

лить его пробивные напряжения. Сравнительный анализ данных моделирования показал, что на величины конструктивно-технологических параметров исследуемого  $p-n^+$ -перехода тип системы координат никакого влияния не оказывает, а разница в значениях пробивного напряжения при моделировании в декартовой и цилиндрической системах координат составляет  $\sim 1-1,5\%$  и ею можно пренебречь.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / П. Антонетти [и др.] – М.: Радио и связь, 1988. – 496 с.
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи – М.: Мир, 1984. – Ч. 1 – 455 с.
3. Малер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Малер, Т. Кейминс – М.: Мир, 1989. – 630 с.
4. URL: <http://www.synopsys.com> (дата обращения: 17.07.2020).

### УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА БЕССВИНЦОВЫМИ ПРИПОЯМИ ПРИ МОНТАЖЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

**В. Л. Ланин, Д. К. Буй**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: vlanin@bsuir.by*

Ультразвуковая пайка активно применяется при монтаже солнечных батарей, а именно при создании токопроводящих контактов к алюминированным панелям. Локальные тепловые эффекты кавитации в расплавах создают условия для образования химических связей между компонентами на межфазной границе, а динамические эффекты обеспечивают удаление оксидных пленок с поверхностей материалов, что является физической основой процессов бесфлюсовой пайки труднопаяемых материалов. Актуальна проблема разработки процесса бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов с использованием бессвинцовых припоев с содержанием диффузионно-активных металлов. Моделированием процесса диффузии показано, что воздействие ультразвуковых колебаний увеличивает глубину диффундирующего элемента Zn на 20–50%. Прочность соединений деталей из алюминиевого сплава АМц зависит от температуры пайки и применяемого припоя. Для припоя системы Sn-20Zn-10Cd прочность в 5–6 раз выше, чем для припоя Sn-10Zn

**Ключевые слова:** ультразвук; бессвинцовый припой; солнечные батареи; монтаж.

### ULTRASONIC SOLDERING BY LEAD FREE SOLDERS WITH SUNNY BATTERIES MOUNTING

**V. L. Lanin, D. K. Bui**

---

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki 6, 220013 Minsk, Belarus  
Corresponding author: V. L. Lanin (vlanin@bsuir.by)*

Ultrasonic soldering is actively used in mounting of solar batteries, namely when creating conductive contacts to aluminized panels. Local thermal effects of cavitation in melts create the conditions for formation of chemical bonds between components at interface,

and dynamic effects ensure removal of oxide films from the surfaces of materials, which is the physical basis for flux-free soldering of hard-to-solder materials. The urgent problem is development of flux-free process soldering of aluminum alloys using lead-free solders with the content of diffusion-active metals. By modeling the diffusion process, it is shown that effect of ultrasonic vibrations increases the depth of diffusing element Zn by 20–50 %. The strength of the joints of parts made of aluminum alloy depends on soldering temperature and solder used. For Sn-20Zn-10Cd solder the strength is 5–6 times higher than for Sn-10Zn solder.

**Key words:** ultrasound; lead-free solder; sunny batteries; mounting.

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковая пайка – это технология бесфлюсовой пайки, не требующая никаких химических веществ и использующая энергию ультразвука для соединения таких материалов, как стекло, керамика, композиционные материалы, а также металлы, с трудом поддающиеся или совсем не поддающиеся пайке с помощью традиционных средств. Пайка обычно включает в себя соединение припоя с металлической подложкой. Ультразвуковой (УЗ) метод пайки является усовершенствованным способом, который позволяет припою связываться с металлическими и неметаллическими материалами. Поскольку возобновляемые источники энергии широко используются во всем мире, то потребность в процессах закрепления электродов к алюминированным панелям солнечных батарей методом ультразвуковой пайки возрастает [1]. Данная технология находит всё большее применение при соединении между собой металлических и неметаллических деталей, входящих в конструкцию фотоэлементов солнечных батарей, а также деталей из медицинских сплавов, используемых в специализированных электронных модулях и блоках датчиков.

Главная роль при УЗ пайке материалов отводится процессу кавитации. Под действием кавитационных микроударов поверхность основного материала очищается от мелкой фракции, в результате чего открывается доступ к порам, которые под действием возникающих в жидком припое за счет кавитации высоких давлений заполняются припоем, обеспечивая тем самым достаточную прочность сцепления. Локальные тепловые эффекты при УЗ пайке создают условия для образования химических связей между компонентами на межфазной границе. Динамические эффекты обеспечивают удаление оксидных пленок с поверхностей материалов, что является физической основой процессов УЗ бесфлюсовой пайки труднопаяемых материалов [2].

В последние годы из-за токсичности свинца, содержащегося в эвтектических оловянно-свинцовых припоях, стали активно применять бессвинцовые припои. Однако эти припои, применяемые в настоящее время для формирования контактных соединений в электронике, как правило, имеют худшую смачиваемость, чем эвтектические оловянно-свинцовые, и потому не заполняют необходимую площадь в зоне соединения [3]. Поэтому актуальна проблема разработки процесса бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов с использованием припоев на основе олова с содержанием диффузионно-активных металлов.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ В УЗ ПОЛЕ

При воздействии УЗ колебаний в расплавах металлов происходит интенсификация процесса диффузии в жидком состоянии, что связано с изменением коэффициента диффузии, вязкости среды, а также с появлением микро- и макропотокков. Воздей-

ствуя мощным ультразвуковым полем на расплав, можно уменьшить энергию активации, а, следовательно, увеличить коэффициент диффузии и активизировать процесс зародышеобразования [4]:

$$D' = D_0 e^{-\frac{E-\Delta E}{R \cdot T}}$$

где  $D_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E$  – энергия активации диффузии;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура, К,  $\Delta E$  – изменение энергии активации диффузии в УЗ поле.

Если вводимая УЗ энергия в расплав без учета потерь активизирует процесс диффузии, то

$$\Delta E = 0,5M(A\omega)^2$$

где  $M$  – молярная масса,  $A$  – амплитуда колебаний,  $\omega$  – частота колебаний.

Глубина диффузии может быть ориентировочно определена как [5]:

$$d = \sqrt{D \cdot t}$$

где  $t$  – время диффузии.

Поскольку в расплавах действуют только продольные волны, то на диффундирующие частицы действует сила УЗ поля  $F$  и под ее влиянием частицы будут двигаться со средней скоростью:

$$U = v \cdot F \quad (1)$$

где  $v$  – подвижность частиц.

В этих условиях к потоку диффузии добавится поток частиц, движущихся под действием силы УЗ поля  $F$ , и тогда полный поток будет равен [5]:

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + U \cdot C_1 \cos \beta \quad (2)$$

где  $C_1$  – концентрация частиц,  $\beta$  – угол между векторами УЗ поля и диффузионного потока.

Сила УЗ поля, воздействующая на поток частиц сечением  $S$  пропорциональна волновому сопротивлению  $\rho c$ , амплитуде и частоте колебаний:

$$F = \rho c \omega A S. \quad (3)$$

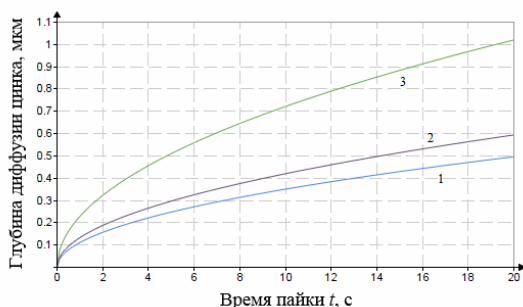
Подставляя выражение (1) и (3) в (2) получим:

$$J = -D' \frac{\partial C}{\partial x} + v \cdot \rho c \omega A S \cdot C_1 \cos \beta. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что активация процессов формирования соединений энергией УЗ поля увеличивает скорость и глубину диффузии. Это приводит к увеличению переходной зоны на границе припой – материалы и к образованию химических соединений между компонентами припоя и материалами, что увеличивает механическую прочность, повышает качество паяных соединений.

Моделировалось влияние УЗ на глубину диффузии Zn из припоя Sn-Zn в поверхность алюминиевого сплава АМц при следующих условиях: амплитуда УЗ колебаний 10 – 20 мкм; площадь контактирования 50 мм<sup>2</sup>; частота УЗ колебаний 44 кГц; температура 250°C; предэкспоненциальный множитель цинка 0,5 см<sup>2</sup>/с; энергия активации диффузии Zn 23 ккал/моль; изменение энергии активации диффузии в УЗ поле 1,5 ккал/моль; концентрация Zn в расплаве-20%; время диффузии 5–20 с; углы  $\alpha$  и  $\beta$

близки к нулю; молярная масса цинка 65 г/моль. Зависимости глубины диффузии цинка в мкм от времени пайки показаны на рис. 1.



**Рисунок 1. – Зависимости глубины диффузии цинка от времени пайки:**  
1 – без УЗ; 2 – с УЗ колебаниями 10 мкм;  
3 – с УЗ колебаниями 20 мкм

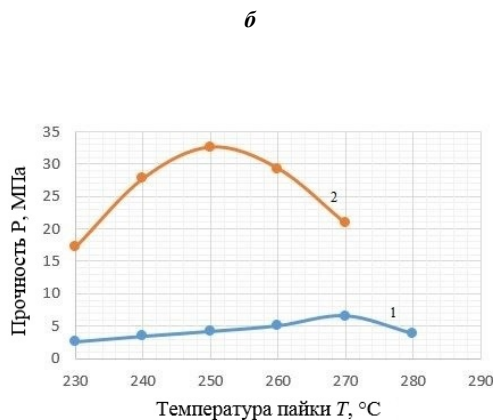
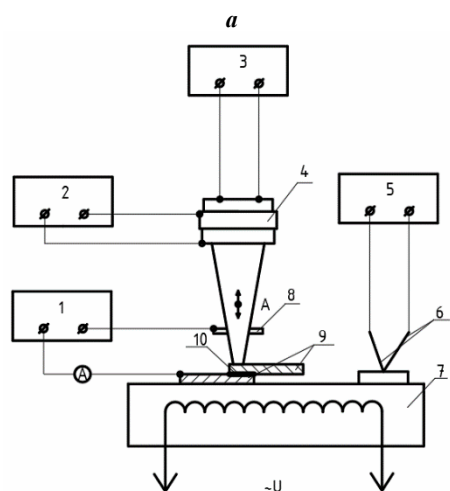
припоя. Для контроля амплитуды колебаний использовался измеритель вибраций контактного типа. Дополнительный нагрев деталей осуществляли с помощью источника тока.

Результаты моделирования показали, что УЗ активация увеличивает глубину диффундирующего элемента Zn на 20% при  $A = 10$  мкм и на 50% при  $A = 20$  мкм.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовались припои на основе олова, содержащие металлы средней химической активности: Zn (Sn-10Zn), Zn и Cd (Sn-20Zn-10Cd).

На рис. 2 показана схема исследования процесса УЗ пайки и зависимости прочности соединений от температуры пайки и типа применяемого



**Рисунок 2. – Схема исследования УЗ пайки (а): 1 – источник тока; 2 – УЗ генератор; 3 – измеритель вибраций; 4 – УЗ паяльник; 5 – измеритель температуры; 6 – термопара; 7 – плата; 8 – зажим; 9 – детали; 10 – припой, зависимости прочности соединений от температуры пайки (б): 1 – Sn-10Zn; 2 – Sn-20Zn-10Cd**

Образцы для испытания на прочность представляли пластины из алюминиевого сплава АМц толщиной 0,5 мм. Процесс пайки вели с применением УЗ колебаний частотой  $44 \pm 1$  кГц и амплитудой 10–15 мкм. Прочность паяных соединений образцов проверяли методом нормального разрыва на разрывной машине НТЦ 13.04.05.

По результатам исследований установлено, что прочность соединений УЗ пайки зависит от температуры пайки и применяемого припоя. С увеличением температу-

ры прочность соединений УЗ пайки достигает определенного максимума в зависимости от состава припоя. Воздействие УЗ активирует диффузию реакционно-активных компонентов в зоне пайки и повышает тем самым прочность соединений, получаемых без применения флюса. Прочность соединения для припоя системы Sn-20Zn-10Cd в 5–6 раз выше, чем для припоя Sn-10Zn, поэтому для УЗ пайки рекомендуются припои, содержащие как минимум два металла средней химической активности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ультразвуковая пайка – [Интернет-ресурс]: <https://www.japanunix.com/en/method/ultrasonic/>.
2. Jacobson, D.M. Fluxless Soldering / D.M. Jacobson, G. Humpston // Int. Materials Reviews, 2006, vol. 51, No 5.– P. 313–328
3. Новоттник, М. Паяемость бессвинцовых припоев / М. Новоттник, А. Новиков // Технологии в электронной промышленности, 2006, № 6. – С. 61–63.
4. Шилаев, А.С. Ультразвуковая обработка расплавов при производстве и восстановлении деталей машин / А.С. Шилаев – Минск.: Наука и техника, 1992. – 176 с.
5. Diffusion Behavior of Zn during Reflow of Sn-9Zn Solder on Ni/Cu Substrate / J. Mittal [et al.] // Journal of Electronic Materials, 2009.vol. 38, No. 12.– P. 2436–2442.

### ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ВОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО-И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

**В. В. Лукьяница**

---

*Белорусский государственный медицинский университет, кафедра физики,  
пр. Дзержинского 83, 220116 Минск, Беларусь, e-mail: lukyan.1952@mail.ru*

Проведены исследования воздействия ультразвука на водородный показатель дистиллированной воды (рН). Использовался ультразвук с частотой 22 кГц. Изменялись изменения рН и спектров (340–900 нм) оптической плотности воды ( $D$ ) под действием ультразвука. Получены зависимости этих изменений от времени воздействия ультразвуком в интервале от 5 до 65 мин. с шагом в 5 мин.

Установлено, что рН воды сначала резко уменьшается, а затем стабилизируется с ростом времени ультразвуковой обработки воды. С учетом данных по одновременным изменениям  $D$  полученные результаты интерпретированы посредством структурных изменений воды при воздействии ультразвука.

**Ключевые слова:** вода; водородный показатель; оптическая плотность воды; ультразвук.

### INFLUENCE OF ULTRASOUND ON THE HYDROGEN INDEX OF WATER USED IN MICRO-AND NANOELECTRONICS TECHNOLOGY

**V. V. Lukjanitsa**

---

*Belarusian state medical University, Department of physics, 83 Dzerzhinsky Ave., 220116 Minsk, Belarus  
Corresponding author: V. V. Lukjanitsa (lukyan.1952@mail.ru)*