

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.791.16

**ПЕТУХОВ**  
Игорь Борисович

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕРМОЗВУКОВОЙ  
МИКРОСВАРКИ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ  
С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2015

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и в ОАО «Планар».

Научный руководитель

**Ланин Владимир Леонидович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

**Лабунов Владимир Архипович**, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Таратын Игорь Александрович**, кандидат технических наук, доцент, начальник управления «Микромеханика» ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Оппонирующая организация

**ОАО «ИНТЕГРАЛ»** – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Защита состоится « 07 » мая 2015 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел.293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики радиоэлектроники».

Автореферат разослан «\_03\_» апреля 2015 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор

С.В. Бордусов

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Микроминиатюризация электронных компонентов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности 3D-интегральных микросхем и многокристальных модулей, вызвали особые проблемы в области формирования микросварных соединений. Одной из основных задач микросварки при сборке данных изделий является обеспечение большого числа (от 100 до 1000) надежных проволочных межсоединений с учетом разновысотности уровней микросварки между компонентами и уменьшения размеров контактных площадок активных структур из-за высокой степени интеграции.

Для формирования микросварных соединений высокой плотности, когда размеры прямоугольных контактных площадок на кристалле имеют значения от 55x55 до 65x65 мкм с шагом между соседними контактными площадками 20–30 мкм, необходимо использовать проволоку малого диаметра (17–25 мкм) для обеспечения размеров формируемых микросварных соединений в пределах границ контактных площадок, что предъявляет новые требования к сборочному оборудованию.

В настоящее время в 95 % изготавливаемых в мире микросхем используют золотую проволоку для обеспечения надежных межсоединений между кристаллом и выводной рамкой методом «шарик–клин». Возможности отечественного оборудования термозвуковой сварки позволяют использовать в основном золотой проволоки диаметром 25–50 мкм и приборов с размерами контактных площадок от 80x80 мкм до 100x100 мкм. В то же время в связи с отходом от применения высокотемпературных эвтектик Au-Si (377°C) и широкого использования клеевых материалов, низкотемпературных припоев требуется снижение температуры зоны сварки до 140–180°C в отличие от используемой технологии термозвуковой сварки при стандартной температуре 220–240 °C. Для решения данной задачи требуется разработка новых ультразвуковых систем для термозвуковой микросварки с обеспечением требований сборки при высокой плотности межсоединений.

Геометрия образуемых шариков на конце золотой проволоки (в ближайшей перспективе и медной проволоки) с использованием электроискрового метода определяет последующие диаметр и высоту деформированного шарика в месте его соединения встык на кристалле за счет приложенного усилия и воздействия ультразвуковых колебаний, что выдвигает особые требования к устройству формирования шарика и ультразвуковой системе. Поэтому приобретает особую актуальность разработка новых технологий и программно-управляемого оборудования формирования межсоединений в перспективных многокристальных приборах электронной техники с разновысотным расположением выводов и с высоким выходом годных изделий.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 4 от 21.12 2009 г.) и соответствует разделу 13 «Микроэлектроника и субмикронные технологии твердотельной электроники», пункту «Производство оптико-механического, контрольно-измерительного и сборочного оборудования для производства субмикронных электронных приборов» Структуры приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011–2015 гг. (Указ Президента Республики Беларусь от 22.07.2010 г. № 378), а также пункту 7.6 «Оборудование для производства сверхбольших интегральных схем (СБИС) нового технологического уровня и микромеханических систем, методы и средства контроля технологии и параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем» раздела 7 «Машиностроение. Контроль и диагностика в машиностроении» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы» (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585).

Работа выполнена в рамках следующих научных тем и программ:

- Государственная программа импортозамещения, задание МП607.15 «Разработать и освоить в производстве автомат присоединения алюминиевых выводов для сборки изделий электронной техники» (2007–2010 гг.) № ГР 20073688;
- Государственная научно-техническая программа «Микроэлектроника», задание 3.13 «Разработать и изготовить универсальную установку присоединения микровыводов с набором быстросменных опций для сборки изделий СВЧ электроники и микросистемотехники» (2008–2010 гг.), № ГР 20083013; задание ЭМЗ «Разработать и освоить производство установки монтажа выводов термозвуковой сваркой в дискретных корпусах изделий» (2011–2014 гг.), № ГР 20114007;
- Государственная научно-техническая программа «Новые материалы и технологии», подпрограмма «Сварка», задание 02.68 «Исследовать, разработать, изготовить установку термозвуковой сварки методом «клин–клин» выводов с расширенным диапазоном диаметров от 0,0125 до 0,075 мм» (2010–2012 гг.), № ГР 20100138;
- Госбюджетная тема ГБ 11-2020 (направление 9) «Разработать и оптимизировать модели энергоэффективных и материалосберегающих процессов со-

здания внутренних токопроводящих микросоединений в твердотельных структурах изделий электроники» (2012–2013 гг.), № ГР 20120381.

### **Цель и задачи исследования**

**Цель** диссертационной работы состоит в исследовании технологических процессов и разработке оборудования для термозвуковой микросварки, методов и средств, обеспечивающих формирование шарика в заданных пределах на золотой проволоке малого диаметра (17–25 мкм), ультразвуковых технологических систем повышенной частоты, аппаратных средств контроля параметров ультразвуковых преобразователей, в комплексе обеспечивающих воспроизводимость параметров микросварных соединений в изделиях электронной техники с высокой плотностью соединений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- разработать модель и методику построения ультразвуковых колебательных систем в диапазоне частот 90–120 кГц, обеспечивающих высокое качество микросварных межсоединений высокой плотности с использованием золотой проволоки малого диаметра (17–25 мкм);
- разработать алгоритмы и аппаратные средства контроля электрических характеристик УЗКС с возможностью анализа механических колебаний сварочного инструмента;
- установить закономерности процессов формирования шарика на золотой проволоке малого диаметра (17–25 мкм) электроискровым методом при различной полярности высоковольтного импульса на электроде разрядника по отношению к проволоке и определить условия формирования воспроизводимого диаметра шарика при длине разрядного промежутка в пределах 0,5–1,5 мм;
- разработать ультразвуковые технологические системы, встраиваемые в программно-управляемые установки термозвуковой микросварки, обеспечивающие создание межсоединений с шагом до 0,09 мм в изделиях электронной техники при различных сочетаниях свариваемых материалов и с высоким выходом годных изделий;
- разработать модельный ряд установок термозвуковой микросварки, обеспечивающих воспроизводимость качества сборки многокристальных и многоуровневых изделий, в том числе 3D-интегральных микросхем типа «система в корпусе» в соответствии с ISO 9001.

### **Научная новизна**

Получены математические выражения, связывающие размеры и физические свойства материалов составных частей пьезоэлектрического излучателя с

его резонансной частотой, позволяющие рассчитать геометрические размеры ультразвуковых колебательных систем в диапазоне частот 51–120 кГц и тем самым обеспечить качественные микросварные межсоединения высокой плотности с использованием золотой проволоки малого диаметра (17–25 мкм) за счет снижения величины импеданса пьезоэлектрического преобразователя до 10–20 Ом и разброса его резонансной частоты в пределах не более  $\pm 3$  кГц.

Определены условия согласования сварочного инструмента с ультразвуковым преобразователем, при которых обеспечивается максимум амплитуды колебаний на торце инструмента, заключающиеся в достижении минимального значения импеданса в пределах 10–20 Ом при сдвиге резонансной частоты ультразвукового преобразователя не более 0,5 % для стандартного диапазона частоты 51–70 кГц и не более 0,2 % для диапазона частот 90–120 кГц.

Установлены закономерности влияния формы, длительности и величины тока искрового разряда между электродом разрядника и золотой проволокой на формирование шарика при отрицательной полярности высоковольтного импульса на разряднике, позволяющие за счет управления величиной импульса энергии разряда обеспечить воспроизводимый диаметр шарика на золотой проволоке малого диаметра (17–25 мкм) с отклонением от его заданного диаметра не более 5 % при длине разрядного промежутка 0,5–1,5 мм.

Экспериментально установлено, что для получения межсоединений высокой плотности соотношения диаметра шарика к высоте его деформированной зоны в месте соединения встык с контактной площадкой в диапазоне частот 51–70 кГц составляют 4,3–5,8, а в диапазоне 90–120 кГц – 2,8–3,9, что дает возможность получать соединения при деформации шарика на 12–18 % меньше в сравнении со стандартным диапазоном.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Аналитическая модель ультразвукового преобразователя (УЗП) для термозвуковой микросварки на основе составного пьезоизлучателя, включающая математические выражения, связывающие размеры и физические свойства составных частей УЗП с его резонансной частотой, что позволяет для УЗП с количеством пьезоколец 4–6 толщиной каждого 1,5–2 мм снизить разброс его резонансной частоты до  $\pm 3$  кГц и импеданс на резонансной частоте до 10–20 Ом в диапазоне 51–120 кГц и повысить качество микросварных межсоединений высокой плотности с использованием золотой проволоки малого диаметра (17–25 мкм).

2. Методика согласования сварочного инструмента с УЗП, включающая изменение рабочей длины и усилия зажима инструмента в волноводе и контроль амплитуды колебаний инструмента с помощью сфокусированного ла-

зерного излучения с перекрытием его инструментом на 45–55 % до достижения максимальной амплитуды колебаний на рабочем торце сварочного инструмента 3–5 мкм при подводимой мощности 3,5–4,5 В и минимальном импедансе в диапазоне 10–20 Ом при сдвиге резонансной частоты не более 0,5 % для диапазона частот 51–70 кГц и не более 0,2 % для диапазона частот 90–120 кГц

3. Закономерности влияния формы, длительности и величины тока искрового разряда между электродом разрядника и золотой проволокой на формирование шарика при отрицательной полярности высоковольтного импульса на разряднике, позволяющие за счет управления величиной импульса энергии разряда обеспечить воспроизводимый диаметр шарика на золотой проволоке малого диаметра (17–25 мкм) с отклонением от его заданного диаметра не более 5 % при длине разрядного промежутка в пределах 0,5–1,5 мм.

4. Экспериментально обоснованные соотношения диаметра шарика к высоте его деформированной зоны в месте соединения встык с контактной площадкой для получения межсоединений высокой плотности термозвуковой микросваркой в стандартном диапазоне частот 51–70 кГц в пределах 4,3–5,8, а в диапазоне частот 90–120 кГц – 2,8–3,9, что дает возможность получать сварные соединения в этом диапазоне при деформации шарика на 12–18 % меньше по сравнению со стандартным диапазоном частот и обеспечить создание межсоединений золотой проволокой с минимальным шагом до 0,09 мм.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Автором диссертации лично получены результаты, выносимые на защиту. В совместных работах соискатель принимал непосредственное участие в проведении экспериментальных исследований, разработке технологических систем микросварки, написании статей. Научный руководитель доктор технических наук, профессор В.Л. Ланин осуществлял постановку задач исследований, совместно с соискателем проводил обобщение результатов теоретических и практических исследований. Вклад В.В. Шевцова, А.А. Лавриновича, Л.Г. Драгилева, А.В. Шепелевича связан с разработкой механических узлов технологического оборудования. Вклад В.В. Нестеровича, Н.В. Федорова связан с реализацией программного обеспечения алгоритмов, разработанных соискателем.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: «Прецизионное оборудование и технологии производства изделий микро- и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, 2004; 15-я и 16-я Международные научно-

технические конференции «Современные средства связи», Минск, Беларусь, 2010, 2011; 2, 3, 4 и 5-я Международные научно-технические конференции «Приборостроение», Минск, Беларусь 2009–2012; 11, 12, 13 и 14-я Международные научно-практические конференции «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ), Одесса, Украина, 2010–2012; «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010», Севастополь, Украина, 2010; научно-практическая конференция в рамках выставки «Радиоэлектроника и приборостроение», С.-Петербург, Россия, 2011; Международная научно-техническая конференция «Electronics System Integration Technology», ESTC-2010, Берлин, Германия, 2010; 3-я Международная научно-практическая конференция «Прецизионное оборудование и технологии производства изделий микро- и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, 2012; Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию БГУИР, Минск, Беларусь, 2014; 18-я Международная научно-техническая конференция Electronics 2014, Паланга, Литва, 2014.

Результаты диссертационной работы внедрены на ведущих производственных предприятиях Республики Беларусь – ОАО «Планар-СО», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

### **Опубликование результатов диссертации**

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 41 печатной работе. В их числе 3 монографии в соавторстве, 8 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, 14 статей в научно-технических периодических изданиях, 5 статей в материалах международных конференций, 7 тезисов докладов на международных научно-технических конференциях, 1 патент Российской Федерации, 1 патент Республики Беларусь, 2 авторских свидетельства СССР на изобретения.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 7,2 авторских листа.

### **Структура и объем диссертации**

Общий объем диссертации составляет 190 страниц, из них 98 страниц основного текста, 98 рисунков на 81 странице, 16 таблиц на 22 страницах, библиографический список из 98 наименований на 7 страницах, список собственных публикаций автора из 41 наименования на 4 страницах и 2 приложения на 4 страницах.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** и общей характеристике работы обоснована актуальность темы диссертации, показана ее связь с научными программами, сформулированы цели и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ процессов ультразвуковой и термозвуковой микросварки при формировании контактных соединений в приборах электронной техники. В первом разделе рассмотрены параметры процессов микросварки, определяющие качество микросварных соединений, а также материалы проволочных выводов. Во втором разделе описаны особенности термозвуковой микросварки с применением активирующих воздействий: электромагнитного излучения в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах длин волн, импульсов электрического тока, а также рассмотрено влияние качества гальванических покрытий контактных площадок на прочность микросварных соединений. В третьем разделе представлен обзор устройств и технологических систем ультразвуковой и термозвуковой микросварки проволочных выводов в приборах электронной техники. Анализ факторов, влияющих на качество и надежность микросварных соединений, показал, что для обеспечения высокого качества и воспроизводимости соединений повышенной плотности необходимы разработка новых технологических систем микросварки; оптимизация технологических параметров ультразвуковой и термозвуковой микросварки методами математического моделирования; разработка новых способов микросварки с активацией процесса физико-химического взаимодействия контактирующих металлов при повышенных частотах колебаний. Проанализированы основные показатели установок присоединения проволочных выводов отечественного и зарубежного производства. Основными направлениями разработок являются повышение производительности и точность позиционирования координатных систем. В четвертом разделе проведен анализ требований к инструментам для ультразвуковой и термозвуковой микросварки.

Во **второй главе** изложены результаты анализа полученных соотношений на основании решений дифференциальных уравнений распространения упругих волн в твердом теле, а именно в металлических накладках и пакете пьезокерамики с учетом положения узловой плоскости колебаний в пьезокерамическом излучателе. При расчете пьезокерамического излучателя необходимо учитывать то обстоятельство, чтобы узел колебаний был ближе к границе раздела пьезокерамики и накладки, т. к. в узле возникают наибольшие внутренние

напряжения, что негативно сказывается на свойствах и надежности пьезокерамики при высокой подводимой мощности.

Предложены выражения, определяющие длину тыльной накладки  $l_1$  и передней (излучающей) накладки  $l_3$  при известной длине пакета пьезокерамики  $l_2$ , а также позволяющие задавать положение узловой точки полуволнового пьезоэлектрического излучателя :

$$l_3 = \frac{c_3}{\omega} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{Z_{23} \cdot \sin\left(\frac{\omega}{c_3} \cdot l_{23}\right) + \cos\left(\frac{\omega}{c_3} \cdot l_{23}\right)}{Z_{23} \cdot \cos\left(\frac{\omega}{c_3} \cdot l_{23}\right) - \sin\left(\frac{\omega}{c_3} \cdot l_{23}\right)} \right) - l_{23}, \quad (1)$$

$$l_1 = \frac{c_1}{\omega} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{Z_{21} \cdot \sin\left(\frac{\omega}{c_1} \cdot l_{21}\right) + \cos\left(\frac{\omega}{c_1} \cdot l_{21}\right)}{Z_{21} \cdot \cos\left(\frac{\omega}{c_1} \cdot l_{21}\right) - \sin\left(\frac{\omega}{c_1} \cdot l_{21}\right)} \right) - l_{21}, \quad (2)$$

где  $c_1$  – скорость звука в тыльной накладке;  $c_2$  – скорость звука в пьезокерамике;  $c_3$  – скорость звука в излучающей (передней) накладке;  $l_{21}$  и  $l_{23}$  – длина частей пьезокерамической секции от узловой точки до металлических накладок;  $Z_{21}$  и  $Z_{23}$  – переменные, учитывающие свойства используемых материалов,  $\omega$  – круговая частота колебаний.

Используя выражения (1) и (2), для четырех пьезоколец диаметром 12 мм и толщиной 2 мм на резонансной частоте пьезоизлучателя 92 кГц определены геометрические размеры накладок: тыльная накладка имеет длину 4 мм, а передняя стальная – 4,2 мм. Экспериментальные данные партии излучателей в количестве 10 шт. показали разброс по частоте до  $\pm 2$  кГц, что достаточно хорошо согласуется с расчетами. Для частоты 102 кГц толщина накладок пьезоизлучателя становится равной 3,2 мм при толщине секции пьезокерамики 8 мм, что снижает надежность и технологичность конструкции.

При заданном числе пьезоколец от двух до шести (четное число колец) и известной их толщине рассчитываются по (1) и (2) длины тыльной и излучающей накладок, при этом длина передней накладки  $l_3$  должна удовлетворять неравенству  $l_1 \gg l_3$ . Остальная часть передней накладки представляет четвертьволновой двухступенчатый акустический трансформатор. Поскольку длина одной четверти волны в диапазоне частот 90–120 кГц составляет от 14,2 до 10,6 мм, то переднюю накладку можно рассматривать как состоящую из двух частей: одна часть дополняет общую длину пьезоизлучателя до одной полуволны ультразву-

ковых колебаний, а остальная часть является четвертьволновым акустическим трансформатором. Передняя часть акустического трансформатора соединяется с узловой точкой волновода ультразвукового преобразователя.

Важным аспектом ультразвуковой системы микросварки является согласование сварочного инструмента с ультразвуковым преобразователем. Входной импеданс свободного от нагрузки инструмента можно определить следующим соотношением из общей теории механических колебаний стержня:

$$Z(0) = j \frac{EIk^3}{\omega} \frac{\sin kL \cosh kL + \cos kL \sinh kL}{1 + \cos kL \cosh kl}, \quad (3)$$

где  $Z(0)$  – входной импеданс инструмента;  $L$  – длина инструмента;  $k$  – волновой коэффициент, определяемый следующим образом:  $k = \left( \omega^2 \cdot \rho \cdot S / E \cdot J \right)^{1/4}$ ;  $\rho$  – плотность;  $S$  – площадь поперечного сечения инструмента;  $E$  – модуль Юнга;  $J$  – момент инерции поперечного сечения инструмента;  $\omega$  – круговая частота.

Закрепленный инструмент в волноводе в общем случае состоит из трех частей:  $A$  – часть над волноводом,  $B$  – часть в торце волновода и  $C$  – рабочий вылет инструмента. Таким образом, входной импеданс инструмента представляет сумму импеданса верхней части инструмента  $A$  и импеданса рабочей части микроинструмента  $C$ :

$$Z(0) = Z_A(0) + Z_C(0). \quad (4)$$

Используя выражение (3), получаем следующее соотношение:

$$Z(0) = j \frac{EJk^3}{\omega} \cdot \left( \frac{\sinh kA \cdot \cos kA + \cosh kA \cdot \sin kA}{1 + \cos kA \cdot \cosh kA} + \frac{\sinh kC \cdot \cos kC + \cosh kC \cdot \sin kC}{1 + \cos kC \cdot \cosh kC} \right). \quad (5)$$

По графической зависимости импеданса  $Z(0)$  (5) от рабочего вылета можно найти точки нулевого импеданса и тем самым определить оптимальный вылет инструмента. Учитывая сложность выражения (5), моделирование выполнено в математическом пакете Mathcad на частоте 65,75 кГц (рисунок 1, а) и на частоте 94,3 кГц (рисунок 1, б) при длине инструмента  $L$ , равной 21 мм. Из графических зависимостей видно, что возможны различные вылеты инструмента для одной резонансной частоты ультразвукового преобразователя. Например, для частоты 65,75 кГц возможна установка инструмента с вылетом 13 и 15 мм.

Экспериментально установленные оптимальные значения 12,8 и 14,7 мм соответственно на 1,5–2,0 % отличаются от расчетных, что объясняется сужением рабочего торца инструмента.

Для проведения экспериментальных исследований и проверки результатов моделирования распределения амплитуды ультразвуковых колебаний вдоль оси сварочного инструмента разработан и изготовлен стенд контроля СКК-01. Принцип работы стенда основан на контроле сигнала фотоприемника лазерного полупроводникового излучателя, сфокусированный луч которого наполовину перекрывается телом рабочего инструмента.

Особенностью данного метода контроля является его нечувствительность к отражающим характеристикам исследуемых объектов и прямой контроль амплитуды колебаний в отличие от доплеровских лазерных измерителей, которые измеряют скорость и после математической обработки получают информацию об амплитуде.

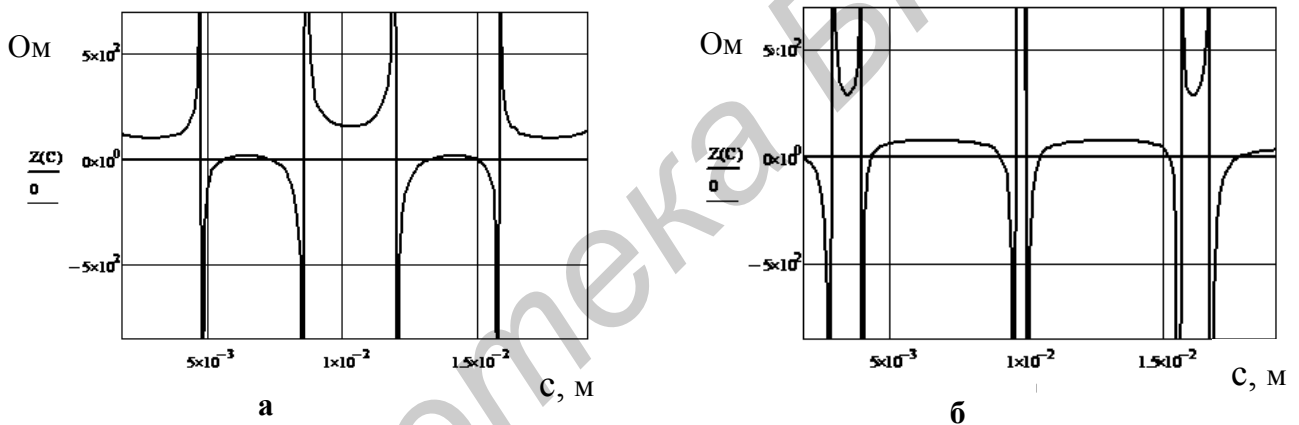


Рисунок 1. – Зависимости входного импеданса инструмента от рабочего вылета  $S$  инструмента на частотах 65,75 кГц (а) и 94,3 кГц (б)

В третьей главе приведена методика построения и исследования УЗ технологических систем микросварки проволочных выводов. Разработана методика контроля импеданса, АЧХ УЗ-преобразователя и устройство, обеспечивающее графический вывод АЧХ и фазовой характеристики на экран монитора через интерфейс RS-232. На рисунке 2 представлена функциональная схема устройства контроля импеданса, АЧХ. Устройство контроля обладает мобильностью и возможностью диагностики преобразователя в установках микросварки без разборки сварочной головки в производственных условиях.

Программная оболочка измерителя импеданса рассчитывает комплексное значение импеданса анализируемой нагрузки в каждой точке диапазона частоты посредством дискретного преобразования Фурье и выводит графики модуля и фазы импеданса на дисплей компьютера. Диапазон частоты сканирования от 10 до 120 кГц с дискретностью сканирования до 5 Гц.

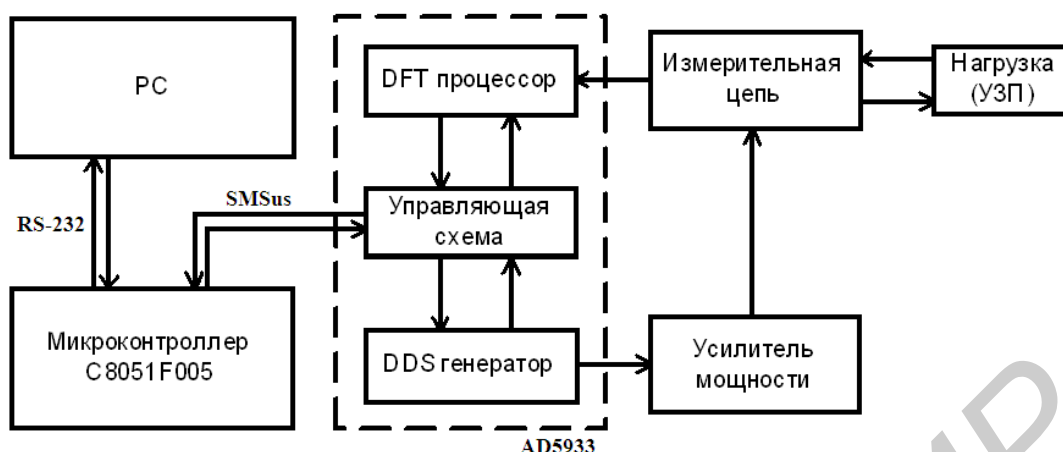
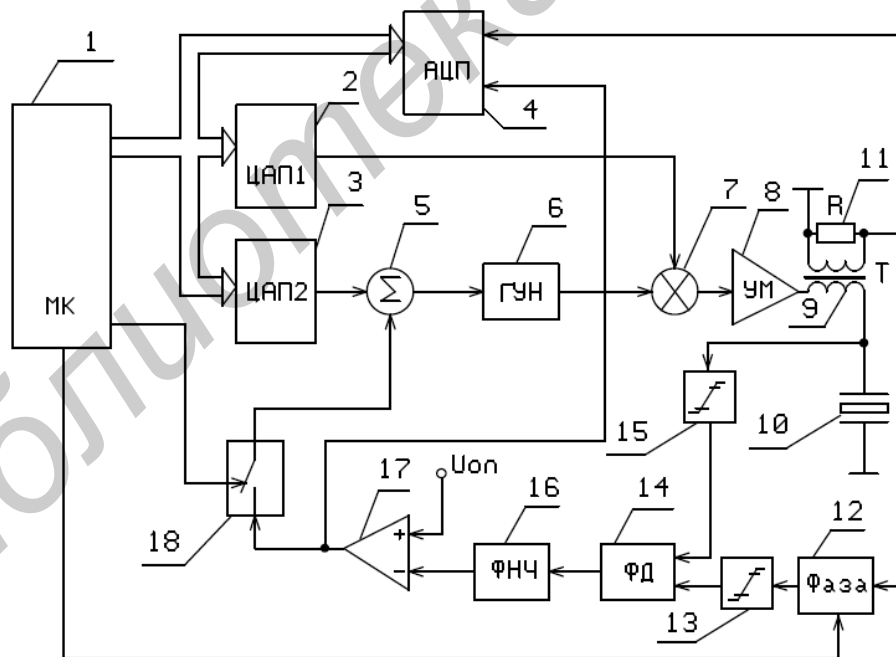


Рисунок 2. – Функциональная схема устройства контроля импеданса

Для диапазона частот 60–120 кГц разработан УЗ-генератор на базе микроконтроллерного управления (рисунок 3), который на выходе формирует три типа программируемых по амплитуде и длительности профиля импульсов по интерфейсу управления RS-232 или 8-бит параллельному порту: стандартный, двухуровневый и трапецеидальный, что обеспечивает широкие возможности управления ультразвуковым воздействием в зоне сварки.

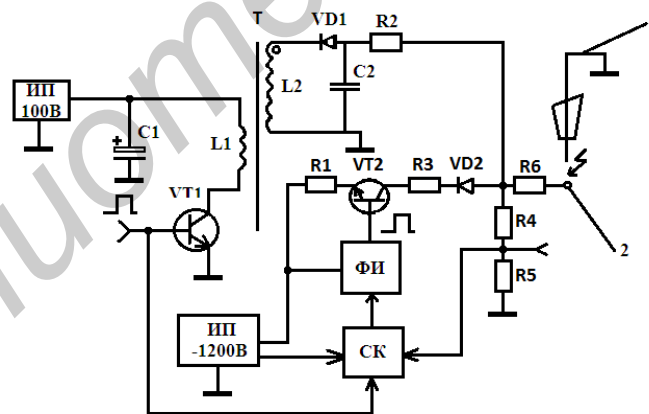


1–микроконтроллер; 2, 3–цифроаналоговые преобразователи; 4–аналого-цифровой преобразователь; 5– сумматор; 6–генератор, управляемый напряжением; 7– умножитель; 8– усилитель мощности; 9– трансформатор тока; 10– ультразвуковой преобразователь; 11–активная нагрузка; 12–фазовращатель; 13–усилитель-ограничитель; 14– фазовый детектор; 15–усилитель-ограничитель; 16– фильтр низких частот, 17–дифференциальный усилитель; 18–аналоговый ключ

Рисунок 3. – Схема широкодиапазонного ультразвукового генератора

Для формирования соединений повышенной плотности золотой проволокой диаметром 17–25 мкм разработано устройство формирования шарика с генерацией отрицательного высоковольтного импульса на электрод по отношению к проволоке (рисунок 4). Это позволило получать шарики стабильного диаметра на проволоке малого диаметра и минимизировать зону отжига. Впервые с помощью скоростной съемки исследовалось положение светящихся участков в зоне разряда. В случае положительной полярности на электроде кончик проволоки окружен светящимся участком искрового разряда на длине 0,15–0,5 мм (зависит от тока разряда), что сопровождается сильным отжигом проволоки над шариком, приводящим к ослаблению прочности проволоочного соединения в этом месте (рисунок 5).

Обнаружено, что размер светящегося участка искрового разряда на проволоке при положительной полярности на электроде уменьшается при снижении тока разряда. Таким образом, для данной полярности предпочтителен режим ступенчатого или экспоненциально спадающего тока разряда для формирования шариков на проволоке диаметром 25–30 мкм для снижения отжига проволоки над местом перехода проволоки в шар. С другой стороны, необходима определенная начальная величина и длительность разрядного тока для обеспечения процесса расплава проволоки, что осложняет подбор параметров образования шарика, особенно для проволоки уменьшенного диаметра (< 20 мкм).



1–разрядник; 2– проволока

Рисунок 4. – Схема устройства формирования шарика

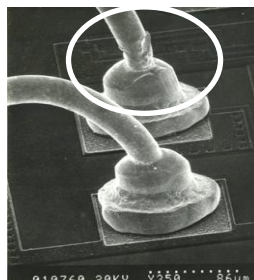


Рисунок 5. – Вид первой сварки «встык» на кристалле с поврежденным переходом проволоки в шарик (верхнее соединение)

В четвертой главе изложены результаты исследования процессов формирования микросварных соединений с повышенной плотностью монтажа. Для достижения высокой воспроизводимости сварных соединений при термозвуковой сварке с использованием проволок уменьшенного диаметра 17,5–25 мкм при сборке приборов с повышенной плотностью монтажа предложено использовать УЗ-системы в диапазоне частот 90–120 кГц.

Влияние частоты УЗ-колебаний на прочность выводов золотой проволоки 30 мкм при различной температуре зоны сварки исследовалось с использованием двух разработанных ультразвуковых преобразователей, один из которых с частотой резонанса 110 кГц, а второй с частотой резонанса 66 кГц, на установке ЭМ-4060П при сборке приборов типа smart card, при температуре не выше 145 °С (лавсановый ленточный носитель) и стандартных приборов на металлических лентах. Результаты контроля прочности выводов, полученных в диапазоне температур рабочей зоны от 100 до 300 °С, показаны на рисунке 6. Снижение прочности выводов ниже 200 °С определяется в основном ослаблением прочности второй клиновой сварки. Ниже 100 °С наблюдается не только снижение прочности сварки встык шариком и второй клиновой сварки, но и наличие соединений с нулевой прочностью («отлипы»). Использование УЗ-системы повышенной частоты 110 кГц позволило обеспечить сборку приборов типа smart card при температуре 140 °С с выходом годных 98,8–99,4 %.

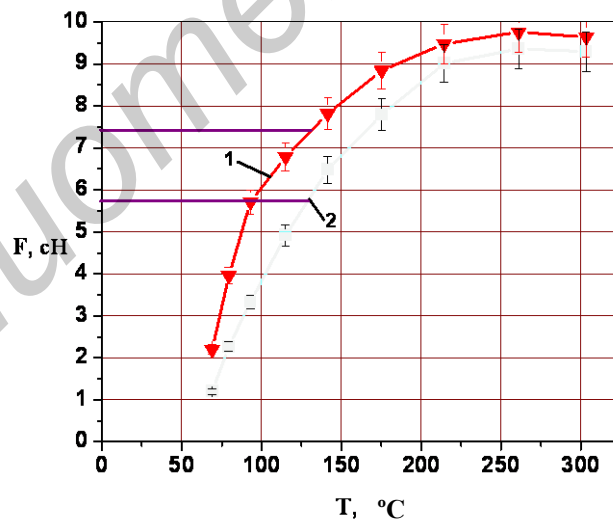


Рисунок 6. – Зависимости прочности выводов золотой проволоки диаметром 30 мкм от частоты УЗ-колебаний и времени сварки: 110 кГц, 15 мс (1) и 66 кГц, 20 мс (2)

Сборка приборов с высокой плотностью монтажа сопряжена с использованием проволоки малого сечения (17–25 мкм), а это ведет к необходимости решения проблемы воспроизводимости диаметра исходных (оплавленных) шариков и обеспечения стабильного диаметра и высоты присоединенного (деформированного) шарика на контактной площадке прибора. Экспериментально

установлено, что отношение диаметра шарика к высоте деформированной зоны шарика в месте присоединения зависит от исходного диаметра шарика и геометрии рабочего торца инструмента, при этом бездефектная прочность шарика на сдвиг достигается при отношении в диапазоне 4,3–5,8 при стандартной частоте ультразвуковых колебаний, а для повышенной частоты 90–120 кГц в диапазоне 2,8–3,9 для проволоки диаметром 17–25 мкм (рисунок 7).

В пятой главе приведены принципы построения полуавтоматических и автоматических установок проволочного монтажа методом термозвуковой сварки, в которых использованы результаты исследований диссертационной работы, обеспечивающие технологический процесс сборки изделий электронной техники с высокой надежностью и позволяющие обеспечить выход годных изделий до 99 %.

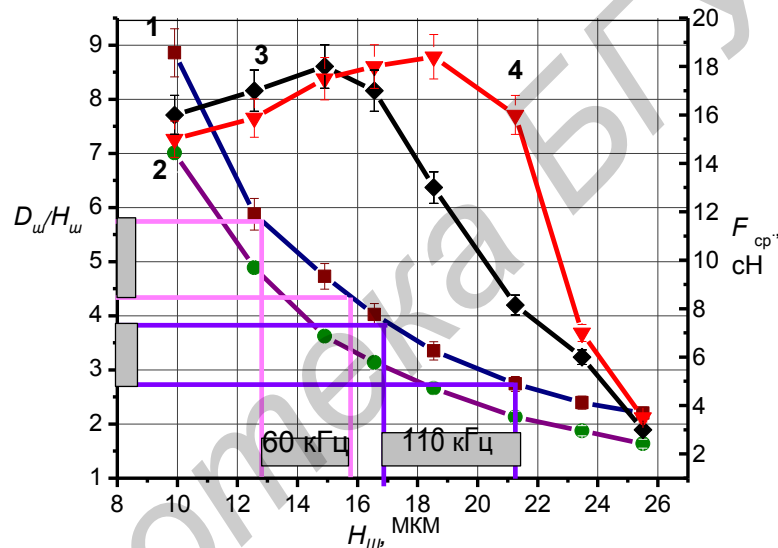


Рисунок 7. – Зависимости отношения диаметра деформированного шарика  $D_w$  к его высоте  $H_w$  (кривая 1–экспериментальные результаты, кривая 2–расчетная) и усилия на срез  $F_{cp}$  (кривая 3 для УЗКС 60 кГц и кривая 4 для УЗКС 110 кГц) от высоты деформированного шарика  $H_w$

Разработанные полуавтоматические установки типа ЭМ-4320У и автоматы термозвуковой сварки типа ЭМ-4260, ЭМ-4350, ЭМ-4450, ЭМ-4451 методом «шарик–клин» и ЭМ-4020ПМ методом «клин–клин», которые по техническим характеристикам не уступают лучшим мировым образцам и позволяют удовлетворить потребности производителей электронной техники и повысить экспортный потенциал Республики Беларусь.

В приложениях представлены копии документов, подтверждающие практическую значимость и использование результатов диссертационной работы.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

Основные результаты исследований сводятся к следующему:

1. Предложена аналитическая модель УЗП термозвуковой микросварки, включающая математические выражения, связывающие размеры и физические свойства составных частей УЗП с его резонансной частотой, что позволяет обеспечить для УЗП с количеством пьезоколец 4–6 толщиной 1,5–2 мм воспроизводимость резонансной частоты в пределах не более  $\pm 3$  кГц, снизить импеданс на резонансной частоте до 10–20 Ом в диапазоне 51–120 кГц и повысить качество микросварных межсоединений высокой плотности с использованием золотой проволоки малого диаметра (17–25 мкм) [1, 3, 7, 9, 20, 26, 32, 36].

2. Предложена методика, включающая изменение места и усилия зажима инструмента в волноводе и распределения узлов и пучностей механических колебаний по длине сварочного инструмента до достижения минимального импеданса в диапазоне 10–20 Ом при минимальном сдвиге резонансной частоты не более 0,5 % для диапазона частот 51–70 кГц и не более 0,2 % для диапазона частот 90–120 кГц, и аппаратно-программный комплекс для анализа спектра колебаний и контроля распределения узлов и пучностей механических колебаний по длине микроинструмента с помощью сфокусированного лазерного излучения с перекрытием его инструментом в исследуемой точке на 45–55 %, что позволяет достигнуть амплитуды колебаний на рабочем торце сварочного инструмента до 3–5 мкм при подводимой мощности в диапазоне 3,5–4,5 Вт [4, 7, 17, 18, 31].

3. Установлены закономерности влияния формы, длительности и величины тока искрового разряда между электродом разрядника и золотой проволокой на формирование шарика при отрицательной полярности высоковольтного импульса на разряднике, позволяющие за счет управления величиной импульса энергии разряда обеспечить воспроизводимый диаметр шарика на золотой проволоке малого диаметра (17–25 мкм) с отклонением от его заданного диаметра не более 5 % при длине разрядного промежутка в пределах 0,5–1,5 мм [2, 6, 8, 38, 39, 40].

4. На основе экспериментальных данных установлено, что для получения межсоединений высокой плотности (с минимальным шагом до 0,09 мм) соотношения диаметра шарика к высоте его деформированной зоны в месте соединения встык с контактной площадкой в стандартном диапазоне частот 51–70 кГц составляют 4,3–5,8, а в диапазоне 90–120 кГц – 2,8–3,9, что дает возможность получать сварные соединения при меньшей на 12–18 % деформации шарика в сравнении со стандартным диапазоном [10, 35].

5. Установлено, что технология термозвуковой микросварки с применением ультразвуковых колебательных систем повышенной частоты позволяет снизить температуру рабочей зоны при создании межсоединений высокой плотности на полимерных ленточных носителях с 220–240 °С до 140–180 °С и обеспечить выход годных изделий до 98,5 % за счет ввода в рабочую зону в 2,25–3,0 раза большей величины энергии УЗ-колебаний, пропорциональной квадрату частоты [1, 2, 5, 11, 30, 37].

6. Разработан алгоритм настройки ультразвукового генератора с микропроцессорным управлением на резонансную частоту пьезокерамических преобразователей в диапазоне частот от 60 до 120 кГц и контролем полосы захвата фазовой автоподстройки частоты, обеспечивающий воспроизводимость качества микросварных соединений в изделиях электронной техники с повышенной плотностью соединений в соответствии с ISO 9001 [11, 27, 41].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанные ультразвуковые генераторы УЗГ-01, УЗГ-02 [1, 2, 12, 41], блоки формирования шарика БФШ-01 [6, 8, 12, 38, 39, 40] и модельный ряд ультразвуковых преобразователей УЗП в стандартном и повышенном диапазоне частот применяются в выпускаемом серийном сборочном оборудовании ОАО «Планар» типа ЭМ-4320, ЭМ-4320У, ЭМ-4370, ЭМ-4260, ЭМ-4360, ЭМ-4450, ЭМ4451 [3, 5, 20], а также это позволило провести модернизацию используемого оборудования. Стоимость поставленного оборудования в Россию, Малайзию, Пакистан, Индию и Китай составляет 1,19 млн \$ США в эквиваленте.

2. Разработан стенд контроля параметров ультразвуковых преобразователей с возможностью передачи данных через канал RS-232 в компьютер или установки термозвуковой сварки для быстрой диагностики ультразвуковой системы без разборки сварочной головки установки [19, 36]. Экономический эффект заключается в сокращении времени при настройке ультразвуковых систем в 2–3 раза, что составляет 20 млн руб. в ценах 2013 г.

3. Методика оценки отношения диаметра деформированного шарика к его высоте использована при создании библиотеки режимов сварки в программном обеспечении установок микросварки, которое позволило автоматически устанавливать параметры термозвуковой микросварки для выбранного типа инструмента и диаметра проволоки [10, 23, 28, 33], .

4. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре электронной техники и технологии БГУИР по дисциплине «Автоматизированные технологические системы для электрофизической обработки».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Монографии

1. Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые / А.П. Достанко, В.Г. Залесский, А.М. Русецкий, В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, Д.А. Голосов, Е.В. Телеш, С.В. Бордусов, С.М. Завадский; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2009. – 199 с.

2. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники / А.П. Достанко, А.М. Русецкий, С.В. Бордусов, В.Л. Ланин, Л.П. Ануфриев, С.В. Карпович, В.В. Жарский, В.И. Плебанович, А.Л. Адамович, Ю.А. Грозберг, Д.А. Голосов, С.М. Завадский, Я.А. Соловьев, И.В. Дайняк, Н.С. Ковальчук, И.Б. Петухов, Е.В. Телеш, С.И. Мадвейко; под ред. А.П. Достанко и А.М. Русецкого. – Минск: Бестпринт, 2011. – 216 с.

3. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / В.В. Жарский, С.Е. Карпович, И.В. Дайняк, В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, Е.А. Литвинов, В.В. Поляковский; под ред. С.Е. Карповича. – Минск: Бестпринт, 2013. – 208 с.

### Статьи в рецензируемых научных журналах

4. Ультразвуковая микросварка ленточных выводов при монтаже мощных полупроводниковых приборов / В.Л. Ланин, А.А. Хмыль, С.С. Волкенштейн, И.Б. Петухов // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2009. – № 2. – С. 127–132.

5. Ланин, В.Л. Выбор микропривода механизма зажима и подачи проволоки в установках термозвуковой микросварки / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, В.В. Шевцов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 3. – С. 54–57.

6. Ланин, В.Л. Выбор полярности электрического разряда при формировании шарика в установках присоединения проволочных выводов / В.Л. Ланин, А.Ф. Цинман, И.Б. Петухов // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2011. – № 3. – С. 110–116.

7. Петухов, И.Б. Оптимизация параметров ультразвуковой системы повышенной частоты для микросварки проволочных выводов / И.Б. Петухов // Доклады БГУИР. – 2012. – № 1 (63). – С. 33–39.

8. Ланин, В.Л. Электроискровой процесс формирования шарика при термозвуковой микросварке в электронике / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Электронная обработка материалов. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 59–62.

9. Ланин, В.Л. Методика расчета параметров УЗ-преобразователей повышенной частоты / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013. – № 5. – С. 42–46.

10. Ланин, В.Л. Получение соединений повышенной плотности термозвуковой микросваркой в 3D интегральных микросхемах / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 2–3. – С. 38–43.

11. Lanin, V.L. High frequency thermosonic wire bonding / V.L. Lanin, I.B. Petuchov // Journal of Science and Engineering. – 2014. – Vol. 4(2). – P. 39–45.

### **Статьи в научно-технических журналах**

12. Ланин, В.Л. Ультразвуковое оборудование для сварки микропроводников / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, В.В. Шевцов // Компоненты и технологии. – 2009. – № 8. – С. 124–128.

13. Ланин, В.Л. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, Д.А. Мордвинцев // Технологии в электронной промышленности. – 2010. – № 1. – С. 48–50.

14. Технологические особенности монтажа Flip-Chip / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, С.С. Волкенштейн, Д.В. Барбарчук // Силовая электроника. – 2010. – № 4. – С. 78–82.

15. Ланин, В.Л. Формирование микросварных соединений в интегральных схемах контактной микросваркой / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Технологии в электронной промышленности. – 2010. – № 7. – С. 54–58.

16. Ланин, В.Л. Термозвуковое присоединение медной проволоки к контактными площадкам / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2011. – № 3. – С. 132–137.

17. Ланин, В.Л. Мониторинг процесса ультразвуковой микросварки методом частотно-временного анализа вибраций инструмента / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – № 5. – С. 52–56.

18. Ланин, В.Л. Настройка ультразвуковых колебательных систем микросварки соединений в электронике / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов, Н.В. Федоров // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – № 6. – С. 66–70.

19. Новое поколение установок ультразвуковой микросварки / Г.Ф. Ковальчук, И.Б. Петухов, В.Л. Ланин, В.В. Шевцов, Л.Г. Драгилев, А.А. Лавринович // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – № 8. – С. 36–40.

20. Ланин, В.Л. Оптимизация параметров ультразвуковых преобразователей повышенной частоты / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Компоненты и технологии. – 2012. – № 3. – С. 124–128.

21. Волкенштейн, С.С. Цифровая видеорегистрация быстропротекающих процессов / С.С. Волкенштейн, И.Б. Петухов, А.А. Хмыль // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 2 – С. 22–24.

22. Ланин, В.Л. Оптимизация параметров ультразвуковых преобразователей для микросварки / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 3.– С. 86–89.

23. Веревкин, А.Т. Расчетно-аналитический метод определения размеров контактных площадок на кристаллах / А.Т. Веревкин, И.Д. Балашев, И.Б. Петухов // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 5. – С. 90–92.

24. Ланин, В.Л. Проблемы формирования микросварных соединений с повышенной плотностью монтажа / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Компоненты и технологии. – 2014. – № 2. – С. 76–78.

25. Ланин, В.Л. Формообразование проволочных соединений повышенной плотности в изделиях электронной техники / В.Л. Ланин, И.Б. Петухов // Технологии в электронной промышленности. – 2014. – № 2. – С. 145–148.

#### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

26. Петухов, И.Б. Оптимизация параметров пьезокерамических излучателей ультразвуковых преобразователей для микросварки проволочных выводов / И.Б. Петухов // Приборостроение–2012: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 ноября 2012 г. / Минск, 2012. – С. 349–351.

27. Петухов, И.Б. Многофункциональные технологические системы установок микросварки проволочных и ленточных выводов / И.Б. Петухов // Прецизионное оборудование и технологии производства изделий микро- и радиоэлектроники: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17 октября 2012 г. / Минск, 2012. – С. 73–75.

28. Цифровой видеоконтроль прецизионных устройств СТО / С.С. Волкенштейн, В.М. Мазаник, Т.Е. Мазовка, И.Б. Петухов, В.В. Шевцов // Прецизионное оборудование и технологии производства изделий микро- и радиоэлектроники: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 17 октября 2012 г. / Минск, 2012. – С. 91–93.

29. Методика расчета и моделирование пьезокерамических излучателей ультразвуковых преобразователей для микросварки проволочных выводов / В.Л. Ланин, Г.Ф. Ковальчук, И.Б. Петухов, С.Б. Школык // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ): материалы 14-й Междунар. науч.-практ. конф., Украина, Одесса, 27–31 мая 2013 г. / Одесса, 2013. – Т. 2. – С. 76–79.

30. Lanin, V.L. Low Temperature Au and Cu Wire Bonding using High Frequency Ultrasonic / V.L. Lanin, I.B. Petuchov // Proceeding of the 18th International

Conf. ELECTRONICS 2014, Lithuania, Palanga, 16–18 June 2014 / Palanga, 2014. – P. 47–50.

### **Тезисы докладов на научных конференциях**

31. Петухов, И.Б. Повышение надежности присоединения выводов при сборке интегральных схем с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты / И.Б. Петухов // Приборостроение–2009: материалы 2-й Международ. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 ноября 2009 г. / Минск, 2009. – С. 305–306.

32. Петухов, И.Б. Ультразвуковой генератор с расширенным диапазоном частот для современных установок микросварки / И.Б. Петухов, В.Л. Ланин // Приборостроение–2010: материалы 3-й Международ. науч.-техн. конф., Минск, 10–12 ноября 2010 г. / Минск, 2010. – С. 110–111.

33. Скоростная видеосъемка формирования шарика в установках термозвуковой микросварки / В.Л. Ланин, В.С. Томаль, И.Б. Петухов, С.С. Волкенштейн // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ): материалы 11-й Международ. науч.-техн. конф., Украина, Одесса, 24–28 мая 2010г. / Одесса, 2010. – Т. 2. – С. 43.

34. Lanin, V.L. Modeling of Ultrasonic Microwelding System by Finite Element Method / V.L. Lanin, I.B. Petuchov, D.N. Buchalko // Proceeding Electronics System Integration Technology Conf. ESTC 2010, Berlin, 13–16 September / Berlin, 2010. – P. 1/3–2/3.

35. Выбор частоты ультразвуковых колебаний при микросварке выводов в смарт-картах / В.Л. Ланин, Г.Ф. Ковальчук, И.Б. Петухов, С.Б. Школык, Д.Н. Бухалко // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ): материалы 12-й Международ. науч.-техн. конф., Украина, Одесса, 23–27 мая 2011/ Одесса, 2011. – С. 260.

36. Система диагностики ультразвуковых преобразователей для микросварки / И.Б. Петухов, Н.В. Федоров, Е.М. Парахонько, В.К. Саевич // Приборостроение–2011: материалы 4-й Международ. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 ноября 2011 г. / Минск, 2011. – С. 133–134.

37. Система ультразвуковой микросварки с контролем деформации проводников / В.Л. Ланин, Г.Ф. Ковальчук, И.Б. Петухов, С.Б. Школык // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ): материалы 13-й Международ. науч.-техн. конф., Украина, Одесса 4–8 июня 2012 г. / Одесса, 2012. – С. 219.

**Авторские свидетельства, патенты на изобретения и полезные модели**

38. Устройство для образования шарика при микросварке: а.с. 1289004 СССР, МПК В23К 11/ 04 / В.М. Головин, И.Б. Петухов, А.П. Рыдзевский, В.И. Басенко, И.П. Яковлев; заявитель предприятие п/я Р6495. – № 3907017; заявл. 10.06.1985; опубл. 08.10.1986 // Официальный бюл. № 33 / Федеральная служба РФ по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1986. – С. 35.

39. Устройство для образования шарика при микросварке: а.с. 1446784 СССР, МПК В23К 11/ 04 / В.М. Головин, И.Б. Петухов, В.И. Басенко, А.П. Рыдзевский; заявитель предприятие п/я Р6495. – № 4222324; заявл. 16.04.1987; опубл. 23.08.1988 // Официальный бюл. № 23 / Федеральная служба РФ по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1988. – С. 37.

40. Устройство для образования шарика при микросварке: пат. 1580692 РФ, МПК В23К 11/ 24 / В.М. Головин, И.Б. Петухов; заявитель предприятие п/я Р6495. – № 4612790; заявл. 06.12.1988; опубл. 25.03.1993 // Официальный бюл. № 9 / Федеральная служба РФ по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 1993. – С. 43.

41. Широкодиапазонный ультразвуковой генератор с автоматической настройкой на резонансную частоту пьезопреобразователя: пат. 8780 Респ. Беларусь, МПК Н03J 7/00, В23К 1/06 / В.Л. Ланин, В.В. Нестерович, И.Б. Петухов, С.Б. Школык; заявитель Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБТЭМ-СО». – № 20120458; заявл. 03.05.2012; опубл. 30.12.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. Центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 6. – С. 258.

## РЭЗІЮМЭ

### Петухоў Ігар Барысавіч

#### Тэхналогія і абсталяванне для тэрмагукавай мікразваркі ў вырабах электроннай тэхнікі з высокай шчыльнасцю міжзлучэнняў

**Ключавыя словы:** тэрмагукавая мікразварка, ультрагукавы пераўтваральнік, ультрагукавы генератар, фарміраванне шарыка, шчыльнасць мантажу.

**Мэта працы:** распрацоўка тэхналагічных працэсаў і абсталявання для тэрмагукавай мікразваркі, метадаў і сродкаў, уключаючы прыстасаванні фарміравання шарыка на дроце малога дыяметра, ультрагукавыя сістэмы павышанай частаты, апаратныя сродкі кантролю параметраў ультрагукавых пераўтваральнікаў, якія забяспечваюць узнаўляльнасць якасці мікразварных злучэнняў у вырабах электроннай тэхнікі з высокай шчыльнасцю злучэнняў

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** упершыню распрацавана тэхналогія тэрмагукавай мікразваркі метадам «шарык-клін» для аўтаматычнай зборкі модуляў пластыкавых карт на гнуткім палімерным носьбіце пры паніжанай тэмпературы (120–140 °С) з выкарыстаннем ультрагукавых сістэм павышанай частаты і вызначаны аптымальныя рэжымы мікразваркі. Распрацаваны разлікова-аналітычны метады і метадыка узгаднення састаўных частак ультрагукавай вагальнай сістэмы; распрацаваны алгарытм аўтаматычнай настройкі ультрагукавога генератара на рэзанансную частату ультрагукавога пераўтваральніка ў дыяпазоне частот ад 51 да 120 кГц. Распрацаваны разлікова-аналітычны метады ацэнкі мінімальнага памераў кантактных пляцовак пры зборцы вырабаў электроннай тэхнікі з высокай шчыльнасцю мантажу. Вызначаны заканамернасці фарміравання шарыка на канцы залатога дроту электраіскравым спосабам і праведзена колькасная ацэнка энергіі разраду пры фарміраванні шарыка. Упершыню выкарыстана хуткасная лічбавая відэаздымка працэсу фарміравання шарыка для даследавання і аптымізацыі рэжымаў аплаўлення дроту малога дыяметра ад 17 да 25 мкм.

**Ступень выкарыстання:** распрацаванае абсталяванне ўкаранёна на трох прадпрыемствах Рэспублікі Беларусь і многіх прадпрыемствах Расіі, СНД і далёкага замежжа (Кітай, Індыя, Малайзія, Пакістан), што дазволіла павысіць якасць і выхад годных вырабаў, зэканоміць дэфіцытныя матэрыялы, павялічыць прадукцыйнасць працы, забяспечыць экалагічную чысціню вытворчасці, атрыманыя вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс БДУІР.

**Вобласць прымянення:** вытворчасць вырабаў электроннай тэхнікі і інтэгральных схем.



**Петухов Игорь Борисович****Технология и оборудование для термозвуковой микросварки в изделиях электронной техники с высокой плотностью межсоединений**

**Ключевые слова:** термозвуковая микросварка, ультразвуковой преобразователь, ультразвуковой генератор, формирование шарика, плотность монтажа.

**Цель работы:** разработка технологических процессов и оборудования для термозвуковой микросварки, методов и средств, включая устройства формирования шарика на проволоке малого диаметра, ультразвуковые системы повышенной частоты, аппаратные средства контроля параметров ультразвуковых преобразователей, обеспечивающие воспроизводимость качества микросварных соединений в изделиях электронной техники с высокой плотностью соединений.

**Полученные результаты и их новизна:** впервые разработана технология термозвуковой микросварки методом «шарик–клин» для автоматической сборки модулей пластиковых карт на гибком полимерном носителе при пониженной температуре (120–140 °С) с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты и определены оптимальные режимы микросварки. Разработан расчетно-аналитический метод и методика согласования составных частей ультразвуковой колебательной системы; разработан алгоритм автоматической настройки ультразвукового генератора на резонансную частоту ультразвукового преобразователя в диапазоне частот от 51 до 120 кГц. Разработан расчетно-аналитический метод оценки минимальных размеров контактных площадок при сборке изделий электронной техники с высокой плотностью монтажа. Определены закономерности формирования шарика на конце золотой проволоки электроискровым способом и проведена количественная оценка энергии разряда при формировании шарика. Впервые использована скоростная цифровая видеосъемка процесса формирования шарика для исследования и оптимизации режимов оплавления проволоки малого диаметра от 17 до 25 мкм.

**Степень использования:** разработанное оборудование внедрено на трех предприятиях Республики Беларусь и многих предприятиях России, СНГ и дальнего зарубежья ( Китай, Индия, Малайзия, Пакистан), что позволило повысить качество и выход годных изделий, сэкономить дефицитные материалы, увеличить производительность труда, обеспечить экологическую чистоту производства, полученные результаты внедрены в учебный процесс БГУИР.

**Область применения:** производство изделий электронной техники и интегральных схем.

**SUMMARY**

**Petuhov Igor Borisovich****Technology and the equipment for thermosonic microbonding in products of electronics with the high density of interconnections**

**Keywords:** Thermosonic microbonding, the ultrasonic transducer, the ultrasonic generator, ball forming, packaging density.

**Objective:** Development of technological processes and the equipment for thermosonic microbonding, methods and tools, including devices of ball formation on a wire of small diameter, ultrasonic systems of the raised frequency, software of control parameters of the ultrasonic transducers, ensure of micro connections providing reproducibility in products of electronics with the raised density of connections.

**Results and their novelty:** for the first time thermosonic ball bonding technology was developed for automatic assembly of plastic cards modules with the flexible polymeric carrier at the lowered temperature (120-140 °C) with using of raised frequency ultrasonic systems and optimal modes of microbonding were defined. The design-analytical method of calculation and components matching of ultrasonic vibration system was developed. The algorithm of automatic tuning of the ultrasonic generator on resonant frequency of the ultrasonic transducer in a range of frequencies from 51 to 120 kHz was developed. The design-analytical method of an estimation of the minimum sizes of contact pads was developed for assembly products of electronics with the raised density of connections. Regularity of ball formation on the end of a gold (copper) wire was defined using electric spark and the quantitative estimation of energy at ball formation. For the first time the high-speed digital video shooting of process ball formation for research and optimization melting modes a small diameter wire from 17 to 25 microns was used.

**Efficiency:** the developed equipment was introduced at 3 enterprises of Byelorussia and many enterprises of Russia, the CIS and the foreign countries (China, India, Malaysia, Pakistan) that has allowed to raise quality and yield, to increase labour productivity, to provide ecological cleanliness of the manufacture. The received results have been introduced in the educational process of BSUIR.

**Field of application:** electronic devices and integrated circuits production.

*Научное издание*

**Петухов Игорь Борисович**

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕРМОЗВУКОВОЙ  
МИКРОСВАРКИ В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ  
С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

---

Подписано в печать . . . 2015.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. . .
Уч.-изд. л. . .	Тираж 60 экз.	Заказ.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/ 238 от 24.03.2014,  
№2/ 113 от 07.04.2014, №3/ 615 от 07.04.2014  
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
220013, Минск, П. Бровки, 6