УДК 621.3.049.77

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОРПУСИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Видрицкий А.Э.[1], Савко А.И[1]., Левчук Д.С.[1], Ланин В.Л.[2]

[1]ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь, AVidritskiy@integral.by

[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Аннотация: представлена математическая модель процесса ультразвуковой пайки кристаллов в корпус, позволяющая прогнозировать прочность соединения в зависимости от мощности ультразвукового воздействия и длительности процесса. Модель учитывает кинетику разрушения оксидной плёнки, формирование площади контакта и деградацию соединения при избыточной введённой энергии. Разработан программный модуль на языке MATLAB для визуализации технологического окна режимов пайки.

Ключевые слова: ультразвуковая пайка, монтаж кристаллов, моделирование, прочность соединения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Монтаж кристаллов в корпус является критически важной технологической операцией в производстве электронных компонентов, определяющей их надёжность, тепловые характеристики и электрические параметры [1]. Для микроболометров и силовых транзисторов, в том числе выполненных по каскодной схеме «кристалл на кристалле», требования к качеству паяного соединения особенно высоки: необходимы минимальное тепловое сопротивление, отсутствие пустот и высокая механическая прочность при термоциклировании [2].

Ультразвуковая пайка представляет собой бесфлюсовый процесс, при котором ультразвуковые колебания частотой 20–60 кГц вводятся в расплав припоя через специализированный инструмент. Возникающие при этом кавитация и микропотоки разрушают оксидные плёнки на паяемых поверхностях и обеспечивают полное смачивание [3, 4]. Применение частот 50–60 кГц позволяет полностью исключить операцию нанесения и отмывки флюса, что критически важно для герметичных корпусов микроболометров, где остатки флюса являются источником газовыделения [3].

Основной проблемой при внедрении ультразвуковой пайки является узкое технологическое окно: при недостаточной введённой энергии оксидная плёнка разрушается не полностью и соединение получается непрочным, а при избыточной энергии наблюдается эрозия тонкоплёночной металлизации и деградация соединения [5, 6]. В связи с этим актуальной задачей является разработка математической модели, позволяющей прогнозировать оптимальные режимы пайки до проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

Целью настоящей работы является разработка математической модели процесса ультразвуковой пайки кристаллов в корпус и программной реализации для оптимизации технологических режимов.

II. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

2.1. Механизм ультразвуковой активации

При прохождении упругих колебаний ультразвуковой частоты через расплав припоя возникает кавитация – образование и схлопывание микропузырьков, создающих локальные ударные волны и микропотоки [4]. Эти явления приводят к механическому разрушению оксидных плёнок на поверхности паяемых материалов и обеспечивают контакт чистого металла с расплавом припоя.

Скорость разрушения оксидной плёнки пропорциональна введённой ультразвуковой энергии и описывается экспоненциальной зависимостью:

$$R(t) = \exp(-k_{ox} \cdot P \cdot t),$$

где $R(t)$ – часть остаточной оксидной плёнки, k_{ox} – коэффициент эффективности ультразвуковой активации, 1/(Вт·с); P – мощность ультразвукового воздействия, Вт; t – время воздействия, с.

2.2. Формирование площади контакта

Площадь металлургического контакта формируется по мере удаления оксида и смачивания поверхности припоем. Доля сформированной площади контакта описывается выражением:

$$\mathrm{A(t)} = 1 - \exp\left(-\frac{\mathrm{P{\cdot}t}}{\mathrm{E_s}}\right),$$

где E_s – характеристическая энергия формирования контакта, Дж.

2.3. Деградация при избыточной энергии

При превышении оптимальной введённой энергии $E_{opt} = P * t$ начинается кавитационная эрозия металлизации и деградация соединения. Коэффициент деградации:

$$K(\mathrm{E}) = \exp\left(-\frac{\max(\mathrm{E}-\mathrm{E_{opt}},0)}{\mathrm{E_d}}\right),$$

где E_d – характеристическая энергия деградации, Дж.

2.4. Итоговая модель прочности

Прочность соединения на сдвиг определяется как произведение максимальной прочности на факторы формирования контакта и деградации:

$$\sigma(\mathrm{P,t}) = \sigma_{\max} \cdot \mathrm{A(t)} \cdot \mathrm{K(E)},$$

где σ_{max} – предельная прочность соединения, МПа.

Локальная температура в зоне пайки при ультразвуковом воздействии:

$$\mathrm{T(t)} = \mathrm{T_{base}} + \alpha \cdot \mathrm{P} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\mathrm{t}}{\tau_\mathrm{T}}\right)\right),$$

где T_{base} – температура расплава припоя, °C; α – коэффициент локального нагрева, °C/Вт; τ_T – постоянная времени теплоотвода, с.

III. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Структура программного модуля

На основе разработанной модели предложен программный модуль на языке MATLAB, включающий четыре вычислительных блока: кинетика разрушения оксида, расчёт прочности, построение технологического окна и анализ локального перегрева. Параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры математической модели

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Максимальная прочность на сдвиг	σ_{max}	30	МПа
Коэффициент активации	k_{ox}	0,08	1/(Вт·с)
Характеристическая энергия контакта	E_s	8	Дж
Оптимальная введённая энергия	E_{opt}	45	Дж
Характеристическая энергия деградации	E_d	60	Дж
Температура расплава припоя	T_{base}	230	°C
Коэффициент локального нагрева	α	0,6	°C/Вт
Постоянная времени теплоотвода	τ_T	0,4	с
Предельная температура кристалла	T_{lim}	260	°C

3.2. Кинетика разрушения оксидной плёнки

На рис. 1 представлена зависимость доли остаточной оксидной плёнки от времени ультразвукового воздействия при различных уровнях мощности.

Видно, что при мощности 10 Вт за 2 с оксид удаляется лишь на 80 %, тогда как при 60 Вт полное удаление достигается уже за 0,5 с.

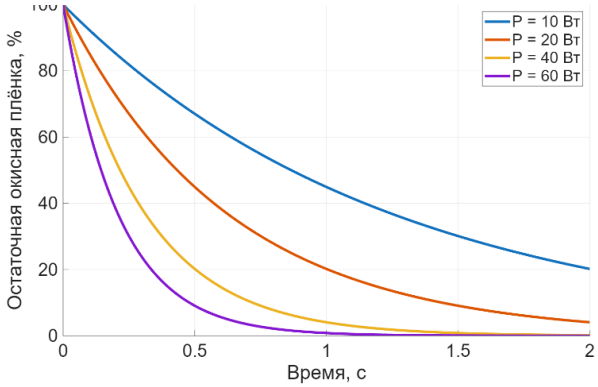


Рисунок 1. Кинетика разрушения оксидной плёнки при различных уровнях ультразвуковой мощности

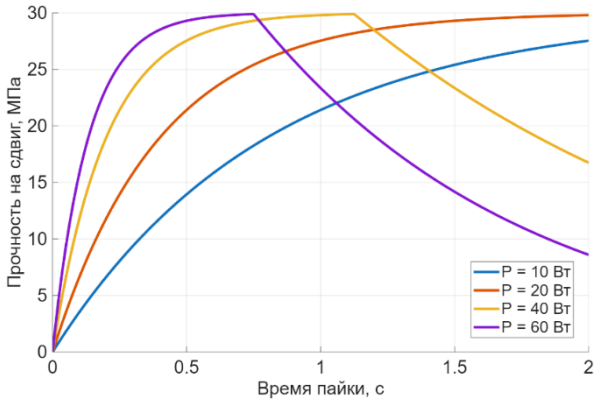


Рисунок 2. Прочность соединения в зависимости от времени пайки при различных уровнях мощности

3.3. Прочность соединения

На рис. 2 показана зависимость прочности соединения на сдвиг от времени пайки при четырёх уровнях мощности. Каждая кривая имеет выраженный максимум, что подтверждает наличие оптимального режима. При мощности 60 Вт максимум достигается при $t \approx 0{,}75$ с, после чего прочность снижается вследствие эрозии металлизации.

3.4. Технологическое окно режимов

На рис. 3 представлена карта прочности в координатах «мощность – время». Пунктирной линией выделена область, в которой прочность составляет не менее 90 % от максимальной. Данная область определяет допустимое технологическое окно для производства.

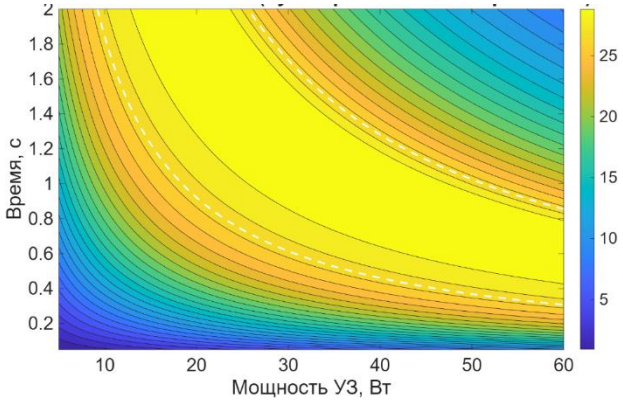


Рисунок 3. Технологическое окно ультразвуковой пайки (пунктир – уровень 90 % от максимальной прочности)

3.5. Локальный перегрев

На рис. 4 показана динамика локальной температуры в зоне пайки. При мощности 60 Вт температура достигает 266 °C, превышая предельно допустимое значение 260 °C, что ограничивает применение высоких мощностей для термочувствительных кристаллов (микроболометров).

3.6. Обсуждение результатов

Полученные результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными данными, приведёнными в [3]: оптимальное время монтажа кристаллов составляет 150–250 мс при мощности порядка 30 Вт. Модель позволяет количественно определить границы технологического окна и обосновать выбор рабочих режимов.

Для микроболометров с тонкоплёночными мембранами рекомендуется работа в нижней части технологического окна ($P = 10 - 20$ Вт, $t = 1{,}5 - 2$ с) с минимальной амплитудой колебаний 1–2 мкм для исключения механического повреждения чувствительного элемента [3]. Для силовых каскодных структур с массивными кристаллами допустима работа при повышенной мощности ($P = 30 - 50$ Вт) с сокращением времени пайки до 0,3–0,8 с.

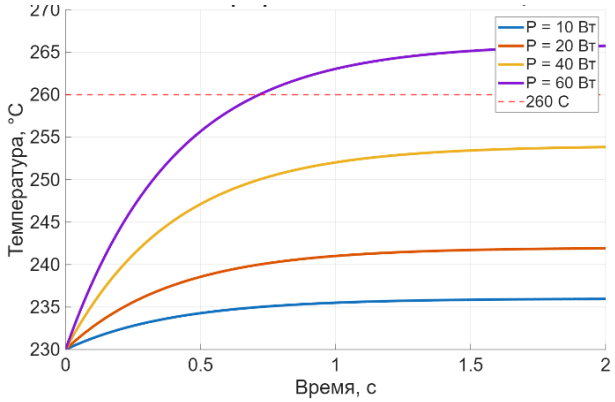


Рисунок 4. Локальная температура в зоне пайки в зависимости от мощности ультразвука

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель процесса ультразвуковой пайки кристаллов в корпус, учитывающая кинетику разрушения оксидной плёнки, формирование площади контакта и деградацию соединения при избыточной энергии. Реализованный в MATLAB программный модуль позволяет визуализировать технологическое окно режимов и обосновывать выбор рабочих параметров пайки для различных типов кристаллов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Технологические особенности монтажа Flip-Chip / В. Л. Ланин [и др.] // Силовая электроника. – 2010. – № 4. – С. 78–82.

[2] Конструктивно-технологические аспекты сборки мощных транзисторов / А. Т. Скойбеда [и др.] // Электронные компоненты. 2005. № 5. С. 48–53.

[3] Петухов, И. Б. Ультразвуковая и вибрационная пайка кристаллов интегральных схем / И. Б. Петухов, В. Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2019. – № 3. – С. 68–71.

[4] Ultrasonic Soldering and Metallization in Electronics / ed. by M. Schwartz. Springer, 2021. 280 p.

[5] Han, L. Bondability window and power input for wire bonding / L. Han, J. Hu // Microelectronics Reliability. 2006. Vol. 46, No 5. P. 795–802.

[6] Wire Bonding: The Ultrasonic Bonding Mechanism / M. Harman // Semiconductor International. 2012. Vol. 35, No 4. P. 22–29.

MODELING AND OPTIMIZATION OF ULTRASONIC DIE BONDING PROCESS PARAMETERS FOR ELECTRONIC PACKAGING

A.E. Vidrytski[1], A.I. Sauko[1], D.S. Liauchuk[1], V.L. Lanin[2]

[1]INTEGRAL JSC - Managing Company of INTEGRAL Holding, Minsk, Republic of Belarus, AVidritskiy@integral.by

[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Abstract: a mathematical model of the ultrasonic die bonding process is presented, enabling prediction of bond strength as a function of ultrasonic power and process duration. The model accounts for oxide film removal kinetics, contact area formation, and bond degradation at excessive energy input. A MATLAB-based software module has been developed for visualization of the process parameter window. Simulation results confirm the existence of an optimal energy input range, which is consistent with experimental data.

Keywords: ultrasonic soldering, die bonding, modeling, process window, bond strength, microelectronics.