

УДК 621.3.002.5:536.24

Построение тепловизионного устройства для исследования температурных полей полупроводниковой керамики

О. И. Абрамов, В. А. Алмазов, А. Н. Комаров, И. В. Овчаров
ФГУП "Всероссийский электротехнический институт им В. И. Ленина", Москва, Россия

Представлен расчет оптико-механической системы однострочного тепловизора и дано его применение для исследования температурных полей оксидно-цинковых резисторов.

Применение неразрушающих дистанционных методов теплового контроля (тепловизионных и пирометрических) в электроэнергетике обеспечивает раннюю диагностику предаварийных состояний оборудования. Особенно актуально применение этих методов для контроля ограничителей перенапряжений (ОПН), основными рабочими элементами которых являются оксидно-цинковые резисторы (ОЦР), снижающие перенапряжения в 10 раз и более. Конструктивно они оформлены как цилиндры диаметром 60 мм и толщиной 8 мм, на торцевые поверхности которых нанесены электроды. Надежность ОПН, использующих в качестве основного рабочего элемента ОЦР, в значительной мере определяется стабильностью их параметров в процессе эксплуатации. Дegradация характеристик ОЦР под воздействием рабочего напряжения, развивающаяся на фоне воздействия других эксплуатационных факторов (температура, перенапряжение и т. п.), вызывает рост мощности потерь в ОЦР, что в конечном счете может привести к нарушению теплового равновесия и отказу ОПН [1]. Диагностику этих явлений целесообразно проводить с помощью бесконтактных тепловизионных методов.

К настоящему времени наибольшие успехи достигнуты в создании сканирующих и матричных тепловизионных систем с охлаждаемыми приемниками излучения (ПИ). Они работают в реальном масштабе времени, имеют температурную чувствительность 0,03—0,1 К, снабжаются устройствами, позволяющими проводить количественный анализ тепловых полей. Широко используются методы цифровой обработки информации.

Тепловизоры с неохлаждаемыми пироэлектрическими видиконами (ПЭВ) по чувствительности и быстродействию приближаются к системам с охлаждаемыми ПИ. Они удобны для проведения экспресс-контроля электрооборудования. Однако их геометрическая разрешающая способность ограничена вследствие растекания энергии по мишени за счет теплопроводности и неполного считывания заряда [2]. Мишень ПЭВ является его основным элементом. Она может быть изготовлена из триглицинсульфата, низкомолекулярной органики и др. [2].

Провести сопоставительный анализ разрешающей способности систем с ПЭВ и сканирующих систем с одноэлементными ПИ удобно с помощью теории линейной фильтрации [3, 4]. Мерой способности системы воспроизводить пространственные частоты, содержащиеся в наблюдаемой картине, является оптическая передаточная функция (ОПФ), Фурье — образ функции рассеяния линии, поэтому удобным тест-объектом для экспериментального исследования сканирующих измерительных ОЭП является излучающая щель [3].

Чтобы теоретически найти отклик системы на входной оптический сигнал, определяют спектр сигнала, умножают на ОПФ системы и производят обратное Фурье-преобразование, что в общем случае требует весьма сложных вычислений. Для приближенного определения отклика можно использовать инженерный метод расчета без перехода к частотным представлениям [5]. Так, для щелевого тест-объекта

$$Z = \frac{1}{2} [F_c(L+1) - F_c(L-1)], \quad (1)$$

где $F_c(x) = \int \Phi(cx) dx$; $\Phi(cx)$ — функция Лапласа; c — параметр, учитывающий качество объектива;

$L = \frac{d}{a}$, где d — ширина изображения щели в фокальной плоскости объектива, a — размер чувствительной площадки ПИ.

Рассмотрим влияние характера функции передачи модуляции (ФМП), являющейся модулем ОПФ, на точность измерения плотности излучения на высоких пространственных частотах (термины — согласно работе [6]):

ФМП одноэлементного ПИ квадратной формы [4] имеет вид

$$|\tilde{g}_0(f)| = \frac{\sin(\pi f \alpha)}{\pi f \alpha}, \quad (2)$$

где α — угловой размер чувствительной площадки ПИ;

f — пространственная частота.

ФМП ПЭВ [2]:

$$|\tilde{g}_{\text{ПЭВ}}(f)| = \frac{\sin(\pi f V T_k) P}{\pi f V T_k}, \quad (3)$$

где $P = \frac{1 - \beta}{\left(1 + \left\{ \left[(2\pi f^2) + \frac{G}{K d_c} \right] \frac{D}{2\pi f V} \right\}^2 \right)^{1/2} (1 + \beta^2 - 2\beta \cos 2\pi f V T_k)^{1/2}}$,

T_k — период кадровой развертки;

V — скорость панорамирования;

β — коэффициент, учитывающий эффективность считывания заряда мишени;

G — плотность излучения;

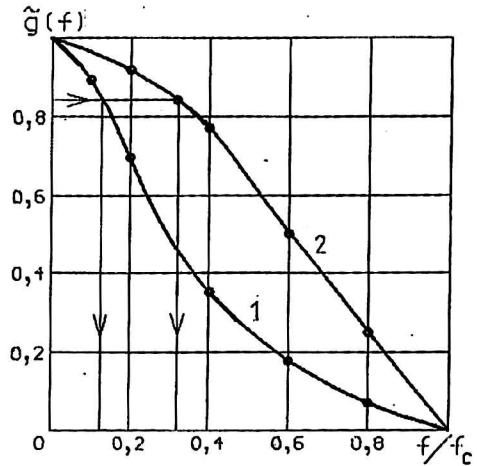
K — коэффициент теплопроводности;

d_c — толщина пироэлемента;

D — температуропроводность.

Влияние диффузии тепловой энергии на ФМП учитывается первым сомножителем в знаменателе уравнения (3), неполное считывание заряда — числителем и вторым сомножителем знаменателя. Анализ уравнения (3) и сравнение выражений (1) и (2) показывают, что P всегда меньше единицы, поэтому кривая зависимости ФМП от пространственной частоты (нормированной на граничную частоту f_c) для ПЭВ пройдет ниже, чем кривая ФМП одноэлементного ПИ (рис. 1).

Рис. 1. Расчетные ФПМ ПЭВ (1) и одноэлементного ПИ (2)



По графикам на рис. 1 видно, что диапазон ПЧ, в котором спад ФПМ не превышает 15 %, для одноэлементного ПИ в 2,3 раза шире, чем для ПЭВ.

Для проверки этого вывода было проведено экспериментальное сравнение ФПМ входных звеньев (объектив, ПИ, предусилитель) тепловизоров с тонкопленочными пироэлектрическим ПИ (ТППИ), с тонкопленочным ПЭВ и с монокристаллическим ПЭВ типа 8090 английской фирмы EEV (рис. 2).

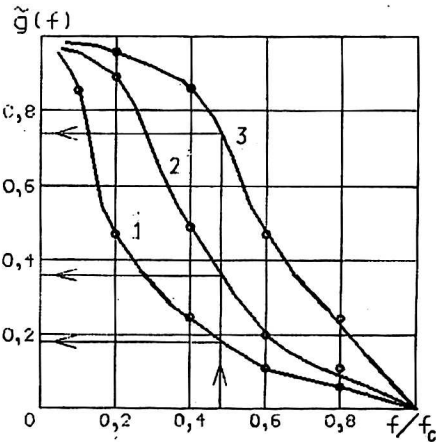


Рис. 2. Экспериментальные ФМП входных звеньев тепловизоров:

1 — с тонкопленочным ПЭВ;
2 — с ПЭВ типа 8090; 3 — с ТППИ

Тест-объектом являлась маска с группами прорезей нарастающей ПЧ, расположенная на фоне плоского теплоизлучателя.

По графикам на рис. 2 видно, что система с ТППИ имеет значительное преимущество при передаче высоких ПЧ. Так, при $f = 0,5 f_c$ отклик этой системы приблизительно в два раза больше, чем системы с ПЭВ типа 8090, и в четыре раза больше, чем с тонкопленочным ПЭВ, что подтверждает расчетные данные.

Таким образом, для измерения тепловых полей, содержащих высокие ПЧ, лучше использовать сканирующую систему с одноэлементным ПИ, в частности с ТППИ, если применение жидкого азота затруднительно.

Анализ ФПМ оптико-механического тракта (ОМТ) дает возможность определить оптимальное соотношение между размером чувствительной площадки (a) ПИ и диаметром абберрационного пятна ($d_{аб}$) рассеяния объектива.

Это позволяет обоснованно выбрать объектив, избегая его излишнего усложнения.

На рис. 3 приведены графики ФПМ ОМТ, полученные в результате перемножения ФПМ объектива

$$|\tilde{g}_{об}(f)| = \exp\left[-\frac{(2\pi f\rho_0)^2}{2}\right],$$

где ρ_0 — угловой размер радиуса пятна рассеяния и ФПМ одноэлементного ПИ (1) для двух значений aberrации объектива.

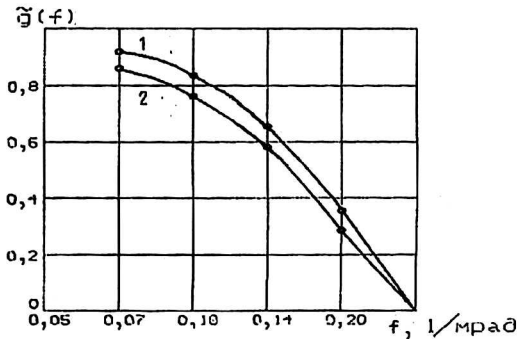


Рис. 3. ФПМ оптико-механического тракта тепловизионных систем:

- 1 — условная система ($a = 0,5$ мм; $d_{аб} = 0,05$ мм);
- 2 — система с ТППИ ($a = 0,5$ мм; $d_{аб} = 0,15$ мм)

Лучшую ФПМ имеет ОМТ при $a = 0,5$ мм, $d_{аб} = 0,05$ мм. Однако объектив с $d_{аб} = 0,05$ мм сложно реализовать. Незначительно уступает ей ФПМ системы № 2 при $d_{аб} = 0,15$ мм. Такое пятно рассеяния легко достижимо в параболическом объективе. Итак, отношение $a/d_{аб} \approx 3$ следует считать оптимальным в системе, предназначенной для измерений на высоких ПЧ.

К аналогичному результату приводит рассмотрение нормированного отклика ОМТ на сигнал от излучающей щели и излучающего квадрата (рис. 4). Графики построены по формуле (1) и по формуле для излучающего квадрата [5].

$$Z_k = \frac{1}{4} [F_c(L+1) - F_c(L-1)]^2.$$

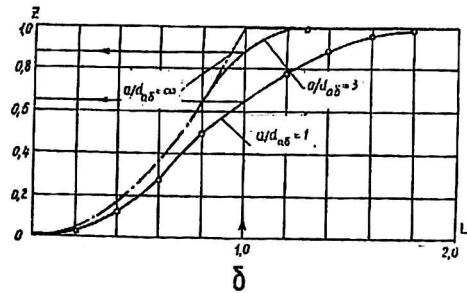
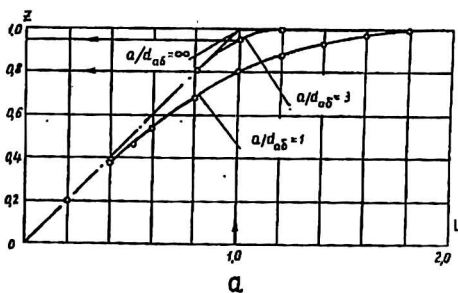


Рис. 4. Зависимость нормированного отклика ОМТ от $L = d/a$:
 а — объект — излучающая щель; б — объект — излучающий квадрат

Значение $L = 1$ соответствует номинальному мгновенному полю зрения, т. е. элементу разложения. По графикам (см. рис. 4) видно, что отклик ОМТ при $d_{аб} = 0,5$ мм (сферический объектив) существенно меньше, чем отклик при $d_{аб} = 0,15$ мм рассеяния (вплоть до $a/d_{аб} = \infty$), и не дает существенного прироста отклика.

Широкое применение инфракрасной техники для дистанционного контроля электрооборудования началось в конце 70-х годов. Параллельно развивались методы контроля и измерений тепловых полей как с помощью тепловизоров, так и с помощью пирометров.

Поскольку тепловизоры дают полный "тепловой портрет" изучаемого объекта, их применение целесообразно там, где имеется большое количество подлежащих контролю точек. В отличие от тепловизоров пирометры дают возможность проводить лишь локальный тепловой контроль. Но из-за отсутствия сложных и дорогих систем сканирования они на один-два порядка дешевле тепловизоров [7].

В ряде случаев целесообразно применение линейных однострочных сканеров с одноэлементными приемниками излучения (ОПИ) — приборов, занимающих промежуточное положение между тепловизорами и пирометрами по производительности и стоимости. Линейные сканеры удобны для исследования одномерных объектов, например дымовых труб, ОПН, разрядников, гирлянд изоляторов.

Такой прибор был создан в ВЭИ с учетом описанных выше исследований и расчетов. В нем использован неохлаждаемый пироэлектрический приемник излучения МГ-30 с регулируемой постоянной времени. В оптической системе применены параболическое зеркало с фокусным расстоянием 300 мм и сканирующий контррефлектор.

Макетный образец тепловизора был использован для исследования таблеток ОЦР. На рис. 5 показана структурная схема испытательного стенда, а на рис. 6 — термопрофили ОЦР.

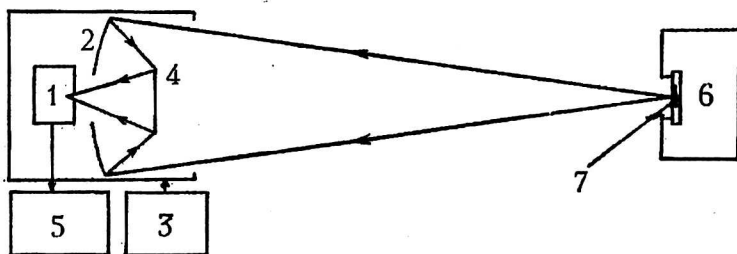


Рис. 5. Структурная схема стенда для исследования распределения локальной электрической проводимости ОЦР по распределению температуры поверхности: 1 — приемник излучения; 2 — параболическое зеркало; 3 — генератор развертки; 4 — сканирующее зеркало; 5 — запоминающий осциллограф; 6 — высоковольтный блок; 7 — ОЦР

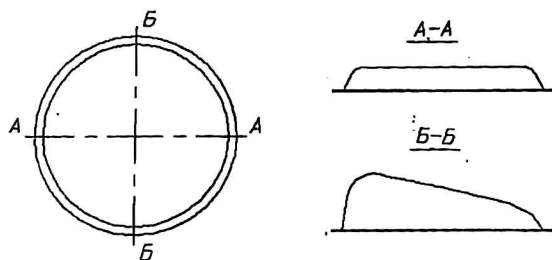


Рис. 6. Профили температуры поверхности ОЦР в двух плоскостях: А-А — нормальное распределение температуры; Б-Б — распределение температуры с отклонением от нормы

Сканер работает в однострочном режиме, частота развертки 3,25 Гц, эквивалентная шуму разность температур составляет 1 К, мгновенное поле зрения 3,3 мрад. Строка проходит через центр таблетки ОЦР. Расстояние между объектом и камерой составляет 1,2 м. С помощью лабораторного макета сканера проведено исследование импульсного нагрева ОЦР. Сразу после пропускания через ОЦР однополярного испытательного импульса экспоненциальной формы амплитудой 2 кА и длительностью на уровне 0,1 амплитуды тока 2 мс с помощью запоминающего осциллографа фиксировалось распределение температуры по диаметру таблетки ОЦР. Затем ОЦР поворачивали на 90°, давали второй импульс и фиксировали строку, перпендикулярную первой. Практически двух строк было достаточно для выявления неравномерности распределения температуры по торцевой поверхности таблетки ОЦР. При этом на части исследованных ОЦР наблюдалась неравномерность распределения превышения температуры над температурой окружающего воздуха, достигающая 30 % (см. рис. 6, Б—Б). Обнаружено, что на площади поверхности, составляющей около 50 % поверхности ОЦР, перегрев превышал средний более чем на 20 %. Методы установления связи между локальной электрической проводимостью и температурой поверхности таблетки представлены в работах [8, 9].

Выводы

1. Показано преимущество оптико-механических систем с одноэлементными приемниками излучения перед системами с пировидиконами для измерений на высоких частотах.
2. Обоснован выбор соотношения 3:1 между размерами чувствительной площадки приемника излучения и диаметром абберационного пятна рассеяния объектива.
3. Создан макетный образец однострочного тепловизора.
4. Проведено исследование тепловых полей варисторов. Обнаружена неравномерность распределения температуры по их поверхности.

Литература

1. Люцерева Л. А. и др. Некоторые свойства варисторов//Прикладная физика. 1999. № 4.
2. Аугина Н. Р., Богомолов П. А., Матвеевко А. В., Сидоров В. И. Пирозлектрические преобразователи с электронным сканированием//Заруб. электрон. техника. 1981. Т. 2. № 9. С. 57—112.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер.с англ. Н. В. Васильченко/Под ред. А. И. Горячева. — М.: Мир. 1978. — 414 с.
5. Хахин В. И. Куртеев В. Д. Геометрическое разрешение тепловизионных систем. — Тепловидение//Межвуз. сб. науч. тр./Под ред. Н. Д. Куртева. — М.: МИРЭА. 1976. Вып. 1. С. 54—75.
6. ГОСТ 23935—79. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 14 с.
7. Овчаров И. В. Разработка и применение тепловизоров и пирометров ВЭИ. — ТЕМП// Сб. тр. Междунар. конф. «Прикладная оптика-98». — СПб, 1998.
8. Zander W. Alterungsmechanismen von ZnO — Ableitermaterial bei Stobelastung//Etz Archiv, 1990. Bd 12. H. 9. S. 283—289.
9. Wang H., Bartkowiak M., Modine F., Dinwiddle R., Boatner L., Mahan G. Nonuniform Heating in Zine Oxide Varistors Studied by Infrared Imaging and Computer Simulation//J. Am. Ceram. Soc. № 81 (8). 1998. P. 2013—2022.

Авторы благодарят профессора В. И. Сидорова (ВНИИ «Альтаир») за полезные консультации.

Creation of the thermal-imaging device for study of temperature fields of semiconductor ceramics

O. I. Abramov, V. A. Almazov, A. N. Komarov, I. V. Ovcharov
The All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The calculation of the optical single-line system for an IR imager and application of this IR imager for investigation of temperature fields of oxide-zinc solutions are presented in this article.