

Оптимальное проектирование МЭМС-элемента приёмника ИК изображения на основе термопары

В.А. Федирко^{1,2}, Р.З. Хафизов^{1,3}, Е.А. Фетисов¹

¹ НИУ МИЭТ, fetisov@inim.ru

² МГТУ «Станкин»

³ ООО «ГрафИмпресс»

Аннотация — Рассмотрена задача оптимизации конструкции МЭМС-элемента неохлаждаемого приёмника изображения в инфракрасном диапазоне на основе термопары в качестве термосенсора. Получены соотношения, оптимальным образом реализующие заданные выходные характеристики приёмника. Представлены результаты компьютерного моделирования оптимизированного элемента тепловизионной матрицы и оценки его выходных характеристик.

Ключевые слова — ИК-фотоприёмники изображения, термопара, термо-ЭДС, термосенсор, проектирование ИК-фотоприёмника, оптимизация, компьютерное моделирование, МЭМС-технологии.

I. ВВЕДЕНИЕ

Потребности рынка в недорогих малогабаритных системах технического зрения инфракрасного (ИК) диапазона широкого спектра практических применений стимулируют разработку и создание различных неохлаждаемых приёмников ИК изображения [1-3]. В последние годы активно разрабатываются и находят всё более широкое применение многоэлементные ИК фотоприёмники с чувствительными элементами на основе микротермопар (см., например, [4-6]). Новые перспективы в этом направлении открывает использование высокоразвитой технологии МЭМС, совместимой с современной кремниевой КМОП технологией. Состояние и перспективы разработок многоэлементных фотоприёмных ИК МЭМС с термопарными преобразователями теплового излучения рассматривались в [7]. В настоящей работе рассмотрены вопросы оптимизации конструкции активной части ячейки матричного фотоприёмника ИК изображения на основе микротермопар при заданных выходных характеристиках приёмника.

II. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТА

A. Принципы оптимизации

При конструировании матричного тепловизионного приёмника изображения в качестве основных задаются следующие характеристики: количество элементов матрицы N , определяющее требуемое пространственное разрешение, время кадра

τ_k , задающее временное разрешение, и минимальное разрешаемое изменение температуры объекта δT_m . Количество элементов матрицы при определённом размере кристалла ограничивает максимальную площадь ячейки и, соответственно, за вычетом площади, резервируемой для схемы считывания, площадь S её активной части. Заданное время кадра накладывает ограничение сверху на время тепловой релаксации детектора излучения τ . Минимальное разрешаемое изменение температуры объекта определяет требуемые шумовые характеристики: задаёт NETD – эквивалентную шуму разность температур на объекте наблюдения.

Выходной характеристикой термопары служит напряжение холостого хода (термо-ЭДС)

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

где α – коэффициент Зеебека термопары, ΔT_t – разность температур, созданная на термопаре. Последняя, при регистрации переменного сигнала на частоте f , даётся известным выражением

$$\Delta T_t = \frac{\alpha \cdot \Delta P_f \tau}{C \sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2}}, \quad (2)$$

где ΔP_f – соответствующая частотная составляющая мощности теплового излучения объекта, поглощённая теплоприёмником, C – его теплоёмкость. При дискретной обработке сигнала ширина восстанавливаемого спектра переменного сигнала, согласно теореме Котельникова, равна половине частоты дискретизации [8]. Это приводит к ограничению на время тепловой релаксации термочувствительного элемента:

$$\tau \leq \tau_k / \pi. \quad (3)$$

Собственные шумы термопары определяются тепловым шумом её сопротивления, что даёт следующее значение NETD:

$$NETD = \frac{2C \cdot \sqrt{k_B T B R_t}}{\alpha \cdot (\Delta p / \Delta T) \cdot A \cdot \tau}, \quad (4)$$

где k_B – постоянная Больцмана, T – температура среды, B – ширина полосы считывающего тракта, R_t –

сопротивление термопары, A – площадь теплоприёмника, Δp – поглощённая единицей площади теплоприёмника избыточная мощность излучения абсолютно чёрного тела, нагретого до температуры $T + \Delta T$, в рассматриваемом спектральном диапазоне при расположении сенсора в фокальной плоскости оптической системы.

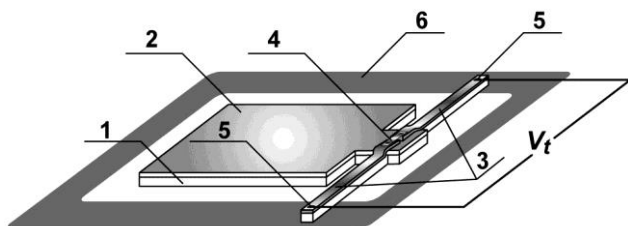


Рис. 1. Схема МЭМС элемента приёмника ИК-изображения: 1 – мембрана, 2 – поглощающий слой, 3 – консоли с термопарой, 4 – «горячий спай» термопары, 5 – «холодные» контакты термопары, 6 – подложка

Активная часть элемента фотоприёмной матрицы МЭМС с термопарой показана схематично на рис. 1. Мембрана с поглощающим слоем подвешена на микроконсолях, выполненной из теплоизолирующего материала. На поверхности консоли сформирована термопара, один «спай» которой нагревается мембраной, а контакты к другому расположены на подложке, имеющей стабильную температуру. Считывание возникающей при нагревании мембраны термо-ЭДС осуществляется КМОП ИС, расположенной непосредственно на кристалле. К такой схеме может быть без труда сведена реальная конструкция. Мембрана и консоли формируются на кремниевой подложке, например, из термического диоксида кремния путём травливания кремниевой подложки. В качестве поглощающего может использоваться, в частности, слой нитрида кремния, обеспечивающий достаточно эффективное поглощение ИК излучения в интересующей области $8 \div 14$ мкм. Термопара изготавливается из анизотипных (p и n) шин поликристаллического кремния, обладающих достаточно высокими значениями коэффициента термо-ЭДС. Технология создания такого МЭМС сенсора хорошо совмещается с кремниевой КМОП технологией.

Время тепловой релаксации такого элемента определяется, в основном, теплопроводностью термопары G_t :

$$\tau \approx \frac{C}{G_t}. \quad (5)$$

Сравнение соотношений (1), (4), (5) показывает, что наименьшее значение NETD такого термочувствительного МЭМС элемента достигается в конструкции с одной термопарой: последовательное соединение нескольких термопар не приводит в этом случае к увеличению напряжения холостого хода

элемента, поскольку пропорционально уменьшается температура мембраны вследствие увеличения суммарной теплопроводности. Но при этом возрастает общее электрическое сопротивление, что приводит, согласно (4), к увеличению NETD.

Площадь активной части ячейки матрицы в представленной схеме делится между площадью фотоприёмной мембраны A и площадью консоли A_c :

$$S = A + A_c; \quad A_c = 2\mu w_t \cdot l, \quad (6)$$

где w_t – ширина одного плеча термопары, l – длина консоли, μ – коэффициент «смежности», учитывающий наличие необходимых зазоров. Оптимизация конструкции состоит, таким образом, в определении оптимальных геометрических размеров мембраны и консолей с термопарой, обеспечивающих достижение заданного минимального разрешаемого изменения температуры объекта δT_m при ограниченной площади S термосенсора и максимально допустимом времени его тепловой релаксации τ :

$$NETD < \delta T_m. \quad (7)$$

Теплопроводность термопары даётся выражением:

$$G_t = \frac{2k_t w_t h_t}{l}, \quad (8)$$

а её электрическое сопротивление

$$R = \frac{2\rho_t l}{w_t h_t}, \quad (9)$$

где h_t – толщина материала термопары (поликремний), k_t – коэффициент теплопроводности материала термопары, ρ_t – его удельное сопротивление (предполагается, что оба плеча термопары имеют близкие по значению сопротивления). Оптимизация геометрии конструкции осуществляется тогда минимизацией

$$NETD \approx \frac{4k_t \sqrt{2k_B T \rho_t w_t h_t B}}{\alpha(\Delta p / \Delta T)} \cdot \frac{1}{A\sqrt{l}} \quad (10)$$

по переменным A и l при дополнительных условиях:

$$A + 2\mu w_t \cdot l = S \quad (11)$$

и

$$\tau = \frac{cAl}{2k_t w_t h_t} \leq \tau_k / \pi, \quad (12)$$

где мы ввели теплоёмкость единицы площади мембраны c .

Значения A , A_c и l , которые доставляют минимум NETD при условии (11) суть:

$$A = \frac{2}{3}S, \quad A_c = \frac{1}{3}S, \quad l = \frac{S}{6\mu w_t}. \quad (13)$$

Одновременное выполнение условий (11) и (12) приводит к уравнению:

$$A^2 - AS + \frac{4k_t \mu w_t^2 h_t \tau}{c} = 0, \quad (14)$$

что совместно с (6) приводит к соотношениям:

$$\frac{A}{S} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{16k_t \mu w_t^2 h_t \tau}{cS^2}} \right) \quad (15)$$

$$\frac{A_c}{S} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{16k_t \mu w_t^2 h_t \tau}{cS^2}} \right)$$

Как видно, условия (11) и (12) совместны, только если

$$S \geq 4 \sqrt{k_t \mu w_t^2 h_t \tau / c}. \quad (16)$$

Этим определяется минимально возможная площадь сенсора для заданного τ при прочих фиксированных параметрах структуры. Или, наоборот, максимальное время тепловой релаксации, которое может быть реализовано при заданной площади сенсора:

$$\tau \leq \frac{cS^2}{16k_t \mu w_t^2 h_t}. \quad (17)$$

Соотношение (17) иллюстрируется рисунком 2, представляющим зависимость времени релаксации от соотношения площадей A/S .

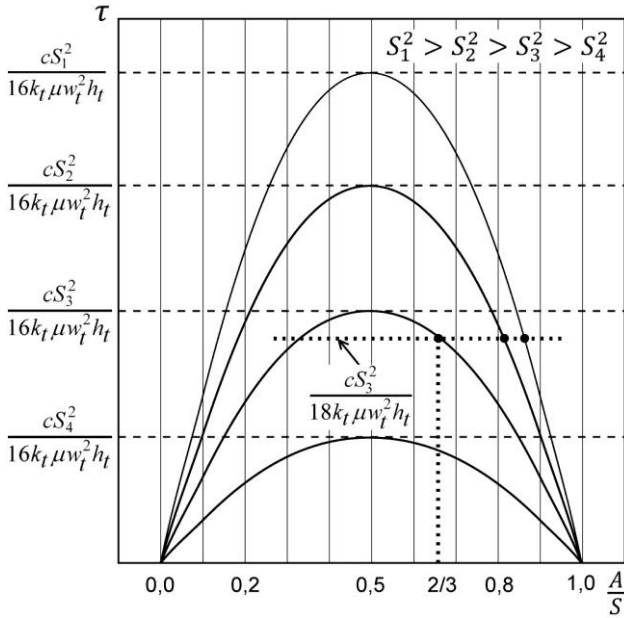


Рис. 2. Зависимость времени тепловой релаксации сенсора от отношения площади мембраны к активной площади сенсора

Сравнивая (15) и (13), находим, что реализация оптимального значения NETD по A и l для заданного τ

при прочих фиксированных параметрах структуры возможна лишь при определённом значении площади сенсора:

$$S = 3 \cdot \sqrt{2k_t \mu w_t^2 h_t \tau / c}, \quad (18)$$

и с соотношением (13) площадей мембраны и консолей. С другой стороны, для заданной площади S соотношение (17) определяет значение времени релаксации в оптимизированной геометрии:

$$\tau = \frac{cS^2}{18k_t \mu w_t^2 h_t}, \quad (19)$$

что, согласно (12), (16), приводит к условию:

$$S \leq 3 \sqrt{2k_t \mu w_t^2 h_t \tau_k / \pi c}, \quad (20)$$

при котором возможна описанная выше оптимизация геометрии термочувствительного элемента.

Наименьшее значение NETD и наибольшее значение напряжения холостого хода реализуется по (2), (4) при максимальном значении времени тепловой релаксации сенсора, допускаемым соотношением (12): $\tau = \tau_k / \pi$. Оно, однако, может быть реализовано, согласно (17), только лишь когда

$$S = S_{opt} = 3 \cdot \sqrt{2k_t \mu w_t^2 h_t \tau_k / \pi c} \quad (21)$$

при оптимальном соотношении (13) площадей мембраны и консолей.

Соответствующее оптимизированное значение NETD:

$$NETD = \frac{6(k_t w_t h_t) \sqrt{6 \mu k_B T r_{\square}}}{\alpha \eta q j \cdot S_{opt}^{3/2} \tau_k^{1/2}} = \frac{2 \cdot \sqrt{k_B T \rho_t}}{\alpha \eta q j \tau_k^{5/4}} \cdot (\pi c)^{3/4} \cdot \left(\frac{k_t}{2 \mu w_t^2 h_t} \right)^{1/4} \quad (22)$$

В (22) мы учли, что $(\Delta p / \Delta T) = \eta q j$, где η — доля поглощаемого теплоприёмной мембраной падающего излучения в рассматриваемом спектральном диапазоне, q — оптический фактор: $q = H t_o / 4$, где H — светосила, а t_o — пропускание объектива, $j \approx 2,62$ Вт/м²·К для диапазона 8÷14 мкм, а также положили, в соответствии со сказанным выше, $B = 1/2 \tau_k$ и ввели поверхностное сопротивление материала термопары $r_{\square} = \rho_t / h_t$.

Приведём некоторые оценки с типичными параметрами элемента с поликремниевой термопарой, задаваемыми МЭМС-технологией с проектными нормами 1,2 мкм: $h_t = 0,5$ мкм, $w_t = 2$ мкм, $c = 2$ Дж/м²·К, $\mu = 2,5$, $r_{\square} = 20$ Ом, $k_t = 25$ Вт/м·К, $\alpha = 300$ мкВ/К [9]. Для $\tau_k = 0,05$ с, $\eta = 0,5$, $H = 1$, $t_o = 0,9$ найдём по (21), (13) и (22):

$$S_{opt} \approx 4200 \text{ мкм}^2, \quad A \approx 2800 \text{ мкм}^2, \quad l \approx 140 \text{ мкм}; \quad (23)$$

$$NETD \approx 27 \text{ мК}. \quad (24)$$

Приведём также выражения для вольт-ваттной чувствительности оптимизированного термосенсора $\Delta V/\Delta P$ и его вольтовой чувствительности к изменению температуры объекта $\Delta V/\Delta T_o$, также используемые для характеристики элемента:

$$\Delta V/\Delta P = \frac{3\alpha\tau_k}{2\pi c S_{opt}}; \Delta V/\Delta T_o = \eta q j \cdot \frac{\alpha\eta\tau_k}{\pi c}. \quad (25)$$

Для элемента с принятыми выше значениями параметров получим

$$\Delta V/\Delta P \approx 850 \text{ В/Вт}, \Delta V/\Delta T_o \approx 0,75 \text{ мВ/К} \quad (26)$$

Заметим попутно, что максимальные значения $\Delta V/\Delta P$ и $\Delta V/\Delta T_o$ достигаются при другом соотношении площадей (см. также рис.2):

$$A=A_c=S/2.$$

Это связано с тем, что с увеличением длины термопары растёт её сопротивление и, соответственно, её тепловые шумы.

Значение NETD (22) должно удовлетворять соотношению (7), а оптимизированная площадь сенсора не должна превышать величину S_p , определяемую заданным форматом фотоприёмника и размером кристалла S_c : $S_p < S_c/N$. Отсюда получаем требование, которому должны удовлетворять параметры системы для достижения необходимого разрешаемого изменения температуры объекта δT_m при заданном формате и выбранном времени кадра τ_k :

$$\frac{k_t w_t \sqrt{\mu \rho_t h_t}}{\alpha \eta q} < \frac{j \tau_k^{1/2} \delta T_m \left(\frac{S_c}{N} \right)^{3/2}}{6 \sqrt{6 k_B T}}. \quad (26)$$

Требования к технологическим параметрам сенсора, как видно из (24), повышаются при увеличении формата матрицы и частоты кадров, и при повышении требований к разрешению по изменению температуры объекта. Требуемые характеристики могут быть достигнуты по (24) путём уменьшения ширины и толщины термопары, повышением поглощательной способности теплоприёмника, и оптимизацией отношения $\sqrt{\rho_t}/\alpha$. Так при $h_t = 0,1 \text{ мкм}$, $w_t = 1 \text{ мкм}$, $c = 2 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К}$, $\mu = 2,5$ при $\tau_k = 0,05 \text{ с}$, $\alpha = 300 \text{ мВ/К}$, $r_{\square} = 20 \text{ Ом}$, $\eta = 0,8$, $H = 1$ найдём из (21), (22):

$$S_{opt} \approx 1500 \text{ мкм}^2, \text{ NETD} \approx 8,5 \text{ мК}, \quad (27)$$

что открывает возможность создать приёмник формата 128×128 с шагом элементов $50\text{--}60 \text{ мкм}$ и высоким разрешением по температуре. Необходимо, однако, отметить, что для регистрации теплового воздействия, соответствующего представленным уровням NETD, необходимо выполнить предварительное усиление сигнала сенсора непосредственно в ячейке с последующей его обработкой схемой, интегрированной в кристалл [10].

В. Моделирование оптимизированной конструкции.

На основе полученных результатов был спроектирован оптимизированный элемент ИК-фотоприёмной матрицы 64×64 на кристалле размером $\sim 9 \times 9 \text{ мм}$, с шагом 125 мкм , ориентированный на имеющиеся технологические возможности. Поскольку площадь на один элемент в таком формате достаточно велика, в конструкции использована двухсторонняя подвеска мембраны на консолях для более надёжного её закрепления. Мембрана и консоли выполняются из термического оксида кремния толщиной $0,5 \text{ мкм}$ путём травли кремниевой подложки с тыльной стороны, ширина консоли $w = 2 \text{ мкм}$. В качестве поглощающего используется слой нитрида кремния толщиной $0,6 \text{ мкм}$, что согласно проведенным спектроскопическим исследованиям [11] обеспечивает эффективность поглощения $\eta \approx 0,5$. Теплоёмкость мембраны с поглощающим слоем составляет в этом случае $c \approx 2 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К}$, коэффициент смежности $\mu = 2,5$. Термопара формируется только на одной консоли осаждением анизотипных слоёв поликристаллического кремния толщиной $0,5 \text{ мкм}$, поверхностное сопротивление слоёв $r_{\square} \approx 20 \text{ Ом}$. Фотоприёмник проектировался на частоту 20 кадров в секунду, то есть $\tau_k = 0,05 \text{ с}$. Оптимизация элемента осуществлялась, разумеется, по активной части структуры, состоящей из мембраны и термопары, что приводит к результатам (23), которые и реализованы в конструкции, представленной на рис. 3.

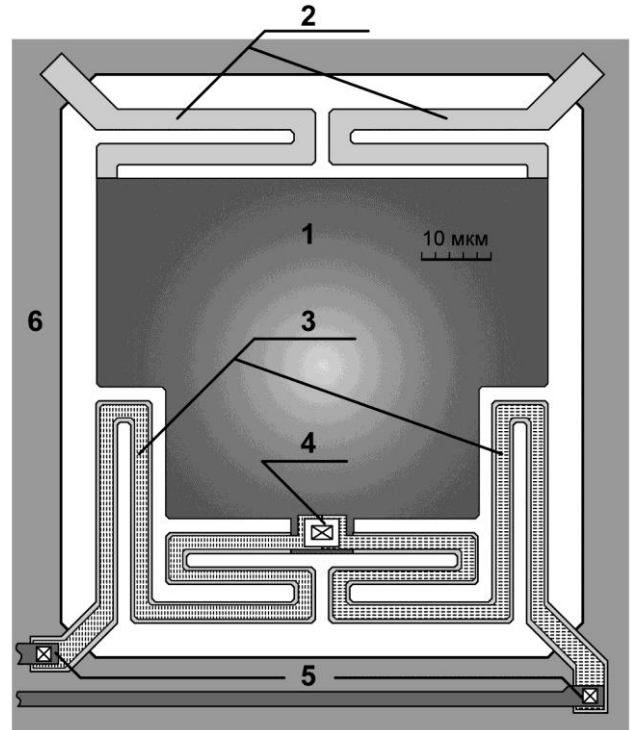


Рис. 3. Конструкция элемента ИК-фотоприёмника: 1 – мембрана с поглощающим слоем, 2 – свободные консоли, 3 – консоли с термопарой, 4 – «горячий» спай термопары, 5 – «холодные» контакты термопары, 6 – подложка

На рис. 4 показаны результаты моделирования переходного процесса теплопереноса в представленном элементе под действием импульсного теплового излучения мощности 10^{-3} Вт/см² длительностью 0,2 с. Моделирование осуществлялось с помощью САПР SYNOPSIS TCAD.

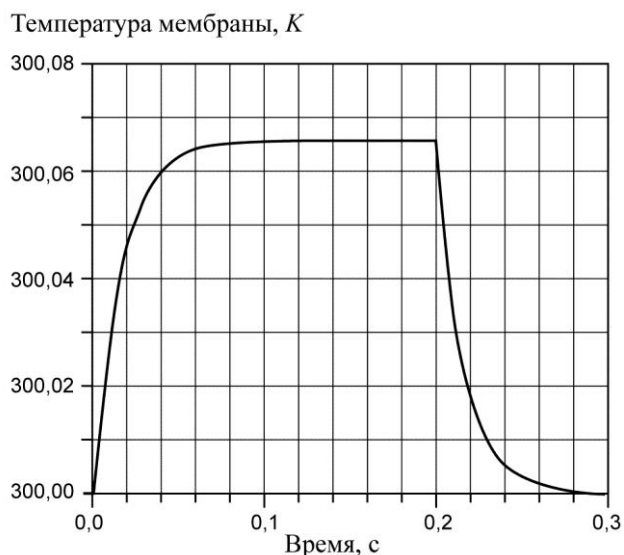


Рис. 4. Переходный процесс при импульсном воздействии теплового излучения

Оценка времени релаксации по переходной характеристике рис. 3 даёт $\tau \approx 0,016 \text{ с} \approx \tau_{\text{т}}/\pi$. Полагая, как и ранее, $\alpha = 300$ мкВ/К, $\eta = 0,5$, $H = 1$, $q \approx 0,225$, получим также оценку вольт-ваттной чувствительности:

$$\Delta V / \Delta P \approx 730 \text{ В} / \text{Вт},$$

что практически совпадает с (26). Некоторое уменьшение связано с теплоотводом по микроконсолям, который не учтен в (26). При выбранном сопротивлении термопары это даст для NETD оценку близкую к (24). Предварительное усиление сигнала выполняется КМОП ИС, реализуемой непосредственно в ячейке.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены теоретические соотношения, оптимизирующие конструкцию термочувствительного элемента матрицы приёмника изображения в ИК-диапазоне при заданных выходных характеристиках фотоприёмника. 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.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Г.И. Орешкину за полезные обсуждения и А.Е. Тимофееву за проведение численных расчётов.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, уникальный идентификатор Соглашения о субсидировании RFMEFI57814X0009. В работе использовались результаты проекта РФФИ № 15-07-06082.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. W. Kruse, D. D. Skatrid, *Editors*, Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems // Semiconductors and Semimetals, v. 47, Academic Press, USA, 1997.
- [2] 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.
- [3] V.A. Fedirko, E.A. Fetisov and K.K. Svidzinsky, Performance Limit of Infra-Red Thermomechanical Imager with Optical Readout // Universal Journal of Applied Science, 2014, v. 2, № 5, pp. 99–103.
- [4] A. Schaufelbuhl, U. Munch, C. Menfoli, O. Brand, O. Paul, Q. Huang, H. Baltes, 256-pixel CMOS-integrated thermoelectric infrared sensor array / 14th IEEE Int. MicroElectroMechanical Systems Conf. (MEMS 2001). 2001, pp. 200–203.
- [5] 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.
- [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 Proceedings. Nürnberg, 2011, pp. 42–44.
- [7] Р.З. Хафизов. Многоэлементные ИК МЭМС-сенсоры с термопарными 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.: ИПИМ РАН, 2014, С. 193-196.
- [8] Котельников В. А., О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет / Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. *Репринт статьи* в журнале УФН, 2006, т. 176, №7, С. 762–770.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.