

Циклостойкие миниатюрные термоэлектрические модули

© М.П. Волков, И.А. Драбкин, Л.Б. Ершова, А.А. Назаренко

ООО „РМТ“,
115230 Москва, Россия

E-mail: mikhail.volkov@rmtltd.ru

(Поступила в Редакцию 20 декабря 2018 г.
В окончательной редакции 24 декабря 2018 г.
Принята к публикации 28 декабря 2018 г.)

Представлены данные испытаний по новым циклостойким миниатюрным термоэлектрическим модулям, которые могут применяться, в частности, для проведения ДНК-анализа в молекулярной биологии. Высокая плотность тепловых потоков и, как следствие, значительные механические напряжения в миниатюрных термоэлектрических модулях предъявляют особые требования к их надежности. Разработанная технология позволяет миниатюрным термоэлектрическим модулям выдерживать более 500 тысяч циклов нагрев-охлаждение (от 20 до 100°C) со скоростью 20°C/с и более.

DOI: 10.21883/FTP.2019.05.47546.04

1. Введение

Термоэлектрические модули (ТЭМ) широко применяются в молекулярной биологии для проведения ДНК-анализа с помощью циклического нагрева и охлаждения биологических жидкостей (метод полимеразной цепной реакции (PCR)). При этом значительные тепловые механические напряжения в ТЭМ предъявляют особые требования к их надежности — циклостойкости.

Используемые для PCR „большие“ циклостойкие ТЭМ (ЦТЭМ) размером более 20 × 20 мм и высотой ветвей ~ 1 мм выпускаются несколькими термоэлектрическими компаниями.

Однако в последнее время для создания мобильных PCR установок требуется индивидуальное циклирование каждого образца или небольшой группы образцов. Это требование могут обеспечить только миниатюрные ЦТЭМ, размеры которых менее 20 × 20 мм. Обычно каждый из таких модулей ответствен за свой температурный цикл и должен иметь свою собственную индивидуальную электронную систему управления.

Как показано далее, обычные миниатюрные термоэлектрические охладители непригодны для многократного быстрого периодического нагрева и охлаждения. Также оказалось невозможным применить технологию производства „больших“ ЦТЭМ для создания миниатюрных ЦТЭМ. В этой связи была поставлена задача разработки новой технологии для миниатюрных ЦТЭМ.

Цели этой работы заключаются в следующем:

- показать, что обычные миниатюрные термоэлектрические модули непригодны для циклических применений;
- объяснить, почему технология изготовления „больших“ ЦТЭМ не применима для миниатюрных ЦТЭМ;
- сообщить о создании новых миниатюрных ЦТЭМ, которые выдерживают более 500000 циклов нагрева-охлаждения (от 20 до 100°C) со скоростью 20°C/с и более.

2. Температурное циклирование „обычных“ миниатюрных ТЭМ

На начальном этапе была рассмотрена возможность использования обычных миниатюрных ТЭМ для многократного температурного циклирования. Для этого были испытаны стандартные модули 1MD06-049-05AN компании РМТ.

Испытания проводились на оборудовании РМТ DX5300 (рис. 1).

Параметры испытаний были следующими:

- температура основания ТЭМ +40°C;
- максимальная температура свободной стороны ТЭМ +100°C;
- минимальная температура свободной стороны ТЭМ +20°C;
- время цикла 30 с.

В испытании участвовало 12 модулей.

Критерием отказа было увеличение электрического сопротивления модуля на переменном токе R_{AC} более

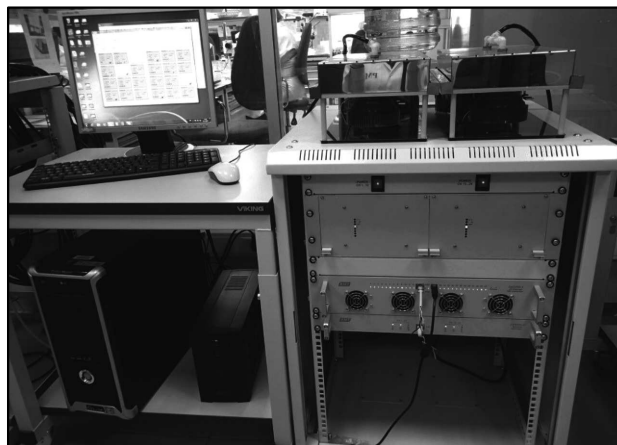


Рис. 1. Оборудование для температурного циклирования DX5300.

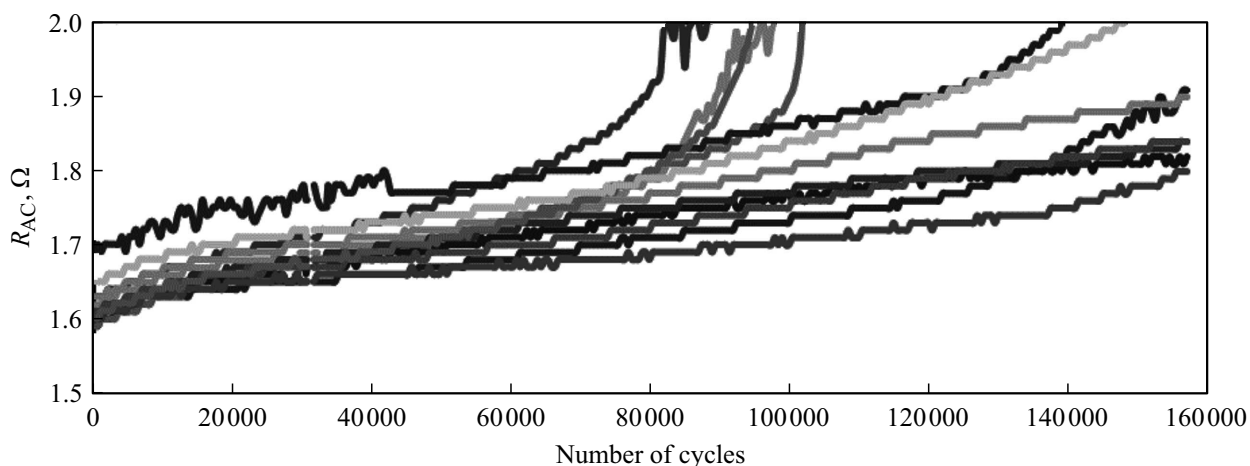


Рис. 2. Зависимость сопротивления ТЭМ 1MD06-049-05AN от числа циклов.

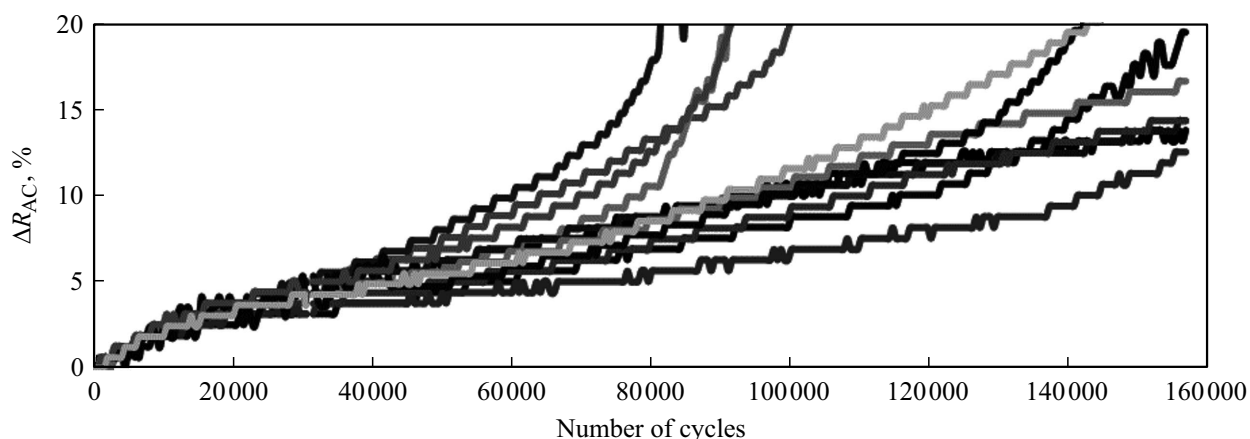


Рис. 3. Зависимость изменения сопротивления ТЭМ 1MD06-049-05AN от числа циклов.

чем на 5% по сравнению с исходной величиной. Для статистической обработки были дополнительно использованы 10%-й критерий, а также критерий полного отказа ТЭМ (обрыв электрической цепи ТЭМ).

На рис. 2 и 3 представлены зависимости величины R_{AC} ТЭМ и ее изменения ΔR_{AC} от числа циклов.

Из рис. 3 были определены значения среднего времени отказа ТЭМ в соответствии с тремя критериями, упомянутыми выше. Эти значения показаны в таблице.

Каковы были причины отказа ТЭМ? Во время визуального осмотра отказавших модулей после испытаний была обнаружена миграция ветвей ТЭМ с их начальных позиций на значительные расстояния (рис. 4).

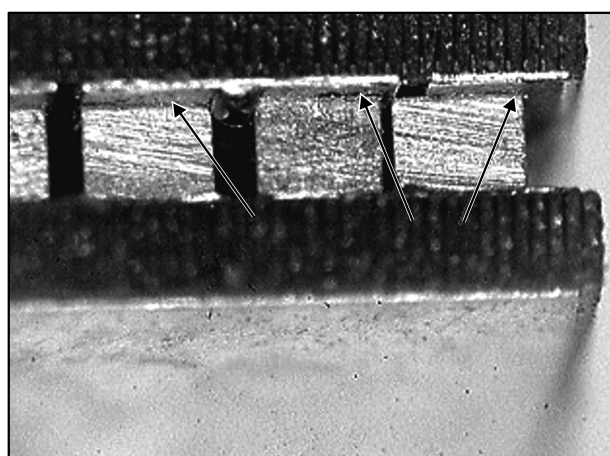


Рис. 4. Миграция ветвей ТЭМ.

Среднее время отказа ТЭМ	
Критерий отказа	Среднее время отказа, число циклов
$\Delta R_{AC} > 5\%$	45500
$\Delta R_{AC} > 10\%$	95500
Полный отказ	142000

Миграция ветвей ТЭМ происходит не из-за плавления припоя (температура плавления припоя состава $\text{Sn}_{95}\text{Sb}_5$ в ТЭМ составляет около 230°C), а из-

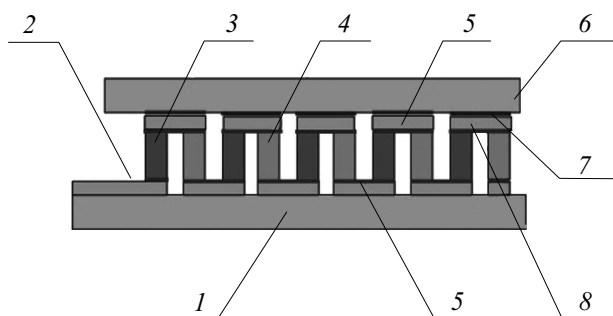


Рис. 5. Схематическая конструкция „больших“ ЦТЭМ [1]: 1, 6 — керамические теплопереходы, 2, 8 — контактные площадки, 3, 4 — ветви, 5 — припой, 7 — эластичный клей.

за скольжения ветвей вдоль припоя. Мы считаем, что это произошло из-за периодического расширения/сжатия керамических теплопереходов модуля, благодаря чему были достигнуты благоприятные условия для скольжения ветвей по мягкому припою. Миграция ветвей ТЭМ наблюдалась главным образом для ветвей, расположенных с внешних сторон ТЭМ, особенно расположенных в углах ТЭМ. Это связано с тем, что растягивающие/сжимающие механические напряжения, возникающие из-за расширения/сжатия керамики, являются максимальными в периферийных областях ТЭМ.

В результате во время циклирования часть ветвей сместилась внутрь ТЭМ (рис. 4).

В результате миграции ветвей ТЭМ между ветвями и контактными площадками образовались промежутки (см. центральную ветвь на рис. 4). Это привело к увеличению электрического сопротивления модулей и в конечном счете к их отказу.

Из рис. 2 и 3 и таблицы можно сделать вывод, что обычные миниатюрные ТЭМ 1MD06-049-05AN могут выдерживать всего несколько десятков тысяч циклов, что далеко от желаемых 500 000 циклов. Поэтому необходимо внести изменения в конструкцию и технологию ТЭМ.

3. Возможность применения технологии „больших“ циклостойких модулей для миниатюрных ТЭМ

Как говорилось выше, технология „больших“ ЦТЭМ с размерами более 20×20 мм широко известна [1]. Схематически конструкция таких ТЭМ представлена на рис. 5.

Устойчивость „больших“ ТЭМ к быстрым многократным циклам достигается за счет эластичного клея между верхней керамикой и контактными площадками.

Может показаться, что возможно перенести технологию „больших“ ЦТЭМ для изготовления миниатюрных

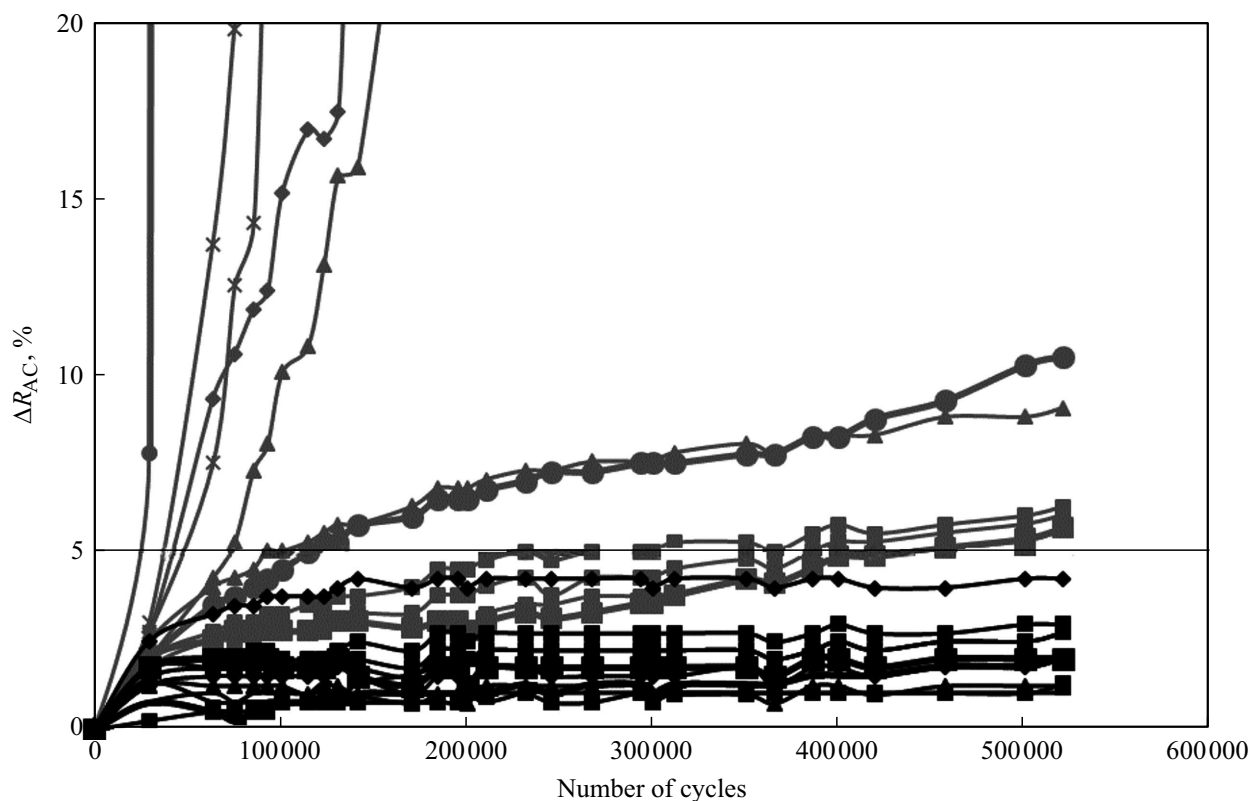


Рис. 6. Зависимость изменения сопротивления ТЭМ 1MC06-126-05 от числа циклов (серые линии относятся к стандартным модулям, черные линии — к ЦТЭМ).

циклостойких модулей. Оказалось, что это не так. Причины заключаются в следующем:

- „большие“ ТЭМ имеют большие размеры контактных площадок, благодаря чему контактные площадки обычно используются в виде отдельных элементов и могут быть легко размещены и приклеены к керамике;
- миниатюрные ТЭМ имеют настолько небольшие размеры контактных площадок, что они не могут быть отдельными элементами, а изготавливаются путем напыления металла на керамику.

Все вышеизложенное приводит к выводу, что в случае миниатюрных ЦТЭМ необходимо применить новые методы для создания контактных площадок и эластичного присоединения их к керамике.

4. Новые циклоустойкие ТЭМ

Нами была предпринята попытка решить проблему, описанную выше. В результате разработана новая технология изготовления миниатюрных циклоустойких ТЭМ. Эта технология хорошо сочетается со стандартной технологией производства РМТ. По результатам этой разработки подана заявка на патент РФ [2].

Чтобы проверить стойкость разработанных ТЭМ к многократным быстрым циклам нагрева и охлаждения, были изготовлены и подвергнуты испытаниям циклоустойкие модули типа 1МС06-125-05.

Испытательное оборудование, а также параметры тестирования и критерии отказа были такими же, как и для предыдущих испытаний модулей 1МД06-049-05АН.

Количество испытанных ТЭМ было 11 шт. Для получения сравнительных данных были также протестированы 11 стандартных модулей 1МС06-125-05.

Результаты испытаний показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно следующее:

- все 11 шт. ЦТЭМ выдержали испытания, после 500 000 циклов изменение R_{AC} не превысило 5%;
- все 11 шт. стандартных ТЭМ не выдержали испытания, после 500 000 циклов изменение R_{AC} было более 5%;
- примерно половина стандартных ТЭМ (5 шт.) претерпели отказ после 100 000 циклов;
- монотонный рост электрического сопротивления наблюдался для всех стандартных ТЭМ, тогда как для ЦТЭМ после 50 000–100 000 циклов наблюдаются лишь незначительные изменения R_{AC} .

5. Заключение

Работа позволяет сделать следующие выводы.

1. Показано, что обычные миниатюрные ТЭМ непригодны для циклических применений.
2. Доказано, что технология изготовления „больших“ ЦТЭМ неприменима для миниатюрных ЦТЭМ.
3. Разработана новая технология изготовления миниатюрных ЦТЭМ. ТЭМ, изготовленные с использованием

этой технологии, выдержали более 500 000 быстрых циклов.

В настоящее время разработанные ЦТЭМ компании РМТ проходят успешную апробацию в PCR установках нескольких зарубежных компаний.

Список литературы

- [1] В.Т. Каменский. Патент РФ № 2117362.
- [2] В.С. Аносов, М.П. Волков, А.А. Назаренко, Д.Е. Суров. Заявка на патент РФ № 2018109990/28(015505).

Редактор А.Н. Смирнов

Miniature thermoelectric modules developed for cycling applications

M.P. Volkov, I.A. Drabkin, L.B. Ershova, A.A. Nazarenko

RMT Ltd,
115230 Moscow, Russia

Abstract In the paper the test data on new cycle-resistant thermoelectric modules are presented and discussed. These modules can be applied in medical equipment for polymerase chain reaction to carry out DNA analysis with the help of rapid periodic heating and cooling of biological probes. However, high density of heat fluxes and, as a result, significant mechanical stresses in miniature thermoelectric modules involve special requirements to their reliability. The company RMT Ltd has developed a technology for the production of highly reliable miniature thermoelectric modules that allowed them to withstand more than 500 thousand heating-cooling cycles (from 20 to 100°C) with a rate of 20°C/sec and more.