

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА ГРЕЮЩЕГО ТОКА ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИЛОВЫХ IGBT МОДУЛЕЙ

Лобанова В.А., Верёвкин В.В., Пилипенко А.П.

Россия, г. Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева, АО «Протон-Электротекс»

Разработка и производство IGBT модулей связано со значительными временными, финансовыми и энергозатратами. Сюда входит разработка, производство, доставка, хранение комплектующих, а также квалификационные, исследовательские и типовые испытания. Принципа энергоэффективности необходимо придерживаться на каждом из перечисленных этапов, а в данной статье речь будет идти о повышении скорости и снижении затрат на разработку новых типов силовых IGBT модулей вследствие точного выбора требуемой длительности греющего импульса во время испытаний в циклическом режиме.

Ключевые слова: силовой IGBT модуль, электротермоциклирование, длительность греющего импульса, переходное тепловое сопротивление.

Типовая конструкция IGBT модуля [1] представляет собой многослойную структуру (Рис. 1), токопроводящие, активные, резистивные либо изолирующие элементы которой соединены между собой с помощью припоя, либо в редких случаях используется технология синтеринга или прямого размещения токопроводящих дорожек на основании с изоляцией эпоксидной смолой.

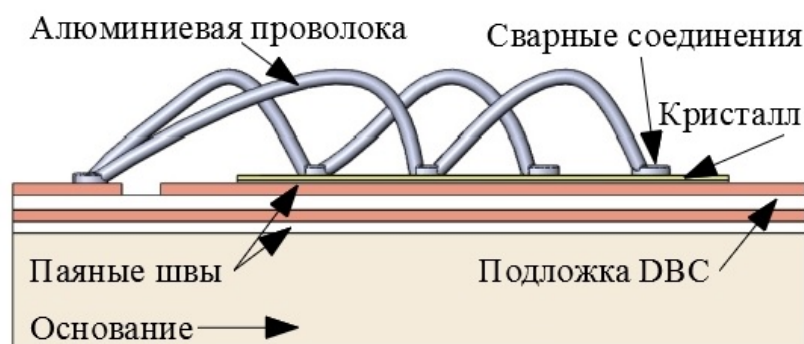


Рисунок 1 — Структура типового IGBT модуля паяной конструкции

На заключительных этапах разработки, после выбора конструкции нового прибора и определения его электрических характеристик, проводятся испытания на надежность. Среди них наиболее энергозатратными являются ресурсные испытания, характеризующиеся циклическим перепадом температур структурных элементов прибора либо под воздействием греющего тока (активное циклирование), либо под воздействием изменения температуры окружающей среды (пассивное циклирование).

В настоящее время существует проблема выбора времени цикла при проведении активного циклирования в связи с отсутствием методики решения данной задачи. Наиболее распространенным способом выбора времени цикла на практике является его произвольное задание в соответствии с ориентировочными значениями для «коротких» или «длинных» циклов, взятыми из различных источников, причем в зависимости от выбранного источника рекомендации могут различаться [2]. Общепринятый стандарт выбора времени цикла отсутствует.

В связи с этим предлагается формализовать подход к определению времени цикла ресурсных циклических испытаний с учетом особенностей конструкции конкретного исследуемого прибора.

Многослойная структура исследуемых приборов предполагает различие в коэффициентах температурного линейного расширения (КТЛР) соседствующих слоев [3], что обуславливает возникновение термомеханических напряжений как в зоне их соединения, так и воз-

действующих непосредственно на элементы конструкции прибора. Известно, что тепловое сопротивление элементов конструкции прямо пропорционально выбранной длительности греющего импульса, что объясняется инерционностью тепловых процессов и конечностью значений теплоемкостей и теплопроводности материалов [4]. Прибор считается равномерно прогретым, то есть в нем устанавливается стационарное распределение температуры, когда время нагрева в несколько раз больше суммы тепловых постоянных времени всех слоев. Из этого следует возможность подвергать термомеханическим нагрузкам те или иные элементы конструкции при достаточно быстром изменении количества рассеиваемой теплоты, то есть варьируя длительность греющего импульса.

Таким образом, некорректно установленная длительность греющего импульса приводит к некорректной нагрузке на элементы конструкции прибора, некорректным результатам испытаний и, как следствие, к неправильному установлению ресурса испытываемых приборов.

Важными параметрами для выполнения тепловых расчетов с поставленной целью являются температура p - n перехода T_j , температура корпуса T_c , тепловое сопротивление в установившемся режиме R_{th} , мощность потерь $P=U_i(i)I$ и переходное тепловое сопротивление $Z_{th}(t)$. Повышение температуры компонентов силового полупроводникового прибора ухудшает его рабочие характеристики и способствует выходу прибора из строя. Эти процессы характеризуются значениями параметра теплового сопротивления. Параметр R_{th} широко используется в качестве маркера степени деградации силового полупроводникового модуля и для расчетов надежностных характеристик разрабатываемого модуля в связи с возможностью реализации его отслеживания.

Для расчета корректной длительности греющего импульса, соответствующей нагрузке на исследуемые элементы конструкции прибора, предлагается следующая методика:

1. Составление граничной задачи с построением нестационарной тепловой модели для каждого слоя прибора с заданием геометрических и тепловых характеристик каждого слоя для кремниевого чипа $c\rho\frac{\delta T}{\delta t}=\lambda\frac{\delta^2 T}{\delta x^2}+\left(\frac{\delta\lambda}{\delta t}\right)\left(\frac{\delta T}{\delta x}\right)+Q(t,T)$ [5] и для остальных слоев

$$\frac{\delta T_i}{\delta t}=a_i\frac{\delta^2 T_i}{\delta x^2} \quad [6] \text{ с заданием граничных условий:}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_i\left(\frac{\delta T_i}{\delta x}\right)_{-R_k}=\lambda_{i+1}\left(\frac{\delta T_{i+1}}{\delta x}\right)_{+R_k} \\ (T_i)_{-R_k}=(T_{i+1})_{+R_k}-(\lambda_{i+1})R_{k-(i+1)}\left(\frac{\delta T_{i+1}}{\delta x}\right)_{+R_k} \end{array} \right. \quad (1)$$

где R_k — контактное сопротивление i -го интерфейса, $\alpha_i=\lambda_i/c_i\rho_i$ — коэффициент температуропроводности материала i -го слоя, ρ_i — плотность материала i -го слоя, c_i — удельная теплоемкость материала i -го слоя, λ_i — коэффициент теплопроводности материала i -го слоя.

2. Расчет распределения температуры по слоям во времени $T(t)$ решением системы дифференциальных уравнений числовым методом (в предлагаемой методике — явным сеточным), предварительно определив величину переходного теплового сопротивления для каждого слоя $Z(t)=[T_j(t)-T_c]/P_0=\sum_{i=1}^m R_i(1-e^{-t/\tau_i})$ [7].

3. Получение временных зависимостей $T_c(t)$ и $T_j(t)$ с помощью интеграла Дюамеля [7] $\Delta T(t)=P(t_0)Z(t)+\int_0^t \frac{dP(\tau)}{d\tau}Z(t-\tau)d\tau$, где $P(t_0)=P(t=0)$.

4. Получение экспериментальных зависимостей $T_c(t)$ и $T_j(t)$ с помощью специально разработанной установки измерения переходного теплового сопротивления $Z_{th}(t)$.

5. Корректировка построенной тепловой модели в соответствии с экспериментальными значениями для соответствия расчетных и экспериментальных зависимостей $T_c(t)$ корпуса и $T_j(t)$ полупроводникового элемента.

6. Построение временного графика распределения температур по слоям (Рис. 2) и выбор оптимальной длительности греющего импульса в соответствии с поставленной задачей. Приведенный на Рис. 2 график показывает степень прогрева каждого слоя (Si, Ge, ... — полупроводниковый элемент; Sn — слой припоя или, в некоторых случаях, синтер-слой между полупроводниковым элементом и DBC подложкой; Cu+Al₂O₃+Cu — DBC подложка, представляющая собой керамическую пластину, покрытую с двух сторон медной металлизацией, на одной из сторон которой, со стороны размещения полупроводниковых элементов, протравлена топология; нижний слой Sn — паяное соединение DBC подложки с основанием, нижний слой Cu — условное обозначение основания, которое может быть изготовлено из меди либо из композитных материалов) при выбранной длительности греющего импульса.

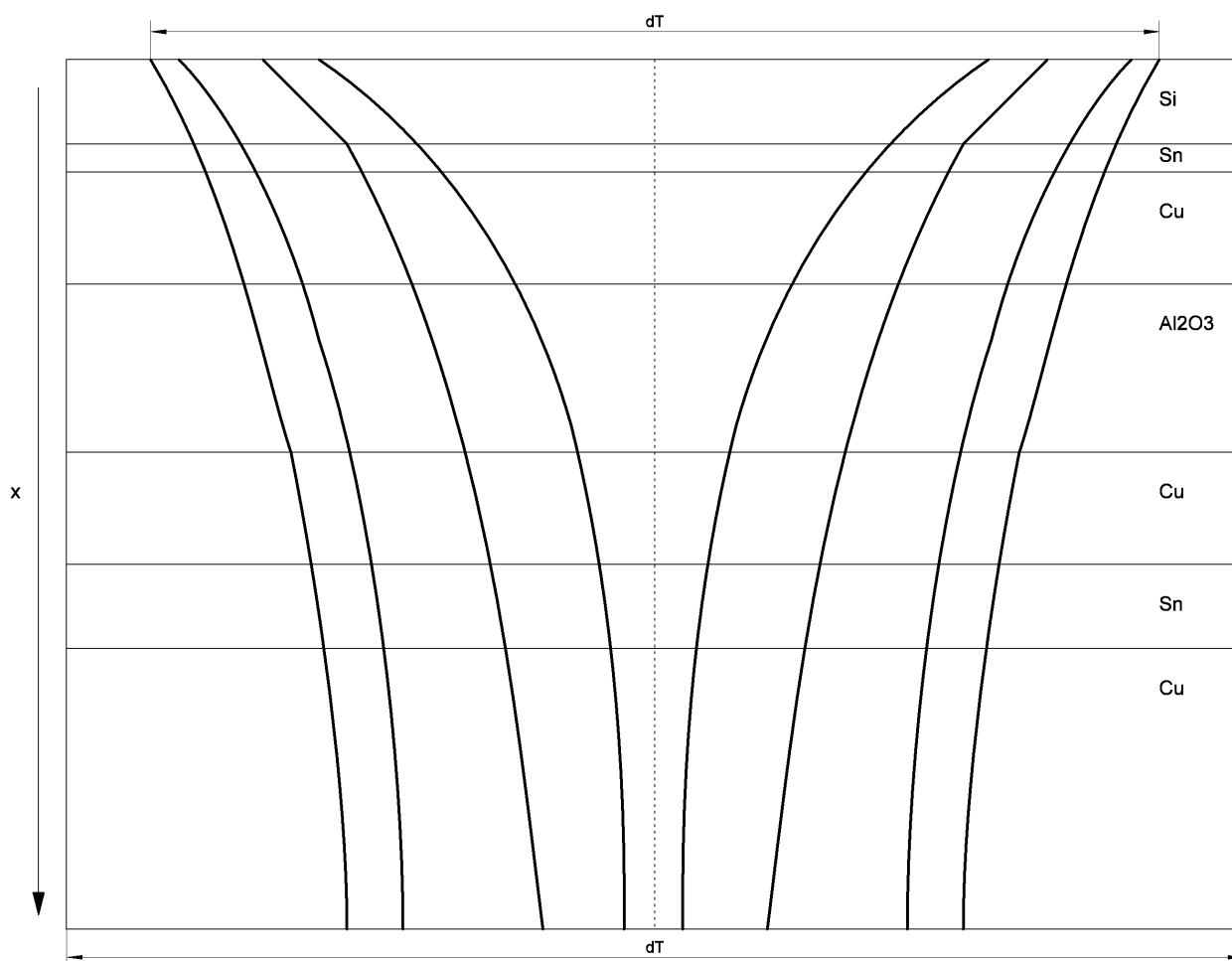


Рисунок 2 — Условный график перепада температур по слоям при различной длительности импульса греющего тока

Тепловая модель любой степени сложности будет иметь определенные допущения, которые упрощают расчет, но снижают его точность. Например, в стандартных технологических условиях неизвестно с достоверной степенью точности толщина слоя припоя и возможные имеющиеся в нем дефекты, не выявляемые с помощью ультразвукового сканирования или рентгенографической дефектоскопии. При этом теплопроводность таких элементов конструкции, как керамика в DBC подложках, зачастую известна только со слов ее поставщика, и неизвестны возможные ее дефекты в части пористости или включений. Предлагаемый метод применим и к другим типам силовых полупроводниковых приборов: так, напри-

мер, становится возможным определить, до какой степени в биполярном модуле можно уменьшать толщину молибдена, чтобы это не привело к снижению уровня ударного тока. Таким образом, фактические характеристики каждого слоя конструкции, особенно после сборочных операций, таких как пайка, синтеринг или сплавление, точно неизвестны. Также неизвестно влияние этих характеристик на распределение температуры по времени и координате.

С целью решения поставленной задачи была разработана и спроектирована установка измерения переходного сопротивления силовых полупроводниковых модулей, позволяющая производить контроль во времени таких параметров, как температура корпуса T_c , мощность потерь $P(t)$ и напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{ce(sat)}$ при измерительном токе, равном 1-2 А, являющееся температурно-чувствительным параметром (ТЧП), характеризующим падение напряжения на $p-n$ переходе, линейно уменьшающимся с ростом температуры. Далее по результатам измерений данных параметров с помощью ПО установки отдельной операцией производится градуировка по измерению кривой охлаждения, расчет температуры перехода T_j по ТЧП и вычисление $Z_{th}(t) = \delta T(t) / P(t)$. Подробнее устройство и принцип работы данной установки будет описано в отдельной статье.

Выводы.

Предложен метод, позволяющий определить длительность греющего импульса при испытаниях в циклическом режиме для нагрузки на выбранные элемента конструкции, с помощью специально сконструированной установки контроля переходного теплового сопротивления. Данный метод позволяет с точностью определить режим испытаний еще на этапе разработки модуля, что значительно сокращает энергозатраты проведение ресурсных испытаний с некорректно выбранной длительностью греющего импульса. Данный подход на текущий момент разработан для одномерной конструкции прибора, что представляет дальнейший интерес исследования его согласования с неоднородной моделью многоэлементных приборов. Предварительно предполагается их согласование, так как в одной из предыдущих работ было показано, что значение ТЧП соответствует температуре наиболее нагретого чипа в многоэлементном модуле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верёвкин В.В., Волобуев К.А., Стригунов С.Л., Пилипенко А.П., Лобанова В.А. Механизмы отказов IGBT-модулей при испытании в режиме электротермоциклирования [Текст]. — Известия СПбГУ «ЛЭТИ». — 2020. — № 10. — с. 68-79.
2. Sarkany Z., Vass-Varnai A., Rencz M. Effect of power cycling parameters on predicted IGBT lifetime [Текст]. — 2015 IEEE Aerospace Conference. — 2015. — с. 1-9.
3. Herrmann T., Feller M., Lutz J., Bayerer R., Licht T. Power cycling induced failure mechanisms in solder layers [Текст]. — 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. — 2007. — с. 1-7.
4. Вишневецкий А.И., Руденко В.С., Платонов А.П. Силовые ионные и полупроводниковые приборы [Текст]. — М.: Высш. Школа. — 1975. — 343 с.
5. Дерменжи П. Г., Кузьмин В.А., Крюкова Н.Н., Мамонов В.И., Павлик В.Я. Расчет силовых полупроводниковых приборов, под ред. В.А. Кузьмина [Текст]. — М.: Энергия. — 1980. — 184 с.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел: пер. с англ. [Текст]. — М.: Наука. — 1964. — 488 с.
7. Абрамович М.И., Бабайлов В.М., Либер В.Е. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках [Текст]. — М.: Энергоатомиздат — 1992. — 432 с.
8. Верёвкин В.В., Стригунов С.Л., Пилипенко А.П., Волобуев К.А., Лобанова В.А. Испытания многокристалльных IGBT-модулей на стойкость к циклическому воздействию силового тока [Текст]. — Изв. вузов. Приборостроение. — 2020. — Т.63, № 5. — с. 173-178. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-173-178

Лобанова Валентина Андреевна, к.т.н., доцент кафедры электроники, радиотехники и систем связи ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: lvanata@yandex.ru,

Верёвкин Владимир Викторович, к.т.н., технический эксперт АО «Протон-Электротекс», e-mail: verevkin.v52@gmail.com

Пилипенко Анастасия Петровна, аспирант кафедры электроники, радиотехники и систем связи ОГУ имени И.С. Тургенева, инженер-технолог АО «Протон-Электротекс», e-mail: a.pilipenko@proton-electrotex.com

METHOD FOR CALCULATING THE CURRENT PULSE DURATION FOR POWER IGBT MODULES LIFETIME TESTING

Lobanova V.A., Verevkin V.V., Pilipenko A.P.

Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev, JSC “Proton-Electrotex”

The development and production of IGBT modules is associated with significant time, financial and energy costs. This includes the development, production, delivery, storage of components, as well as qualification, research and type lifetime testing. The principle of energy efficiency must be adhered at each of the listed stages, and this article is about increasing the speed and reducing the cost of developing new types of power IGBT modules due to precise selection of the required duration of heating pulse during power cycling testing.

Keywords: *power IGBT module, power cycling, heating pulse duration, transient thermal resistance.*

BIBLIOGRAPHY

1. Verevkin V.V., Volobuev K.A., Strigunov S.L., Pilipenko A.P., Lobanova V.A. IGBT modules failure mechanisms during power cycling tests [Text]. — Izv.vuzov. Priborostroyeniye. — 2020. — N 10. — pp. 68-79.
2. Sarkany Z., Vass-Varnai A., Rencz M. Effect of power cycling parameters on predicted IGBT lifetime [Текст]. — 2015 IEEE Aerospace Conference. — 2015. — pp. 1-9.
3. Herrmann T., Feller M., Lutz J., Bayerer R., Licht T. Power cycling induced failure mechanisms in solder layers [Text]. — 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. — 2007. — pp. 1-7.
4. Vishnevskij A.I., Rudenko V.S., Platonov A.P. Power ion and semiconductor devices [Text]. — Moscow: Vyssh. Shkola. — 1975. — 343 p.
5. Dermenzhi P. G., Kuz'min V.A., Kryukova N.N., Mamonov V.I., Pavlik V.YA. Power semiconductor devices calculation, pod red. V.A. Kuz'mina [Text]. — Moscow: Energiya. — 1980. — 184 p.
6. Carslaw H., Jaeger J. Conduction of heat in solids [Text]. — Moscow: Nauka. — 1964. — 488 p.
7. Abramovich M.I., Babajlov V.M., Liber V.E. Diodes and thyristors in converter machines [Text].— Moscow:Energoatomizdat — 1992.— 432 p.
8. Verevkin V.V., Strigunov S.L., Pilipenko A.P., Volobuev K.A., Lobanova V.A. IGBT modules failure mechanisms during power cycling test [Text]. — Journal of Instrument Engineering. — 2020. — Vol. 63, N 5. — p. 173—178 (in Russian).

Lobanova Valentina Andreevna Candidate of Engineering Sciences, associate professor at the department of Electronics, Radio Engineering and Communication Systems, Orel State University named after I.S. Turgenev, e-mail: lvanata@yandex.ru,

Verevkin Vladimir Viktorovich, Candidate of Engineering Sciences, JSC “Proton-Electrotex” technical expert, e-mail: verevkin.v52@gmail.com,

Pilipenko Anastasia Petrovna student at Orel State University named after I.S. Turgenev, process engineer at JSC “Proton-Electrotex”, e-mail: a.pilipenko@proton-electrotex.com.