

# Высокочастотная пайка СВЧ микроблоков из диамагнитных сплавов

В. Л. Ланин, Ю. Н. Грищенко, А.Д. Хацкевич

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П.Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь, e-mail: [vlanin@bsuir.by](mailto:vlanin@bsuir.by)*

Поступила в редакцию 2020 г

## ВВЕДЕНИЕ

Микроминиатюризация электронной аппаратуры в значительной степени зависит от создания функциональных приборов и блоков в микроэлектронном исполнении, помещённых в герметичный корпус. Микроблоки СВЧ диапазона нашли широкое применение в средствах телекоммуникаций, мобильных устройствах управления и др. Наблюдается чётко выраженная тенденция роста доли ВЧ и СВЧ применений в общемировом рынке электроники (лавинобразное развитие телекоммуникаций, мобильных и портативных устройств, гражданского и индустриального рынка), что делает эти типы приборов массовыми. Специальные применения, такие как аэрокосмическая электроника, также динамично развиваются в направлении повышения рабочих частот, приобретения новых свойств, повышения энергоэффективности, снижения массы и габаритов [1].

В настоящее время до 40% металлостеклянных и металлокерамических корпусов микроблоков герметизируется пайкой, достоинствами которой являются: ремонтпригодность изделия, невысокие температуры нагрева корпуса, возможность групповой технологии. Традиционные процессы пайки в печи, на термостоле или паяльником имеют низкую производительность, используют в значительной мере ручной труд и не обеспечивают высокого качества паяемых соединений. Возникают трудности с использованием флюса и необходимостью удаления его остатков.

Перспективным направлением в технологии производства изделий электроники является применение высокочастотной (ВЧ) пайки для герметизации металлостеклянных и металлокерамических корпусов СВЧ микроблоков. Воздействие энергии электромагнитных колебаний высокой частоты позволяет осуществлять высокопроизводительный бесконтактный нагрев деталей и припоя с помощью наведённых в них вихревых токов, активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям [2,3].

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЧ НАГРЕВА

Особенностью индукционного ввода ВЧ энергии является возможность регулирования пространственного расположения зоны протекания вихревых токов в изделии. Во-первых, вихревые токи протекают в пределах площади, охватываемой индуктором. Нагревается только та часть тела, которая находится в магнитной связи с индуктором независимо от общих размеров тела. Во-вторых, глубина зоны циркуляции вихревых токов и, следовательно, зоны выделения энергии зависит, кроме других факторов, от частоты ВЧ генератора (увеличивается на низких частотах и уменьшается с повышением частоты) [4].

Основными трудностями применения ВЧ нагрева для процессов герметизации пайкой корпусов микроблоков из алюминиевых сплавов является низкий КПД нагрева, длительность процесса и значительный при этом нагрев герметизируемого электронного модуля. Существует большое разнообразие конструкций индукционных нагревательных устройств. Для сквозного нагрева проводящих тел круглого, квадратного и прямоугольного сечения применяют индукторы соленоидального типа, в виде плоской спирали или плоских тел – индукторы с

магнитопроводом. Для нагрева колец, небольших плат, проводов используют индукционные устройства с замкнутой и разомкнутой магнитной цепью.

Для обеспечения эффективности ВЧ нагрева в процессе герметизации пайкой корпусов микроблоков необходимо исключить проникновение электромагнитного поля внутрь корпуса и повреждение электронного микроблока. При ВЧ нагреве распределение напряженности электрического поля в проводящей среде имеет вид:

$$E = E_0 \cdot \exp(-x/\delta), \quad (1)$$

где  $E_0$  – напряженность поля на поверхности,  $x$  – текущая координата,  $\delta$  – глубина проникновения поля.

До 86 % мощности нагрева создается в поверхностном слое проводящего тела толщиной  $\delta$ , где амплитуда напряженности поля  $E_0$  уменьшается в  $e$  раз. Глубина проникновения поля зависит от частоты тока  $f$ , удельного электрического сопротивления материала  $\rho$  и магнитной проницаемости  $\mu$  [5]:

$$\delta = \sqrt{\rho / \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная поля.

При пайке микроэлектронных устройств, содержащих внутри корпуса микроплату с элементами, чувствительными к электрической составляющей поля, энергия ЭМ наводки должна значительно меньше энергии деградации элементов, которая составляет 10–15 мкДж [6]. На глубине, равной 4-м толщинам скин-слоя  $\delta$ , напряженность поля ослаблена в 152 раз по сравнению с поверхностью, что на порядок ниже напряженности наводок, приводящих к деградации элементов. Таким образом, выбор частоты при пайке микроэлектронных устройств необходимо осуществлять из условия:

$$\delta \leq h/4, \quad (3)$$

где  $h$  – толщина стенки корпуса.

Учитывая выражение (1) получим соотношение для нижней частоты тока:

$$f_{min} \geq 4.05 \cdot 10^{-6} \cdot \rho / (\mu h^2) \quad (4)$$

Верхний предел частоты вытекает из требования максимальной величины термического КПД ВЧ нагрева, при которой:

$$\begin{aligned} \delta &> h/8, \\ f_{max} &< 16.2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho / (\mu h^2) \end{aligned} \quad (5) \quad (6)$$

Этим условиям удовлетворяет нагрев энергией ВЧ ЭМ колебаний в диапазоне частот 0,4–2,0 МГц. С повышением частоты локализуется тепловыделение и снижается температурное воздействие на изделие.

Для качественной герметизации СВЧ микроблоков ВЧ пайкой необходимо обеспечить рекомендуемый стандартом IPC/JEDEC-1-STD-020C температурный профиль (рис. 1), который состоит из трех участков: нагрев до температуры плавления припоя, пайка и охлаждение. Применяемые припои Sn-Pb и Sn-Ag-Cu отличаются температурами плавления и пайки, а также различной длительностью процесса пайки. При ВЧ нагреве важно оперативно регулировать скорость нагрева так, чтобы паяемые детали и припой одновременно достигали температуры пайки. На индуктор подают ВЧ напряжение и нагревают изделие (участок от 25°C до  $T_{smax}$ ). Скорость нагрева составляет порядка 2 – 3 °C/c [7].

После расплавления припоя ( $T_L$ ) снижают интенсивность ВЧ нагрева в зависимости от требуемого температурного режима процесса пайки (участок  $T_L - T_p$ ), что позволяет избежать перегрева припоя, а также снизить нагрев изделия. Затем ВЧ напряжение отключают, и изделие охлаждают.

Того, чтобы повысить эффективность ВЧ нагрева микроблоков из диамагнитных сплавов проведено моделирование распределения плотности вихревых токов в деталях корпуса в пакете ELCUT 6.3. Для моделирования построены две геометрические модели устройства индукционного нагрева с использованием ферритового магнитопровода и без него.

Моделирование проводилось на частоте 2 МГц при токе в индукторе 10 А. Модели распределения плотности вихревых токов для двух случаев нагрева представлены на рис. 2.

Моделирование индукционного нагрева показало наличие неравномерности распределения плотности вихревых токов в деталях корпуса. Максимальная по модулю плотность токов (до  $1,8 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> – без магнитопровода и  $3,1 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> – с магнитопроводом) отмечена на поверхности корпуса и крышки и уменьшается до близкого к нулю значению вглубь деталей. На рис. 3 приведены зависимости распространения плотности вихревого тока в зоне пайки корпуса и крышки по глубине проникновения. Корпус микроблока, расположенный на расстоянии 1–2 мм от индуктора нагревается сильнее, чем крышка и припой в зазоре между корпусом и крышкой.

При использовании полузамкнутого магнитопровода из феррита плотности вихревых токов в корпусе и крышки выравниваются, а максимальное значение плотности тока на поверхности крышки и в припое в 1,7 раз выше, чем без магнитопровода. Так же увеличивается и глубина проникновения вихревых токов в припой в 1,2–1,3 раза. Это связано с тем, что магнитопровод концентрирует магнитный поток в зоне пайки, сокращая тем самым время нагрева [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе осуществлялась герметизация пайкой корпуса СВЧ микроблока с торцевыми выводами (рис. 4). Корпус СВЧ микроблока изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т фрезерованием. Внутри корпуса расположена микроплата с электронными компонентами. Для герметизации корпуса пайкой легкоплавкими припоями на его поверхность нанесено многослойное покрытие: никель–15 мкм, медь–6 мкм, олово-висмут толщиной 8–9 мкм. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 5. Корпус микроблока 2 закреплялся на диэлектрическом термостойком основании 1. Индуктор токов ВЧ 4 состоял из 6 витков медной трубки диаметром 4 мм. Ферритовый магнитопровод 5 располагался внутри индуктора на поверхности крышки 3, охватывая ее по периметру. В качестве источника высокочастотной энергии использовался высокочастотный ламповый генератор ВЧГ2-1/1,76.

Для получения необходимого термопрофиля нагрева применена компьютерная методика контроля температурного профиля нагрева в реальном масштабе времени с использованием высокотемпературного терморезистора 7 100 кОм NTC 3950 (до 300 град), микроконтроллера ARDUINO и ПЭВМ, что позволило в условиях мощных электромагнитных полей вести контроль нагреваемого корпуса микроблока в реальном масштабе времени.

С помощью измерительной рамки 6 и электронного вольтметра ЭВ осуществлялся контроль напряженности электромагнитного поля. Электромагнитные наводки на провода от термистора устранялись фильтром ВЧ на входе микроконтроллера Arduino Nano.

Полученный термопрофиль ВЧ пайки микроблока изображен на рис. 6. Время нагрева до достижения температуры 200 °С составляет 45–50 секунд. Скорость нагрева до температуры пайки примерно равна  $3 \div 4$  °С/с. Охлаждение корпуса после пайки проводилось вентилятором со скоростью 2 °С/с. Общее время пайки оплавлением с применением ферритового магнитопровода составило 25 секунд. Анализ зависимостей показывает, что применение ферритового магнитопровода внутри индуктора концентрирует напряженность магнитного поля при одинаковой мощности ВЧ нагрева в 1,2–1,3 раза, при этом скорость нагрева увеличивается во столько же раз. При одной и той же мощности нагрева напряженность магнитного поля внутри корпуса составляет  $0,0025 \cdot 10^5$  А/м, что в 44 раза меньше, чем снаружи. Микроплата не испытывает перегрева во время герметизации корпусов СВЧ микроблоков ВЧ пайкой.

## ВЫВОДЫ

Для обеспечения эффективности ВЧ нагрева в процессе герметизации пайкой корпусов микроблоков исключено проникновение ЭМ поля внутрь корпуса посредством выбора необходимого частотного диапазона токов ВЧ и оптимизирован температурный профиль нагрева. Для ВЧ пайки микроблоков из диамагнитных сплавов применен шести витковый

индуктор с полузамкнутым магнитопроводом, охватывающим корпус микроблока по периметру. Это позволило осуществить не только высокопроизводительный бесконтактный нагрев корпуса микроблока и крышки с помощью наведенных в них вихревых ВЧ токов, но и активировать припой и улучшить его растекание по паяемым поверхностям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Климачев И.И., Иовдальский И.И. *СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования*. М.: Техносфера, 2006. 351 с.
2. Ланин В. Л., А.П. Достанко, Е.В. Телеш. *Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники*. Минск : Изд. центр БГУ, 2007. 574 с.
3. Lucia O., Maussion P., Dede E.J., Burdio J. Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. *IEEE Transactionson Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. № 5., pp. 2509-2520. DOI: 10.1109/TIE.2013.2281162.
4. Rapoport E., Pleshivtseva Y. *Optimal Control of Induction Heating Processes*. USA, N.Y: CRC Press, 2007. 341 p.
5. Немков В. С., Демидович В.Б. *Теория и расчет устройств индукционного нагрева*. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 142 с.
6. Ricketts L.W., Bridges J.E., Miletta J. *EMP radiation and protective techniques*. N.J., John Wiley @ Sons, Inc.1976. 380 p.
7. Шмаков М, Тиханкин А. Оптимизация температурного профиля пайки печатных плат оплавлением. *Технологии в электронной промышленности*. 2008. № 1. С. 44–46.
8. Ланин В.Л. Оценка эффективности систем индукционного нагрева для пайки электронных модулей. *Электронная обработка материалов*. 2017. № 6, С. 91–96. DOI: 10.5281/zenodo.1051272.

УДК 621. 365.5

**Высокочастотная пайка корпусов микроблоков из диамагнитных сплавов. Ланин В. Л., Грищенко Ю.Н., Хацкевич А.Д. // Электронная обработка материалов. 2020. № ( ). С.**

Для обеспечения эффективности ВЧ нагрева при герметизации пайкой корпусов микроблоков исключено проникновение электромагнитного поля внутрь корпуса посредством выбора необходимого частотного диапазона токов ВЧ. Оптимизирован термический профиль ВЧ нагрева за счет использования полузамкнутого магнитопровода из феррита, охватывающего корпус по периметру. При этом плотности вихревых токов в корпусе и крышки выровнены, а максимальное значение плотности тока на поверхности крышки и в припое в 1,7 раз выше, чем без магнитопровода.

Библиогр. 8. Ил. 5.

**High-frequency soldering of microblocks packages from diamagnetic alloys.**

**Lanin V.L., Grishchenko Y.N., Hatskevich A.D.**

### Summary

To ensure the efficiency of the HF heating during sealing by soldering the microblocks packages, the penetration of the electromagnetic field into the body by excluding the required frequency range of HF currents is excluded. The thermal profile of HF heating has been optimized through the use of semi-closed magnetic core made of ferrite, covering body along the perimeter. In this case, the eddy

current densities in the package and the lid are aligned, and the maximum current density on the lid surface and in the solder is 1.7 times higher than without the magnetic circuit.

*Key words: HF Soldering, Magnetic circuits, Microblocks packages.*

### Рисунки

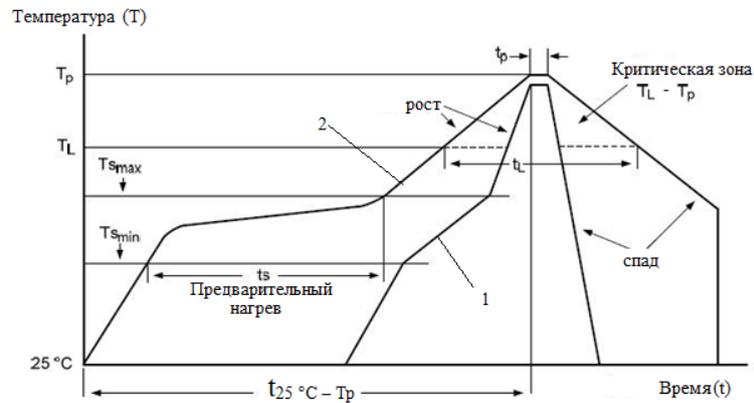


Рис. 1. Рекомендуемый профиль пайки: 1 – припой Sn-Pb, 2 – припой Sn-Ag-Cu

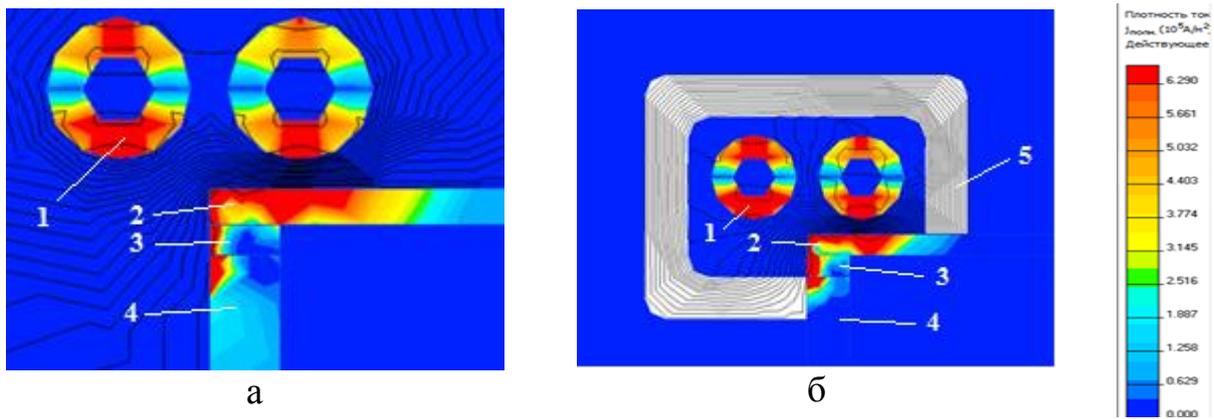


Рис. 2. Распределение плотности вихревых токов в зоне пайки:  
а – без магнитопровода, б – с магнитопроводом;  
1 – индуктор, 2 – крышка, 3 – припой, 4 – корпус, 5 – магнитопровод

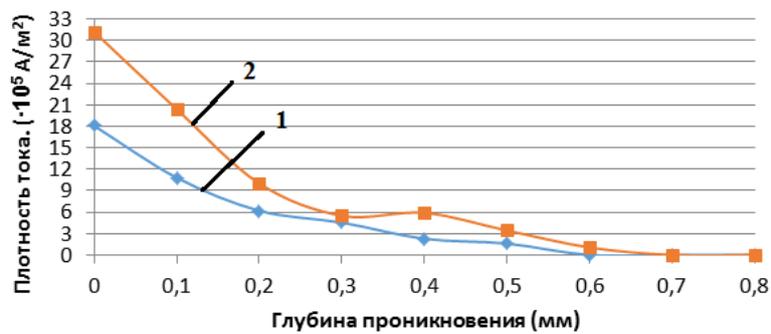


Рис. 3. Зависимость плотности тока в припое от глубины проникновения:  
1 – без магнитопровода, 2 – с магнитопроводом

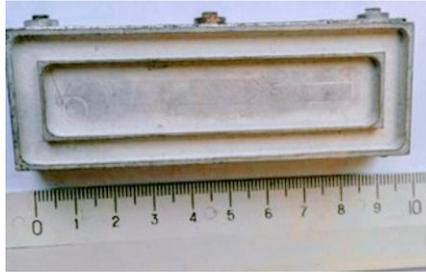


Рис. 4. Герметизируемый корпус СВЧ микроблока

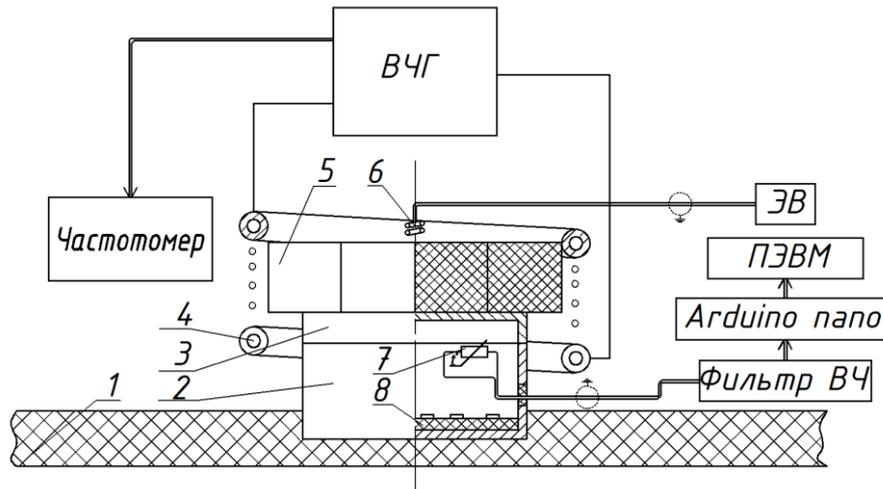


Рис. 5. Схема ВЧ нагрева для герметизации корпусов микроблоков: 1 – основание, 2 – корпус, 3 – крышка, 4 – индуктор, 5 – магнитопровод, 6 – измерительная рамка, 7 – терморезистор, 8 – микроплата

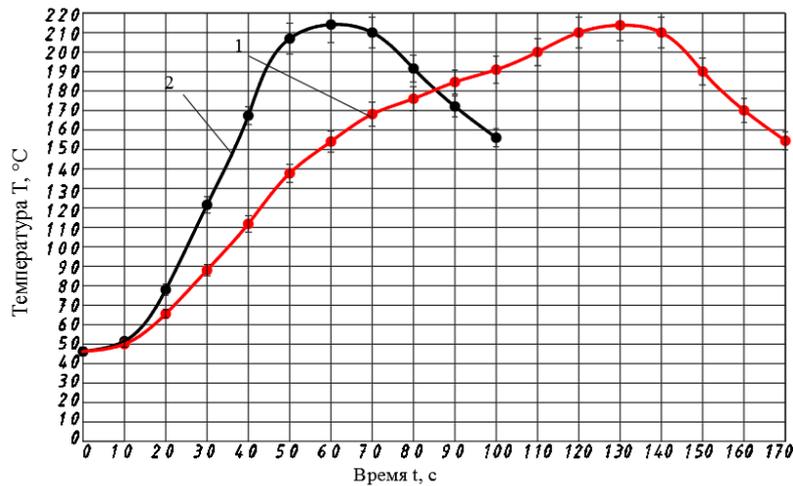


Рис. 6. Термопрофили ВЧ пайки при герметизации корпуса СВЧ микроблока: 1 – без магнитопровода; 2 – с ферритовым магнитопроводом