

# Настольная автоматическая установка монтажа золотой проволоки методом «шарик-клин»

И. Петухов, к. т. н.<sup>1</sup>, Е. Летунович<sup>2</sup>

УДК 621.791.16 | ВАК 05.27.06

Разработана настольная автоматическая установка термозвуковой микросварки золотых проволочных выводов диаметром от 17,5 до 50 мкм при монтаже межсоединений в изделиях электронной техники, которая отличается наличием системы автоматического совмещения рабочего инструмента с разноуровневыми контактными площадками многокристалльных изделий и прецизионной трехосевой координатной системой на основе сервоприводов. Установка обеспечивает автоматический монтаж выводов по предварительно занесенным в память координатам точек межсоединений, что повышает точность и производительность процесса.

## ВВЕДЕНИЕ

Устойчивая тенденция миниатюризации многокристалльных сборок с обеспечением высокой функциональности объясняется как техническими, так и экономическими соображениями. Очевидно, что набор определенных кристаллов, установленных на объединительной подложке (интерпозере) позволяет создать необходимый функционал в сжатые сроки даже без использования фотолитографии. Топология интерпозера (рисунок межсоединений и контактных площадок) может быть выполнена установками лазерной обработки материалов с использованием режима лазерного выпаривания предварительно нанесенной металлизации с шириной линии снятия металлизации 15–20 мкм на кремниевой или керамической подложке.

Для обеспечения межсоединений «кристалл – интерпозер – кристалл» используется проволочный монтаж, который остается одним из основных методов сборки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическими размерами изделий, а также более доступным технологическим процессом [1].

В настоящее время монтаж золотых проволочных выводов диаметром от 17,5 до 50 мкм в основном осуществляется с помощью термозвуковой микросварки методами

«клин-клин» (wedge-wedge wire bonding в зарубежной литературе) и «шарик-клин» (ball-wedge wire bonding) с подогревом рабочей зоны до температуры от 100 до 230 °С, приложением заданного усилия к формируемому соединению «проволока – контактная площадка» и одновременным вводом ультразвуковых колебаний частотой в диапазоне 60–140 кГц через рабочий инструмент [2]. При монтаже золотой проволокой также используются методы термокомпрессионной сварки с температурой рабочей зоны в диапазоне 270–310 °С и расщепленным электродом без воздействия ультразвуковых колебаний при сборке структур, чувствительных к механическим вибрациям и появлению микротрещин в зоне образования соединения. Термокомпрессионная микросварка, так же как и термозвуковая, подразделяется на методы «шарик-клин» и «клин-клин» (рис. 1). В настоящее время на промышленном уровне практически освоена технология присоединения медной проволоки диаметром от 17,5 до 50 мкм методом термозвуковой сварки, но с необходимостью поддува защитного газа (95%N<sub>2</sub>5%H<sub>2</sub>) при формировании шарика на конце проволоки и в зоне соединения для защиты от окисления соединяемых материалов [3, 4].

## ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКИ МЕТОДОМ «ШАРИК-КЛИН» И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Процесс термозвуковой микросварки в технологическом плане обусловлен следующими параметрами: температурой рабочей зоны монтажа, амплитудой ультразвуковых колебаний микросварочного инструмента (капилляра), контактным усилием (нагрузением) системы «торец капилляра – проволока – контактная площадка» и временем

<sup>1</sup> ОАО «Планар-СО», начальник научно-технического центра, petuchov@kbtcm.by.

<sup>2</sup> ОАО «Планар-СО», начальник лаборатории.

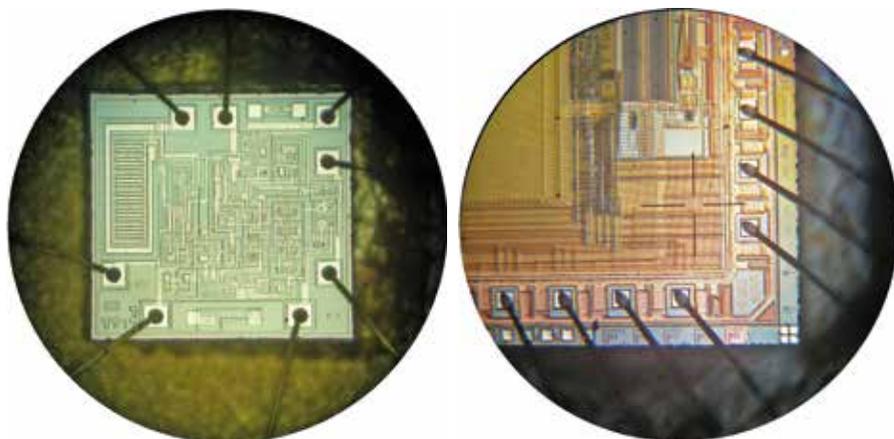


Рис. 1. Методы микросварки: а – шарик-клин; б – клин-клин

сварки. Очевидно, что чем тоньше используемая проволока, тем точнее должны задаваться исходные параметры и поддерживаться на заданном уровне в процессе присоединения. Применение тонкой проволоки <20 мкм связано в первую очередь с размерами контактных площадок кристаллов <60 × 60 мкм, а значит, и малой площадью соединения. Анализ технических характеристик установок шарикового и клинового присоединения выводов ведущих мировых производителей, таких как Hesse Knipps [5], Kulicke & Soffa [6], F&K Delvotec [7] и ASM [8], показывает, что особое внимание при этом уделяется определению момента контактирования микросварочного инструмента с точкой присоединения проволоки и управлению нагрузением. Для специфических приборов архитектуры 2,5D с заложенной в конструкцию большой разновысотностью  $\Delta h$  (до 4 мм) уровней сварки необходимо иметь возможность изменения вертикального положения рабочего торца микросварочного инструмента на различных позициях присоединения (рис. 2). Это может быть обеспечено перемещением сварочной головки по вертикальной оси Z.

Усилие  $F_n(t)$  (рис. 2) на микросварочный капилляр передается в большинстве случаев от электромагнитного актуатора – катушки в поле постоянного магнита по типу звуковой катушки (voice coil motor) ввиду простоты конструкции и возможности программирования посредством задания тока через катушку. Преимуществами подвески ультразвукового (УЗ) преобразователя на плоскопараллельных пластинах в сварочной головке являются отсутствие трения качения и повышенная износостойкость по сравнению с узлами на подшипниковых опорах, что делает ее вариантом, привлекательным для применения в системах УЗ-микросварки. Однако у подвески на плоскопараллельных пластинах есть и недостаток: зависимость усилия в зоне сварки от величины перебега сварочной головки (СВГ) после момента контактирования торца капилляра с точкой сварки. Перебег гарантирует необходимую

степень деформирования проволоки для образования надежного соединения в процессе сварки, и обычно его величина устанавливается равной диаметру проволоки. Фактически к предустановленному сварочному усилию прикладывается упругая сила изгиба плоскопараллельных пластин [9], и необходимо принимать меры по компенсации этого недостатка с помощью схемотехнических решений системы управления нагрузением.

Для обеспечения высокой производительности установки термозвуковой сварки необходимо перемещать СВГ на больших скоростях.

Очевидно, что при присоединении тонкой проволоки диапазон сварочных усилий смещается в область пониженных значений; например, для проволоки диаметром 18 мкм это диапазон 17,0–18,5 г. В ходе формирования проволочной петли при быстрых перемещениях по осям X, Y, Z от одного места присоединения к другому возникают вибрационные шумы на входе датчика касания, выполняемого, в частности, в виде электрической контактной пары «упор – подвеска УЗ-преобразователя». Для их минимизации необходимо увеличивать усилие сжатия механической системы «упор – подвеска УЗ-преобразователя». Следовательно, управлять электромагнитным нагрузением требуется не только в точках присоединения, но и «в полете» – при формировании петли между точками присоединения проволоки.

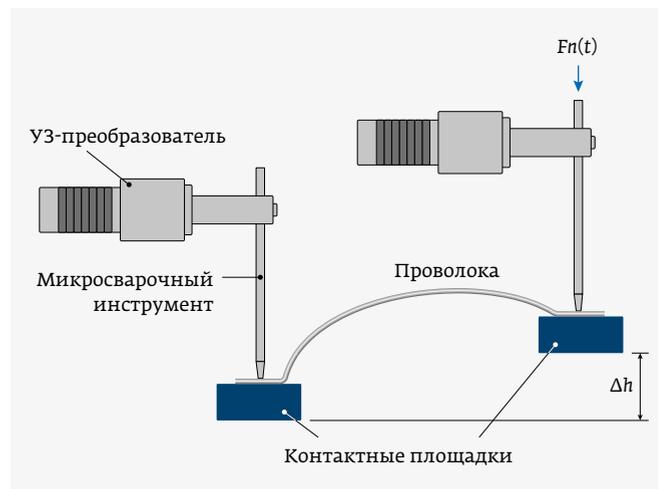


Рис. 2. Положение ультразвукового преобразователя на позиции присоединения.  $\Delta h$  – разновысотность контактных площадок

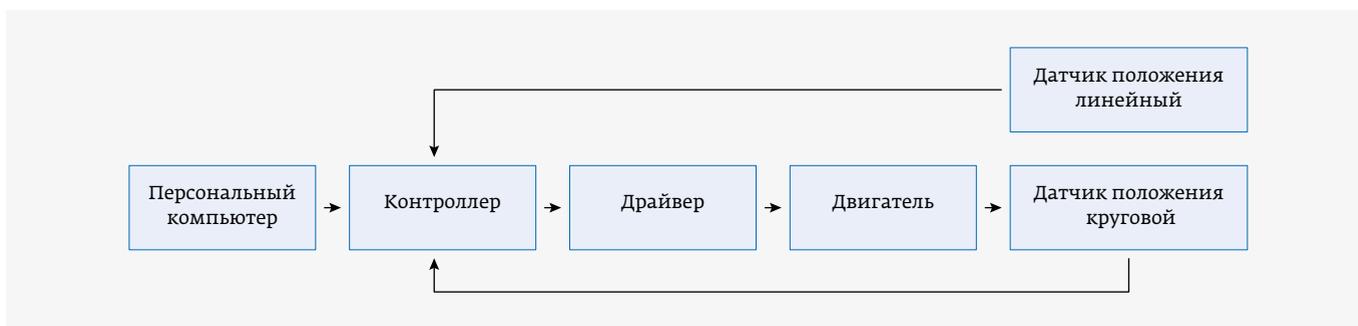


Рис. 3. Система управления по одной координатной оси

Анализ применения координатных систем X-Y-Z на основе сервоприводов показал возможность снижения вибрационных шумов на входе датчика касания по сравнению с приводной системой на основе шаговых приводов при одной и той же механической конструкции сварочной головки. При построении новой настольной установки термовзвучковой микросварки золотой проволоки с применением сервоприводной системы решались задачи по обеспечению:

- автоматического монтажа проволочных выводов в многокристальном изделии по предварительно записанной программе с использованием видеосистемы и системы автоматического совмещения;
- точного попадания торца инструмента в контактную площадку путем проведения процедуры совмещения оптической оси видеосистемы с механической осью сварочного капилляра (запись механического отскока);
- плавности перемещения СВГ, в частности, по координате Z, для стабильного определения момента контактирования капилляра с точкой присоединения;

- требуемой производительности при монтаже золотой проволоки в сложных многокристальных изделиях.

В приводной координатной системе используются серводвигатели с круговыми датчиками высокого разрешения, контролирующими положение крутящего вала, и каретки на ШВП (шарико-винтовых передачах) с оптическими линейными датчиками положения. Датчики имеют корпусное закрытое исполнение и удобны в монтаже. Система управления по осям построена по структурной схеме, приведенной на рис. 3. Особенностью управляющей системы является наличие ПИД-регулятора (рис. 4), который может быть встроен либо в контроллер, либо в серводрайвер.

Общее управление установкой организовано на базе персонального компьютера (далее – ПК). Управляющая программа ПК реализует алгоритм работы установки и интерфейс с пользователем. На контроллер поступают команды на перемещение в виде задания скорости, ускорения, координаты и типа движения. Контроллер в соответствии с командами от ПК рассчитывает требуемые

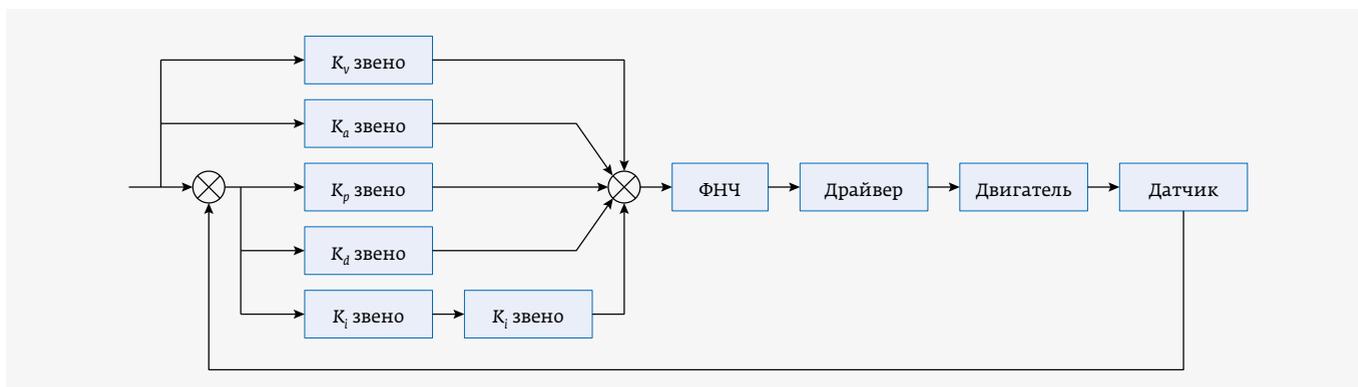


Рис. 4. Блок-схема ПИД-регулятора по одной координатной оси:  $K_v$  – коэффициент скорости;  $K_a$  – коэффициент ускорения;  $K_p$  – коэффициент пропорциональный;  $K_d$  – коэффициент дифференциальный;  $K_i$  – коэффициент интегральный;  $K_{limit}$  – ограничение коэффициента интегрального; ФНЧ – фильтр низких частот

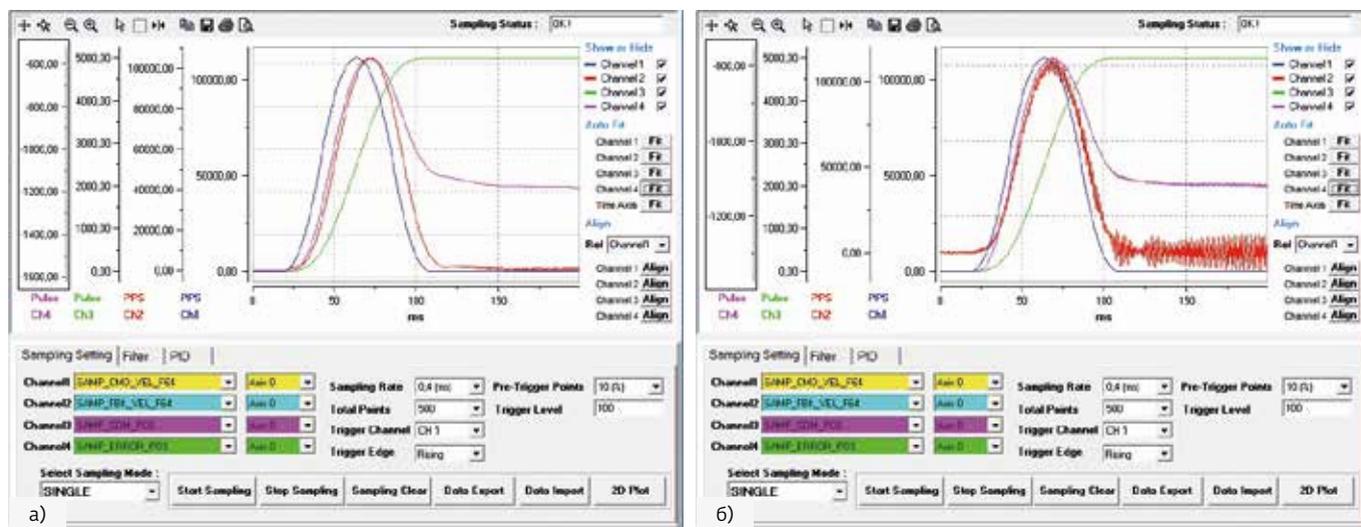


Рис. 5. Графические настройки ПИД-регулятора по одной координатной оси: а - оптимальная настройка ПИД-регулятора; б - неоптимальная настройка ПИД-регулятора (видны колебания на кривой скорости)

координаты по осям X, Y, Z, скорость и ускорение для обеспечения интерполированного кусочно-непрерывного перемещения капилляра от одной точки присоединения к другой. По получаемой информации от датчика контроллер определяет реальную скорость и положения привода и корректирует управляющее воздействие на серводвигатель. Драйвер формирует токи в фазах двигателя в соответствии с управляющим воздействием от контроллера. Реальное положение движущихся частей привода по каждой координате определяется при помощи линейного датчика положения, подключенного к контроллеру.

Настройка ПИД-регулятора может производиться автоматически и вручную. Как правило, при настройке регулятора можно изменять три коэффициента:

пропорциональный  $K_p$ , дифференциальный  $K_d$  и интегральный  $K_i$ . При ручной настройке обычно используется специальное программное приложение или система сбора данных для графического вывода реального положения кареток по трем координатам относительно заданных координат. Фактически отображается реальное поведение привода при перемещении, в том числе точки неустойчивого положения (рис. 5).

Регулировка системы управления привода установки проводится изготовителем оборудования, и потребителю нет необходимости проводить данный сервис.

### АВТОМАТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ЭМ-6705-02

Сварочная система автоматической установки ЭМ-6705-02 состоит из прецизионной координатной системы, перемещающей СВГ по координатам X, Y, Z. Внешний вид СВГ показан на рис. 6. В СВГ могут использоваться керамические сварочные капилляры длиной 11, 16 и 19 мм, обеспечивающие глубокий доступ к зоне сварки присоединения проволочного вывода. Капилляр устанавливается в волновод УЗ-преобразователя заподлицо, чем достигается максимальный вылет инструмента.

Для формирования шарика на конце золотой/медной проволоки электроискровым способом используется фиксированный или подводной электрод, обеспечивающий расстояние (зазор) от торца капилляра 0,8–1 мм, на который подается импульс высокого напряжения отрицательной полярности (рис. 7). Импульс имеет двухступенчатую форму, фактически он состоит из короткого пробойного импульса длительностью 1–1,5 мс амплитудой порядка 4,5 кВ и основного (оплавляющего) амплитудой порядка 1,2 кВ с максимальной длительностью

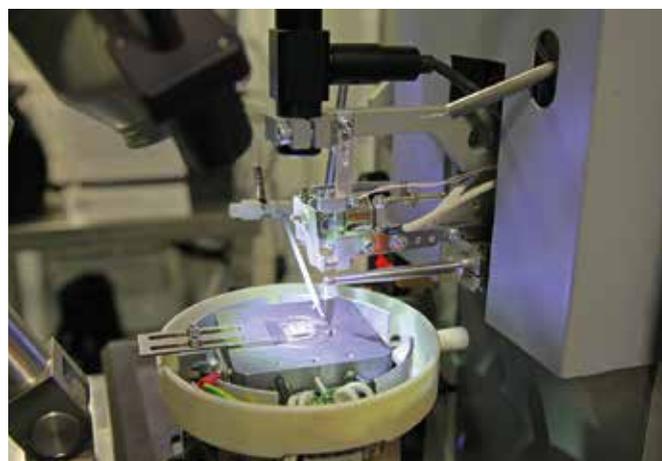
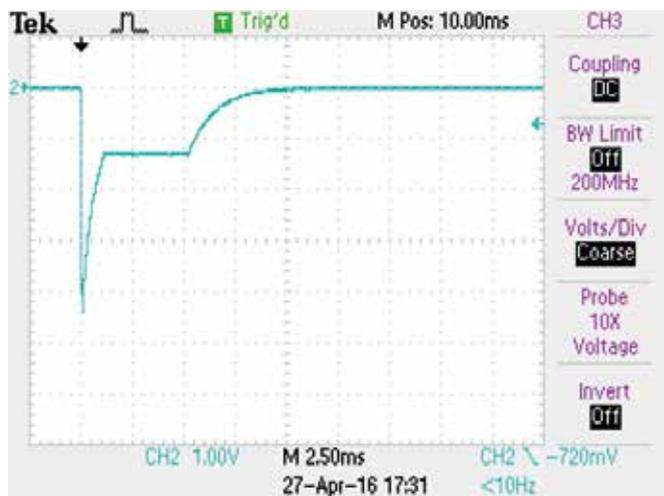


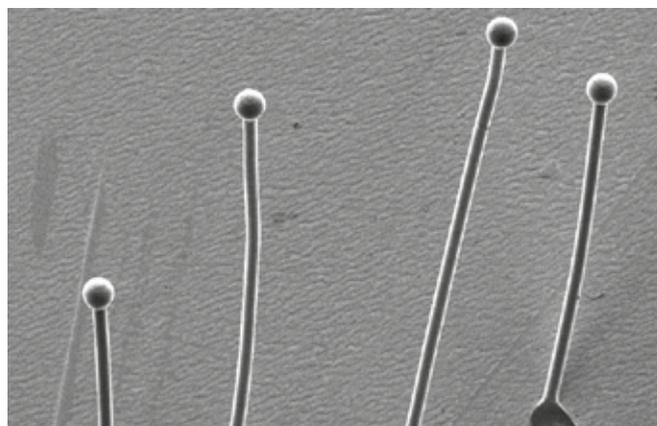
Рис. 6. Сварочная головка установки ЭМ-6705-02



**Рис. 7.** Форма высоковольтного импульса для формирования шарика на конце проволоки при масштабе осциллограммы 1 : 1000

8 мс. Пробойный импульс регулируется в диапазоне от 3 до 5 кВ.

Для регулировки диаметра шарика (обычно в диапазоне 1,8–2,2 от диаметра проволоки) используются параметры амплитуды тока разряда (мА) и времени разряда (мс). Например, для золотой проволоки диаметром 30 мкм ток разряда устанавливают порядка 26 мА, а время разряда – 1,5–1,9 мс. Стандартный внешний вид формируемых шариков на золотой проволоке приведен на рис. 8. На фото – технологический образец, изготовленный для удобства контроля шариков,



**Рис. 8.** Внешний вид формируемых шариков на золотой проволоке диаметром 30 мкм

получаемых при заданных параметрах высоковольтного импульса, средствами растровой электронной микроскопии. Образец сделан путем формирования шарика оплавлением проволоки под торцом капилляра, затем вытягиванием проволоки пинцетом из капилляра вниз, подгибкой проволоки и присоединением ее к подложке в режиме односточечной сварки. Эта технология называется в зарубежной литературе cherry ball formation («формирование «вишенки»), сами шарики получили название free air ball. Технология позволяет производить трехмерный контроль в любом направлении с помощью поворота образца в камере микроскопа.

**Таблица 1.** Основные характеристики автоматической установки ЭМ-6705-02

Метод сварки	Термозвуковая сварка «шарик-клин»
Режим работы	Совмещение и присоединение выводов – автоматически
Материал и размеры присоединяемых выводов, мкм	Al, Cu проволока $\phi$ 17,5–50
Рабочее поле (X, Y, Z), мм	70×70×30
Разновысотность между точками сварки, мм	6
Ток разряда формирования шарика, регулируемый, мА	5–50
Полярность разряда по отношению к проволоке	Отрицательная
Автоматическое распознавание разноуровневых контактных площадок на кристалле и подложке	Имеется
Индивидуальные параметры каждого соединения	Имеется
Выходная мощность УЗГ, Вт	Не менее 4
Длительность сварочного импульса, мс	1,0–255
Рабочая частота ультразвуковой системы, кГц	110/135



**Рис. 9.** Автоматическая установка термовзвучковой микросварки ЭМ-6705-02 производства ОАО «Планар-СО» научно-производственного холдинга точного машиностроения «Планар»

Внешний вид автоматической установки ЭМ-6705-02 показан на рис. 9. Основные технические характеристики установки сведены в табл. 1.

## Выводы

1. Разработана новая автоматическая термовзвучковая установка для монтажа проводников из золота или меди диаметром в диапазоне 17,5–50 мкм с использованием координатной системы на серводвигателях,

обеспечивающей точное определение момента контактирования торца капилляра с точкой сварки.

2. Встроенная система распознавания позволяет выполнять автоматическое совмещение капилляра с предварительно обученными точками сварки многокристальных приборов с разновысотностью до 6 мм и производить монтаж выводов в автоматическом режиме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Достанко А. П. [др.]**. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые. / Минск: Бестпринт, 2009. 202 с.
2. **Harmann G. G.** Wire bonding in microelectronics. Third Edition. / N.Y.: McGraw Hill, 2010. 427 p.
3. **Abe H., Kang D. C., Yamamoto T., Yagihashi T., Endo Y., Saito H., Horie T., Tamate H., Ejiri Y., Watanabe N. and Iwasaki T.** Cu wire and Pd-Cu wire package reliability and molding compounds, 2012. IEEE 62<sup>nd</sup> Electronic Components and Technology Conference, IEEE, San Diego, CA, pp. 1117–1123.
4. **Appelt B. K., Tseng A., Chen C.-H. and Lai Y.-S.** Fine pitch copper wire bonding in high volume production, Microelectronics Reliability, Vol. 51. No. 1, 2011, pp. 13–20.  
<https://www.hesse-mechatronics.com/en/>  
<https://www.kns.com/Products/Equipment/Ball-Bonder>  
<https://www.fkdeltotec.com/en/medien/downloads/>  
<https://www.asmpacific.com/en/products?equipment=4>
5. **Петухов И. Б.** Стабилизация сварочного усилия в процессе ультразвукового монтажа проволочных и ленточных выводов // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. 2021. № 1–2. С. 49–53.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1960 руб.

### ОСНОВЫ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ. СТАНДАРТЫ, КОНЦЕПЦИИ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ Белоус А. И., Солодуха В. А.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2021. – 482 с.,  
ISBN 978-5-94836-612-8

Эта книга фактически представляет собой научно-практическую энциклопедию по современной кибербезопасности. Здесь анализируются предпосылки, история, методы и особенности киберпреступности, кибертерроризма, киберразведки и киберконтрразведки, этапы развития кибероружия, теория и практика его применения, технологическая платформа кибероружия (вирусы, программные и аппаратные трояны), методы защиты (антивирусные программы, проактивная антивирусная защита, кибериммунные операционные системы). Впервые в мировой научно-технической литературе приведены результаты системного авторского анализа всех известных уязвимостей в современных системах киберзащиты – в программном обеспечении, криптографических алгоритмах, криптографическом оборудовании, в микросхемах, мобильных телефонах, в бортовом электронном оборудовании автомобилей, самолетов и даже дронов.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📞 +7 495 956-3346; ✉ [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)