

Решение уравнения Максвелла в сферической системе координат для комплексных амплитуд тангенциальных составляющих вектора электрического поля позволяет представить электромагнитное поле  $\vec{E}_r(\theta, \varphi, r)$  на поверхности сферы радиуса  $r$ , охватывающей излучающую систему в виде разложения  $\varphi$  по векторным сферическим функциям (гармоникам) [1]:

$$\vec{E}_r(\theta, \varphi, r) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^{+n} A_{mn} \cdot \vec{M}_{mn} + B_{mn} \cdot \vec{N}_{mn}$$

Векторные сферические функции  $\vec{M}_{mn}, \vec{N}_{mn}$  и комплексные коэффициенты  $A_{mn}, B_{mn}$  выражаются через полиномы Лежандра  $P_n^m(\theta)$ , сферические функции Ханкеля  $Z_n(kz)$  и тангенциальные составляющие вектора  $E$  на сферической поверхности радиуса  $r_0$  ( $r_0$ -радиус сферы, на которой производится измерение) [2]. Число  $N$  определяется радиусом минимальной сферы, охватывающей измеряемый объект. Тангенциальные составляющие поля  $E_\varphi, E_\theta$  на сфере любого радиуса (как больше, так и меньше  $r_0$ ) рассчитываются по формулам, содержащим Фурье преобразование по координате  $\varphi$ . В тоже время полиномы Лежандра  $P_n^m(\cos\theta)$  можно представить в виде конечного ряда Фурье:

$$P_n^m(\cos\theta) = \frac{(2n)!}{2^n n! (n-m)!} e^{-j\frac{\pi}{2}m} \sum_{k=0}^n C_k^{mn} e^{j(n-2k)\theta},$$

где  $C_k^{mn}$  - постоянные коэффициенты, являющиеся результатом алгебраических процедур.

Таким образом, интегрирование по координате  $\theta$  также сводится к преобразованию Фурье, что позволяет использовать при расчетах тангенциальных составляющих поля на поверхности произвольного радиуса эффективный алгоритм БПФ.

Разработанное на основании представленного алгоритма программное обеспечение позволяет, используя результаты измерений на сферической поверхности радиуса  $r_0$ , рассчитывать поле в векторном виде на сферической поверхности произвольного радиуса  $R$ . При  $R \gg \lambda$  амплитуда рассчитанного поля определяет пространственную диаграмму направленности исследуемого объекта. Восстановление амплитудно-фазового распределения на сфере минимального радиуса позволяет проводить дефектоскопию антенных элементов путем сравнения теоретических расчетов с результатами обработки экспериментальных данных, оптимизировать конструкцию отдельного антенного элемента и линейки антенных элементов, учитывать влияние конструктивных элементов модуля, а при наличии защитных покрытий (панелей, укрытий, обтекателей) определить степень их влияния, однородность характеристик, провести их дефектоскопию (дефектоскопия материала, накопления влаги и др.).

1. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн.- М.-1978.
2. Арфкен Г. Математические методы в физике.-М.-1970.

УДК 621.382

## МЕТОДИКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ РАСТЕКАНИЯ ТЕПЛОвого ПОТОКА В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ И СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Бумай Ю.А.<sup>1</sup>, Васьков О.С.<sup>1</sup>, Кононенко В.К.<sup>1</sup>, Нисс В.С.<sup>1</sup>, Керенцев А.Ф.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Рубцевич И.И.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ОАО Интеграл

Минск, Республика Беларусь

### 1 Методика исследования профилей растекания теплового потока

Детальные исследования тепловых характеристик полупроводниковых приборов проведены методом тепловой дифференциальной релаксационной спектрометрии ТРДС, хорошо зарекомендовавшим себя при анализе тепловых параметров внутренних элементов гетеролазеров, светодиодов и транзисторов [1].

Релаксационный метод основан на анализе переходных электрических процессов, связанных с разогревом полупроводникового прибора проходящим через него током. Из временной зави-

симости температуры перехода при нагреве прямым током находятся дискретный и дифференциальный спектры теплового сопротивления  $R_{th}$  прибора, значения тепловой емкости  $C_{th}$  и постоянной времени тепловой релаксации  $\tau$ . Дифференциальный спектр определяется на основе производных высшего порядка динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, а дискретный – модели Кауера. Два вида спектров (непрерывной и дискретный) теплового сопротивления используются для анализа и уточнения компонентов теплового сопротивления в рамках электротепловой модели Фостера

и более физически точной модели Кауера. Временные зависимости изменения напряжения на *p-n* переходе, которые дают возможность анализа путей прохождения теплового потока по элементам структуры, измеряются при помощи импеданс - спектрометра тепловых процессов [2], разработанного в БНТУ.

В случае одномерного распространения теплоты в полубесконечной пластине от верхней части транзистора к теплоотводу распределение температуры  $T(x, t)$  по глубине следует закону [3]

$$T(x, t) = \frac{P}{S_a} \cdot \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\pi k \sqrt{t}}} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $k$  – коэффициент теплопроводности. Здесь  $P$  – подводимая тепловая мощность, которая рассеивается через активную площадь сечением  $S_a$ . Коэффициент  $\alpha = k/c_p\rho$ , где  $c_p$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность, для Si величина  $c_p\rho$  составляет 1.69 Дж/см<sup>3</sup>·К. Так как при этом  $k = 1.49$  Вт/см К, то имеем  $\alpha = 0.88$  см<sup>2</sup>/с. Таким образом, нагрев поверхности кристалла следует закону

$$\Delta T(t) = \frac{P}{S_a} \cdot \frac{2\sqrt{\alpha}\sqrt{t}}{\sqrt{\pi k}}, \quad (2)$$

и время корневого закона изменения температуры *p-n* перехода при импульсном электрическом возбуждении транзистора охватывает длительности порядка 0.1–1 мс [4]. Это позволяет определить активную площадь транзистора  $S_a$  в зависимости от мощности импульса возбуждения  $P$ .

Этот вывод следует из решения нестационарного уравнения теплопроводности [3]. На начальном участке нагрев активной области прибора прямо пропорционален  $\sqrt{t}$ :

$$\Delta T(t) = \frac{2PR_{th}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\tau}}, \quad (3)$$

где постоянная тепловой релаксации  $\tau = (R_{th}S_a)^2 k c_p\rho$ , а  $R_{th}$  – тепловое сопротивление активного слоя площадью  $S_a$ . Для Si постоянная тепловой релаксации составляет величину порядка  $\tau \approx 3$  мс и начальный участок нагрева соответствует временам  $t \leq 0.4\tau$  [4].

Для определения распределения площади теплового потока от поверхности кристалла до внешнего терморadiatora использованы величины  $e$  (тепловой эффузии) или величины  $\alpha = k/c_p\rho$  (температуропроводности) для слоистых компонентов полупроводникового прибора. Если использовать соотношение между тепловыми характеристиками  $R_{th}$  и  $C_{th}$  слоистых компонентов структуры в виде

$$R_{th} / C_{th} = \frac{\alpha}{k^2 S_a^2} = \frac{1}{k c_p S_a^2}, \quad (4)$$

то можно определить изменение активной площади  $S_a$  при распространении теплоты вдоль диода от *p-n* перехода к подложке, теплоотводу и окружающей среде. Послойные значения компонентов теплового сопротивления  $R_{th}$  и тепловой емкости  $C_{th}$ , можно установить из анализа дискретного спектра теплового сопротивления измеряемой структуры [1].

Как известно [5], тепловая эффузия  $e = k/\alpha^{1/2} = (k c_p)^{1/2}$  прямо связана с  $k$  и  $\alpha$ , поэтому ее экспериментальное значение задается, как

$$e^* = \sqrt{C_{th} / R_{th} / S_a^*}, \quad (5)$$

где  $S_a^*$  – эффективная площадь полупроводниковой структуры, зависящая от особенностей конфигурации прибора и определяемая размерами слоев и площадью чипа  $S_{ch}$ , а также коэффициентом его заполнения  $\gamma$ .

## 2 Экспериментальная часть

Значения активной площади ряда транзисторов находились по методике начального корневого участка разогрева полупроводниковых приборов. Границы временного корневого участка возбуждения типичных мощных транзисторов соответствуют практически временам 0.1–2 мс.

Растекание теплового потока в кристалле определяющего его активную площадь зависит от особенностей конфигурации полупроводникового прибора и определяется размерами слоев и площадью чипа  $S_{ch}$ , а также коэффициентом его заполнения  $\gamma$ , который составляет практически 0.4–0.7.

На рисунке 1 представлены профили распределения площади теплового потока для пары мощных МОП транзисторов типа КП7209, полученные по разработанной методике и, для сравнения, фотоизображение области посадки кристалла под припой.

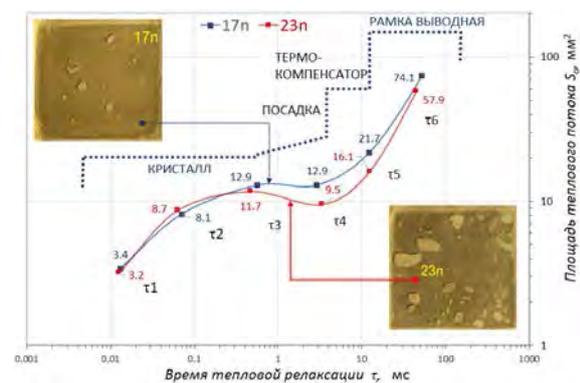


Рисунок 1 - Профили распределения теплового потока в транзисторах 17n и-23n типа КП7209 металлокерамическом корпусе ТО-254 с разным качеством посадки кристаллов и фото-изображения припоя под кристаллом

Видно, что в образце 23n происходит большее чем в 17n сужение теплового потока  $S_a$  в

области посадки, что коррелирует с видимой площадью дефектов на фото припоя.

На рисунке 2 представлены профили распределения сечения теплового потока в мощных светодиодах Cree XPG и Cree XPE с разной площадью кристалла. Видно, что на начальном участке, где растекание тепла определяется размерами кристалла светодиода активная площадь теплового потока коррелирует с геометрической площадью кристалла для обоих образцов. На участках, близких к внешнему корпусу приборов, уровни сечения тепловых потоков обоих образцов выравниваются, из-за одинаковой конструкции и тепловых параметров образцов.

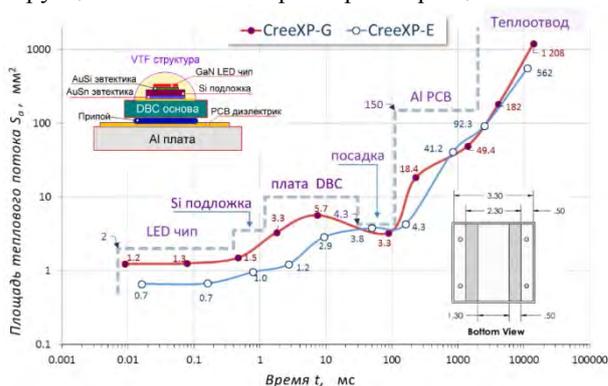


Рисунок 2 – Профили распределения сечения теплового потока в шкале времени для мощных светодиодов компании Cree с разной площадью кристалла  $S_{ch}$  для Cree XPG – 2 мм<sup>2</sup> и Cree XPE – 1 мм<sup>2</sup>

УДК 621.78.062.2

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ГАЗОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ

Виленчиц Б.Б., Попов В.К.

*Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета  
Минск, Республика Беларусь*

Углеродный потенциал процесса газовой цементации равновесия обычно регулируется кислородными датчиками. Для коррекции сигнала этого датчика, его показания сравниваются с фольговой пробой. Для этого науглероживается тонкая железная фольга и в ней измеряется содержание углерода, которое должно быть равно углеродному потенциалу, измеренному датчиком кислорода.

Предлагаемый метод для экспресс-определения содержания углерода в фольге основан на гармоническом анализе вихревых токов [1] и реализован в небольшом автоматизированном устройстве, которое является надежным и простым в использовании. С помощью этого устройства содержание углерода в тонкой железной фольге может быть получено с точностью лучше, чем 0,03 % и за время менее 2 секунд в

1. Васьков, О.С. Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов / О.С. Васьков [и др.] // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2014, № 1. – С. 47–52.
2. Бумай, Ю.А. Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай [и др.] // Электроника инфо. – 2010, № 3. – С. 58–59.
3. Stout, R. P. Accuracy and time resolution in thermal transient finite element analysis / R.P. Stout, D.T. Billings // 2002-Int-ANSYS-Conf-91. – <http://ansys.com/staticassets/ANSYS/>.
4. Vaskou, A.S. Thermal characterization of light-emitting sources of Cree types / A.S. Vaskou [et al.] // Proc. 12th Int. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, LFNМ\*2013. Sudak, 2013. P. 79–81.
5. Zakgeim, A.L. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A.L. Zakgeim, A.E. Chernyakov, A.S. Vaskou, V.K. Kononenko, V.S. Niss // EuroSimE 2013: 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. – 2013. – №01. – P. 1/7-7/7.

диапазоне от 0 - 1,2 % массового содержания углерода. Это эффективный инструмент для быстрого контроля качества печных цементационных атмосфер и коррекции показаний кислородного зонда.

Для качественной цементации необходимо, контролировать концентрацию углерода на поверхности детали. Это косвенно делается с помощью кислородных зондов. На основе измеренного парциального давления кислорода и химических условий равновесия цементационной атмосферы вычисляется углеродный потенциал. Поскольку цементация осуществляется при высокой температуре (900 - 950 °С) в агрессивной и пыльной среде, сигнал датчика кислорода дрейфует. Для корректировки характеристик датчика используют тонкую (50 мкм) железную фольгу, которую размещают на ко-