УДК 621.3

# ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СПОСОБА КОМПОНОВКИ РАБОЧЕГО КРИСТАЛЛА ПРОЦЕССОРА ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

**Павлидис В.Д., Азизов В.Э.**

*ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», Оренбург, e-mail: Institut.riska@yandex.ru*

Одной из ключевых задач в производстве современных электронных устройств является совершенствование технологий монтажа кристаллов. Цель исследования – определить наиболее эффективные способы компоновки рабочего кристалла процессора для комплектации различных электронных устройств. В рамках исследования были рассмотрены пять основных технологий монтажа кристаллов. Авторами проведен сравнительный анализ технологий на основе критериев надежности, универсальности, экономичности и простоты. Рассмотрены ключевые этапы процессов монтажа и дана оценка их применимости для различных типов устройств. Проведен сравнительный анализ пяти технологий монтажа кристаллов, выявлены их основные преимущества и ограничения, определены оптимальные методы для различных условий эксплуатации. Результаты исследования показывают, что методы термокомпрессионного соединения, чипа на плате и перевернутого чипа обладают наибольшей производительностью и надежностью. Эти технологии оптимальны для применения в условиях высокой нагрузки, компактности, надежности, энергоэффективности, экономичности, универсальности и перспективности. Внедрение полученных результатов позволит значительно улучшить процессы монтажа кристаллов и повысить общую эффективность их использования в современных электронных устройствах, так как они могут быть успешно применены для оптимизации производства в условиях повышенных требований к надежности и производительности.

**Ключевые слова: технологии монтажа кристаллов, критерии эффективности, коэффициенты эффективности, оптимизация выбора технологии**

# OPTIMIZATION OF THE CHOICE OF THE METHOD OF LAYOUT OF THE WORKING PROCESSOR CRYSTAL FOR COMPLETING ELECTRONIC DEVICES

**Pavlidis V.D., Azizov V.E.**

*Orenburg State Agrarian University, Orenburg, e-mail: Institut.riska@yandex.ru*

One of the key tasks in the production of modern electronic devices is the improvement of crystal mounting technologies. The purpose of the study: to determine the most effective ways of arranging the working crystal of the processor for the assembly of various electronic devices. The study considered five main crystal mounting technologies. The authors conducted a comparative analysis of the technologies based on the criteria of reliability, versatility, cost-effectiveness and simplicity. The key stages of the mounting processes are considered and an assessment of their applicability for various types of devices is given. A comparative analysis of five crystal mounting technologies is carried out, their main advantages and limitations are identified, and optimal methods for various operating conditions are determined. The results of the study show that the methods of thermocompression bonding, chip on board and flip chip have the highest productivity and reliability. These technologies are optimal for use in conditions of high load, compactness, reliability, energy efficiency, cost-effectiveness, versatility and prospects. The implementation of the obtained results will significantly improve the processes of crystal assembly and increase the overall efficiency of their use in modern electronic devices, as they can be successfully applied to optimize production in conditions of increased requirements for reliability and productivity.

**Keywords: crystal assembly technologies, efficiency criteria, efficiency coefficients, optimization of technology selection**

## Введение

В условиях глобализации и стремительного технологического прогресса обеспечение импортозамещения высокотехнологичной продукции становится ключевой задачей. Международная конкуренция способствует развитию собственных технологий и производств, которые удовлетворяют потребности различных секторов экономики в высокотехнологичных компонентах.

Разработка и внедрение отечественных технологических решений, способствующих снижению эксплуатационных и производственных затрат, ставят их в число приоритетных задач. Широкое применение высокотехнологичных и интеллектуальных систем в военном деле, робототехнике, а также в добыче и переработке ресурсов подчеркивает необходимость создания надежных и эффективных технологий монтажа кристаллов [1, с. 568]. Эти технологии являются основой для формирования конкурентоспособных электронных устройств, которые могут использоваться в различных условиях.

**Цель исследования** – определить наиболее эффективные способы компоновки ра-

бочего кристалла процессора для комплектации различных электронных устройств.

Задачи исследования:

– проведение сравнительного анализа методов монтажа рабочих кристаллов процессоров;

– выявление их основных характеристик и особенностей;

– оценка показателей, влияющих на надежность и эффективность;

– расчет относительного коэффициента эффективности *k* для моделирования производительности и затрат;

– определение дефицитных областей и приоритетных направлений для разработки собственных технологий монтажа.

**Материалы и методы исследования**

Кристалл представляет собой небольшую пластину полупроводникового материала, обычно кремния, на которой размещены электрические схемы и компоненты процессора. Такой кристалл содержит миллионы или даже миллиарды транзисторов, которые выполняют вычислительные операции и обрабатывают данные [2, с. 120].

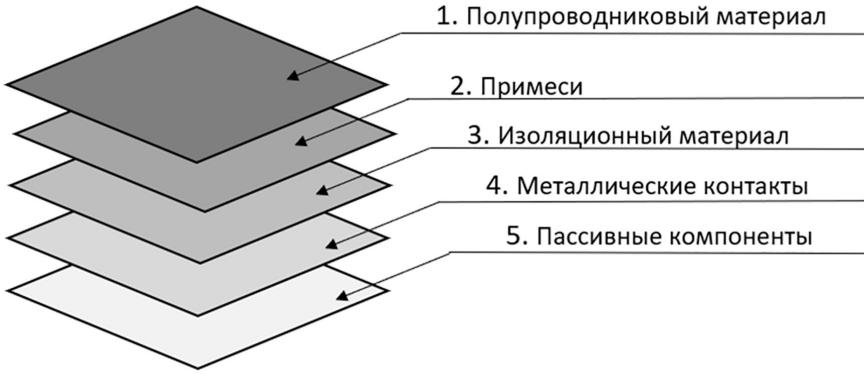


*Рис. 1. Структура кристалла*
*Источник: составлено авторами на основе [2, с. 120]*

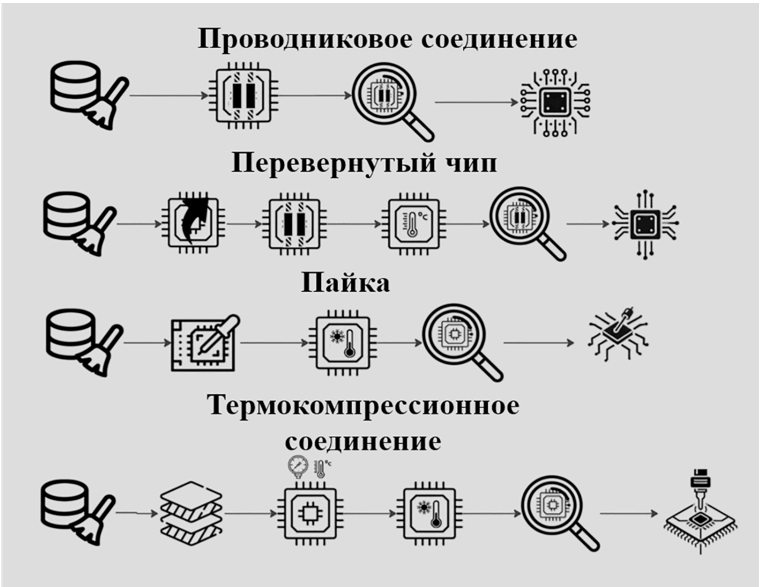


*Рис. 2. Основные методы монтажа кристаллов: – очистка кристалла, – проверка соединений; – установка тонких металлических проводников; – высокое давление; – высокая температура; – охлаждение; – нагрев соединений методом ручной пайки; – проводниковое соединение; – пайка; – перевернутый чип; – термокомпрессионное соединение*

*Источник: составлено авторами на основе [3]*

**Таблица 1**

Анализ технологии монтажа кристаллов

| Вид соединения | Основа соединения | Преимущества соединения | Недостаток соединения | Область применения |
|---|---|---|---|---|
| Проводниковое соединение | Соединения кристаллов с контактами с помощью тонких металлических проводников | Простота и высокая скорость монтажа; универсальность | Чувствительность к вибрациям и механическим воздействиям; возможность разрывов проводов при перегрузках | Обширно используется в производстве интегральных схем, включая микропроцессоры, оперативную память и другие устройства |
| Перевернутый чип | Кристалл устанавливается «вверх дном», и его выводы соединяются напрямую с контактами на печатной плате | Энергоэффективность; высокая плотность соединений | Высокая стоимость материалов; чувствительность к загрязнениям | Используется в высокоскоростных процессорах, графических процессорах и в системах с высокими требованиями к производительности |
| Чип на плате | Кристалл напрямую монтируется на печатную плату, а затем соединяется с используемыми проводами | Компактность; высокая скорость передачи данных | Низкая надежность; высокое тепловыделение | Часто применяется в компактных устройствах, таких как датчики и встраиваемые системы |
| Пайка | Соединение выводов кристалла с контактами на плате с помощью припоя | Надежность соединений; доступность технологии | Потери в теплопроводности; зависимость от качественного припоя | Широко используется в производстве печатных плат, сборке электроники для бытовых и промышленных устройств |
| Термокомпрессионное соединение | Технология, в которой высокая температура и давление применяются одновременно для соединения проводников и кристаллов | Надежность соединений; высокая производительность | Сложность технологии; ограниченность в использовании материалов | Применяется в высокопроизводительных и надежных устройствах, таких как современные процессоры и системы на кристалле |

Источник: составлено авторами на основе [4, с. 62].

Основные составные части кристалла включали полупроводниковый материал (кремний), примеси (фосфор и бор для изменения электрических свойств), оксидные слои (диоксид кремния как изоляционный материал), металлические контакты (медь или алюминий для соединения компонентов) и пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы и другие элементы для улучшения функциональных характеристик) (рис. 1).

Для наглядного представления процессов монтажа кристалла были подготовлены схемы, демонстрирующие ключевые этапы каждого метода (рис. 2).

Для более глубокого анализа была составлена таблица, в которой представлены ключевые аспекты каждой из рассматриваемых технологий монтажа кристаллов (табл. 1).

Анализ технологий монтажа кристаллов показал, что каждый из представленных методов обладал уникальными характеристиками. Важно было учитывать как преимущества, так и недостатки каждой технологии, чтобы выбрать оптимальное решение для достижения максимальной эффективности и надежности устройства.

## Результаты исследования и их обсуждение

Каждая из технологий монтажа кристаллов может быть оценена по четырем стандартным критериям: простота, универсальность, экономичность и надежность [5, с. 63].

Под надежностью понимали долговечность и устойчивость соединений к механическим и термическим воздействиям, а также способность сохранять свои характеристики на протяжении длительного

времени. Простота технологии подразумевала легкость процесса монтажа, включая количество необходимого оборудования, которое потребуется для выполнения работ. Под универсальностью понимали возможность применения метода к различным типам устройств, а также его адаптивность к различным условиям эксплуатации. Экономичность предполагала способность минимизировать расход энергии при необходимости сохранения требуемых функциональных характеристик.

Проведена оценка видов соединения с учетом мнения различных специалистов, которая получена методом экспертных оценок в личных контактах и после изучения научно-технических источников [6, с. 15]. Каждому виду соединения был поставлен в соответствие коэффициент $g$, равный отношению суммы выставленных специалистами баллов по каждому критерию $b$ к максимально возможному количеству баллов $a = 20$: $g = b/a$ (табл. 2).

Проведен анализ соответствия видов соединения и типов самих кристаллов (высокопроизводительные, низкочастотные, компактные), что позволило выбрать наиболее эффективные соединения в зависимости от специфики применения устройства, тем самым оптимизируя производственные процессы и улучшая характеристики конечных продуктов (табл. 3) [7, с. 68].

В рамках анализа технологий монтажа кристаллов могут быть получены коэффициенты эффективности методов соединений $k$, которые позволят разработчикам и инженерам выбирать наиболее подходящие комбинации в зависимости от специфики требований к производительности и компактности устройств: $k = b/a+i$, где $k$ – коэффициент эффективности, $b$ – сумма баллов по каждому критерию, $a = 20$ – максимально возможное количество баллов, $i$ – количество соответствий в баллах.

Определим коэффициенты эффективности для каждого вида соединений:

I. Проводниковое соединение:

$k = 13/20+1 = 33/20 = 1,65$.

II. Перевернутый чип:

$k = 11/20+2 = 51/20 = 2,55$.

III. Чип на плате:

$k = 15/20+2 = 55/20 = 2,75$.

IV. Пайка:

$k = 14/20+1 = 34/20 = 1,7$.

V. Термокомпрессионное соединение:

$k = 16/20+2 = 56/20 = 2,8$.

**Таблица 2**

Оценка базовых видов соединений

| Вид соединения | Критерии оценки, баллы | | | | Оценка вида соединения ($g$) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Простота | Универсальность | Экономичность | Надежность | |
| Проводниковое соединение | 3 | 4 | 3 | 3 | 0,65 |
| Перевернутый чип | 2 | 3 | 2 | 4 | 0,55 |
| Чип на плате | 4 | 5 | 2 | 4 | 0,75 |
| Пайка | 4 | 4 | 2 | 4 | 0,7 |
| Термокомпрессионное соединение | 2 | 5 | 4 | 5 | 0,8 |

Источник: составлено авторами на основе [6, с. 15].

**Таблица 3**

Анализ соответствия между видами соединения кристаллов и типами кристаллов

| Вид соединения | Высокопроизводительные кристаллы | Низкочастотные кристаллы | Компактные кристаллы | Количество соответствий в баллах ($i$) |
|---|---|---|---|---|
| Проводниковое соединение | – | + | – | 1 |
| Перевернутый чип | – | + | + | 2 |
| Чип на плате | + | – | + | 2 |
| Пайка | – | + | – | 1 |
| Термокомпрессионное соединение | + | – | + | 2 |

Приведены наиболее эффективные методы соединений: термокомпрессионное соединение ($k$ = 2,8) выделяется высокой надежностью и производительностью, что позволяет использовать этот метод в сильно нагруженных системах, где важна стабильность; чип на плате ($k$ = 2,75) является оптимальным выбором для компактных устройств при низких затратах на производство; перевернутый чип ($k$ = 2,55) подходит для устройств, в которых нужен баланс между компактностью и высокой энергоэффективностью.

## Заключение

Сравнительный анализ пяти ключевых технологий монтажа кристаллов позволил выявить преимущества, недостатки и определить приоритетные области применения каждой технологии. Сформированные критерии оценки видов соединений, расчет относительного коэффициента $g$ и коэффициент эффективности методов соединения $k$ способствовали выделению наиболее эффективных технологий (термокомпрессионное соединение, чип на плате и перевернутый чип), для которых в результате исследования предложены области применения в зависимости от задач и эксплуатационных условий. Таким образом, результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процессов монтажа кристаллов и повышения их эффективности в производстве современных электронных устройств.

## Список литературы

1. Беляев А.С., Пантюхин А.Р., Александрова Т.В. Использование системы на кристалле для управления роботами // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства: сборник материалов XI Международной научно-технической конференции (Ижевск, 25–27 ноября 2015 г.). Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2016. С. 568–573.

2. Вайселев А., Борзых М. Тенденции в развитии микропроцессоров // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 68–2. С. 120–122.

3. Иванников В.П., Кабакова А.В. «Нанотехнологии» в сфере микроэлектроники и наноэлектроники. возможности и ограничения // Управление техносферой. 2023. Т. 6, № 1. URL: https://technosphere-ing.ru/files/2021/2107.pdf (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.34828/UdSU.2023.11.87.007.

4. Стоянов А.А., Побединский В.В., Рогозин Н.В., Рембеза С.И. Особенности монтажа кристаллов с использованием технологии «flip-chip» при сборке 3D БИС // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 9–1. С. 62–64.

5. Бритиков Ф.О. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем // Science Time. 2016. № 1 (25). С. 63–66.

6. Чкалова М.В., Павлидис В.Д., Прочанкина Е.В., Каменева Е.В. Программа расчета параметров динамической системы // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614236. Российская Федерация. № 2021610399: заявл. 11.01.2021. опубл. 22.03.2021. 15 с.

7. Чкалова М.В., Павлидис В.Д. Система показателей эффективности технологического оборудования в кормопроизводстве // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 2 (42). С. 68–73. DOI: 10.51794/27132064-2021-2-68.