

# ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПИКСЕЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ МАТРИЦЫ

**Т**епловизионные приборы, или тепловизоры, стремительно развиваются сегодня, вытесняя, где можно, приборы ночного видения, и становятся массовым продуктом, сравнимым с цифровыми фотокамерами. Совершенствуется и их проектирование – строятся математические модели (ММ) термочувствительных элементов (ТЧЭ) и используются элементы САПР. Об одном таком подходе, разработанном в ЦНИИ "Циклон", пойдет речь ниже.

Известно, что болометр – это тепловой приемник излучения, основанный на изменении параметров ТЧЭ из металла, полупроводника или диэлектрика в результате поглощения им потока излучения. Параметром ТЧЭ болометра, изменяющимся под действием излучения (обычно инфракрасного), является сопротивление. ТЧЭ может быть представлен одним элементом, если болометр используется в режиме точечного измерителя температуры, или несколькими элементами, сформированными в виде тепловизионной (ТВМ), или микроболометрической (МБМ), матрицы (охлаждаемой или неохлаждаемой), если болометр используется для формирования теплового поля, то есть работает в режиме тепловизора.

ТЧЭ, или (по аналогии с элементом изображения) пиксель, – это элемент ТВМ/МБМ, используемый как приемник теплового излучения болометра в режиме тепловизора. Его динамические, тепловые и электрические характеристики являются определяющими для качественного приема теплового изображения. Поэтому так важна задача разработки конструкции пикселя болометрической тепловизионной матрицы, которая в нашем случае является неохлаждаемой.

На рис.1 показана конструкция пикселя, представляющая собой объемную (но близкую к плоской) многослойную конструкцию. ТЧЭ в конструкции пикселя – это слой окиси вана-

дия, при попадании на который теплового излучения от объекта меняется его электрическое сопротивление.

Необходимо грамотно выбрать/рассчитать конструкцию пикселя на ранней стадии проектирования, чтобы оценить, будут ли его параметры (например, чувствительность и быстродействие) удовлетворять предъявленным требованиям, и гарантировать, что на завершающих этапах проектирования не придется заниматься их подгонкой. Такой подход не только позволяет существенно снизить материальные затраты, но и уменьшает сроки проектирования.

Наилучшее проектное решение можно получить, используя методы оптимального проектирования и системный подход [1] (соответствующие рекомендации изложены в ГОСТ РВ 20.39.302-98), поэтому была поставлена задача нахождения оптимальных конструктивных параметров пикселя с учетом требуемого быстродействия. Для ее решения была построена

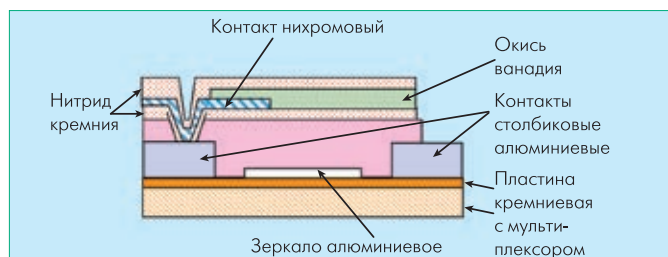


Рис. 1 Сечение конструкции пикселя (вид сбоку)

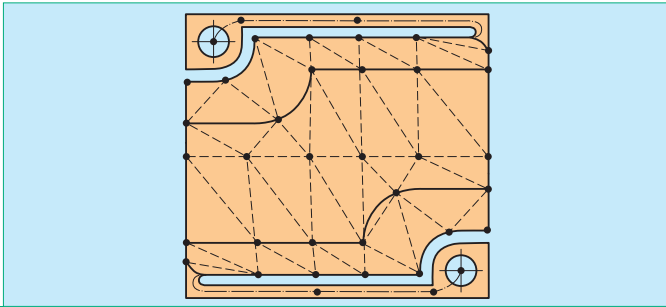


Рис.2 Аппроксимация конструкции пикселя конечными элементами

ММ, учитывающая тепловые и электрические процессы в пикселе, и выбран адекватный критерий оптимизации. Для построения ММ был использован метод конечных элементов (МКЭ).

В нем для построения модели конструкции производится ее разбиение на конечные элементы (КЭ), аппроксимирующие ее форму. КЭ могут быть различной формы. В нашем случае были использованы балочные и треугольные плоские КЭ.

Для построения модели теплообмена в пикселе использовалось дифференциальное уравнение (ДУ), описывающее нестационарный тепловой режим в трехмерном теле [2].

Процесс минимизации функционала, отражающего накопление энергии в КЭ, осуществляемый в МКЭ на множестве узловых элементов, приводит к системе обыкновенных ДУ, которая стала основой формирования ММ динамических тепловых и электрических процессов в пикселе при воздействии теплового излучения:

$$[C_0]T'_t + [R_0]T + F_0 = 0, \quad (1)$$

где  $[C_0]$  – матрица теплоемкости системы,  $T$  – вектор узловых температур,  $t$  – время,  $[R_0]$  – матрица теплопроводности системы,  $F_0$  – вектор воздействий.

Балочный и плоский треугольный элементы, выбранные для построения ММ, позволяют достаточно точно аппроксимировать геометрию пикселя, пример которой приведен на рис.2 (пунктиром обозначены треугольные элементы, а штрихпунктиром – балочные элементы). Для выбранных КЭ использовалась симплекс-аппроксимация для определения их матриц теплопроводности и теплоемкости, а также вектора воздействия.

При построении электрической модели пикселя используется та же система ДУ (1) с заменой удельных тепловых проводимостей на удельные электрические проводимости. Эквивалентные удельные тепловые проводимости, тепловые емкости и электрические проводимости многослойных КЭ тепловой модели вычисляются как параллельное соединение соответствующих проводимостей и емкостей слоев конструкции пикселя с учетом их толщины.

АЧХ пикселя вычисляется переводом системы (1) в частотную область, то есть заменой операции  $T'_t$  умножением на  $j\omega T$ , где  $\omega$  – круговая частота гармонического теплового воздействия. Решая полученную систему относительно  $T$  для заданной частоты  $f$ , получаем АЧХ:  $A(f)$ , где  $A$  – амплитуда

внешнего теплового воздействия, зависящая от набора параметров  $(C_0, R_0, f, F_0)$ .

При импульсном внешнем тепловом воздействии на пиксель действует серия импульсов, для которой должны быть известны (или заданы): удельная мощность, приходящаяся на поверхность пикселя; длительность  $\tau$  и период следования импульсов; количество импульсов. Это позволит определить максимальную температуру пикселя в конце воздействия.

Данная задача решалась операторным методом с использованием электротепловых аналогий:

- электрическое сопротивление  $R_э$  – тепловое сопротивление  $R$ ;
- электрическая емкость  $C_э$  – тепловая емкость  $C$ ;
- электрический потенциал  $\phi$  – температура  $T$ ;
- электрический ток  $I$  – тепловой поток  $P$ .

Процесс теплообмена представлен тепловой схемой, элементы которой – источники и приемники тепловой энергии и тепловые сопротивления (проводимости). Каждому узлу тепловой схемы ставится в соответствие определенная температура  $T$ . Переменные величины в этой схеме (тепловые потоки и перегревы) подчиняются законам Ома и Кирхгофа для тепловых схем.

Метод электротепловой аналогии представляет тепловую модель пикселя в виде электрической схемы, приведенной на рис.3, где  $C$  – конденсатор, моделирующий теплоемкость пикселя;  $R$  – резистор, моделирующий тепловое сопротивление пикселя;  $I$  – источник тока, моделирующий мощность падающего импульсного теплового потока,  $U_C$  – напряжение на конденсаторе  $C$ , моделирующее температуру пикселя. При расчете на импульсное воздействие тепловое сопротивление и емкость пикселя предварительно вычисляются по полной объемной КЭ-модели пикселя, см. (1).

Напряжение  $U_C$  получено, исходя из стандартных уравнений: а)  $i=i_C+i_R$ ; б)  $i_C=C(U_C)'_t$ ; в)  $U_C=U_R$ .  $U_C$  определяется интегрированием  $i_C$  за время  $\tau$ , которое дает:

$$U_C(\tau)=iR-iR e^{-a\tau}+U_C(0)e^{-a\tau}, \text{ где } a=1/(RC).$$

Это выражение использовано для вычисления изменения температуры пикселя при воздействии теплового импульса. Здесь  $U_C(0)$  – напряжение, сохранившееся на  $C$  в конце паузы между импульсами.

Критерием оптимальности конструкции пикселя выбрана его максимальная чувствительность при выполнении ограни-

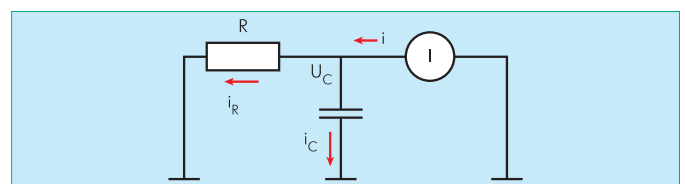


Рис.3 Эквивалентная схема электротепловой модели пикселя при импульсном воздействии

чений на тепловую постоянную времени. Это соответствует достижению максимума относительного изменения электрического сопротивления пикселя  $\Delta R_n$  при воздействии на него ступенчатого теплового импульса.

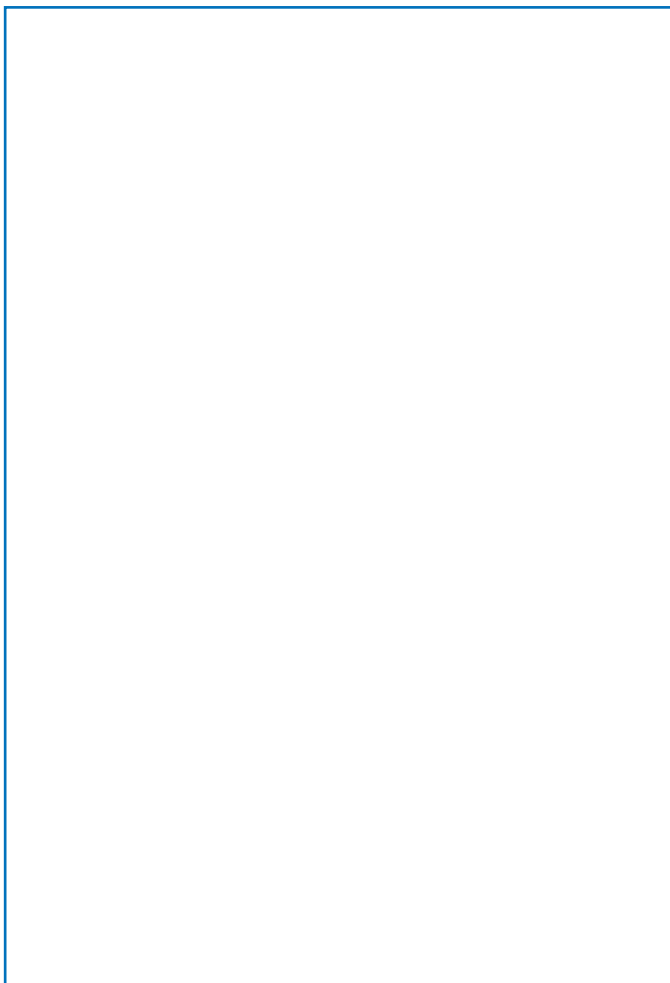
Критерий оптимальности  $Z$  имеет следующий вид:

$$Z = \min(1 - \text{abs}(\Delta R_n / R_n)),$$

где  $R_n$  – начальное сопротивление пикселя.

На основе модели тепловой динамики пикселя были разработаны две программы:

- программа анализа динамических тепловых и электрических характеристик пикселя, позволяющая рассчитывать АЧХ пикселя (изменение температуры пикселя в зависимости от падающей тепловой мощности и ее частоты) и его реакцию (температуру) на периодическое воздействие тепловых импульсов, а также тепловое и электрическое сопротивление пикселя, его тепловую постоянную времени и изменение сопротивления пикселя при тепловом воздействии;
- программа оптимизации конструктивных параметров пикселя, позволяющая находить оптимальные значения варьируемых параметров его конструкции по критерию максимальной чувствительности, приведенному выше. В качестве таких параметров могут быть: ширина балки, высота столбика и толщины нихрома, окиси ванадия и нитрида кремния. Программа может оптимизировать геометрию



пикселя. На параметры (включая постоянную времени пикселя) накладываются ограничения на допустимые изменения их значений, исходя из технологических возможностей или для обеспечения механической прочности.

При подготовке исходных данных для ввода в ПЭВМ необходимо формализовать конструкцию пикселя, построив ее КЭ-модель.

Балочный КЭ – это двумерный прямолинейный элемент с постоянной площадью сечения и узлами на концах. Для него задаются: координаты узлов, площадь сечения, периметр, плотность материала, удельные теплопроводность, теплоемкость и электропроводность материала.

Треугольный КЭ – это плоский элемент постоянной толщины и треугольной формы с равномерным распределением массы. Вершины треугольников являются узлами КЭ. Для него задаются: координаты узлов, толщина, плотность материала, удельные теплопроводность, теплоемкость и электропроводность материала. В пределах КЭ его теплофизические и электрические характеристики, а также действующие на грани удельные поверхностные тепловые нагрузки должны быть равными.

Процесс дискретизации может быть разделен на два этапа: разбиение конструкции на КЭ и нумерация узлов. Для конструкции выбирается глобальная система прямоугольных координат  $X, Y, Z$  (оси  $X$  и  $Y$  расположены в плоскости пикселя, а ось  $Z$  перпендикулярна его плоскости). Отдельные части конструкции пикселя расчленяются на простейшие КЭ: балочные и треугольные. Соединение КЭ проводится через узлы КЭ. При разбиении учитывается также положение контрольных точек, которые находятся в узлах. Так, балка конструкции пикселя моделируется балочным КЭ, а приемная часть и ее контакт с балкой – набором треугольных элементов (см. рис.2).

После разбиения конструкции на КЭ последовательно нумеруются узлы, и указывается тип КЭ. За нулевой узел принимается основание столбика, находящееся на подложке, и от него ведется отсчет температуры пикселя. В программе заложены следующие типы конструкций элементов пикселя:

- для балочных КЭ: трехслойная конструкция балки пикселя (нитрид кремния-нихром-нитрид кремния) и конструкция алюминиевого столбика;
- для треугольных КЭ: трехслойная конструкция средней (приемной) части пикселя (нитрид кремния-окись ванадия-нитрид кремния) и четырехслойная конструкция контакта пикселя с балкой (нитрид кремния-нихром-окись ванадия-нитрид кремния).

Для ввода в ЭВМ описания ММ конструкции пикселя готовятся следующие группы данных.

Группа 1 (варьируемые параметры, вводимые с клавиатуры): ширина балки; высота столбика, толщина: нихрома, окиси ванадия, нитрида кремния.

Группа 2 (имена задаются пользователем, например, описание КЭ-модели конструкции пикселя, сохраняемое в фай-

ле): количество узлов модели; массив координат узловых элементов в глобальной системе координат; количество и массив узлов балочных и треугольных КЭ; количество и массив/перечень номеров контрольных узлов; номер узла модели в центре пикселя; номера узлов по краям контактов.

Группа 3 (имена задаются пользователем, например, описание теплофизических характеристик материалов пикселя, сохраняемое в файле): плотность, удельная теплопроводность, уд. теплоемкость и удельная электропроводность: никрома, окиси ванадия, нитрида кремния и алюминия.

Группа 4 (описания параметров внешнего теплового воздействия, сохраняемые в файле):

- для расчета АЧХ: удельная тепловая мощность, падающая на поверхность пикселя [ $\text{мкВт}/\text{м}^2$ ]; начальное и конечное значения частоты гармонического теплового воздействия;
- для расчета реакции на серию тепловых импульсов: максимальная удельная тепловая мощность, падающая на поверхность пикселя [ $\text{мкВт}/\text{м}^2$ ]; количество и длительность теплового импульса [ $\text{мс}$ ]; период следования импульсов [ $\text{мс}$ ].

Все исходные данные для расчета запрашиваются соответствующими программами после их запуска и сохраняются в файлах с именами, которые можно корректировать и использовать для повторных расчетов.

Результаты расчета выводятся в файл с именем, задаваемым пользователем, где для точек частотного диапазона или номеров тепловых импульсов приводятся значения температур в контрольных узлах модели конструкции пикселя. Также выводятся значения постоянной времени, электрического сопротивления и его относительного изменения.

Результат оптимизации – оптимальные значения толщины никрома, ширины балки, толщин окиси ванадия и нитрида кремния, высоты столбика.

Анализ результатов пробных расчетов и оптимизации показал хорошее совпадение с результатами экспериментального анализа характеристик отечественных и зарубежных пикселей [3].

Разработанные программы позволят проводить оптимальное проектирование тепловизионных болометрических матриц с заданными характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кожевников А.М.** Методология оптимального проектирования бортовых радиоэлектронных средств на основе моделирования их электрических, тепловых и механических режимов. – Информационные технологии в проектировании и производстве, 2005, №2.
2. **Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979.
3. **Жуков А.А.** и др. Метод определения теплофизических характеристик неохлаждаемых полупроводниковых микроболометров. – Нано- и микросистемная техника, 2006, №1.