

3. Prudnik A., Beloglazov A., Kudryavtseva T., Lynkou L. Production technology and shielding properties of the needle-punched non-woven fabrics with carbon additives. (20–22 September 2017). Electromagnetic disturbances EMD 2017: Proceedings of the 24<sup>th</sup> International conference, Poland, Białystok, Białystok, 2017. P. 108–111.

4. Абудхади Х.Д.А., Аль-Машатт Е.А.А., Алсайх Н.Б.А., Бойправ О.В., Прудник А.М. Электромагнитные характеристики углеродсодержащего нетканого материала с геометрическими неоднородностями // Доклады БГУИР. 2017. № 1 (95). С. 87–90.

УДК 621.382

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ КТД8307

Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Васьков О.С.<sup>1</sup>, Нисс В.С.<sup>1</sup>, Грибович В.В.<sup>2</sup>, Цивако А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Минск, Республика Беларусь

С использованием релаксационного импеданса – спектрометра тепловых процессов [1] исследована структура внутреннего  $R_{jc}$  и внешнего  $R_{ca}$  тепловых сопротивлений составного транзистора КТД8307 (производства ОАО Интеграл) в пластмассовом корпусе SOT-223 с посадкой кристалла на клей ХН9889-1 (5 образцов) и клей SK70-N (5 образцов). Для сравнения определялась также структура теплового сопротивления биполярных транзисторов КТ817Г в пластмассовом корпусе TO-252 (DPAK), с посадкой кристалла на припой.

Анализ структуры теплового сопротивления образцов проводился методом тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии [2, 3] во временной области  $10^{-4} - 10^2$  с. В качестве источника разогрева и активного элемента использовался защитный диод перехода “коллектор-эмиттер”. Ток накачки составлял 0.5 А, а измерительный 1 мА.

Из анализа временной зависимости прямого напряжения на активной области (пересчитанного в температуру с использованием температурного коэффициента) находится внутреннее тепловое сопротивление транзистора и его структура в виде непрерывного (дифференциального) и дискретного спектра (зависимости теплового сопротивления элементов структуры транзистора и внешнего теплоотвода от времени тепловой релаксации). Дифференциальный спектр определяется на основе производных высшего порядка от динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, а дискретный – модели Кауера. При построении структуры внутреннего теплового сопротивления образцов было выбрано разрешение достаточное для построения 7-извеной (7-го порядка) электротепловой RC-модели.

Анализ растекания теплового потока в исследуемых транзисторах проводился на основе концепции тепловой эффузии (effusivity). Из послойных значений компонентов теплового сопротивления и тепловой емкости, определялось значение

эффективной площади  $S_e$  (площади сечения теплового потока) в транзисторе и элементах внешнего теплоотвода.

Конструкции транзисторов и пути растекания теплового потока в корпусах SOT-223 и TO-252 показаны на рис. 1.

Для корпуса SOT-223 определяющим является поперечное к кристаллу, через выводы корпуса тепловое растекание в окружающую среду (рис. 1а). Для корпуса TO-252 характерно продольное через подложку рамки выводной растекание тепла (рис. 1б).

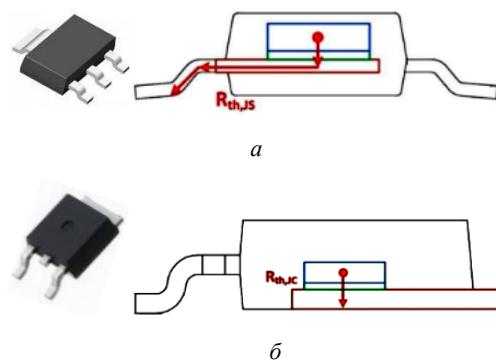


Рисунок 1 – Внешний вид и конструкция исследованных образцов с корпусами SOT-223 (а) и TO-252 (б). Стрелками показано направление растекания тепла для корпусов обоих типов

На рис. 2 и 3 приведены дифференциальный и дискретный спектры теплового сопротивления  $R_{th}$  и профили растекания теплового потока  $S_e$  в исследованных образцах. Дифференциальный спектр соответствует электротепловой модели Фостера, а дискретный – Кауера.

Из анализа спектров образцов КТД8307 с разным качеством посадки кристалла можно идентифицировать R2 и R3 как тепловые сопротивления области посадки кристалла с сопротивлением R1, а тепловые сопротивления R4 – R7 соответствуют растеканию тепла от выводной рамки в окружающую среду.

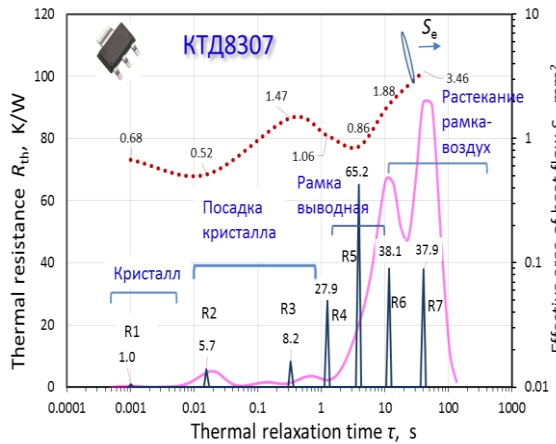


Рисунок 2 – Дифференциальный (непрерывный) и дискретный (вертикальные линии) спектры теплового сопротивления  $R_{th}$  и профиль растекания теплового потока  $S_e$  (пунктирная линия) для транзистора КТД8307 в корпусе SOT-223

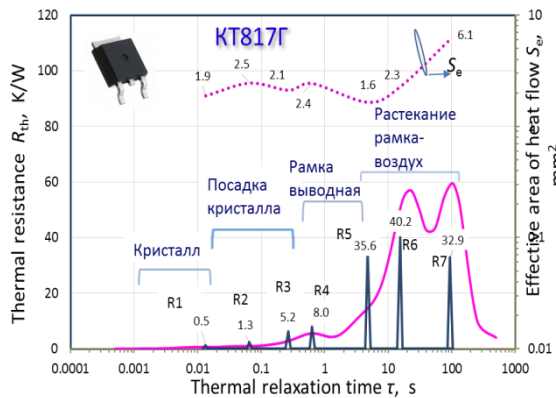


Рисунок 3 – Дифференциальный (непрерывный) и дискретный (вертикальные штрихи) спектры теплового сопротивления  $R_{th}$  и профиль растекания тепла  $S_e$  (пунктирная линия) для транзистора КТД817Г в корпусе TO-252

Из сравнения рис. 2 и 3 видны следующие особенности.

1. Составной транзистор КТД8307 имеет более высокий чем КТД817Г уровень теплового сопротивления в начальной зоне спектра, соответствующей области кристалла и его посадки, что связано с разной площадью кристаллов (для КТД8307  $S_{кр}=1.64 \text{ мм}^2$ , а для КТД817Г  $S_{кр}=2.25 \text{ мм}^2$ ).

2. В зоне спектра тепловых сопротивлений, соответствующей растеканию тепла через выводы (временной интервал 1-100 с), составной транзистор КТД8307 в корпусе SOT-223 имеет более высокий уровень переходного сопротивления  $R_5$ , чем КТД817Г в корпусе TO-252, что согласуется с конструктивными особенностями корпусов (рис. 1). Соответственно внешнее тепловое сопротивление (корпус – окружающая среда) для транзистора КТД8307 выше, чем для КТД817Г.

3. Профиль растекания тепла (зависимость  $S_e$  от времени) для обоих образцов (рис. 2 и 3) для времен свыше 10 с показывает резкий рост теплового рассеяния, причем площадь теплового потока  $S_e$  превышает площадь корпуса составного транзистора, что характеризует переходной слой корпус – окружающая среда.

На рис. 4 представлена гистограмма разброса внутреннего теплового сопротивления  $R_{jc}$  составных транзисторов КТД8307 (нормированного на среднее по всем образцам) с разным способом посадки кристалла (клей ХН9889-1 и клей SK70-N).

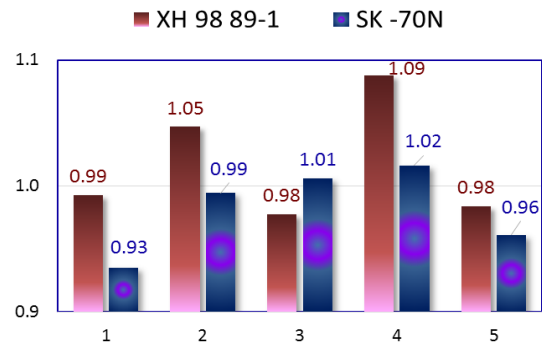


Рисунок 4 – Нормированный разброс внутреннего теплового сопротивления  $R_{jc}$  ( $p-n$  переход – корпус) исследованных транзисторов КТД8307 с разным типом клея (в каждой группе слева – образцы с клеем ХН9889-1, справа – с клеем SK70-N)

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Измеренные образцы транзистора КТД8307 в пластмассовом корпусе SOT-223 с посадкой кристалла на клей ХН9889-1 и клей SK70-N имеют уровень внутреннего теплового сопротивления ( $p-n$  переход – корпус)  $\sim 9-10 \text{ К/Вт}$ , находящийся в пределах паспортных данных транзистора.

Разброс по тепловому сопротивлению для транзисторов с посадкой кристалла на клей ХН9889-1 и клей SK70-N не превышает 5% в каждой группе.

Транзисторы КТД8307 с посадкой кристаллов на клей ХН9889-1 имеют в среднем на 4 % большее внутреннее тепловое сопротивление по сравнению с посадкой на клей SK70-N.

### Литература

1. Бумай, Ю.А. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай, О.С. Васьков, В.К. Кононенко, В. М. Ломако // Электроника инфо. – 2010. – № 3. – С. 58–59.
2. Васьков, О.С. Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов / О.С. Васьков, В.С. Нисс, В.К. Кононенко, А.С. Турцевич, И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, А.Ф. Керенцев // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2014. – № 1. – С. 47–52.

З. Нисс, В.С. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии /

В.С. Нисс, О.С. Васьков, А.С. Турцевич, А.Ф. Керенцев, В.К. Кононенко // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256.

УДК 620.179.14

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ И КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЛОКАЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ

Бурак В.А., Счастный А.С.

Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь

Пригодность листового проката сталей к штамповке или к глубокой вытяжке определяется однородностью механических свойств в различных направлениях относительно направления прокатки. Однородность листового проката сталей зависит от ряда характеристик, среди которых можно выделить такие, как качество и исходное состояние металла и особенности технологии прокатного производства. Для металла после прокатки, особенно холодной, характерна большая неоднородность свойств в направлении вдоль и поперек прокатки, то есть большая анизотропия механических свойств в плоскости листа.

Целью работы является сравнительный анализ распределения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности вдоль поверхности стального листа после его импульсного локального намагничивания полем накладного соленоида для оценки возможности контроля неоднородности структуры стали в различных направлениях относительно направления прокатки.

Исследовались образцы листового проката двух видов сталей разного назначения, для которых характерно значительное различие как механических, так и магнитных свойств, в том числе и анизотропии. В качестве первого образца для сравнительного анализа поведения поля остаточной намагниченности после локального импульсного намагничивания была взята электротехническая сталь, для которой анизотропия свойств, в первую очередь магнитных, имеет важное практическое значение. Образец электротехнической стали имел размеры  $170 \times 260$  мм<sup>2</sup> и толщину 0,45 мм.

Также было исследовано изменение остаточного магнитного поля после локального импульсного намагничивания над поверхностью образца холоднокатаной конструкционной углеродистой стали, 35Х для которой анизотропия свойств, особенно механических, является фактором, усложняющим проведение последующей технологической обработки. Образец из конструкционной стали имел размеры  $200 \times 200$  мм<sup>2</sup> и толщину 1,5 мм.

Импульсное намагничивание осуществлялось на предварительно размагниченных образцах при помощи прибора ИМА-6 [1, 2]. Образцы листового проката намагничивались локально в центре импульсами магнитного поля аperiodической формы длительностью 17 мс по уровню 0,1 и амплитудой  $H_m$  20 и 250 кА/м. Напряженность поля остаточной намагниченности образцов измерялась феррозондом-градиентометром, который размещался внутри намагничивающего соленоида вдоль его оси.

Для измерения величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности на фиксированном расстоянии от центра намагниченного участка после локального намагничивания соленоид вместе с феррозондом передвигался с заданным шагом в направлении прокатки или поперек нее.

На рисунках 1 и 2 представлены результаты измерения вдоль (1) и поперек (2) прокатки величины градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности  $\nabla H_r$  локально намагниченного участка образцов электротехнической и конструкционной сталей.

Сравнительный анализ распределений градиента нормальной составляющей поля остаточной намагниченности  $\nabla H_r$ , измеренных вдоль и поперек направления прокатки, над поверхностью плоских образцов из электротехнической (рисунок 1) и конструкционной (рисунок 2) сталей позволяет говорить о следующих закономерностях:

- при локальном намагничивании любым из рассматриваемых импульсных магнитных полей для электротехнической стали характерна значительно большая магнитная анизотропия (приблизительно 6–7 раз), чем для конструкционной стали;

- для конструкционной стали скорость уменьшения градиента  $\nabla H_r$  с ростом расстояния от центра локально намагниченного участка выше при измерении вдоль прокатки, а для электротехнической – при измерении поперек направления прокатки. Различие значений  $\nabla H_r$ , измеренных вдоль и поперек направления прокатки, проявляется на