

ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTRONICS

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.3

В.А. Сергеев, М.Ю. Сальников, А.М. Низаметдинов

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СКВОЗНЫХ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, профессор, окончил физический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, заведующий базовой кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Имеет монографии, статьи и изобретения в области моделирования и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Сальников Максим Юрьевич, окончил радиотехнический факультет УлГТУ, аспирант базовой кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Инженер ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет научные публикации и изобретения в области контроля качества элементов и устройств вычислительной техники и систем управления. [e-mail: salnikov-1309@mail.ru].

Низаметдинов Азат Маратович, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Старший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Имеет научные публикации и изобретения в области автоматизации измерений и исследования характеристик материалов и изделий электроники. [e-mail: ufire@mv.ru].

Аннотация

Представлен краткий обзор стандартных способов контроля качества и диагностики дефектов сквозных металлизированных отверстий (СМО) печатных плат (ПП), отмечены их основные недостатки. Более подробно рассмотрены методы теплового контроля, которые сводятся к разогреву СМО и контролю их температуры в процессе нагрева. Основным недостатком известных методов является контактный характер нагрева СМО и измерения температуры, приводящий к значительным погрешностям и низкой достоверности контроля. Описан бесконтактный способ, состоящий в одностороннем нагреве СМО лазерным лучом и бесконтактном измерении температуры торцов СМО ИК-камерой. Для анализа переходных тепловых процессов в СМО при одностороннем нагреве предложена тепловая эквивалентная схема СМО, учитывающая отвод тепла от металлизации СМО в материал ПП. Показано, что качество металлизации можно оценить по разности температур верхнего (нагреваемого) и нижнего торцов СМО, а качество адгезии металлизации СМО с материалом печатной платы – по отношению приращений температур. Рассмотрены особенности реализации способа и приведены результаты его апробации на реальном образце.

Ключевые слова: печатная плата, сквозное металлизированное отверстие, контроль качества, бесконтактный тепловой метод, односторонний нагрев, тепловая эквивалентная схема, тепловые переходные характеристики.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-3-65-96-102

THE QUALITY CONTROL OF PLATED-THROUGH HOLES OF PRINTED CIRCUIT BOARDS BY PULSED LASER HEATING

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from the Faculty of Physics of Gorky State Technical University; Head of the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of RAS; Head of the Department of Radioengineering, Opto and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov IRE; an author of monographs, inventions, and articles in the field of researching and simulating semiconductor device and integrated circuit performance, and measuring their thermal characteristics. e-mail: sva@ulstu.ru.

Maksim Iurievich Salnikov, Postgraduate Student the Department of Radioengineering, Opto and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University at Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov IRE; graduated from the Radioengineering Faculty of Ulyanovsk State Technical University; Engineer at FRPC JSC RPA 'Mars'; an author of publications and inventions in the field of quality control of elements and units of computer machines and management systems. e-mail: salnikov-1309@mail.ru.

Azat Maratovich Nizametdinov, graduated from the Radioengineering Faculty of Ulyanovsk State Technical University; Senior Scientist at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov IRE; an author of publications and inventions in the field of measurement automation and researching the characteristics of materials and electronic devices. e-mail: ufire@mv.ru.

Abstract

The article gives a brief overview of standard methods of quality control and defect diagnostics of plated-through holes (PTH) of printed circuit boards (PCB) and considers their main disadvantages. It scrutinizes the methods of thermal control, which are reduced to PTH heating and monitoring the temperature. The main disadvantage of common methods is that they require a contact during heating the PTH and temperature measurement, which leads to significant errors and low reliability of control. The article describes a non-contact method involving heating only one side of the PTH by a laser beam and non-contact temperature measurement of the PTH ends by an IR camera. The authors propose a thermal equivalent scheme of PTH to analyze the transient thermal processes in PTH, which takes into account the heat removal from the plating of PTH into the PCB material. It is shown that the quality of plating can be estimated by the temperature difference between the upper (heated) and lower ends of the PTH, and the quality of adhesion between PTH plating and the PCB material can be estimated by the ratio of temperature increments. The article describes peculiarities of this method and gives the results of its testing on a real sample.

Keywords: printed circuit board, plated-through hole, quality control, non-contact thermal method, one-sided heating, thermal equivalent circuit, thermal transient characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Качество и надежность радиоэлектронных средств (РЭС) во многом определяется качеством печатных плат (ПП) и их отдельных элементов. Основные дефекты, возникающие при производстве и эксплуатации ПП, определены ГОСТ Р 56251-2014 [1]. Одной из наиболее острых и сложных проблем при производстве ПП является проблема диагностики скрытых дефектов сквозных металлизированных отверстий (СМО) (рис. 1), поскольку дефекты СМО являются наиболее опасными и трудно выявляемыми видами дефектов и приводят к различным видам отказов. Наиболее распространенными причинами отказов печатных уз-

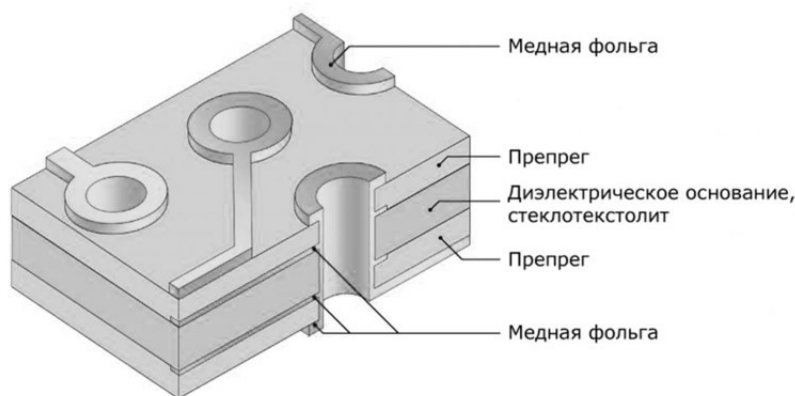


Рис. 1. Вид СМО ПП в разрезе

лов при испытаниях и эксплуатации являются разрывы металлизации, неравномерная толщина металлизации, плохая адгезия металлизации СМО с материалом ПП, инородные включения и т. п. [1–4].

Для оценки качества и выявления дефектов СМО применяют различные визуальные, электрические и механические методы контроля и испытаний по ГОСТ Р 55744-2013 [5].

К электрическим методам относится контроль электрического сопротивления СМО, позволяющий оценить толщину металлизации в СМО. Такие дефекты, как раковины, трещины или утоньшения покрытия, приводят к повышению сопротивления по сравнению с расчетным значением. Оценку сопротивления СМО проводят при комнатной температуре, при измерительном токе не более 0,1 А. Результаты измерений сравнивают с калибровочными зависимостями «сопротивление – толщина меди», полученными заранее для разной толщины медного покрытия СМО, определяемой по микрошлифам. При этом необходимо учитывать и покрытия для пайки, которые могут исказить результаты из-за отличия сопротивления этих покрытий от сопротивления меди.

Для проверки способности СМО выдерживать повышенную токовую нагрузку на готовых ПП, проводят испытания током подозрительных СМО, выявленных при визуальном осмотре. При испытании через СМО в течение 30 с пропускают электрический ток силой, зависящей от диаметра проверяемого отверстия. Под действием этого тока СМО не должны разрушаться и изменять своих размеров.

Электрические методы контроля являются контактными, их достоверность зависит от качества контактной системы. Кроме того, эти методы не позволяют оценить качество адгезии медного металлизации с материалом ПП.

Качество адгезии металлизации СМО с материалом ПП позволяет оценить метод определения прочности на вырыв покрытий из СМО. Перед испытаниями в контролируемые СМО впаивают облуженные отрезки проволоки, повторяя эту операцию несколько раз. После последнего цикла пайки образец выдерживают при комнатной температуре в течение 30 мин и под прямым углом к поверхности образца прикладывают усилие с постепенным увеличением до тех пор, пока металлизация отверстия не отделится от материала основания. Метод является разрушающим и дает лишь усредненную оценку качества адгезии СМО.

Для неразрушающего выявления скрытых дефектов СМО применяют методы рентгеновской и ультразвуковой томографии [6]. Однако соответствующее контрольное оборудование дорогое и сложное в эксплуатации; трудоемкость операции контроля не позволяет обеспечить сплошной 100% контроль ПП в условиях массового производства.

1 МЕТОД ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

Для контроля качества СМО ПП используют различные тепловые методы [7, 8], однако известные те-

пловые модели СМО [8] не учитывают отвода тепла в материал ПП и не позволяют связать тепловые характеристики СМО с качеством адгезии. Для диагностики дефектов адгезии можно использовать методы теплового контроля, которые сводятся к импульсному разогреву СМО и контролю их температуры в процессе нагрева. В работе [9] предложен способ контроля СМО, заключающийся в пропускании по цилиндру металлизации СМО импульса теплового возбуждения, создаваемого с помощью электрода, контактирующего с верхней кромкой металлизации, и в регистрации температуры нижней кромки металлизации тепловым приемником. При этом качество металлизации определяют по калибровочным кривым, полученным на заведомо качественных СМО. Недостатком способа является его контактный характер, поскольку наличие контактов приведет к искажению тепловых характеристик СМО, а от качества контакта температурного приемника с нижней кромкой СМО зависит точность измерения температуры. Кроме того, сами авторы этого способа ограничивают его применение для СМО диаметром не более 0,3–0,5 мм и на промежуточной стадии производства ПП.

С учетом малых размеров СМО нами рассмотрена возможность локального одностороннего нагрева СМО лазерным излучением [10]. Идея локального нагрева образца для исследования его тепловых характеристик лазерным лучом была предложена У. Паркером с соавторами еще в 1961 г. [11]. С тех пор этот метод, названный методом лазерной вспышки (МЛВ), значительно усовершенствовался и вошел в международные стандарты [12], но сохранил ряд недостатков: необходимость вырезки образца определенной формы и размеров и двустороннего доступа к нему. В работе [13] описан экспресс-метод определения коэффициента температуропроводности твердых тел путем локального нагрева плоских пластин лазерным лучом ступенчато изменяющейся мощности с регистрацией нестационарного температурного поля тепловизором (рис. 2).

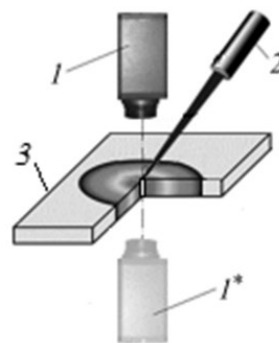


Рис. 2. Расположение тепловизора 1 и 1*, лазера 2 и объекта 3 при реализации МЛВ [13]

Тепловизор может располагаться как на стороне с лазером, так и с обратной, как это показано на рисунке 2. Кадры тепловизора преобразовываются в карты

распределения температуры, по которым и определяют искомые параметры.

Апробация МЛВ при одностороннем нагреве СМО лазерным лучом проводилась нами на образце ПП из стеклотекстолита FR4 толщиной $l = 1,5$ мм [10]. Для эксперимента было выбрано СМО без контактной площадки с внутренним диаметром отверстия $D_1 = 0,38$ мм и внешним диаметром $D_2 = 0,4$ мм, то есть толщина медной металлизации составляла 10 мкм. Медная металлизация СМО сверху была покрыта тонким слоем сплава для пайки ПОС 64 с коэффициентом оптического отражения K_0 около 0,6 [14].

Лазерный луч твердотельного лазера с длиной волны излучения 450 нм (синий цвет) и регулируемой мощностью излучения направлялся перпендикулярно плоскости ПП и фокусировался на верхний торец СМО по его внешнему диаметру. Температура нижнего торца СМО с обратной стороны ПП измерялась тепловизором Testo 876.

Для оценки оптической мощности, поглощаемой в торце СМО и вызывающей его нагрев, необходимо учесть коэффициент отражения ПОС 64 и отношение K_S площади торца цилиндра металлизации к площади лазерного пучка, которое определяют по формуле

$$K_S = \frac{S_{\text{ТОР}}}{S_{\text{СМО}}} = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) \approx 0,1. \quad (1)$$

Таким образом, на нагрев СМО будет затрачиваться только малая часть мощности $P_{\text{л}}$ излучения лазера:

$$P_{\text{Т}} = (1 - K_0) K_S P_{\text{л}} \approx 0,04 P_{\text{л}}. \quad (2)$$

2 Анализ тепловой схемы СМО при одностороннем нагреве

Для анализа тепловых процессов в СМО при его одностороннем нагреве со стороны одного (верхнего) торца на основе развитых ранее тепловых моделей полупроводниковых приборов [15] предложена тепловая эквивалентная схема СМО, показанная на рисунке 3.

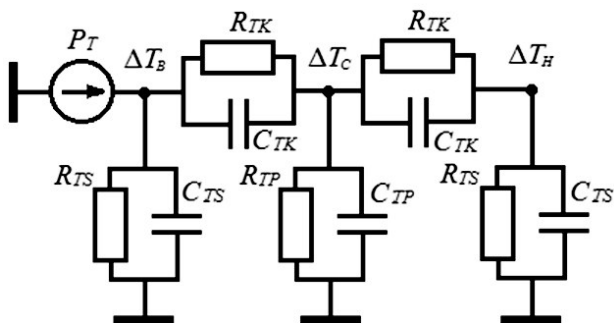


Рис. 3. Тепловая эквивалентная схема СМО

Величина $2R_{\text{ТК}}$ – продольное тепловое сопротивление тонкого медного полого цилиндра металлизации

СМО с толщиной стенок $d = r_2 - r_1$, где r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы СМО, рассчитываемое по известной формуле [9]:

$$2R_{\text{ТК}} \approx \frac{4l}{\lambda_{\text{Cu}} \pi (D_1^2 - D_2^2)}, \quad (3)$$

где λ_{Cu} – коэффициент теплопроводности меди (400 Вт/м·К), и для контролируемого СМО составляет 320 К/Вт.

Соответственно $2C_{\text{ТК}}$ – теплоемкость тонкой медной цилиндрической трубки СМО с толщиной стенок d , которая определяется

$$2C_{\text{ТК}} \approx \frac{\rho_{\text{Cu}} c_{\text{Cu}} \pi (D_1^2 - D_2^2) l}{4}. \quad (4)$$

Заметим, что тепловая постоянная времени нагрева медной цилиндрической трубки СМО

$$\tau_{\text{ТК}} = 4R_{\text{ТК}} C_{\text{ТК}} \approx \frac{l^2}{a_{\text{Cu}}}, \quad \text{где} \quad a_{\text{Cu}} = \frac{\lambda_{\text{Cu}}}{\rho_{\text{Cu}} c_{\text{Cu}}} \approx$$

$\approx 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ – температуропроводность меди, не зависит от толщины стенок, а определяется только толщиной ПП. При $l = 1,5 \cdot 10^{-3}$ тепловая постоянная времени СМО составит $\tau_{\text{ТК}} \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$.

$R_{\text{ТР}}$ – тепловое сопротивление между металлизацией СМО и прилегающим материалом ПП. Значение $R_{\text{ТР}}$ является диагностическим параметром, поскольку зависит от адгезии и при ее ухудшении должно превышать. $C_{\text{ТР}}$ – теплоемкость объема прилегающего к СМО материала ПП. Это RC-звено в эквивалентной схеме подключается в середине полого цилиндра, поскольку при небольших мощностях нагрева температура СМО спадает линейно от верхнего торца к нижнему. Для оценки $R_{\text{ТР}}$ используем выражение для теплового сопротивления цилиндрической стенки из материала ПП [16] с эффективным радиусом $r_{\text{ЭФФ}}$:

$$R_{\text{ТР}} = \frac{1}{2\lambda l} \ln \left(\frac{r_{\text{ЭФФ}}}{r_2} \right). \quad (5)$$

Тепловые модели показывают, что материал ПП в стационарном режиме прогревается на глубину нескольких (5–6) внешних диаметров СМО и при коэффициенте теплопроводности материала ПП (стеклотекстолита и др.) порядка 0,2–0,3 Вт/м·К $R_{\text{ТР}}$ составит $2,5\text{--}3,5 \cdot 10^3$ К/Вт. Теплоемкость прилегающей к СМО цилиндрической стенки материала ПП определяется по формуле:

$$C_{\text{ТР}} = \pi r_{\text{ЭФФ}}^2 l \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}}, \quad (6)$$

и при удельной теплоемкости стеклотекстолита $c_{\text{ст}} \approx 1,0$ кДж/кг·К и его плотности $\rho_{\text{ст}} = 1800$ кг/м³ для СМО радиусом 0,2 мм составит $3,2 \cdot 10^{-2}$ Дж/К. Таким образом, тепловая постоянная времени этого RC-звена для заданных размеров СМО оставляет в зависимости

от теплопроводности материала ПП от 70 до 100 с, то есть на несколько порядков превышает тепловую постоянную времени $\tau_{ТК}$ собственно СМО.

$R_{ТС}$ – тепловое сопротивление торец СМО–окружающая среда, обусловленное конвекционной теплоотдачей с торца СМО и с прилегающей к торцу нагретой поверхности ПП. Нагрев прилегающих к СМО областей материала ПП определяется его коэффициентом теплопроводности λ . Для стеклотекстолита с $\lambda = 0,33$ Вт/м·К эффективный диаметр прилегающей к СМО нагретой поверхности составляет 8–10 внешних диаметров СМО, и при коэффициенте α_T конвекционной теплоотдачи в воздух, равном 6-8 Вт/(м²·К), значение $R_{ТС}$ составляет $1,2-2,0 \cdot 10^4$ Вт/К. $C_{ТС}$ – эквивалентная теплоемкость слоя воздуха, прилегающего к торцу нагретой поверхности ПП, в котором происходит конвекционный теплообмен.

В стационарном режиме схемы с учетом того, что $R_{ТС} \gg R_{ТК}, R_{ТР}$, для расчета приращений температуры верхнего ΔT_B и нижнего ΔT_H торцов нетрудно из тепловой эквивалентной получить следующие приближенные формулы:

$$\Delta T_B \approx P_T (R_{ТК} + R_{ТР}), \quad (7)$$

$$\Delta T_H \approx P_T R_{ТР}. \quad (8)$$

Заметим, что согласно (7) и (8) отношение ΔT_B к ΔT_H не зависит от греющей мощности и позволяет определить значение $R_{ТР}$ по расчетному значению $R_{ТК}$.

При подаче на торец СМО ступеньки греющей мощности приращений температуры верхнего ΔT_B и нижнего ΔT_H торцов нарастают не мгновенно. Полагая для упрощения анализа тепловое сопротивление $R_{ТС}$ бесконечно большим, для изменения температуры верхнего и нижнего торцов можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned} \Delta T_B(t) &\approx \\ &\approx P_T \left[R_{ТК} \left(1 - e^{-\frac{4t}{\tau_{ТК}}} \right) + R_{ТР} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{ТР}}} \right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta T_H(t) \approx P_T R_{ТР} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{ТР}}} \right). \quad (10)$$

Соответственно, при длительности импульса греющей мощности, удовлетворяющей условию $\tau_{ТР} \gg t_i \gg \tau_{ТК}$, учитывая, что в этом случае

$e^{-\frac{4t_i}{\tau_{ТК}}} \rightarrow 0$, и оставляя линейный член в разложении выражения $e^{-\frac{t}{\tau_{ТР}}}$ в ряд: $e^{-\frac{t_i}{\tau_{ТР}}} \approx 1 - \frac{t_i}{\tau_{ТР}}$, получим

$$\Delta T_H(t) \approx P_T R_{ТР} \frac{t_i}{\tau_{ТР}}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_B(t)}{\Delta T_H(t)} &\approx 1 + \frac{R_{ТК}}{R_{ТР}} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_{ТР}}} \right)^{-1} \approx \\ &\approx 1 + \frac{R_{ТК} \tau_{ТР}}{R_{ТР} t_i}. \end{aligned} \quad (12)$$

3 ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице приведены результаты измерения температуры нижнего торца СМО при локальном ступенчатом нагреве верхнего торца СМО лазерным лучом для длительности импульса примерно 10 с. Значения $R_{ТР}$, рассчитанные по формуле (11), приведены в таблице.

Полученные экспериментальные значения $R_{ТР} \approx 3000-3400$ К/Вт вполне соответствуют приведенным выше оценкам этой величины при однородном отводе тепла от металлизации ПП в материал ПП. Некоторое увеличение теплового сопротивления $R_{ТР}$ с ростом греющей мощности объясняется, вероятно, уменьшением теплопроводности материалов с ростом температуры и тепловым расширением материалов ПП [2, 3].

Таблица

Приращения температуры нижнего торца СМО при ступенчатом локальном нагреве верхнего торца лазерным лучом

Измеряемый параметр	Мощность P_T		
	0,03 Вт	0,04 Вт	0,06 Вт
ΔT_H^{10} , К	11	16	26
$R_{ТР}^{10}$, К/Вт	2940	3200	3360

Заметим, что отношение приращений температуры согласно (12) не зависит от уровня греющей мощности, что может служить основой бесконтактного способа контроля качества СМО при лазерном нагреве без учета отражающей способности материала. При этом, для бесконтактного измерения температуры верхнего торца СМО необходимо использование дополнительных оптических элементов для исключения засветки тепловизора отраженным лазерным лучом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная тепловая эквивалентная схема СМО может быть использована для анализа переходных тепловых процессов в СМО при его одностороннем нагреве. Параметры тепловой эквивалентной схемы СМО являются диагностическими параметрами, характеризующими качество СМО. Нагрев одного из торцов СМО методом лазерной вспышки и измерение температуры верхнего и нижнего торцов

СМО с помощью тепловизора или ИК-камеры позволяют неразрушающим путем определить как продольное тепловое сопротивление СМО, так и контактное тепловое сопротивление между металлизацией СМО и материалом ПП, то есть оценить качество самой металлизации СМО и качество ее адгезии к материалу ПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 56251-2014. Платы печатные. Классификация дефектов. М. : Стандартинформ, 2014. 107 с.
- Study of key failure modes of PTH in high density printed board and case study / Yao Bin, Chen Hui, Lu Yudong, Luo Daojun // 15th International Conference on Electronic Packaging Technology. 2014. pp. 923–927.
- Medvedev A.M. Printed-Circuit Board. Reliability of Interconnections // Reliability: Theory & Applications. 2012. № 7. С. 72–79.
- A Study on Effects of Copper Wrap Specifications on Printed Circuit Board Reliability / B. Sood, J. Shue, J. Leitner, K. Daniluk, L.-N. Sindjui // IEEE Transactions on Reliability, March 2019. Vol. 68, no. 1. pp. 248–266.
- ГОСТ Р 55744-2013. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров М. : Стандартинформ, 2014. 43 с.
- Данилова Е.А. Обзор методов обнаружения опасных технологических дефектов в электронных платах // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Т. 1. С. 331–335.
- On Thermo-Mechanical Reliability of Plated-Through-Hole (PTH) / F. Su, R. Mao, J. Xiong et al. // Microelectronics Reliability. 2012. Vol. 52, no. 6. pp. 1189–1196.
- Винокуров А. Расчет печатных плат для светодиодов Cree серии XP и MX // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 3. С. 16–20.
- Пат. 2159522 РФ, МПК H05K 3/42, G01N 27/82. Способ контроля качества металлизации отверстий печатных плат / Плотников Ю.А., Поляхов М.Ю., Чернов Л.А. заявка 99115757/09 ; заявл. 23.07.1999 ; опубл. 20.11.2000. Бюл. № 32.
- Сергеев В.А., Сальников М.Ю., Низаметдинов А.М. Диагностика межслоевых соединений печатных плат методом импульсного лазерного нагрева // Вузовская наука в современных условиях : Сб. мат. 54-й науч.-техн. конф. (28 января–2 февраля 2021 г.). В 3 ч. Ч. 1. Ульяновск : УЛГТУ, 2021. С. 158–162.
- Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity / W.J. Parker, W.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbott // Journal of Applied Physics. 1961. 32 (9). pp. 1679–1684.
- ASTM E1461-13. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. URL: <https://www.astm.org/Standards/E1461.htm>.
- Определение температуропроводности материалов методом нестационарного точечного нагрева / Д.Ю. Головин, А.И. Тюрин, А.А. Самодуров, Ю.И. Головин // Письма в ЖТФ. 2020. Вып. 1. С. 39–42.
- Справочник конструктора-машиностроителя. Основные характеристики покрытий. URL: <https://www.cncnc.ru/documentation/sprav-constr/html/tom1/pages/chapter8/ckm85.html>.

cncnc.ru/documentation/sprav-constr/html/tom1/pages/chapter8/ckm85.html.

15. Сергеев В.А., Ходаков А.М. Нелинейный тепловые модели полупроводниковых приборов. Ульяновск : УЛГТУ, 2012. 153 с.

16. Цилиндрическая стенка. Температурное поле. URL: <https://portal.tpu.ru /SHARED/p/ PNB/ learning/ Thermodynamics/Tab3/Lecture11.pdf>.

REFERENCES

- GOST R 56251–2014. *Platy pechatnye. Klassifikatsiia defektov* [State Standard 56251–2014. Printed Circuit Boards. Classification of Defects]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 107 p.
- Yao Bin, Chen Hui, Lu Yudong, Luo Daojun Study of Key Failure Modes of PTH in High Density Printed Board and Case Study. *The 15th International Conference on Electronic Packaging Technology*. 2014, pp. 923–927.
- Medvedev A.M. Printed-Circuit Board. Reliability of Interconnections. *Reliability: Theory & Applications*, 2012, iss. 7, pp. 72–79.
- Sood B., Shue J., Leitner J., Daniluk K., Sindjui L.-N. A Study on Effects of Copper Wrap Specifications on Printed Circuit Board Reliability. *IEEE Transactions on Reliability*, March 2019, vol. 68, no. 1, pp. 248–266.
- GOST R 55744–2013. *Platy pechatnye. Metody ispytanii fizicheskikh parametrov* [State Standard 55744–2013. Printed Circuit Boards. Physical Parameters Test Methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 43 p.
- Danilova E.A. Obzor metodov obnaruzheniia opasnykh tekhnologicheskikh defektov v elektronnykh platakh [Review of Methods for Detecting Dengerous Technological Defects in Electronic Boards]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma 'Nadezhnost i kachestvo'* [Proc. of International Workshop on Reliability and Quality]. 2013, vol. 1, pp. 331–335.
- Su F., Mao R., Xiong J. et al. On Thermo-Mechanical Reliability of Plated-Through-Hole (PTH). *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, no. 6, pp. 1189–1196.
- Vinokurov A. Raschet pechatnykh plat dlia svetodiodov Cree serii XP i MX [Printed Circuit Board Design for Light Emitting Diodes of Cree XP and MX Series]. *Poluprovodnikovaia svetotekhnika* [Semiconductor Lighting Engineering], 2010, iss. 3, pp. 16–20.
- Russian Federation Patent 2159522, Int.CL. H05K 3/42, G01N 27/82. *Sposob kontrolia kachestva metallizatsii otverstii pechatnykh plat* [Monitoring of Holes Plating Procedure of Printed Circuit Boards]. Inventors: Plotnikov Iu.A., Poliakhov M.Iu., Chernov L.A. Application 99115757/09. Date of filing: July 23, 1999. Date of publication: November 20, 2000. Bull. no. 32.
- Sergeev V.A., Salnikov M.Iu., Nizametdinov A.M. Diagnostika mezhsloevykh soedinenii pechatnykh plat metodom impulsnogo lazernogo nagreva [Diagnostics of PCB-Interconnections]. *Vuzovskaia nauka v sovremennykh usloviakh. Sb. mat. 54-i nauch.-tekhn. konf. (28 ianvaria–2 fevralia 2021 g.). V 3 ch. Ch. 1.* [Proc. of the 54th Sci.-Pract. Conf. on Science in Universities under Present-Day

Conditions in three volumes, vol. 1]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2021, pp. 158–162.

11. Parker W.J., Jenkins W.J., Butler C.P., Abbott G.L. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity. *Journal of Applied Physics*, 1961, iss. 32 (9), pp. 1679–1684.

12. ASTM E1461-13. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. Available at: <https://www.astm.org/Standards/E1461.htm>.

13. Golovin D.Iu., Tiurin A.I., Samodurov A.A., Golovin Iu.I. Opredelenie temperaturoprovodnosti materialov metodom nestatsionarnogo tochechnogo nagreva [Determination of Thermal Diffusivity by Nonstationary Spot Heating]. *Pisma v ZhTF* [Technical Physics Letters], 2020, iss. 1, pp. 39–42.

14. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelia. Osnovnye kharakteristiki pokrytii [Guide for Design-Engineers. General Coating Characteristics]. Available at: <https://www.cncnc.ru/documentation/sprav-constr/html/tom1/pages/chapter8/ckm85.html>.

15. Sergeev V.A., Khodakov A.M. *Nelineinye teplovyie modeli poluprovodnikovyykh priborov* [Nonlinear Thermal Models of Semiconductor Devices]. Ulyanovsk, UISTU Pub., 2012. 153 p.

16. *Tsilindricheskaia stenka. Temperaturnoe pole* [Cylinder Wall. Temperature Field]. Available at: <https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PNB/learning/Thermodynamics/Tab3/Lecture11.pdf>.