

УДК [611.018.51+615.47]:612.086.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛ-ПОДЛОЖКА ПРИ МОНТАЖЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ



**В.Л. Ланин**

*Профессор кафедры электронной техники и технологии, доктор технических наук*



**А.Э. Видрицкий**

*Аспирант кафедры электронной техники и технологии*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь  
Email: vlanin@bsuir.by*

### **В.Л. Ланин**

*Профессор кафедры электронной техники и технологии. Имеет 30 летний опыт работы в области технологии ультразвуковой микросварки. Автор 10 монографий в данной области.*

### **А.Э. Видрицкий**

*Окончил Белорусский национальный технический университет. Аспирант кафедры электронной системы и технологии. Проводит научные исследования по технологии монтажа кристаллов и герметизации приемников инфракрасного излучения.*

**Аннотация.** Монтаж кристаллов в корпуса интегральных схем должен обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений. При вибрационной эвтектической пайке подложка и кристалл нагреваются до высокой температуры (~400°C), что может привести к повреждению кристалла. Использование ультразвуковых колебаний при монтаже кристаллов позволяет получать достаточно надёжные соединения кристаллов с подложкой, а так же уменьшить температуру процесса почти в 2 раза. В результате моделирования теплового сопротивления кристалл-подложка получены его зависимости от типа припоя и его толщины. Отмечен линейный рост теплового сопротивления и механических напряжений в кристалле в зависимости от толщины слоя припоя.

**Ключевые слова:** монтаж, кристаллы, пайка, припой, тепловое сопротивление.

Операция монтажа кристаллов в корпуса – наиболее ответственная в технологическом процессе сборки изделий электроники, так как обеспечивает требуемое расположение кристалла, прочное механическое соединение, надёжный электрический контакт и хороший теплоотвод. Монтаж кристаллов интегральных схем (ИС) в корпус или на подложку должен обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений. Если кристаллы приборов имеют значительную мощность рассеяния (более 0,5 Вт), то между подложкой кристалла и посадочной площадкой выводной рамки необходимо создать токопроводящий электрический контакт с незначительным электрическим и тепловым сопротивлением, что достигается использованием методов пайки. В настоящее время для монтажа кристаллов ИС широко используется метод вибрационной эвтектической пайки золоченой поверхности кристалла к золоченой поверхности основания корпуса с использованием различных припоев [1]. Для обеспечения необходимой смачиваемости припоя и предотвращения окисления в процессе пайки используется инертный газ или формирующий газ на

основе смеси 10% водорода и 90% азота. Нанесение припоя на подложку осуществляется дозированием паяльной пасты или проволоки припоя.

Посадка кристалла на эвтектические сплавы помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет ряд других недостатков. В виду малой пластичности эвтектики Au–Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и подложки в напаянном кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов на последующих технологических операциях и испытаниях, а также к снижению надежности приборов. Установлено, что основными причинами, приводящими к снижению выхода годных изделий, являются: отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади; образование микротрещин и растрескивание кристаллов после пайки и термокомпрессионной разварки выводов [2].

Неполное образование эвтектики связано с недостаточной толщиной слоя золота на кристалле (менее 1 мкм). В тоже время повышение сплошности эвтектики под кристаллом приводит к росту количества приборов с трещинами в кристаллах, что обусловлено ростом внутренних механических напряжений в кристаллах.

Для автоматизированного монтажа кристаллов мощных полупроводниковых приборов созданы технологии и оборудование, исключающие недостатки процессов сборки в водородных печах. Монтаж кристаллов с приложением вибраций амплитудой 0,5–1,0 мм в плоскости основания позволяет обеспечить равномерное растекание припоя и до минимума свести дефекты в паяном соединении в виде пустот. Нанесение дозы расплавленного припоя в зону монтажа кристалла осуществляется автоматически проволочным дозатором с программированием скорости вращения центрального распределительного вала и скорости движения вакуумного захвата и съема кристаллов.

Контроль выхода годных приборов при использовании различных режимов вибрации в процессе пайки кристаллов показал, что при малой дозе припоя (100 имп.) выход годных не превышает 95%. Малая амплитуда колебаний кристалла в пределах 250 мкм не позволяет получить сплошной паяный шов под кристаллом. При дозах припоя более 150 имп. припой, растекаясь за пределы кристалла, эффективно заполняет все пространство под кристаллом. Паяный шов образуется без пор, пустот и щелей. Для обеспечения толщины паяного соединения кристалл–подложка не менее 30 мкм необходима доза припоя более 150 имп. и снижение амплитуды колебаний кристалла в процессе монтажа [3].

Монтаж кристаллов с применением ультразвуковых (УЗ) колебаний частотой 50–70 кГц позволяет полностью отказаться от применения флюсов, при этом исключается операция отмычки флюса, сокращается общая длительность технологического процесса. При использовании УЗ колебаний для пайки кристаллов очень важно правильно выбирать технологические параметры, такие как частоту и амплитуду колебаний, дозирование припоя и др. В частности, очень важен выбор резонансной длины инструмента в зависимости от частоты УЗ системы [4].

Для повышения устойчивости процесса монтажа кристалла с применением УЗ колебаний необходимо, чтобы рабочая область была заполнена инертным или формирующим газом. При УЗ пайке температуры инструмента и рабочей области значительно ниже, чем при вибрационной эвтектической пайке, что в свою очередь уменьшает вероятность появления экзотермических процессов, которые могут в последствии повредить кристалл.

При монтаже кристаллов УЗ колебания необходимо прикладывать в кристаллу таким образом, чтобы он совершал вибрации, параллельные плоскости выводной рамки. В этом случае основная доля УЗ энергии переходит в расплав припоя и затрачивается на разрушение оксидных пленок на его поверхности и на межфазной границе кристалл–припой. Увеличивая частоту колебаний до 66 и выше кГц, можно снизить амплитуду колебаний инструмента до 1–2 мкм при интенсивности колебаний, достаточных для разрушения оксидных пленок. Отсутствие вибраций большой амплитуды (0,3–0,35 мм) в случае использования УЗ колебаний, позволяет производить

монтаж на ограниченных по площади кристаллодержателях, а также в корпусах типа «колодец» изделий оптоэлектроники.

Таким образом, при оптимальных параметрах процесса монтажа кристаллов ИС исключается образование локальных несмоченных припоем участков, которая может достигать 25–30% площади активной транзисторной структуры. Образующиеся неоднородности способствуют развитию тепловой неустойчивости однородного токораспределения, искажению теплового фронта и, за счет этого перегреву кристалла. Поэтому необходимо провести моделирование теплового сопротивления участка кристалл–подложка для различных типов припоев и толщины слоя припоя в соединении.

Тепловую модель мощного транзистора с напаянным кристаллом можно представить в виде трех многослойных параллелепипедов, которые имитируют кристалл с плоским источником тепла на его поверхности, слой припоя заданной толщины и участок кристаллодержателя, ограниченного размерами паяного соединения (рисунок 1).

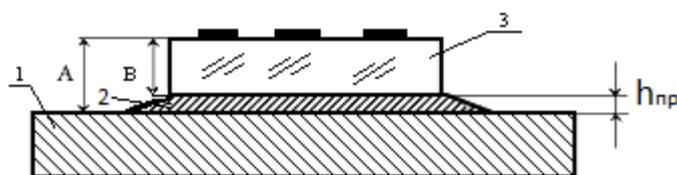


Рисунок 1 – Схема монтажа кристалла: 1 – кристаллодержатель, 2 – припой, 3 – кристалл

Тепловое сопротивление кристалл–подложка исходя из упрощенной тепловой модели [5], можно определить из выражения:

$$R_t = \sum_{i=1}^3 R_{ti} = \frac{1}{\lambda_{Si}} \int_0^{L_{kp}} \left( \frac{dL}{b + LtgB} - \frac{dL}{a + LtgB} \right) + \frac{h_{np}}{\lambda_{np} \cdot S_{np}} + \frac{1}{\lambda_{Cu}} \ln \frac{b + 2L}{a + 2L} \cdot \frac{a}{b} \quad (1)$$

где  $\lambda_{Si}$ ,  $\lambda_{np}$ ,  $\lambda_{Cu}$  – теплопроводности кристалла, припоя, кристаллодержателя;

$L_{kp}$ ,  $h_{np}$ ,  $L_{Cu}$  – толщина кристалла, припоя, кристаллодержателя;

$a$  и  $b$  – размеры источника тепла;

$tgB$  – тангенс угла растекания теплового потока.

Проведено моделирование теплового сопротивления кристалл-подложка в пакете Matlab 2019R для кристаллов размером 2,0x2,0 мм в зависимости от типа припоя и его толщины в соединении (рисунок 2). Из рисунка 2 следует, что наименьшие значения теплового сопротивления отмечены для припоя с большим содержанием серебра (ПСр25). При толщине паяного соединения, равной 50 мкм, расчетное значение  $Rt$  составляет 0,545°C/Вт и при этом выполняется необходимое условие, когда расчетное значение  $Rt$  меньше нормативного значения. На зарубежных образцах изделий фирм Siemens, International Rectifier реальная толщина припоя под кристаллом составляет 45–60 мкм.

При выборе толщины припоя учитывают, что существует критическая величина паяного соединения, ниже которой снижается надежность изделий в экстремальных условиях

эксплуатации из-за возникновения внутренних механических напряжений, превышающих допустимый уровень для данной конструкции прибора.

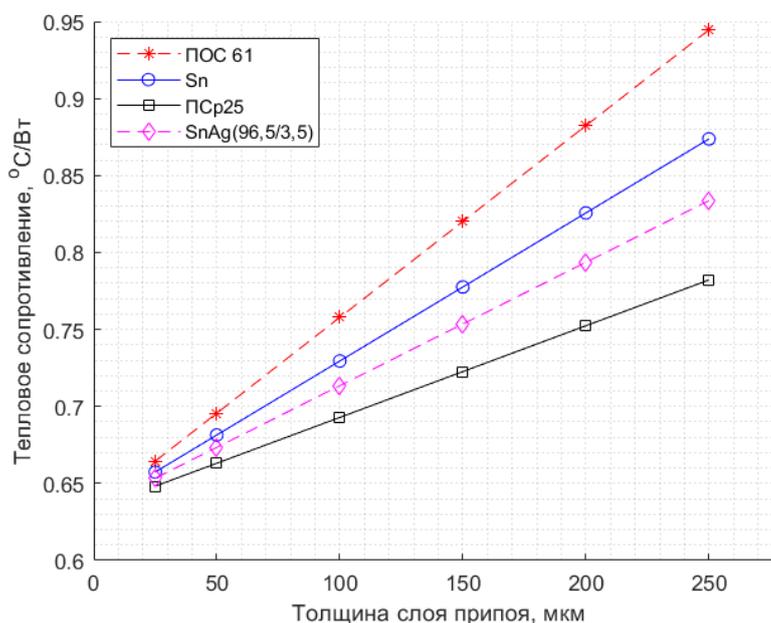


Рисунок 2 – Зависимости теплового сопротивления кристалл-подложка от типа припоя и его толщины

Для ИС и полупроводниковых приборов с площадью кристалла более 25 мм минимальная толщина соединения "кристалл-корпус" должна быть не менее 25 мкм. Максимальное напряжение, возникающее в кристалле, определяется выражением:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0) \sqrt{\frac{E_1 E_2 L}{X}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение;

$K$  – безразмерная константа;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты линейного термического расширения припоя и кремния;

$E_1, E_2$  – модули упругости припоя и кремния;

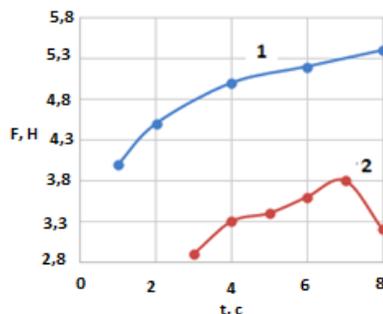
$L$  – длина кристалла;

$T, T_0$  – температуры пайки и окружающей среды.

Внутренние напряжения в напаянном кристалле могут достигать 50–65 МПа и при воздействии термоциклических нагрузок привести к образованию трещин в кристалле. При уменьшении толщины припоя внутренние напряжения возрастают, поэтому для обеспечения надежности изделий выбирают толщину припоя в пределах 35–50 мкм

Монтаж кристаллов пайкой с применением УЗ колебаний проводился при мощности УЗ 3,25 Вт и частоте 69 кГц. Проверка качества присоединения кристаллов осуществлялась с помощью цифрового динамометра для определения усилия сдвига кристалла. Зависимости усилия сдвига кристалла от времени пайки температуры представлены на рисунке 3. Анализ

экспериментальных данных показал, что прочность паяного соединения растёт с увеличением времени пайки. При пайке с использованием ультразвуковых колебаний наблюдается улучшение качества соединения вплоть до температуры 225 °С, а далее качество ухудшается, для решения этой проблемы необходимо проводить процесс в среде с инертным или формирующим газом.



1 – с УЗ колебаниями, 2 – без вибраций

Рисунок 3 – Зависимости прочности соединений от времени пайки

Использование УЗ колебаний при монтаже кристаллов позволяет получать достаточно надёжные соединения кристаллов с корпусом с меньшей областью монтажа, так же снизить температуру процесса почти в 2 раза по сравнению с эвтектической пайкой.

#### Список литературы

- [1] Зенин В.В., Емельянов В.А., Ланин В.Л. Монтаж кристаллов и внутренних выводов в производстве полупроводниковых изделий. – Минск: Интегралполиграф, 2015. – 380 с.
- [2] Ланин В.Л., Керенцев А.Ф. Сборка мощных бескорпусных MOSFET- транзисторов для поверхностного монтажа // Силовая электроника. 2009. № 3. – С. 76–79.
- [3] Ануфриев, Л.П. Автоматизированный монтаж кристаллов транзисторов вибрационной пайкой / Л.П. Ануфриев, А.Ф. Керенцев, В.Л. Ланин // Технологии в электронной промышленности.– 2006.– № 3. – С. 47–50.
- [4] Петухов, И. Ультразвуковая и вибрационная пайка кристаллов интегральных схем / И. Петухов, В. Ланин // Технологии в электронной промышленности. – 2019. – № 3. – С. 68–71.
- [5] Синкевич, В.Ф. Физические основы диагностирования предельных состояний и обеспечения надежности мощных транзисторов / В.Ф. Синкевич // Электронная промышленность.– 1990.– Вып.6. – С. 19–26.

## THERMAL RESISTANCE SIMULATION CRYSTAL-SUBSTRATE FOR MOUNTING INTEGRATED CIRCUITS

V.L. LANIN

Doctor of Technical Sciences

Professor, Department of Electronic System and Technology, BSUIR

A. E. VIDRYTSKI

Graduate student

Department of Electronic System and Technology, BSUIR

Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus  
E-mail: vlanin@bsuir.by,

**Abstract.** Mounting crystals in integrated circuit packages should provide high strength connections under thermal cycling and mechanical stress, low electrical and thermal resistance, minimal mechanical impact on the crystal and the absence of contamination. In vibratory eutectic soldering, the substrate and die are heated to high temperatures (~400°C), which can damage the die. The use of ultrasonic vibrations during the installation of crystals makes it possible to obtain sufficiently reliable connections between the crystals and the substrate, as well as to reduce the process temperature by almost 2 times. As a result of modeling the thermal resistance of the crystal-substrate, the dependences of this parameter on the type of solder and its thickness were obtained. A linear increase in thermal resistance and mechanical stresses in the crystal was noted depending on the thickness of the solder layer.

**Keywords:** assembly, crystals, soldering, solders, thermal resistance.