

УДК 621.362

## Комплексный метод контроля качества конструкции и эксплуатационной надежности термоэлектрических модулей в составе оптоэлектронных приборов

Г. Г. Громов, Л. Б. Ершова  
ЗАО "РМТ", Москва, Россия

И. А. Драбкин

Институт химических проблем микроэлектроники, Москва, Россия

*Международные и национальные стандарты требуют высокой надежности от термоэлектрических (ТЭ) модулей, применяемых в оптоэлектронных приборах. Стандартный критерий состоит в измерении и спецификации электрического сопротивления R-модуля. На производственной стадии добротность Z ТЭ-модуля также контролируется методом Хармана. В работе [1] предложен комплексный метод контроля качества путем измерения R, Z и временной константы  $\tau$ . Следуя этому подходу, в данной статье показываются преимущества такого комплексного измерения R, Z и  $\tau$  для оценки качества всей сборки, основанной на ТЭ-модуле, а также для контроля надежности или отказов модуля во время работы в составе оптоэлектронного прибора. Представлены теоретические обоснования и экспериментальные результаты. Все исследования были проведены с помощью комплексных измерителей серий DX4065 и DX4165, выпускаемых фирмой RMT Ltd.*

Термоэлектрические (ТЭ) модули являются элементами многих оптоэлектронных приборов (фотодетекторы, матрицы ПЗС, полупроводниковые лазеры и т. п.). В соответствии с международными и национальными стандартами к ТЭ-модулям, применяющимся в оптоэлектронных приборах, предъявляются высокие требования по качеству и надежности.

Вместе с тем в соответствии со стандартами испытаний на надежность (например, стандарты Telcordia, MIL) единственным критерием является сопротивление ТЭ-модуля, величина изменения которого призвана свидетельствовать о надежности изделия. Дополнительно компании-производители термоэлектрических модулей проводят в процессе производства и выходного контроля измерения термоэлектрической добротности ТЭ-модуля — так называемый параметр Z.

Ранее в работе [1] было показано, что такой подход является недостаточным для детального контроля качества ТЭ-модуля, так как подробный анализ причин некачественной продукции оказывается невозможным, а в ряде случаев по данным параметрам не удается выявить и сам дефект. Был предложен метод комплексного анализа качества и надежности ТЭ-модуля путем контроля трех его параметров: сопротивления (АС R), добротности (Z) и постоянной времени ( $\tau$ ). Применимость данного метода была рассмотрена в [1] на примере анализа технологического брака на стадии производства и надежность испытаний ТЭ-модулей.

В настоящей работе рассмотрена применимость метода комплексного контроля (Z, R,  $\tau$ ) для оценки качества и надежности ТЭ-модулей, интегрированных в оптоэлектронные устройства, особенно когда демонтаж и отдельный анализ ТЭ-модуля невозможны и нежелательны.

Использование такого подхода оказывается возможным с помощью единственного в настоящее время семейства серийных приборов Z, R,  $\tau$ -метров серий DX4065 и DX4165, разработанных в компании РМТ.

### Методы исследования

В настоящей работе приведены результаты как экспериментальных, так и теоретических исследований. Экспериментальные измерения проводились с использованием Z, R,  $\tau$ -метра серии DX4065. В качестве примеров применялись оптоэлектронные конструкции на основе стандартных оптоэлектронных корпусов (типа ТО) и стандартных ТЭ-модулей производства компании РМТ, оптимальных для данных конструкций.

### Результаты

Рассмотрим конструкцию оптоэлектронного устройства с использованием встроенного ТЭ-модуля (рис. 1).

В общем случае такое устройство представляет собой стандартный или специальный корпус, внутри которого смонтирован ТЭ-модуль. На хо-

лодной стороне модуля помещен объект охлаждения. Внутри оптоэлектронного прибора обеспечивается контролируемая среда (вакуум, газ). Термоэлектрический охладитель призван обеспечить отвод тепла от охлаждаемого объекта, (его охлаждение ниже температуры окружающей среды) и термостабилизацию при заданной температуре.

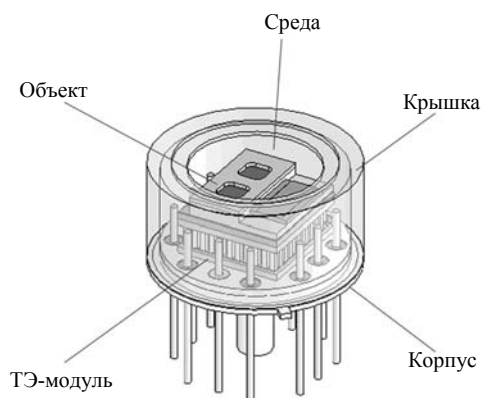


Рис. 1. Пример конструкции оптоэлектронного устройства с использованием встроенного ТЭ-модуля

С учетом того, что функционирование оптоэлектронного прибора в целом зависит от качества обеспечения отмеченных условий, очевидны требования к надежности и качеству ТЭ-модуля в составе оптоэлектронного изделия: они зависят от качества и надежности как самого ТЭ-модуля, так и всей охлаждающей конструкции.

В связи с этим анализ надежности можно разбить на отдельные наиболее значимые элементы:

эксплуатационная надежность ТЭ-модуля. Закономерно, что в процессе эксплуатации имеет место постепенная деградация ТЭ-модуля. Оценки надежности проводят в соответствии со стандартами по результатам ускоренных испытаний, имитирующих различные воздействующие факторы эксплуатации (механические, температурные и т. п.);

монтаж ТЭ-модуля в корпусе прибора. Метод монтажа и его качество заметно сказываются в процессе эксплуатации;

монтаж охлаждаемого объекта на ТЭ-модуль. Это также является предметом детального анализа, так как надежность и эффективность расположения объекта охлаждения на ТЭ-модуль определяют эффективность функционирования оптоэлектронного изделия в целом;

контролируемая среда в охлаждающей системе. Контролируемая среда в объеме охлаждения призвана минимизировать тепловые потери (идеально — вакуум) или обеспечить контролируемые и стабильные условия эксплуатации. Соответственно, изменения и нарушения данной среды сказываются на эффективности термоэлектрической охлаждающей конструкции.

### Эксплуатационная надежность ТЭ-модуля

Методы ускоренных испытаний призваны проверить надежность ТЭ-модуля в оптоэлектронных применениях.

На рис. 2 приведены результаты надежностных испытаний стандартных ТЭ-модулей компании РМТ. Методы испытаний — температурные (термоудар) (см. рис. 2, а) и ускоренные испытания наработку на отказ при повышенной температуре (см. рис. 2, б).

Как отмечалось в работе [1], воздействующие факторы должны вести к деградации ТЭ-модуля, и в частности ТЭ-материала конструкции охладителя. Причем при известных механизмах деградации тенденции в изменении измеряемых параметров одинаковы — происходит увеличение сопротивления модуля и уменьшение добротности на фоне незначительных изменений постоянной времени ТЭ-модуля в составе конструкции.

В частности, такой метод как температурные испытания (термоудар) прежде всего должен приводить к механической деградации ТЭ-модуля, а именно появлению микротрещин в материале модуля. Это в свою очередь должно проявляться в увеличении электрического сопротивления модуля  $R$  и соответствующем уменьшении его добротности  $Z$ , так как имеется обратно пропорциональная зависимость ТЭ-добротности от сопротивления модуля. В упрощенном виде это можно записать как

$$Z \sim \frac{\alpha^2}{k_0} \frac{1}{R_0}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент Зеебека ТЭ-материала;

$k_0$  — теплопроводность ветви;

$R_0$  — электрическое сопротивление ветви.

В случае ускоренных испытаний наработку на отказ при повышенной температуре механизмы деградации, по-видимому, более сложны (одновременное воздействие температуры, тока и тепловых напряжений), но результат похожий — увеличение сопротивления  $R$  и уменьшение добротности  $Z$ .

Постоянная времени охладителя оказывается более инертной, чем  $Z$  (1) и  $R$ , к такому виду воздействия, как надежностные испытания, однако ее поведение не менее познавательно. Поведение постоянной времени  $\tau$  — это показатель тенденции изменения теплопроводности  $k$  ТЭ-модуля

$$\tau \sim \frac{C}{k}, \quad (2)$$

где  $C$  — теплоемкость всех объектов, соединенных с холодными концами ТЭ-ветвей.

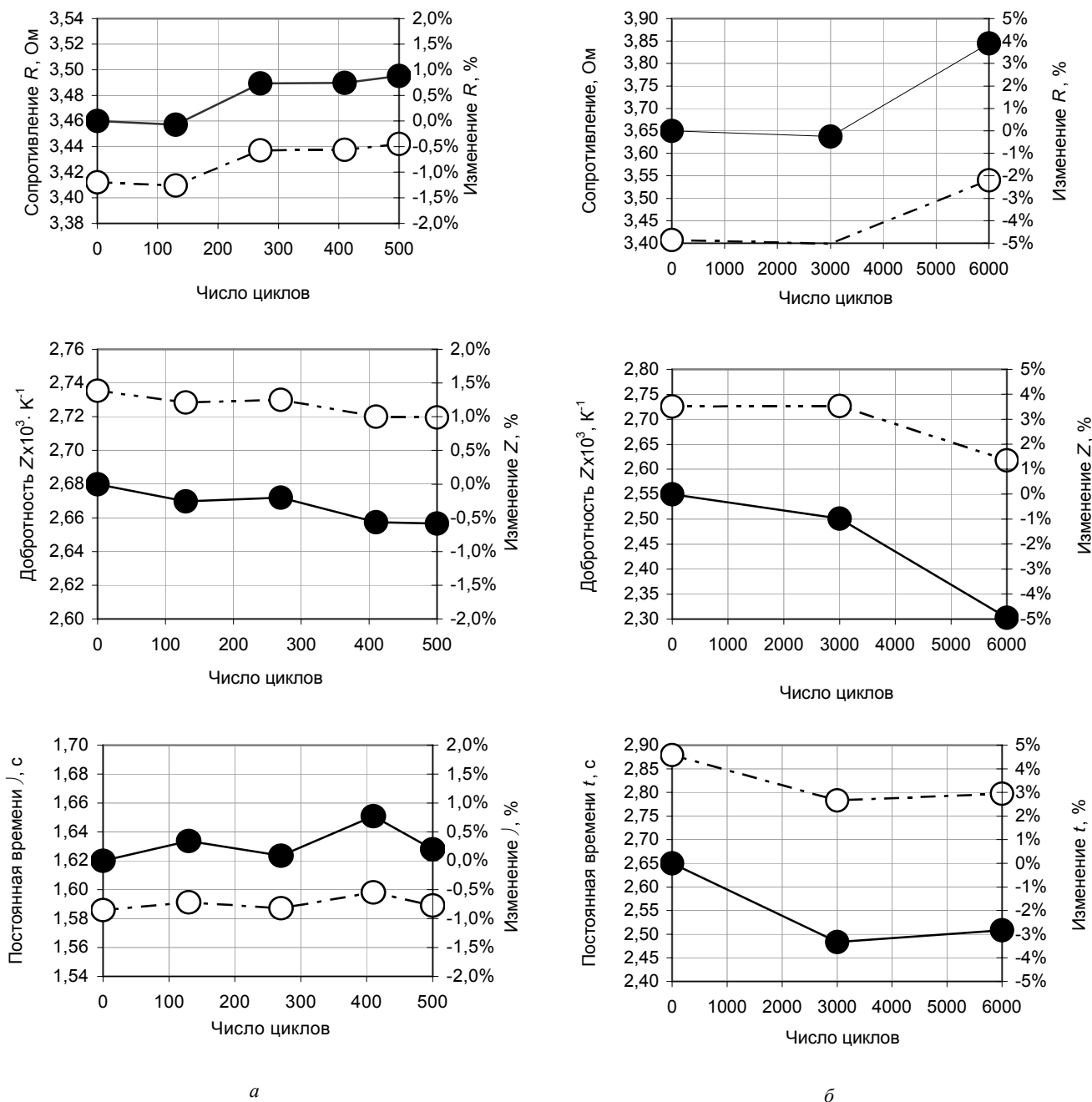


Рис. 2. Изменение параметров ТЭ-модуля 1МС06-060-10 (Z, R, и τ) в процессе:

а — температурных испытаний: 500 циклов термоудара от -50 до +125 °С; б — испытаний на наработку на отказ: 6000 циклов "включено—выключено" (5 мин/5 мин) при повышенной температуре (85 °С)  
 ○ — левая шкала; ● — правая шкала

При температурных испытаниях, приводящих к объемным деформациям в материале ТЭ-модуля, его теплопроводность несколько уменьшается, отсюда незначительное возрастание его константы времени, что и наблюдается в эксперименте (см. рис. 2, а).

При наработке на отказ при повышенной температуре включаются диффузионные механизмы приконтактных слоев теплопереходов, отсюда такое, на первый взгляд, парадоксальное уменьшение константы времени охладителя (см. рис. 2, б).

### Монтаж ТЭ-модуля на корпус прибора

Качество монтажа ТЭ-модуля на основании корпуса оптоэлектронного прибора призвано, кроме механической интеграции, обеспечить надежный теплосток с основания охладителя. Как при монтаже охладителя, так и в процессе эксплуатации целостность теплового контакта ТЭ-модуля с основанием прибора может нарушаться или ухудшаться. Например, в случае пайки как метода монтажа в процессе сборки на корпус возможны локальные непропаи, а в процессе эксплуа-

тации возможны коррозия или нарушение паяного соединения с уменьшением площади теплового контакта. Очевидно, что качество  $R$  при монтаже ТЭ-модуля на основание корпуса остается неизменным.

Будем моделировать ухудшение качества контакта ТЭ-модуля с основанием как уменьшение площади этого контакта. Механизмы воздействия изменения площади контакта на величины  $Z$  и  $\tau$  различны.

Для добротности модуля этот параметр существен как характеристика коэффициента теплоотдачи с поверхности контакта. При определении  $Z$  однокаскадного ТЭ-модуля с помощью метода Хармана [2, 3] запишем ТЭ-добротность как

$$Z = \frac{\Delta T}{T_{av}} \frac{N\alpha}{IR}, \quad (3)$$

где  $N$  — число ветвей в ТЭ-модуле.

Если  $A$  — полный коэффициент теплоотдачи с поверхности контакта ТЭ-модуль—основание, то от величины  $A$  зависит как средняя температура ТЭ-модуля  $T_{av}$ , так и разность температур  $\Delta T$  на модуле. При нарушении теплоотвода с горячей стороны модуля последний начинает перегреваться. В приближении малой теплоотдачи по воздуху выразим обе величины —  $T_{av}$  и  $\Delta T$  — через  $A$  [4, 5]

$$\Delta T(A) = \frac{\alpha I}{k_0} \left( T_a + \frac{I^2 N R_0}{A} \right) - \frac{I^2 R_0}{2k_0 A}, \quad (4a)$$

$$T_{av}(A) = T_a \left( 1 + \frac{\alpha I}{2k_0} \right) + \frac{I^2 R_0 N}{A} \left( 1 + \frac{A}{4Nk_0} \right). \quad (4б)$$

Как видим, обе величины возрастают с уменьшением  $A$ , однако  $\Delta T$  возрастает быстрее, так как температура горячей стороны опережает в росте температуру холодной стороны. Отсюда величина ТЭ-добротности  $Z$  должна обнаруживать рост при ухудшении теплового контакта с корпусом (рис. 3).

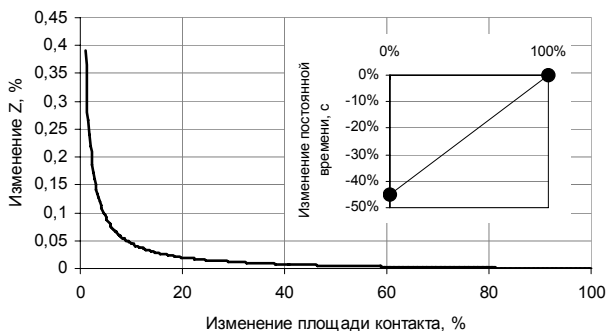


Рис. 3. Расчетная оценка зависимости  $Z$  и  $\tau$  однокаскадного ТЭ-модуля от площади контакта с основанием оптоэлектронного прибора

В эксперименте действительно наблюдается повышение  $Z$  (рис. 4), что согласуется с теоретическими оценками.

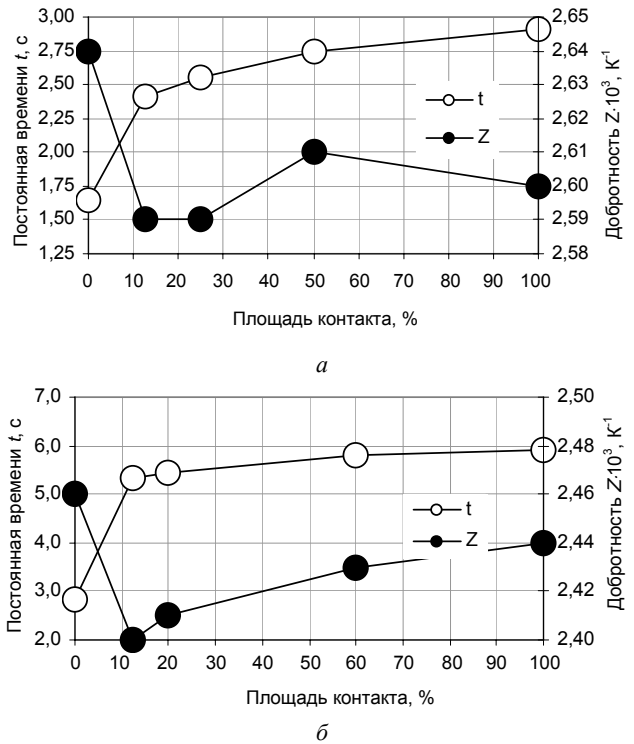


Рис. 4. Измеренная зависимость параметров ТЭ-модуля от площади контакта с основанием оптоэлектронного прибора:

$a$  — ТЭ-модуль типа 1MC06-060-10;  $b$  — ТЭ-модуль типа 2MC06-041-15

Для постоянной времени модуля существенна теплоемкость объектов, контактирующих с модулем. Константа времени однокаскадного ТЭ-модуля с качественным тепловым контактом горячей стороны и основания корпуса может быть оценена как

$$\tau_1 = \frac{LC_1}{s_0 k_0 N}, \quad (5)$$

где  $C_1$  — теплоемкость коммутационных шин и теплоперехода ТЭ-модуля на охлаждаемой стороне;

$N$  — число ветвей в модуле;

$s_0$  — площадь поперечного сечения ветви.

Для однокаскадного ТЭ-модуля, холодный и горячий теплопереходы которого находятся в постоянном теплообмене с окружающей средой (для свободного модуля), константа времени может быть представлена как

$$\tau_2 = \frac{C_1 C_2 L}{(C_1 + C_2) k_0 N s_0}, \quad (6)$$

где  $C_1, C_2$  — теплоемкости всех элементов на холодном и горячем теплопереходах, соответственно.

Если  $C_1 \approx C_2$ , что очень близко к реальности для свободного модуля, то постоянная времени для однокаскадного модуля, полностью утратившего контакт с корпусом примерно в два раза, меньше, чем для модуля, качественно установленного на корпус

$$\tau_2 \approx \frac{1}{2} \tau_1. \quad (7)$$

Изменение постоянной времени  $\tau$  носит ступенчатый характер исходя из критерия "есть контакт — нет контакта" с теплоемкостью корпуса. Это подтверждается экспериментальными данными (см. рис. 4): для однокаскадного ТЭ-модуля 1МС06-060-10 константа времени, действительно, уменьшается на 81,2 %; для двухкаскадного ТЭ-модуля это падение выражено несколько меньше.

Видно, что в случае однокаскадного, и в случае двухкаскадного ТЭ-модуля имеет место возрастание  $Z$ , но оно относительно мало и не столь показательно. Именно постоянная времени конструкции — характерный показатель надежности контакта ТЭ-модуля и корпуса.

### Монтаж объекта охлаждения на теплопоглощающую поверхность ТЭ-модуля

Качество и надежность монтажа объекта охлаждения на холодную сторону ТЭ-модуля также существенно влияют на постоянную времени модуля в составе конструкции.

Как видно из выражений (2) и (5), постоянная времени прямо пропорциональна теплоемкости, а значит, массе охлаждаемого объекта. На рис. 5 даны теоретические кривые зависимости констант времени различных ТЭ-модулей от массы охлаждаемого объекта.

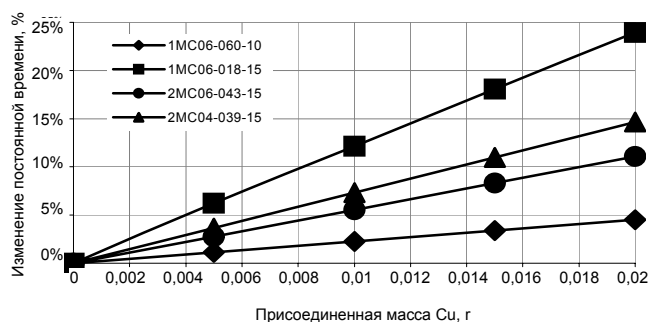


Рис. 5. Расчетная оценка зависимости изменения постоянной времени ТЭ-модуля от массы охлаждаемого объекта

Экспериментальные данные подтверждают, что постоянная времени ТЭ-модуля имеет сильную зависимость от прикрепленной к холодной стороне массе (рис. 6).

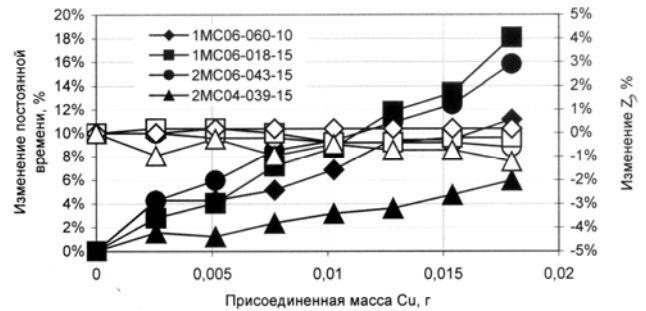


Рис. 6. Зависимость параметров ТЭ-модуля от присоединенной к холодной стороне эквивалентной массы меди для нескольких типов ТЭ-модуля: заполненные значки —  $\tau$ , левая шкала; полые значки —  $Z$ , правая шкала

В связи с этим существенные изменения постоянной времени ТЭ-модуля в процессе эксплуатации в составе конструкции без видимых изменений добротности и сопротивления могут однозначно свидетельствовать о потере контакта с охлаждаемым объектом (обрыв, отпаивание, разрушение и т. п.).

### Среда системы охлаждения

В случае создания специальной среды в системе охлаждения ее качество и постоянство в процессе эксплуатации также требуется контролировать. Измерение параметров ТЭ-модуля в составе оптоэлектронного прибора позволяет осуществлять этот контроль.

#### Вакуумная среда

Как известно, вакуум в системе охлаждающей ТЭ-конструкции является наилучшим случаем для уменьшения паразитных тепловых потерь, так как практически исключает дополнительную теплопроводность и конвекцию, увеличивающую теплоотдачу с холодной стороны.

При нарушении вакуумной плотности конструкции прибора будет наблюдаться заметное уменьшение эффективного охлаждения. Измерения дадут заметное изменение величины добротности, однако сопротивление ТЭ-модуля будет практически неизменно. Слабое влияние теплопроводности оказывает влияние и на постоянную времени, которая незначительно падает.

#### Газонаполненная среда

В случае нарушения газонаполнения в охлаждаемом объеме появляется неконтролируемая среда (на практике скорее всего окружающий воздух). Это должно приводить к изменению добротности конструкции, но заметно меньше, чем для случая с вакуумом. Более заметно будет то, что окружающий воздух имеет достаточную влажность. При

работе охлаждающей конструкции в условиях влажной среды также будет наблюдаться конденсация влаги на холодной стороне, что однозначно приведет к уменьшению добротности конструкции.

Оценим расчетным путем чувствительность величин  $Z$  и  $\tau$  (формулы (6), (7)) однокаскадного ТЭ-модуля к нарушению вакуума, т. е. возрастанию влияния двух процессов:

- теплопроводности в зазорах между ветвями ТЭ-модуля (сказывается в значении как  $Z$ , так и  $\tau$ );
- теплоотдачи с поверхности ТЭ-модуля (сказывается в значении  $Z$ ).

Пусть в вакуумную конструкцию проник воздух. Рассмотрим, что при этом происходит с величиной ТЭ-добротности ТЭ-модуля в составе прибора. На воздухе кроме излучательного проявляются теплопроводный и конвекционный механизмы теплопередачи. Учтем дополнительную теплопроводность по воздуху в зазорах между ветвями как увеличенную теплопроводность каждой ветви ТЭ-модуля

$$k'_0 = k_0 \left( 1 + \frac{k_{air}}{k_{mater}} \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) \right), \quad (8)$$

где  $k_0$  — теплопроводность ТЭ ветви;

$k_{air}$  — теплопроводность воздуха;

$k_{mater}$  — теплопроводность термоэлектрического материала;

$\beta$  — коэффициент заполнения модуля, представляющий отношение площади поперечного сечения всех ветвей в модуле к площади теплоперехода модуля.

Если теплопроводность ТЭ-ветви составляет  $k_0 = 1,45$  Вт/мК, то для 1МС06-060 и 1МС06-018 (коэффициенты заполнения  $\beta = 0,36$ ) при 293 К теплопроводность  $k'_0 = 1,49$  Вт/мК.

В табл. 1 приведены результаты расчетов для коэффициентов излучательной и конвекционной теплоотдачи на единицу поверхности для 1МС06-060-xx и 1МС06-018-xx при измерениях по методу Хармана.

Таблица 1

#### Результаты расчетов

Тип ТЭ-модуля	$\alpha_{rad}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_{conv}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_{sum}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
1МС06-060	1,61	8,17	9,78
1МС06-018	2,93	9,29	12,22

*Примечание.* Расчетные оценки излучательного и конвекционного коэффициентов теплоотдачи ТЭ-модулей получены при измерениях по методу Хармана. Температура окружающей среды принята 293 К. Характерная разность температур 3 К. Учтена возможность снижения радиационной нагрузки с помощью экранов.

На рис. 7, а приведены примеры теоретических расчетов (см. формулы (3), (4а, б)), подтверждающие уменьшение ТЭ-добротности конструкции при нарушении контролируемой среды системы охлаждения.

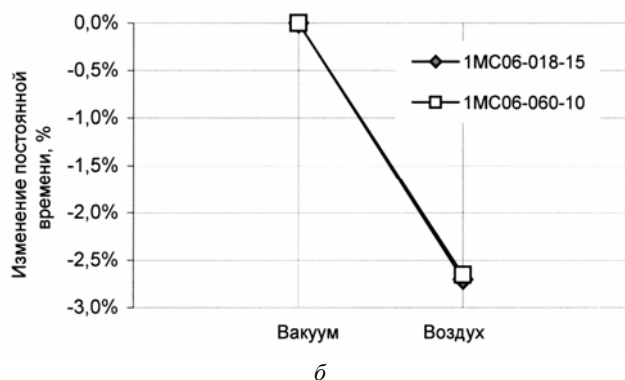
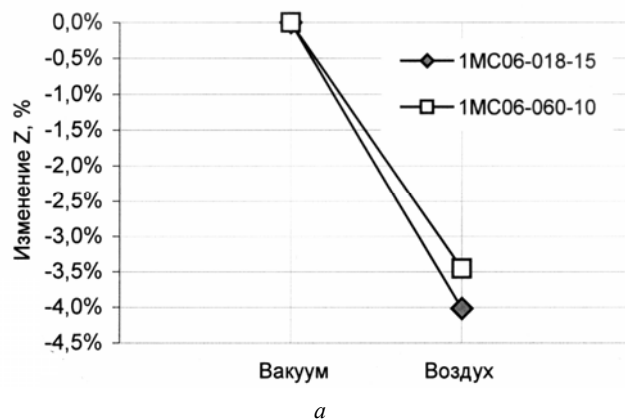


Рис. 7. Расчетная оценка изменения:

а — ТЭ-добротности  $Z$  и б — постоянной времени  $\tau$  ТЭ-модуля в зависимости от среды охлаждения

Для константы времени ТЭ-модуля существенной оказывается лишь эффективное увеличение теплопроводности ТЭ-ветвей. С учетом выражений (5), (8) получаем уменьшение константы времени ТЭ-модуля в воздушной среде (см. рис. 7, б).

## Заключение

В табл. 2 воспроизведена диагностическая матрица из работы [1], с помощью которой по измерению трех предложенных параметров ( $Z$ ,  $R$ ,  $\tau$ ) можно диагностировать причины ухудшения качества ТЭ-модуля.

В табл. 3 приведено продолжение данной диагностической матрицы для комплекса случаев ТЭ-модуля, интегрированного в составе оптоэлектронного прибора.

Таблица 2

Диагностическая матрица дефектов ТЭ-модулей [1]

Дефект	$R$	$Z$	$\tau$
Отслоение коммутационных пластин от керамики	~ const	~ const	↑
Перепутанная полярность ветвей ТЭ-модуля	~ const	↓	↑*
Тепловой контакт ветвей ТЭ-модуля с припойным мениском	~ const	↓	↓
Тепловой и электрический контакты ветвей ТЭ-модулей с припойным мениском	↓	~ const	↓
Короткое замыкание ветвей ТЭ-модуля	↓	↓	↓
Двухкаскадный ТЭ-модуль: перепутанная полярность одного из каскадов	~ const	~ const	↓**
Деградация ТЭ-материала модуля	↑	↓	~ const

\* ~const при малом токе.

\*\* ~ в два раза меньше номинального значения.

Таблица 3

Диагностическая матрица дефектов ТЭ-модуля, интегрированного в оптоэлектронный прибор

Дефект	$R$	$Z$	$\tau$
Деградация ТЭ-модуля в процессе эксплуатации	↑	↓	↑ или ↓
Дефекты монтажа ТЭ-модуля в корпусе прибора	~ const	↑	↓*
Дефекты монтажа объекта охлаждения на ТЭ-модуль	~ const	~ const	↓
Нарушение среды охлаждения	~ const	↓	↓

\* При полном отрыве от корпуса ~ в два раза меньше номинального значения.

Из табл. 3 видно, что применение метода анализа по трем критериям позволяет проводить выявление причин, вызывающих ухудшение качества и надежности термоэлектрических охлаждающих конструкций в составе оптоэлектронных приборов. При этом установление причин возможно без демонтажа ТЭ-модуля из оптоэлектронного прибора.

По одному же из рассмотренных параметров, например по  $R$ , в трех из четырех рассмотренных случаев невозможно не только идентифицировать причины происходящего, но и вообще установить факт ухудшения качества охлаждающей конструкции, а также ее ответственности за ухудшение эксплуатационных качеств оптоэлектронного прибора. И, наоборот (что также важно), если причины выхода из строя оптоэлектронного прибора не связаны с ТЭ-модулем, то метод позволяет подтвердить это достаточно точно, если все измерен-

ные параметры находятся в пределах допустимых значений.

### Л и т е р а т у р а

1. *Yershova L. B., Gromov G. G., Drabkin I. A.* Complex Express TEC Testing: Proc. of XXII Int. Conf. on Thermoelectrics. La Grande Motte, France. August 17—21, 2003. P. 504.
2. *Harman T. C.* Measurement of Pertinent thermoelectric Properties// Thermoelectric Materials and Devices/ *Cadoff I. B., Miller E., Reinhold*, 1967. Chap. 6.
3. *Babin V. P., Gorodetskiy S. M.* Thermoelectric modules quality testing by a manufacturer: Proc. XIV Int. Conf. on Thermoelectrics. — St. Petersburg, Russia. June 27—30, 1995. P. 338.
4. *Драбкин И. А.* Характеристики термоэлектрических модулей. Термоэлектрическое охлаждение/ Под ред. Л. П. Булата. — СПб: СПбГУНиПТ, 2002. С. 99.
5. *Gromov G., Kondratiev D., Rogov A., Yershova L.* Z-Meter: Easy-to-use Application and Theory: Proc. of VI European Workshop on Thermoelectrics, Freiburg, 2001.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

## reliability of thermoelectric modules in optoelectronic devices

G. G. Gromov, L. B. Yershova  
RMT Ltd, Moscow, Russia

I. A. Drabkin  
Institute of Chemical Problems for Microelectronics, Moscow, Russia

*International and national standards require high reliability from thermoelectric (TE) modules applied in optoelectronic devices. A standard criterion is the measurement and specification of the module electric resistance (R). At the manufacturing stage the module TE figure-of-merit (Z) is also controlled by the Harman method. Paper [1] suggested a complex quality controls method by measuring TE module R, Z and time constant ( $\tau$ ). As a follow-up of this approach the given paper shows the advantages of the complex (R, Z,  $\tau$ )-measurement for estimating the quality of assemblies based on TE modules as well as modules reliability control or while operating in optoelectronic devices. Theoretical backgrounds and experimental results are offered. The measurements were carried out with the help of Z, R,  $\tau$ -methods of the DZ4065 and DX4165 series produced by RMT Ltd.*

УДК 621.383

## Видеопроцессор реального времени для пировидикона

В. Н. Бодров, П. С. Кондратов  
ГОУВПО МЭИ (ТУ), Москва, Россия

Г. А. Падалко  
ФГУП "АОМЗ", г. Азов Ростовской обл., Россия

*Встроенная система обработки теплового изображения была создана на базе матричной БИС FPGA, т. е. вентиляционной матрицы с эксплуатационным программированием. Основная задача такой системы — увеличение отношения сигнал/шум применительно к тепловым изображениям. Она содержит быстрый 12-битовый аналого-цифровой преобразователь, RAM объемом 1 Мбайт, съемный модуль для подсоединения к персональному компьютеру (ПК). Реализуются алгоритмы с использованием подстройки различных окон. Показана возможность реализации быстрого преобразования Фурье (FFT) для тепловых изображений. Предусмотрены возможности для цветового кодирования тепловых изображений, а также подсоединения различных модулей для передачи и сохранения данных.*

Исходные тепловизионные изображения, в частности получаемые непосредственно с пировидиконов, имеют ряд особенностей по сравнению с обычным телевизионным изображением. Это прежде всего низкий контраст и малое соотношение сигнал/шум в исходном сигнале изображения. Данные факторы обусловлены физической природой формируемого теплового изображения, спецификой работы приемных датчиков (приемников) изображения и спецификой формирования сигналов изображений.

Поэтому необходимым условием формирования качественной последовательности тепловых картин является использование устройства, позволяющего устранить недостатки исходного термо-

изображения путем его обработки в реальном масштабе времени. Под реальным масштабом времени мы понимаем такой темп процесса, при котором реальная задержка не превышает длительности одного кадра. Для решения этой задачи необходимо, чтобы основные операции: захват изображения; обработка сигналов изображения и его передача на устройство отображения — также осуществлялись в реальном масштабе времени. Устройство, выполняющее совокупность этих операций, часто называют видеопроцессором.

Подобные устройства можно разделить на две категории: