

УДК 621.382.017

В.И. Смирнов, В.А. Сергеев, А.А. Гавриков

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДОВ И ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

Смирнов Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор, окончил Горьковский государственный университет по специальности «Физика», профессор кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет статьи, монографии, изобретения в области автоматизации средств измерений. [e-mail: smirnov-vi@mail.ru].

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил Горьковский государственный университет по специальности «Электроника твердого тела», директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Имеет статьи, монографии, изобретения в области физики тепловых процессов в твердотельных структурах и полупроводниковых приборах. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Гавриков Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, окончил УлГТУ по специальности «Проектирование и технология электронных средств», старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Имеет статьи, изобретения в области измерений теплофизических параметров полупроводниковых приборов. [e-mail: a.gavrikoff@gmail.com].

Аннотация

С помощью компьютерного моделирования исследована кинетика процесса нагрева светодиодов широтно-импульсно модулированной (ШИМ) мощностью, изменяющейся по гармоническому закону. В основе построения модели лежит принцип теплоэлектрической аналогии, согласно которой процессы распространения тепла по пути «активная область кристалла – кристаллодержатель – корпус прибора – радиатор – окружающая среда» происходят аналогично электрическим процессам в схеме замещения, представляющей собой совокупность последовательно соединенных RC-цепочек. Задачей моделирования являлась проверка корректности метода измерения теплового сопротивления светодиодов, основанного на его нагреве ШИМ-мощностью, а также исследование влияния на точность и чувствительность метода таких параметров, как период следования греющих импульсов, частота и коэффициент модуляции, количество греющих импульсов за период модуляции. Результаты моделирования показали, что метод обладает погрешностью на уровне 3%, причем эта величина не зависит от периода следования греющих импульсов, изменяющегося в диапазоне 80–200 мкс. Чувствительность метода зависит от частоты модуляции греющей мощности и периода следования греющих импульсов. Она уменьшается с ростом частоты модуляции и возрастает с уменьшением периода следования при постоянной амплитуде колебаний длительности импульсов.

Ключевые слова: светодиод, тепловое сопротивление, процесс нагрева, компьютерное моделирование.

SPECTRAL METHOD OF MEASUREMENT OF THE LED THERMAL RESISTANCE AND ESTIMATION OF THE OPTIMAL PERFORMANCE

Vitalii Ivanovich Smirnov, Doctor of Engineering, Professor, graduated from the Gorky State University with the specialty of Physics; Professor of the 'Design and Technology of Electronic Instrumentation' Department at Ulyanovsk State Technical University; an author of articles, monographs, inventions in the field of measurement instrument automation. e-mail: smirnov-vi@mail.ru.

Vyacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor, graduated from the Gorky State University with the specialty of Solid-State Electronics, Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of articles, monographs and inventions in the field of physics of the thermal processes in solid-state structures and semiconductor devices. e-mail: sva@ulstu.ru.

Andrey Anatolyevich Gavrikov, Candidate of Engineering, graduated from the Ulyanovsk State Technical University with the specialty of Design and Technology of Electronic Instrumentation, Senior Staff scientist at Ulyanovsk Branch of the Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of articles and inventions in the field of measurement of thermal and physical parameters of semiconductor devices. e-mail: a.gavrikoff@gmail.com.

Abstract

The computer simulation helped the authors in studying the kinetics of the LED heating by the pulse-width modulated power varying harmonically. The programming model relies on a principle of the thermoelectric analogy saying that the heat dissipation processes on the path "chip – substrate – case – radiator – environment" are similar to electrical processes in the equivalent circuit, which is a set of serial-connected RC-chains. The task of simulation was to validate the LED thermal resistance measurement method based on heating by PWM power, as well as to study the effect on the accuracy and sensitivity of the method parameters such as heating pulse repetition period, frequency, and modulation coefficient, the number of heating pulses per modulation period. The simulation results shows that the method has an accuracy of 3%, and this value is independent of the heating pulse repetition period ranging between 80–200 ms. Sensitivity of the method depends on the modulation frequency of the heating power and heating pulse repetition period. It decreases with increasing modulation frequency, increases with the decrease of the repetition period at constant amplitude of oscillation pulse duration.

Key words: LED, thermal resistance, heating process, computer simulation.

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые светодиоды в настоящее время находят самое широкое применение, начиная от источников освещения и заканчивая системами передачи информации. Их эффективность излучения и скорость деградации сильно зависят от температуры активной области кристалла [1]. Параметром, определяющим температуру p - n -перехода в светодиоде, является тепловое сопротивление:

$$R_T = \frac{\Delta T}{\Delta P}, \quad (1)$$

где ΔP – рассеиваемая в светодиоде электрическая мощность;

ΔT – соответствующее изменение температуры перехода относительно корпуса или окружающей среды.

Поэтому для контроля качества выпускаемых светодиодов и светодиодной продукции необходимы измере-

ния их теплового сопротивления. Несмотря на важность и актуальность данной задачи, отечественные средства измерений теплового сопротивления серийно не производятся.

За рубежом для контроля тепловых параметров полупроводниковых изделий с p - n -переходами получил распространение стандарт JE5D51-1 [2], заключающийся в подаче на диод постоянной мощности и измерении отклика на это воздействие – температуры p - n -перехода $T_n(t)$ в процессе нагрева до достижения стационарного состояния. Температура определяется на основе измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), в качестве которого используется прямое падение напряжения на диоде при малом измерительном токе. Анализ такой переходной характеристики $T_n(t)$ позволяет определить компоненты полного теплового сопротивления, соответствующие отдельным слоям структуры или элементам конструкции диода, по которым распространяется тепло-

вой поток. Данный метод реализован в измерительном комплексе T3Ster [3].

Альтернативой данному методу является спектральный метод [4, 5], реализованный в виде автоматизированного прибора [6]. В отличие от стандарта JESD51-1 в данном методе на светодиод подается переменная мощность, изменяющаяся по гармоническому закону. Изменение мощности происходит путем широтно-импульсной модуляции (ШИМ) греющих импульсов тока, а именно, при постоянном периоде следования импульсов их длительность t_u изменяется по гармоническому закону:

$$t_u = t_{ucp} (1 + a \cdot \sin \omega t), \quad (2)$$

где t_{ucp} – средняя длительность импульсов;

a – коэффициент, определяющий глубину модуляции греющей мощности (отношение разности максимальной и минимальной длительностей к периоду следования);

ω – циклическая частота модуляции.

В паузах между импульсами для определения температуры p - n -перехода измеряется ТЧП – прямое напряжение на светодиоде при малом измерительном токе, существенно меньшем греющего тока. Определив амплитуды переменных составляющих температуры и греющей мощности на частоте модуляции и используя (1), можно вычислить и тепловое сопротивление светодиода. Производя измерения при различных частотах модуляции греющей мощности, можно, как и в стандарте JESD51-1, определить вклад отдельных компонентов в полное тепловое сопротивление.

На точность и чувствительность метода влияют режимы нагрева, а именно: период следования импульсов, их средняя длительность и коэффициент модуляции, а также частота модуляции. Для определения оптимальных режимов нагрева необходимы исследования влияния указанных выше параметров. Данная задача решалась с помощью компьютерного моделирования кинетики нагрева светодиода мощностью, широтно-импульсно модулированной по гармоническому закону.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СВЕТОДИОДОВ ШИМ-МОЩНОСТЬЮ

В основе построения модели лежит принцип теплоэлектрической аналогии, который широко используется при анализе тепловых процессов, происходящих в полупроводниковых приборах при протекании через них электрического тока [7, 8]. Согласно теплоэлектрической аналогии, процессы распространения тепла по пути «активная область кристалла – кристаллодержатель – корпус прибора – радиатор – окружающая среда» происходят аналогично электрическим процессам в схеме замещения, представляющей собой совокупность последовательно соединенных RC-цепочек. Поток тепла аналогичен электрическому току, протекающему по звеньям схемы замещения, электрический потенциал является аналогом температуры. Каждому из слоев структуры или элементов конструкции светодиода, по которым распространяется поток тепла от источника к окружающей среде, соответствует своя RC-цепочка. Электрическое сопротивление

k -й RC-цепочки является аналогом теплового сопротивления R_{T_k} , k -го элемента конструкции, электрическая емкость – аналог теплоемкости C_{T_k} ; постоянная времени k -й цепочки $\tau_k = R_{T_k} \cdot C_{T_k}$ – аналог тепловой постоянной k -го элемента конструкции.

Упрощенная конструкция светодиода представлена на рисунке 1а. Там же показаны компоненты полного теплового сопротивления, включающие в себя сопротивления « p - n -переход – монтажная пластина» $R_{T_{n-nl}}$, «монтажная пластина – радиатор» $R_{T_{nl-p}}$ и «радиатор – среда» $R_{T_{p-cp}}$. Через T_n , T_{nl} , T_p и T_{cp} обозначены соответственно температуры p - n -перехода, пластины, радиатора и окружающей среды; P – греющая мощность. Схема замещения изображенного на рисунке 1а светодиода, содержащая 3 звена и называемая тепловой моделью по Фостеру или тепловой моделью в приведенных параметрах, представлена на рисунке 1б. Анализ тепловых процессов с использованием теплоэлектрической аналогии с некоторыми допущениями, связанными с пренебрежением оптической мощностью излучения и конвективными потоками тепла через боковую поверхность структуры, применим и к полупроводниковым светодиодам.

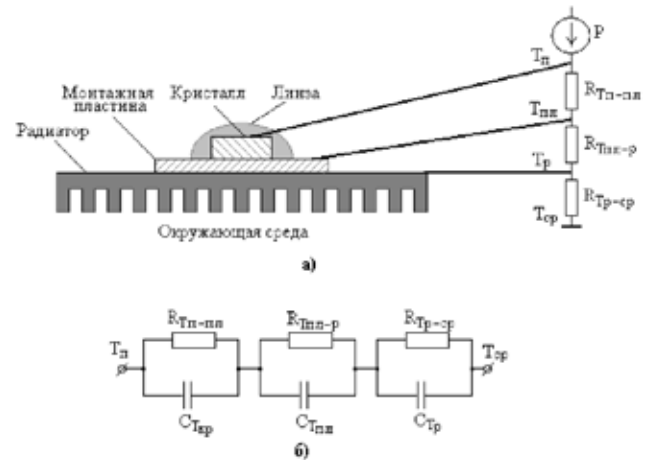


Рис. 1. Упрощенная конструкция светодиода (а) и его тепловая модель (б)

Пусть светодиод нагревается последовательностью импульсов тока, длительность которых изменяется по гармоническому закону (2). Для определения изменений температуры на всех элементах конструкции светодиода представим его в виде n -звенной тепловой модели и найдем изменение потенциала на всех RC-цепочках при заданном токе (аналоге теплового потока). Расчеты показывают, что при постоянном периоде следования и скважности греющих импульсов температура на k -м элементе $T_k(t)$ на интервале греющего импульса будет определяться выражением [9]:

$$T_k(t) = P \cdot R_{T_k} \cdot (1 - e^{-t/\tau_k}) + T_{k_{min}} \cdot e^{-t/\tau_k}, \quad (3)$$

где $T_{k_{min}}$ – температура k -го элемента в мо-

мент времени, соответствующий фронту греющего импульса. Для 1-го импульса этот момент времени соответствует началу нагрева $t=0$ и $T_{k_{\min}}(0) = T_{cp}$ представляет собой начальную температуру светодиода до его разогрева. Для произвольного i -го греющего импульса температура $T_{k_{\min}}$ рассчитывается с учетом процессов нагрева и остывания от предшествующих $(i-1)$ импульсов и пауз (рис. 2).

В момент окончания произвольного i -го греющего импульса температура $T_k(t)$ примет максимальное значение $T_{k_{\max}}$, равное

$$T_{k_{\max}} = P \cdot R_{T_k} \cdot (1 - e^{-t_u/\tau_k}) + T_{k_{\min}} \cdot e^{-t_u/\tau_k}, \quad (4)$$

где $T_{k_{\min}}$ – температура k -го элемента на фронте i -го импульса.

На интервале паузы между греющими импульсами, когда выделения мощности в светодиоде нет, происходит процесс его остывания и температура k -го элемента будет изменяться согласно выражению:

$$T_k(t) = T_{k_{\max}} \cdot e^{-t/\tau_k}. \quad (5)$$

В момент окончания паузы t_n (в момент включения следующего импульса) температура примет минимальное значение $T_{k_{\min}}$:

$$T_k(t_n) = T_{k_{\min}} = T_{k_{\max}} \cdot e^{-t_n/\tau_k}. \quad (6)$$

Особенностью моделирования кинетики нагрева светодиода является то, что длительность греющих импульсов и пауз между ними не остается постоянной, а изменяется по гармоническому закону (2). Алгоритм расчета изменения температуры k -го элемента конструкции светодиода заключается в следующем. Вначале по формулам (3) и (5) с учетом (4) и (6) рассчитывается зависимость $T_k(t)$ на первом периоде следования T_{cn} греющих импульсов.

Величина $T_{k_{\min}}$ при этом принимается равной температуре окружающей среды. Это позволяет рассчитать температуру $T_{k_{\min}}$ для следующего периода следования. Далее вычисляются новые значения длительности t_{ui} греющего импульса и паузы t_{ni} по формулам:

$$t_{ui} = t_{ucp} \left(1 + a \cdot \sin \frac{2\pi i}{N} \right),$$

$$t_{ni} = T_{cn} - t_{ui},$$

где индекс i соответствует номеру греющего импульса;

t_{ucp} – средняя длительность импульсов;

a – коэффициент модуляции греющей мощности;

N – количество импульсов на периоде модуляции.

Полученные значения t_u и t_n подставляются в выражения (4) и (6), что дает возможность рассчитать зависимость $T_k(t)$ на втором и последующих периодах следования греющих импульсов. Для определения температуры p - n -перехода относительно корпуса или окружающей среды производится суммирование $T_k(t)$ по всем элементам конструкции (звеньям тепловой модели светодиода):

$$T_n(t) = T_{cp} + \sum_{k=1}^n T_k(t). \quad (7)$$

Задачей моделирования является проверка корректности способа измерения теплового сопротивления светодиодов, основанного на его нагреве ШИМ-мощностью, изменяющейся по гармоническому закону, а также исследование влияния на точность и чувствительность метода таких параметров, как период следования греющих импульсов, частота и коэффициент модуляции, количество греющих импульсов за период модуляции. При моделировании необходимо также учесть, что измерение температуры перехода производится не в момент окончания греющего импульса, а с временной задержкой, необходимой для завершения переходных электрических процессов, возникающих при переключении светодиода из режима разогрева в режим измерения ТЧП (около 10 мкс). Это приводит к некоторой погрешности определения теплового сопротивления светодиода, которую в рамках модели можно оценить.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Интерфейс программы моделирования кинетики нагрева светодиода гармонической ШИМ-мощностью представлен на рисунке 3. С его помощью можно задать параметры греющих импульсов (частоту модуляции, период следования, амплитуду переменной составляющей длительности), а также параметры модели светодиода (тепловые сопротивления звеньев и их тепловые постоянные).

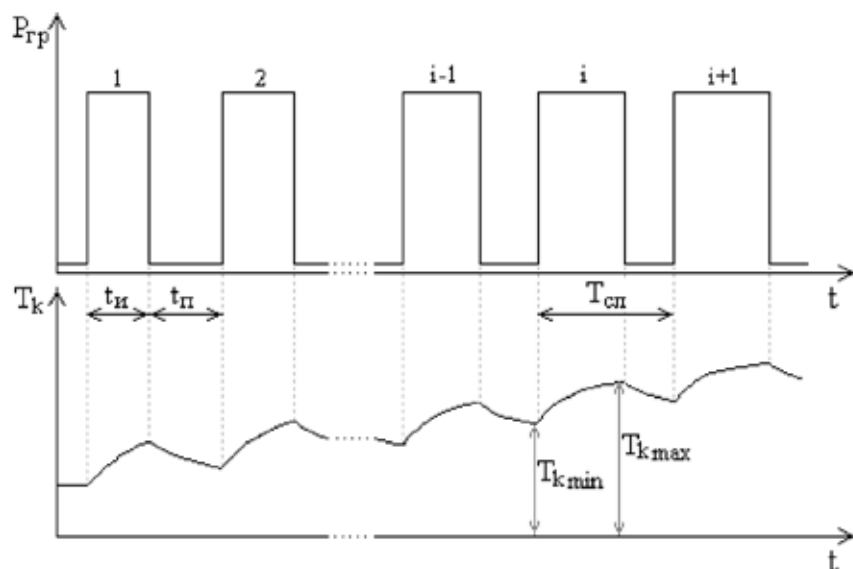


Рис. 2. Кинетика нагрева k -го элемента конструкции светодиода при расcеиваемой мощности с ШИМ

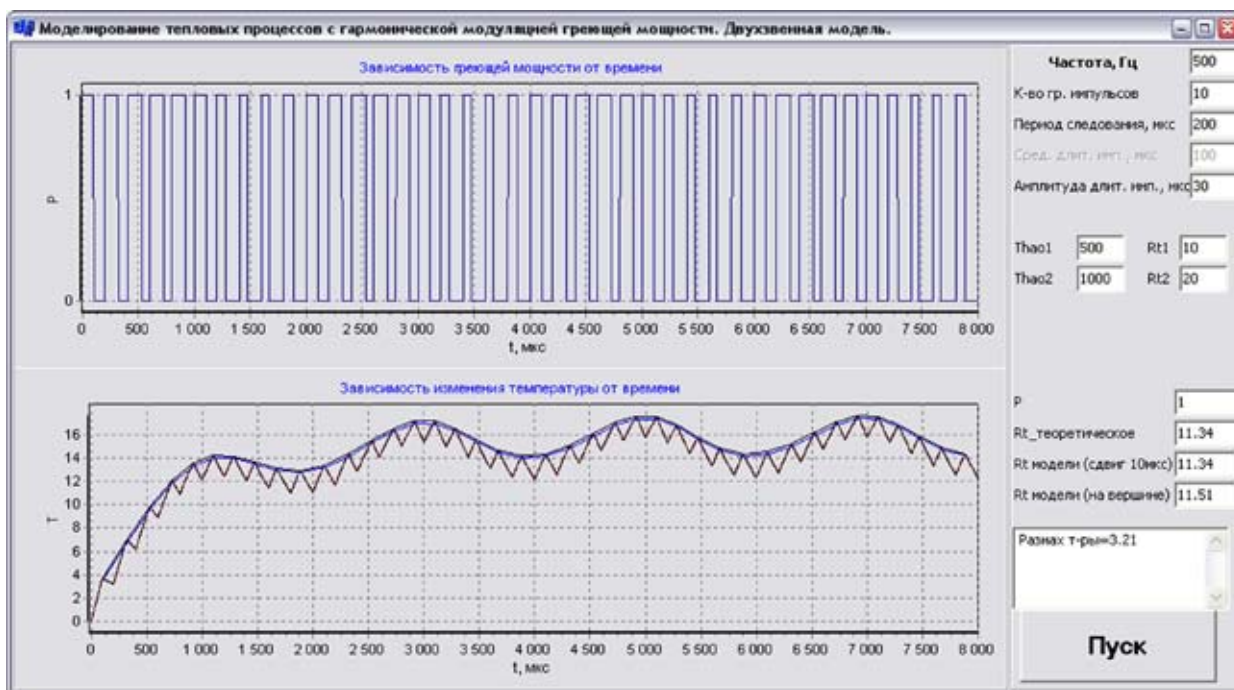


Рис. 3. Интерфейс программы моделирования кинетики нагрева светодиодов гармонической ШИМ-мощностью

В соответствии с заданными параметрами программа производит расчет суммарного изменения температуры модели, определяет амплитуду переменной составляющей температуры и на основании полученных значений производит расчет теплового сопротивления. Для проверки корректности способа и оценки влияния различных факторов на точность измерения по заданным параметрам модели (R_{T_k} и τ_k) и циклической частоте модуляции ω производился теоретический расчет R_T согласно выражению:

$$R_T = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n \frac{R_{T_k}}{1 + (\omega\tau_k)^2} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n \frac{R_{T_k} \omega\tau_k}{1 + (\omega\tau_k)^2} \right)^2}, \quad (8)$$

которое получается в результате вычисления модуля теплового импеданса \tilde{R}_{T_k} для n -звенной модели светодиода:

$$\tilde{R}_T = \sum_{k=1}^n \frac{R_{T_k}}{1 + j\omega\tau_k}.$$

Моделирование производилось для двухзвенной модели, имеющей параметры: $R_{T_1} = 10$ К/Вт; $\tau_1 = 500$ мкс; $R_{T_2} = 20$ К/Вт; $\tau_2 = 1000$ мкс. Частота модуляции греющей мощности выбиралась из диапазона от 10 до 500 Гц; период следования – из диапазона от 80 до 200 мкс; мгновенная мощность $P = 1$ Вт.

Расчет температуры p - n -перехода $T_n(t)$ производился по формулам (3)–(6) с учетом (7). В качестве примера на рисунке 3 в нижнем окне показан график зависимости $T_n(t)$, имеющий пилообразный характер. В процессе моделирования для каждого греющего импульса определялся момент времени достижения макс-

симальной температуры T_{max} , после чего через 10 мкс определялась температура перехода, которая и использовалась для последующего вычисления первой гармоники колебаний $T_n(t)$ и R_T двухзвенной модели. Результаты расчета R_T как функции периода следования импульсов при нескольких значениях частоты модуляции представлены на рисунке 4а.

Амплитуда переменной составляющей длительности импульсов принималась равной 30 мкс. На графике кружками отмечены результаты моделирования, сплош-

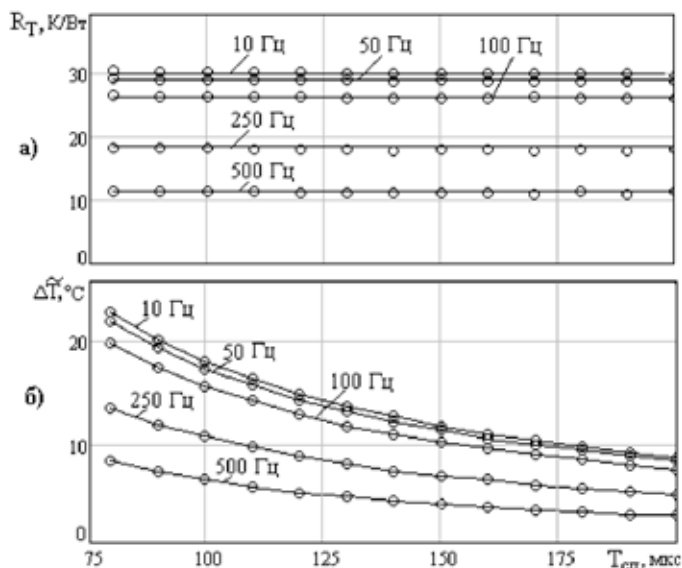


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления (а) и размаха колебаний температуры p - n -перехода (б) от частоты следования греющих импульсов

ными прямыми – результаты теоретического расчета по формуле (8). Видно, что оба способа расчета теплового сопротивления для двухзвенной модели дают примерно одинаковые результаты, отклонение не превышает 3%. Это свидетельствует о корректности способа измерения теплового сопротивления светодиодов, основанного на нагреве гармонической ШИМ-мощностью.

Чувствительность метода измерения теплового сопротивления светодиодов определяется размахом переменной составляющей температуры перехода $\Delta\tilde{T} = T_{max} - T_{min}$ при единичной рассеиваемой мощности P . На рисунке 4б приведены результаты расчета $\Delta\tilde{T}$ как функции периода следования импульсов при различной частоте модуляции греющей мощности. Эти результаты показывают, что чувствительность метода резко уменьшается с ростом частоты модуляции греющей мощности. Так, при периоде следования импульсов $T_{cl} = 100$ мкс на частоте модуляции 10 Гц размах температуры перехода $\Delta\tilde{T}$ составляет 18 К, а на частоте модуляции 500 Гц – менее 7 К. С уменьшением периода следования при постоянной амплитуде колебаний длительности импульсов чувствительность метода возрастает.

Ограничивающими факторами, не позволяющими существенно уменьшить период следования греющих импульсов, являются частота синхронизации микроконтроллера, формирующего последовательность импульсов с гармонической ШИМ; быстродействие аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который осуществляет аналого-цифровое преобразование напряжения на светодиоде, изменяющемся в небольшом диапазоне (единицы и десятки милливольт); необходимость ожидания завершения переходных электрических процессов, вызванных переключением светодиода из режима нагрева в режим измерений. Например, при использовании типового 8-разрядного микроконтроллера с частотой синхронизации 16 МГц и 16-разрядного АЦП с временем преобразования 10 мкс реализуемый минимальный период следования импульсов составляет около 100–120 мкс.

Представленные результаты моделирования получены при постоянной амплитуде колебаний длительностей, которая принималась равной $\tau_0 = 30$ мкс. Средняя длительность импульсов при этом $t_{u\text{cp}} = T_{cl}/2$. Исследуем влияние величины τ_0 на точность и чувствительность метода при постоянном периоде следования $T_{cl} = 120$ мкс. Результаты моделирования зависимости R_T от τ_0 представлены на рисунке 5а, а зависимости размаха колебаний температуры $\Delta\tilde{T}$ от τ_0 – на рисунке 5б. Сплошными линиями на рисунке 5а показаны теоретические значения R_T , рассчитанные по формуле (8). Видно, что на всех частотах модуляции греющей мощности величина τ_0 не влияет на значения R_T , полученные в рамках модели.

Зависимость размаха колебаний температуры $\Delta\tilde{T}$ (рис. 5б), характеризующего чувствительность

метода измерений R_T от τ_0 носит линейный характер: с увеличением τ_0 растет и $\Delta\tilde{T}$. Поэтому при реализации метода при фиксированных значениях периода следования T_{cl} и средней длительности греющих импульсов целесообразно задавать максимально возможную амплитуду колебаний длительности греющих импульсов τ_0 . Ограничивающим фактором здесь является то, что длительность паузы между греющими импульсами, в течение которой производится измерение ТЧП, не может быть меньше определенной величины, примерно равной 30 мкс. Минимальная длительность греющих импульсов также ограничена, поскольку микроконтроллеру необходимо измерить напряжение на светодиоде в середине греющего импульса, одновременно исключив влияние выбросов на его фронте, записать информацию в массив и подготовиться к следующему приходу импульса. Для типового 8-разрядного микроконтроллера с частотой синхронизации 16 МГц это примерно составляет 20–30 мкс. Поэтому при $T_{cl} = 120$ мкс, $t_{cp} = 60$ мкс и коэффициенте модуляции $a = 0,5$ максимальное значение амплитуды колебаний длительности греющих импульсов примерно равно 30–40 мкс.

Измерение теплового сопротивления отдельных полупроводниковых слоев или элементов конструкции светодиода, имеющих малые значения тепловой постоянной, требует относительно высокой частоты модуляции греющей мощности (до тысячи герц). Поскольку период следования импульсов составляет величину около 100–120 мкс, то за один период модуляции микроконтроллер может сгенерировать ограниченное количество греющих импульсов. Например, при $f_{mod} = 1000$ Гц и $T_{cl} = 120$ мкс это количество равно 8. При таком небольшом количестве импульсов возрастает погрешность определения амплитуды

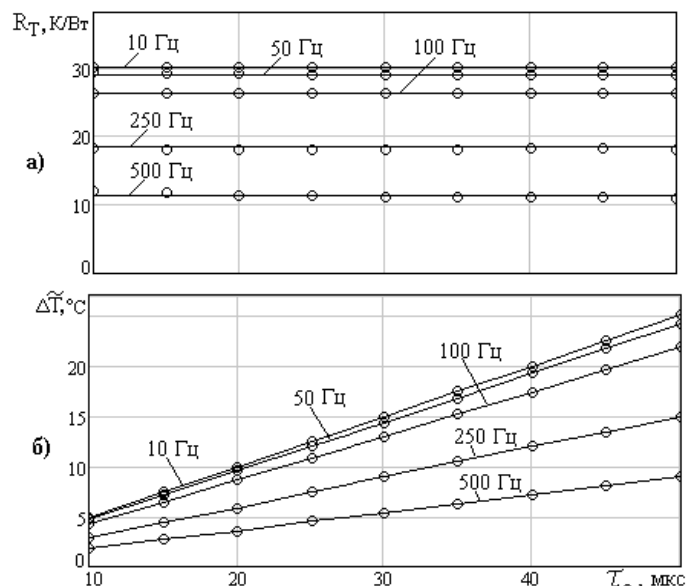


Рис. 5. Зависимость теплового сопротивления (а) и размаха колебаний температуры p - n -перехода (б) от амплитуды колебаний длительности греющих импульсов

ды переменной составляющей температуры p - n -перехода и, как следствие, теплового сопротивления светодиода. На рисунке 6 представлена зависимость погрешности определения теплового сопротивления δR_T от количества греющих импульсов n за один период модуляции при $T_{cl} = 120$ мкс.

Погрешность δR_T вычислялась согласно выражению:

$$\delta R_T = \frac{|R_T - R_{T_{теор}}|}{R_{T_{теор}}} \cdot 100\%,$$

где теоретическое значение теплового сопротивления $R_{T_{теор}}$ рассчитывалось по формуле (8).

Представленные на рисунке 6 результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что при допустимой погрешности 2% количество импульсов за период модуляции не должно быть меньше 14. Как показали исследования, эту погрешность можно существенно уменьшить, если для вычисления амплитуды переменной составляющей температуры использовать дискретное преобразование Фурье.

Особенностью анализируемого метода измерения теплового сопротивления светодиодов является то, что изменяя частоту модуляции греющей мощности, можно измерить спектральную зависимость теплового сопротив-

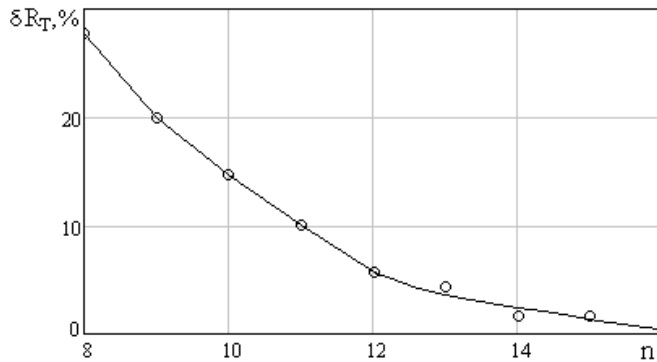


Рис. 6. Зависимость погрешности определения теплового сопротивления от количества греющих импульсов за период модуляции ($T_{cl} = 120$ мкс)

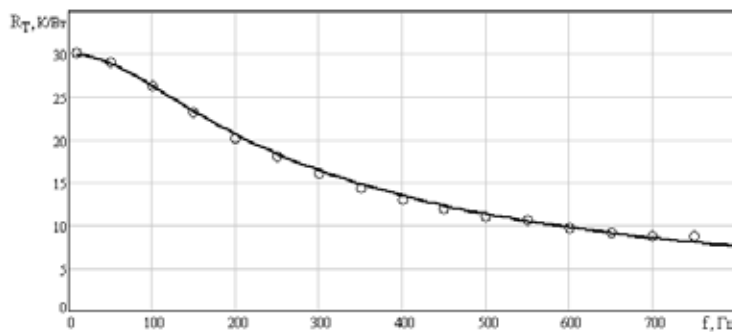


Рис. 7. Зависимость теплового сопротивления от частоты модуляции греющих импульсов для двухзвенной модели ($T_{cl} = 120$ мкс)

ления с характерными пологими участками, на которых величина R_T практически не изменяется. Каждый такой участок спектра соответствует определенному слою полупроводниковой структуры или элементу конструкции светодиода. Поэтому представляет интерес получить спектральную зависимость в рамках модели (изменяя частоту модуляции греющей мощности) и сравнить ее с теоретической зависимостью $R_T(\omega)$, полученной с использованием формулы (8).

Результаты такого моделирования представлены на рисунке 7. На графике кружками отмечены значения R_T , полученные в рамках модели, сплошная линия – результат расчета по формуле (8). Видно, что совпадение результатов моделирования с теоретическим расчетом хорошее. Если не учитывать результат моделирования на частотах 700 и 750 Гц, при которых начинает проявляться влияние малого количества греющих импульсов на период модуляции, то отклонение не превышает 3%.

Выводы

Таким образом, анализ результатов компьютерного моделирования тепловых процессов в светодиодах, нагреваемых ШИМ-мощностью, изменяющейся по гармоническому закону, позволяет сделать следующие выводы.

1. Метод измерения теплового сопротивления светодиодов, основанный на использовании гармонической ШИМ-мощности, обладает погрешностью на уровне 3%, причем эта величина не зависит от периода следования греющих импульсов, изменяющегося в диапазоне 80–200 мкс.

2. Чувствительность метода зависит от частоты модуляции греющей мощности и периода следования греющих импульсов. Она уменьшается с ростом частоты модуляции и возрастает с уменьшением периода следования при постоянной амплитуде колебаний длительности импульсов. При использовании типовых микроконтроллеров и АЦП минимальный период следования может составить величину порядка 100–120 мкс.

3. При постоянном периоде следования греющих импульсов чувствительность метода прямо пропорциональна амплитуде колебаний длительности греющих импульсов. Для типовых микроконтроллеров и АЦП при периоде следования 120 мкс реализуемая максимальная длительность греющих импульсов составляет 40 мкс.

4. При высокой частоте модуляции на точность измерений оказывает влияние количество греющих импульсов за один период модуляции. При допустимой погрешности 2% и периоде следования 120 мкс количество импульсов за период модуляции не должно быть меньше 14. Это влияние можно существенно уменьшить, если для вычисления амплитуды переменной составляющей температуры использовать дискретное преобразование Фурье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды. – М. : Физматлит, 2008. – 496 с.
2. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard. – URL: <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf>.
3. T3Ster – Thermal Transient Tester - Technical information. – URL: www.mentor.com/micred.
4. Пат. 2402783 РФ, G01 R 31/26. Способ измерения теплового импеданса полупроводниковых диодов / Сергеев В.А, Смирнов В.И., Юдин В.В. и др. – опубл. 27.10.10, Бюл. № 30.
5. Измерение теплового импеданса мощных светодиодов с применением широтно-импульсной модуляции мощности / Сергеев В.А. [и др.] // Известия вузов. Электроника. – 2012. – № 3. – С. 64–68.
6. Аппаратно-программный комплекс для измерений тепловых характеристик полупроводниковых приборов / Смирнов В.И. [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 1. – С. 135–136.
7. Аронов В.Л., Федотов Я.А. Исследование и испытание полупроводниковых приборов. – М. : Высшая школа, 1975. – 325 с.
8. Вяхирев В.В. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 3. – С. 90–92.
9. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

REFERENCES

1. Shubert F. *Svetodiody* [LED]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 496 p.
2. IC Thermal Measurement Method. Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1

standard. Available at: <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf>.

3. T3Ster – Thermal Transient Tester - Technical information. Available at: www.mentor.com/micred.

4. Russian Federation Patent 2402783, Int.Cl.: G01 R 31/26. Sposob izmereniya teplovogo impedansa poluprovodnikovyykh diodov [Thermal Impedance Measurement Method for Semiconductor Diode]. Inventor: Sergeyev V.A, Smirnov V.I., Yudin V.V., and others. Date of publication October 27, 2010, Bull. no. 30.

5. Sergeev V.A. and Others. Izmereniye teplovogo impedansa moshchnyykh svetodiodov s primeneniyyem shirotno-impulsnoy modulyatsii moshchnosti [Measuring the LED Thermal Impedance with the Use of Width-Pulse Power Modulation]. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [News of Higher Educational Institutions. Electronics], 2012, no. 3, pp. 64–68.

6. Smirnov V.I. and Others. Apparatno-programmnyy kompleks dlya izmereniy teplovykh kharakteristik poluprovodnikovyykh priborov [Software and Hardware System for Measuring Thermal Characteristics of Semiconductor Devices]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2013, no.1, pp. 135–136.

7. Aronov V.L., Fedotov Ya.A. *Issledovaniye i ispytaniye poluprovodnikovyykh priborov* [Research and Testing of Semiconductor Devices]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1975. 325 p.

8. Vyakhirev V.V. Izmereniye teplovykh kharakteristik poluprovodnikovyykh elektronnykh komponentov [Measuring Thermal Characteristics of Semiconductor Electronic Components]. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in Electronic Industry Magazine], 2013, no. 3, pp. 90–92.

9. Tugov N.M., Glebov B.A., Charykov N.A. *Poluprovodnikovyye pribory* [Semiconductor Devices]. Moscow, Elektroatomizdat Publ., 1990. 576 p.