

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕМБРАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИЁМНИКА ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

© Р. И. Аль-Натах

ОАО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Рассмотрена конструкция элементов матрицы приёмника ИК-излучения, работающего на основе зависимости тока обратно смещённого p-n перехода от температуры. Для данной конструкции решена тепловая задача, результатом которой являлись рассчитанные значения тепловой постоянной времени и стационарное значение температуры нагрева. Получены зависимости переходной функции температуры и её профили при различных толщинах металлизации и элементов матрицы. Проведена оптимизация конструкции матрицы с точки зрения геометрии и свойств используемых материалов. В результате выбран наиболее подходящий вариант её конструкции с точки зрения эффективности нагрева элементов матрицы.

Ключевые слова: тепловая задача, переходная функция, мембранная конструкция, тепловая постоянная, моделирование, метод конечных элементов, теплоёмкость, теплопроводность, матрица

Сведения об авторах: Аль-Натах Ренат Ибрагимович, al-natah@pulsarnpp.ru

SIMULATION AND OPTIMIZATION OF IR-RADIATION RECEIVER MEMBRANE STRUCTURE THERMAL CHARACTERISTICS

R. I. Al-Natakh

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

Structure of IR-radiation receiver matrix based on the dependence of reverse biased p-n junction current on temperature was investigated. Thermal analysis have been performed for the given structure, resulting in the simulated values of thermal time constant and stationary heating temperature. Dependence of transitional heating function and its profiles on different values of metallization thickness and matrix elements were obtained. Optimization of matrix structure in terms of geometry and material properties was performed, resulting in the most suitable structure in terms of effectiveness of matrix elements heating.

Keywords: thermal analysis, transition function, membrane structure, thermal constant, simulation, finite element method, heat capacity, thermal conductivity, matrix

Data of authors: Al-Natakh Renat Ibragimovich, al-natah@pulsarnpp.ru

Введение

В настоящее время неохлаждаемые тепловые приёмники имеют широкое применение в устройствах мониторинга и сигнализации, в системах контроля температурной стабильности, в системах охраны и обнаружения очагов возгорания и т.д.

Неохлаждаемые тепловые приёмники, хотя и уступают фотонным и квантовым по своим предельным параметрам, обладают целым рядом характеристик, которые делают их незаменимыми в обширной области применений. В частности, это относится к задачам наблюдения и распознавания объектов на небольших расстояниях (до

2500 м), инфракрасной микроскопии и т.п. Главное преимущество тепловизионных систем на многоэлементных тепловых приёмниках по отношению к системам с фотонными и квантовыми приборами, заключается в том, что для их работы не требуется охлаждения до криогенных температур. Ещё в конце 70-х гг. в США был дан старт нескольким большим программам, финансировавшим работы по развитию технологий ИК-приёмников двойного применения [1, 2].

Главной целью этих проектов было создание неохлаждаемых, полностью твердотельных, механически несканируемых систем формирования тепловизионных изображений. Перед разработчиками была поставлена задача создания приборов, которые по своим характеристикам для ряда задач (ИК-прицелы, ИК-бинокли, системы ИК-обзора для транспортных средств, беспилотные малогабаритные системы авиаразведки) могли бы быть сопоставимы с характеристиками криогенных систем, обеспечивая при этом существенное снижение стоимости, упрощение требований к логическим схемам обработки сигналов и значительное увеличение надёжности [3, 4].

Постановка задачи

В данной работе следует определить значение тепловой постоянной времени нагрева конструкции и переходной функции температуры при различных геометриче-

ских параметрах ИК-матрицы. Переходная функция температуры определяется при условии изменения температуры сцены на 1 К и начальной температуре 300 К.

Моделирование и расчёт тепловой задачи для матрицы ИК-приёмника проводились из соображения оптимизации конструкции приёмника таким образом, чтобы максимально и эффективно использовать энергию падающего теплового излучения. Тепловая постоянная времени представляет собой величину, характеризующую инерционность нагрева и охлаждения материала в связи с его теплоёмкостью и теплопроводностью. Тепловая постоянная времени равна отношению теплоёмкости к теплопроводности конструкции.

Идеальный случай представляет собой нагрев свободной пластины, находящейся в вакууме, когда её тепловые потери идут только на обратное излучение в вакууме. В этом случае тепловая постоянная времени и стационарная температура будут больше, так как отсутствуют тепловые потери за счёт теплопроводности. В данной работе используется металлизация, так как она необходима для создания схемы считывания. Её толщина, с одной стороны, должна быть минимальной настолько, чтобы тепловые помехи, связанные с высокой теплопроводностью металлов, были минимальными, а с другой стороны, толщина должна быть такой, чтобы можно было изготовить эту конструк-

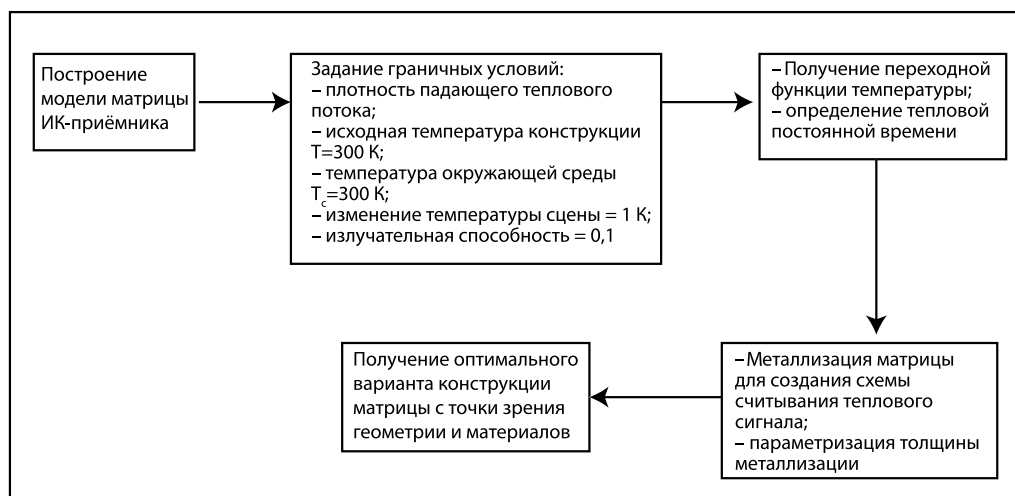


Рис. 1

Блок-схема постановки задачи

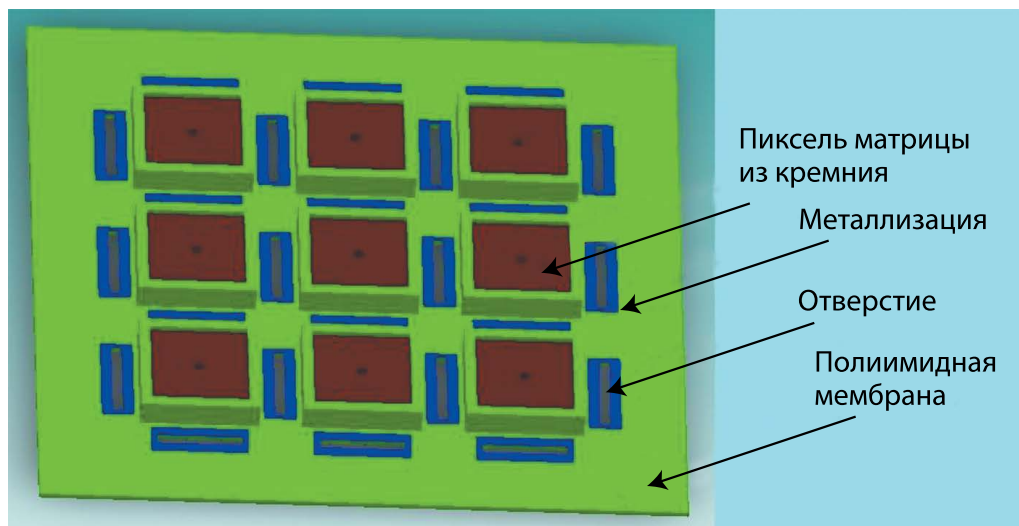


Рис. 2

Общий вид модели конструкции приёмника ИК-излучения

цию с точки зрения современных технологических норм. С этой целью в поставленной задаче рассматривается моделирование теплопроводности конструкции при различных толщинах металлизации и при различных свойствах используемых металлов.

Конструкция матрицы

Данная матрица представляет собой мембранную конструкцию. В качестве материала для поддерживающей мембраны используется полиимид. Он обладает низкой теплопроводностью (0,147 Вт/(м·К)). На полиимидной мембране крепятся элементы матрицы из кремния и поликремния, представляющие собой диодную структуру [5-7]. Между пикселями располагаются прямоугольные отверстия, служащие барьерами для растекания тепла по всей конструкции. Появление тепла вызвано нагревом центрального элемента матрицы падающим излучением. Вокруг отверстий расположена металлизация из хрома. На обратной стороне матрицы эта металлизация проходит между пикселями в виде тонкой линии. Металлизация делается максимально тонкой и узкой для уменьшения общей теплопроводности конструкции и препятствия растеканию тепла по её элементам.

Расчёты проводились для матрицы с размерами пикселей 17x17 мкм². Толщи-

на пикселей составляет 5 мкм. Толщина металлизации находится в пределах 0,1-0,001 мкм. На рис. 2 показан общий вид конструкции матрицы, промоделированной средствами САПР CoventorWare [3].

Методики моделирования и расчёта

Для осуществления моделирования и расчёта конструкции матрицы использовались средства современных систем автоматизированного проектирования, такие как CoventorWare [8] и Ansys [9]. Программный пакет CoventorWare представляет собой комплекс средств для моделирования МЭМС устройств, начиная от формирования шаблонов, масок и описания технологического маршрута и заканчивая расчётами цельной конструкции. Программный пакет Ansys представляет собой комплекс средств построения различных моделей с любыми размерами. Данный комплекс позволяет построить различные модели устройств и рассчитать их характеристики как механические, так и тепловые. На рис. 3 показаны этапы технологического маршрута изготовления конструкции данной матрицы средствами системы автоматизированного проектирования CoventorWare [8]:

0 – формирование подложки толщиной 50 мкм;

1 – травление отверстия в подложке;

Number	Step Name	Layer Name	Material Name	Thickness	Mask Name	Photoresist	Depth	Mask Offset	Sidewall Angle	Comments
0	Substrate	Substrate	Silicon	50	layer1					
1	Straight Cut				layer2	-		0	0	
2	Planar Fill	BPSG	BPSG	0						
3	Stack Material	Pixels	Silicon	5						
4	Straight Cut				layer3	+		0	0	
5	Conformal Shell	Polyimide	POLYIMIDE	1						
6	Straight Cut				Polyimide	+		0	0	
7	Straight Cut				layer6	-		0	0	
8	Conformal Shell	Al_Front	CHROMIUM	0.01						
9	Straight Cut				layer7	+		0	0	
10	Straight Cut				layer8	-		0	0	
11	Delete		BPSG							
12	Delete	Substrate								
13	Stack Material	Al_Back	CHROMIUM	0.01						
14	Straight Cut				Polyimide	+		0	0	
15	Straight Cut				layer9	-		0	0	
16	Straight Cut				layer9	-		0	0	
17	Straight Cut				layer8	-		0	0	
18	Straight Cut				layer8	-		0	0	
19	Straight Cut				layer6	-		0	0	

Рис. 3

Этапы моделирования технологического процесса изготовления конструкции матрицы приёмника ИК-излучения

2 – заполнение отверстия жертвенным слоем из борофосфор-селикатного стекла BPSG;

3 – осаждение кремния толщиной 5 мкм для формирования пикселей матрицы;

4 – формирование маски для вытравливания кремния с целью формирования матрицы;

5 – конформное осаждение полиимида для создания поддерживающей мембраны;

6 – формирование маски для вытравливания необходимой части полиимидной мембраны;

7 – формирование маски с негативным фоторезистом для вытравливания отверстий в мембране;

8 – конформное осаждение металлизации из хрома;

9 – формирование маски для вытравливания необходимой части металлизации;

10 – формирование маски с негативным фоторезистом для вытравливания отверстий и дорожек в металлизации;

11 – удаление жертвенного слоя;

12 – удаление подложки (это необходимо для модели), так как нет необходимости в расчёте тепловых характеристик подложки;

13 – осаждение металлизации на заднем фронте мембраны;

14 – вытравливание необходимой части полиимидной мембраны;

15 – 19 – формирование множества масок для селективного травления отдельных частей кремния, металлизации и мембраны.

В программных пакетах CoventorWare и Ansys расчёты производятся методом конечных элементов МКЭ [10]. Он заключается в том, что модель разбивается специальной сеткой на отдельные элементы, для каждого из которых производится расчёт той или иной характеристики. Для каждого элемента составляется система интегрально-дифференциальных уравнений, которые решаются различными численными методами в рамках возможностей данных программных пакетов. На рис. 4 показана трёхмерная модель конструкции данной матрицы с привязанной к ней сеткой для расчета методом конечных элементов, построенной в программном пакете CoventorWare [8].

На основании созданных шаблонов, масок и технологических этапов в программном пакете CoventorWare строится трёхмерная модель конструкции, для которой задаётся сетка для её расчёта методом конечных элементов.

Перед запуском расчётной части программного пакета следует задать начальные и граничные условия. В данной задаче задавались значения падающего теплового потока и начальной температуры. Тепловой поток падает на центральный элемент ма-

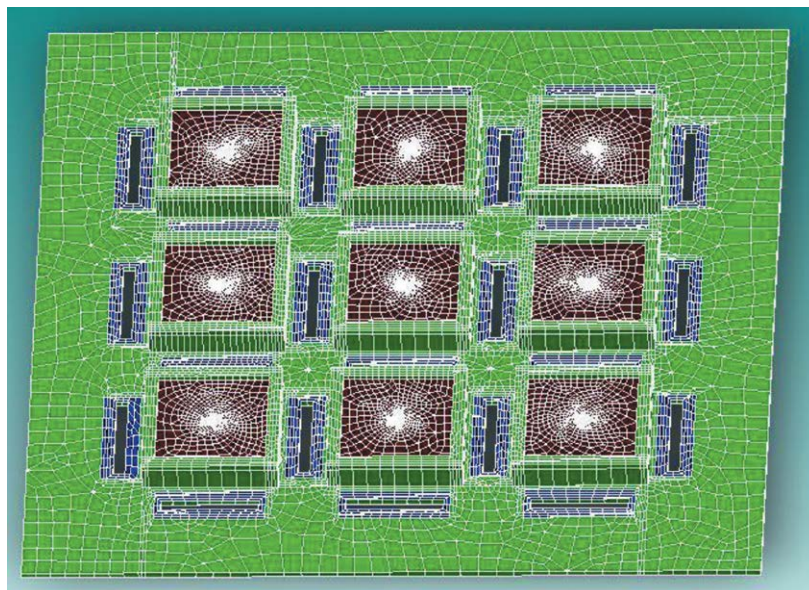


Рис. 4

**Трёхмерная модель приёмника с привязанной к ней сеткой
для расчёта методом конечных элементов**

трицы. Его значение составляет $0,61 \text{ Вт/м}^2$. Это значение рассчитывалось по закону Ньютона о теплообмене излучением. Начальная температура конструкции составляет 300 К . Изменение температуры сцены составляет 1 К . Закон Ньютона математически описывается следующим образом [11]:

$$q = H(T - T_0), \quad (1)$$

где q – мощность излучения, приходящаяся на единицу площади, H – коэффициент пропорциональности, T – текущая температура тела, T_0 – температура окружающей среды. Но закон излучения Планка имеет вид:

$$q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где ε – коэффициент излучения, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Разлагая функцию T^4 в ряд по степеням $T - T_0$, ограничиваясь линейными по $T - T_0$ слагаемыми и, учитывая (2), получим:

$$q = 4\varepsilon \sigma T_0^3 (T - T_0), \quad (3)$$

где $T - T_0 = 1 \text{ К}$ (изменение температуры сцены), $T_0 = 300 \text{ К}$. Подставляя эти значения в (3), получим величину плотности теплового потока, равной $0,61 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, которая задаётся в качестве граничного условия в программном пакете CoventorWare. Методом конечных элементов для данной конструкции матрицы решается уравнение теплопроводности [6]:

$$\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 = (k/\rho c) \partial T / \partial t, \quad (4)$$

где T – искомая температура, k – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, c – удельная теплоёмкость, t – время. Уравнение теплопроводности (4) является двумерным, так как тепловой поток распространяется в плоскости xu в силу того, что теплоотвод располагается по периметру конструкции. В табл. 1 приведены свойства материалов, используемых при моделировании и решении данной задачи.

Как видно из таблицы, у никеля и у хрома коэффициенты теплопроводности являются наименьшими по сравнению, например, с алюминием или с медью. Поэтому, в качестве металлизации лучше использовать хром или никель.

Таблица 1

Некоторые физические свойства материалов, используемых при моделировании данной тепловой задачи

Материал	Коэффициент теплопроводности Вт/(м·К)	Плотность г/см ³	Удельная теплоёмкость Дж/(кг·К)
Алюминий	238	2,7	8,8·10 ²
Кремний	145	2,3	7,0·10 ²
Медь	401	8,9	3,85·10 ²
Молибден	138	10,2	2,56·10 ²
Никель	90,9	8,9	4,6·10 ²
Полиимид	0,147	2,5	6,16·10 ²
Хром	93,9	7,2	4,61·10 ²

Результаты моделирования и расчёта

В качестве результатов представлены зависимости средней температуры центрального пикселя матрицы от времени при различной толщине металлизации. На рис. 5 показана мгновенная картина распределения температуры в момент времени 0,02 с (стандартное время одного кадра для телевизионных систем) при толщине металлизации хромом 0,01 мкм.

На рис. 6 приведены зависимости средней температуры центрального пикселя матрицы приёмника ИК-излучения при раз-

личной толщине металлизации хромом. Как видно, идеальным случаем является конструкция без металлизации, к ней и необходимо стремиться. Поэтому, сравнивая зависимости, приведённые на рисунке, наиболее подходящим вариантом является конструкция с металлизацией хромом толщиной 0,01 мкм и при толщине пикселей 2 мкм. При уменьшении толщины пикселей общая теплоёмкость конструкции уменьшается, а так как постоянная времени равна отношению теплоёмкости к теплопроводности конструкции, то постоянная времени уменьшается, что и наблюдается на графике. Поэто-

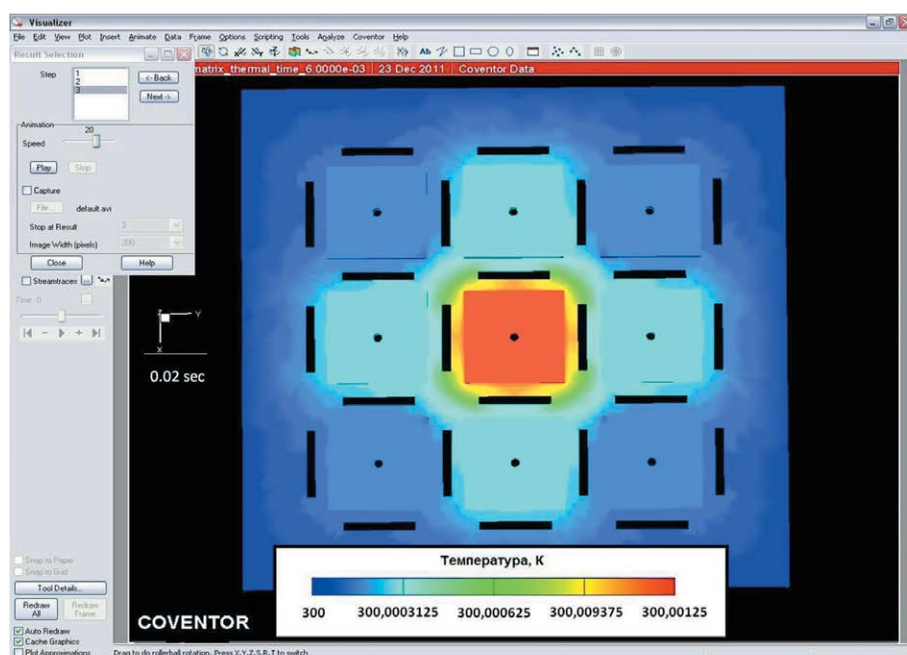


Рис. 5

Мгновенная картина распределения температуры по матрице приёмника ИК-излучения

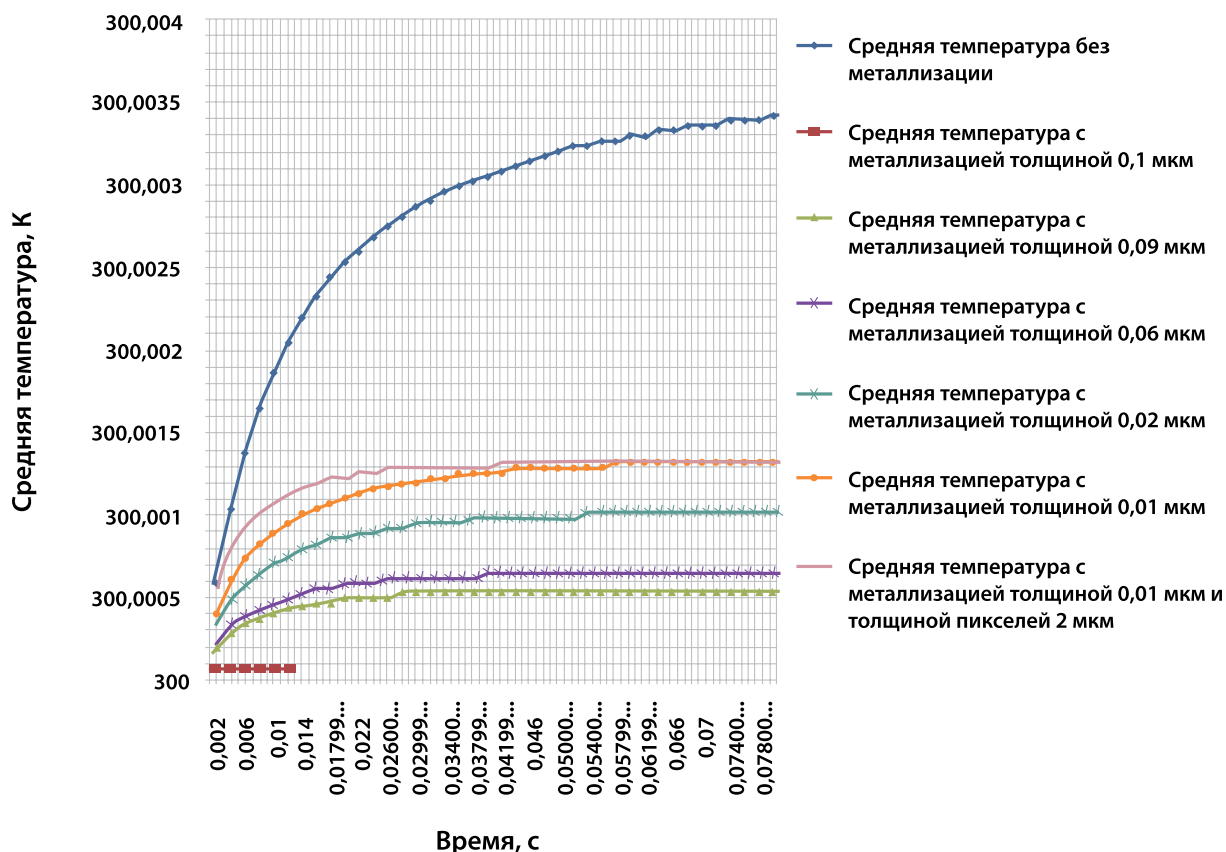


Рис. 6

Зависимости средней температуры нагрева от времени при различной толщине металлизации из хрома

му, оптимальным вариантом конструкции является конструкция с металлизацией толщиной 0,01 мкм и толщиной пикселей в 2 мкм.

Заключение

Моделирование и расчёт тепловой задачи для матрицы ИК-приёмника проводились из соображения оптимизации конструкции приёмника таким образом, чтобы максимально и эффективно использовать энергию падающего теплового излучения. Идеальным случаем является нагрев свободной пластины, находящейся в вакууме, когда у неё тепловые потери идут только на обратное излучение в вакууме.

Другим критерием оптимизации конструкции матрицы является тепловая постоянная времени, которая должна совпадать со временем одного кадра. Это значение порядка 0,02-0,04 с. Поскольку тепловая постоянная времени определя-

ется отношением теплоёмкости к теплопроводности чувствительного элемента матрицы, необходимо варьировать значения теплоёмкости и теплопроводности таким образом, чтобы достичь компромисса между ними. С одной стороны, при уменьшении толщины чувствительного элемента уменьшается его теплоёмкость. Это в свою очередь приведёт к уменьшению тепловой постоянной времени, что является положительным результатом. А с другой стороны, это приведёт к ухудшению чувствительности приёмника из-за того, что установившееся значение температуры снизится за счёт уменьшения толщины поглощающего слоя при одной и той же его площади.

Что касается теплопроводности конструкции, следует отметить, что элементы конструкции делаются достаточно узкими и тонкими для сведения общей теплопроводности конструкции к минимуму. Это достигается путём создания высокой тепловой изоляции

с применением технологии МЭМС, а также за счёт использования материалов с плохой теплопроводностью, таких как полиимид. При металлизации необходимо использовать металлы с плохой теплопроводностью, такие как никель и хром. В данной задаче при моделировании использовался хром.

С одной стороны, уменьшение теплопроводности повышает эффективность нагрева чувствительного элемента, с другой стороны, оно значительно увеличивает тепловую постоянную времени, что является отрицательным результатом. За время одного кадра чувствительный элемент не успеет нагреться до установившегося значения температуры, то есть тепловая постоянная времени в этом случае имеет достаточно большое значение.

Поэтому необходимо найти тот самый баланс и оптимум между значениями теплоёмкости и теплопроводности, используя различные ухищрения в технологии изготовления самой конструкции матрицы в целом.

Таким образом, решив задачу теплопроводности данной конструкции приёмника ИК-излучения, удалось найти оптимальный вариант её конструкции с точки зрения геометрии и свойств выбранных материалов. Полученные результаты будут полезными при изготовлении и исследовании конструкций матриц приёмников ИК-излучения.

Литература

1. Певцов Е. Ф., Чернокожин В. В. Матричные ИК-приёмники для малогабаритных тепловизионных камер // Электронные компоненты. – 2001. – № 1-3.
2. Певцов Е. Ф. Матричные ИК-приёмники и портативные системы визуализации инфракрасного излучения // Материалы XVIII международной конференции «Фотоэлектроника и приборы ночного видения». – М.: ГНЦ РФ ФГУП «ОРИОН», 2004. – 31 с.
3. Chuan Li, C. J. Han, George Skidmore Overview of DRS uncooled VOx infrared detector development. – SPIE, vol. 50 (6), 061017, 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://spie.org/x648.html?product_id=903928 (дата обращения: 13.10.2015).
4. Fraenkel A., Mizrahi U., Bikov L., Giladi A., Shiloah N., Elkind, Kogan I., Maayani S., Amsterdam A., Vaserman I., Duman O., Hirsh Y., Shapiro F., Tuito A., Ben-Ezra M.. SCD's uncooled detectors and video engines for a wide range of applications. – SPIE, vol. 8012, 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://spie.org/x648.html?product_id=883108 (дата обращения: 13.10.2015).
5. Takahiro Ohnakado, Masashi Ueno, Yasuaki Ohta, Yasuhiro Kosasayama, Hisatoshi Hata, Takaki Sugino, Takanori Ohno, Keisuke Kama, Masahiro Tsuagai, Hiroshi Fukumoto Novel readout circuit architecture realizing TEC-less operation for SOI diode uncooled IRFPA. – SPIE, vol. 7298, 2009. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://spie.org/x648.html?product_id=818418 (дата обращения: 13.10.2015).
6. Sean Kilcoyne, Neil Malone, Micky Harris, John Vampola, Decosta Lindsay Silicon p-i-n focal plane arrays at Raytheon. – SPIE, vol. 7082, 2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://spie.org/x648.html?product_id=798580 (дата обращения: 13.10.2015).
7. Kosasayama Y., Sugino T., Nakaki Y., Fujii Y., Inoue H., Yagi H., Hata H., Takeda M., Kimata M. / Pixel scaling for SOI-diode uncooled focal plane arrays // Proceeding of SPIE, 2004, vol. 5406, pp. 504-511.
8. Режим доступа: <http://www.coventor.com> (дата обращения: 13.10.2015).
9. Режим доступа: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 13.10.2015).
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов – М.: Мир, 1979. – 392 с.
11. Карслоу Д. Егер Теплопроводность твёрдых тел / Пер. с англ., под ред. А. А. Померанцева. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

References

1. Pevtsov E. F., Chernokozhin V. V. Matrix IR-receivers for small thermal-vision cameras. *Elektronnyye komponenty* [Electronic components], 2001, № 1-3.
2. Pevtsov E. F. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii «Fotoelektronika i pribory nochnogo videniya»* [Proceedings of XVIII International Conference «Photoelectronics and night vision devices»]. Moscow, «ORION» Publ., 2004, 31 p.
3. Chuan Li, C. J. Han, George Skidmore. Overview of DRS uncooled VOx infrared detector development. SPIE, vol. 50 (6), 061017, 2011. URL: http://spie.org/x648.html?product_id=903928 (accessed 13 October 2015).
4. Fraenkel A., Mizrahi U., Bikov L., Giladi A., Shiloah N., Elkind S., Kogan I., Maayani S., Amsterdam A., Vaserman I., Duman O., Hirsh Y., Shapiro F., Tuito A., Ben-Ezra M. SCD's uncooled detectors and video engines for a wide range

-
- of applications. SPIE, vol. 8012, 2011. URL: http://spie.org/x648.html?product_id=883108 (accessed 13 October 2015).
5. Takahiro Ohnakado, Masashi Ueno, Yasuaki Ohta, Yasuhiro Kosasayama, Hisatoshi Hata, Takaki Sugino, Takanori Ohno, Keisuke Kama, Masahiro Tsuagai, Hiroshi Fukumoto Novel readout circuit architecture realizing TEC-less operation for SOI diode uncooled IRFPA. SPIE, vol. 7298, 2009. URL: http://spie.org/x648.html?product_id=818418 (accessed 13 October 2015).
 6. Sean Kilcoyne, Neil Malone, Micky Harris, John Vampola, Decosta Lindsay Silicon p-i-n focal plane arrays at Raytheon. SPIE, vol. 7082, 2008. URL: http://spie.org/x648.html?product_id=798580 (accessed 13 October 2015).
 7. Kosasayama Y., Sugino T., Nakaki Y., Fujii Y., Inoue H., Yagi H., Hata H., Takeda M., Kimata M. Pixel scaling for SOI-diode uncooled focal plane arrays // Proceeding of SPIE, 2004, vol. 5406, pp. 504-511.
 8. URL: <http://www.coventor.com> (accessed 13 October 2015).
 9. URL: <http://www.ansys.com> (accessed 13 October 2015).
 10. Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Application of finite element method]. Moscow, Mir Publ., 1979, 392 p.
 11. Karslow D. Eger *Teploprovodnost tverdykh tel* [Thermal Conductivity of Solids]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 488 p.