено в В/К, положительный знак соответствует p-кремнию, а отрицательный – n-кремнию.

Важно также отметить еще один существенный фактор, который нужно принимать во внимание при разработке. Он состоит в том, что с увеличением количества термопар в чувствительном элементе, увеличиваются также и тепловые утечки через консоли, что снижает  $\Delta T$  и, соответственно, термоЭДС, а также возрастает электрическое сопротивление и, соответственно, тепловые шумы.

#### IV. ВЫВОДЫ

Проанализирован уровень и состояние разработок многоэлементных тепловых МЭМС сенсоров с микротермопарами. С учетом возможностей их реализации на основе базовых процессов и материалов КМОП технологии, обеспечивающих достижение низкого ценового уровня, развитие указанных типов сенсоров представляется весьма перспективным. Рассмотрены основные аспекты оптимизации конструкции и параметров структур, входящих в состав чувствительного элемента сенсора.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (контракт №11927р/21899 от 27.06.2013).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Schaufelbuhl, U. Munch, C. Menfoli, O. Brand, O. Paul, Q. Huang, H. Baltes, 256-pixel CMOS-integrated thermoelectric infrared sensor array // 14<sup>th</sup> IEEE Int. MicroElectroMechanical Systems Conf. (MEMS 2001). 2001. P. 200-203.
- [2] Hirota M., Nakajima Y., Saito M., Satou F., Uchiyama M. 120x90 element thermopile array fabricated with CMOS technology // Proc. SPIE. 2003. V. 4820. P. 239-249.
- [3] www.omega.com/pptst/OSXL-101.html (дата обращения: 28.04.2014).
- [4] Forg B., Leneke W., Schieferdecker J., Schulze M., Simon M., Storck K. Thermopile Sensor Arrays with Internal Amplifiers and Digital Out // Sensor & Test 2008. Nürnberg. Proceedings. P. 249-252.
- [5] www.heimannsensor.com (дата обращения: 28.04.2014).
- [6] Forg B., Herrmann F., Schieferdecker J., Leneke W., Schulze M., Simon M., Storck K. Thermopile Sensor Array with Improved Spatial Resolution, Sensitivity and Image Quality // Sensor & Test 2011. Nürnberg. Proceedings. P. 42-44.
- [7] Zhao Y., Mao M., Horowitz Roberto, Majumdar A., Varesi J., Norton P., Kitching J. Optomechanical Uncooled Infrared Imaging System: Design, Microfabrication, and Performance // Journal of Microelectromechanical Systems. April 2002. Vol. 11. № 2.
- [8] Sze S.M. Semiconductor Sensors. New York: Wiley, 1994.
- [9] Хафизов Р.З., Фетисов Е.А., Лапшин Р.В., Кириленко Е.П., Анастасьевская В.Н., Колпаков И.В. Термомеханическая чувствительность неохлаждаемого биматериального приёмника ИК-диапазона, построенного по технологии микрооптомеханических систем // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 4. С. 520.