

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
КОМПЛЕКСЫ  
ИНТЕГРИРОВАННЫХ  
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
КОМПЛЕКСЫ  
ИНТЕГРИРОВАННЫХ  
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Под редакцией  
академика НАН Беларуси  
А. П. Достанко

Минск  
«Беларуская навука»  
2016

УДК 621.382

**Технологические** комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники / А. П. Достанко [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2016. – 251 с. – ISBN 978-985-08-1993-2.

Рассмотрены и обобщены результаты исследований и разработок в области создания и функционирования современных технологических комплексов интегрированных процессов производства изделий электроники, начиная от очистки поверхности подложек ультразвуком, СВЧ-плазмохимической обработки, магнетронного электронно-лучевого и импульсного лазерного формирования структур и состава слоев, высокочастотного локального нагрева, диффузионной сварки, а также интегрированного контроля микро- и наноструктур.

Предназначена для инженерно-технических работников предприятий электронной и других отраслей промышленности, специалистов научно-исследовательских институтов, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов технических вузов.

Табл. 18. Ил. 196. Библиогр.: 263.

*Рекомендовано к изданию Советом БГУИР, протокол № 7 от 3 апреля 2015 г.*

**А в т о р ы:**

А. П. Достанко, С. М. Аваков, О. А. Агеев, М. П. Батура, С. В. Бордусов,  
Д. А. Голосов, В. Н. Джуплин, С. М. Завадский, О. В. Клим, В. Л. Ланин,  
С. И. Мадвейко, С. Н. Мельников, И. Б. Петухов, Г. Е. Ретюхин, А. М. Русецкий,  
Д. С. Титко, В. С. Томаль, Г. А. Трапашко, Д. И. Чередниченко, С. Б. Школык

**Р е ц е н з е н т ы:**

академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор *В. А. Лабунюв*,  
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук,  
профессор *Ф. И. Пантелеенко*

**ISBN 978-985-08-1993-2**

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2016

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих десятилетий мировыми тенденциями в области науки, техники и технологий являются микро- и наноминиатюризация и интеграция электронных систем при непрерывном совершенствовании их технических характеристик и использования новых материалов. Постоянно возрастающая потребность в использовании изделий электроники во всех сферах жизнедеятельности человека ставит перед разработчиками задачу создания технологических комплексов интегрированных процессов производства изделий электроники, способных на базе комбинированных «мокрых» и «сухих» технологических процессов производить изделия, содержащие все большее количество микро- и наноразмерных активных и пассивных компонентов наряду с расширением их функциональных характеристик.

Современная электронная промышленность, по ряду причин, ориентирована на многономенклатурное мелкосерийное производство изделий. Такая ориентация, в свою очередь, выдвигает специальные требования и к технологическому оборудованию, требуя быстрой переналадки оборудования и его многофункциональности, преемственности технологий. На сегодняшний день востребованы технологические комплексы: не энергоемкие, быстро переналаживаемые, многофункциональные, надежные в работе и программно-управляемые. Зарубежное оборудование имеет высокую стоимость, требует наличия особых условий эксплуатации, оригинальных материалов, высококвалифицированного обслуживающего персонала. Высокая цена оборудования, дорогостоящее обслуживание, отсутствие отечественных материалов-аналогов, являются сдерживающими факторами для потребителей в странах СНГ к закупке современного оборудования у ведущих мировых производителей.

В монографии обобщены результаты разработок и исследований авторов, работающих в Республике Беларусь (УО «БГУИР», ОАО «ПЛАНАР-СО», ОАО «КБТМ-ОМО», НИИ ОАО «Оптическое станкостроение и вакуумная техника») и Российской Федерации (Институт нанотехнологий электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог)) в области технологических комплексов для производства изделий электроники, начиная от подготовки поверхности подложек с помощью ультразвуковых процессов очистки, СВЧ-плазмохимической обработки, магнетронного нанесения слоев металлов, сплавов и диэлектриков, электронно-лучевого и импульсного

лазерного формирования структуры и состава слоев, высокочастотного локального нагрева при формировании контактных соединений, лазерной микрообработки и диффузионной сварки в производстве микроэлектромеханических систем, а также интегрированного контроля топологии микро- и наноструктур в изделиях электроники.

Кластерные нанотехнологические комплексы, обладая высокими технологическими аналитическими возможностями, являются модульной платформой для внедрения групповых локальных технологий получения нанокристаллических материалов для микроэлектромеханических систем импульсным лазерным, электронно-лучевым и плазменным осаждением, исследования их структуры и электрофизических свойств. Метод лазерного осаждения, используемый в ряде кластерных нанотехнологических комплексов, позволяет управлять большим количеством технологических параметров, что обеспечивает возможность в широких пределах влиять на электрофизические, физико-химические, механические и структурные параметры функциональных материалов.

Приведенные в монографии научные и практические результаты получены при выполнении Государственной программы научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» в 2011–2015 гг., гранта БРФФИ – РФФИ с Институтом нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (РФ), а также Государственной научно-технической программы «Микроэлектроника» (подпрограмма «Электронное машиностроение» 2011–2015 гг.).

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ С МИКРОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

### **1.1. Методы и устройства удаления загрязнений с микропрофильных поверхностей**

Выбор аппаратуры и моющих сред для ультразвуковой очистки (УЗО) зависит, прежде всего, от вида удаляемых загрязнений. В ультразвуковом (УЗ) поле происходит механическое разрушение пленки загрязнений под действием кавитации, и одновременно ускоряется процесс химического взаимодействия моющей жидкости с загрязнением под воздействием акустических течений. Классификацию загрязнений проводят по трем основным признакам [1]: способности противостоять воздействию микроударных нагрузок; прочности связи пленки загрязнений с очищаемой поверхностью; характеру химического взаимодействия с моющей жидкостью.

По первому признаку загрязнения подразделяются на кавитационно стойкие и кавитационно нестойкие, по второму – на прочно и слабо связанные с очищаемой поверхностью, по третьему – на химически взаимодействующие и не взаимодействующие с моющей жидкостью. Следует отметить, что классификация загрязнений по характеру взаимодействия с моющей жидкостью достаточно условна, так как всегда можно подобрать такой химический состав жидкости таким, что загрязнение будет вступать с ней в химическую реакцию. Поэтому под средой, химически взаимодействующей с загрязнением, понимают такую жидкость, которая, удаляя загрязнение с поверхности, не вступает в химическую реакцию с материалом очищаемого изделия. Если такое взаимодействие наблюдается, то оно протекает гораздо медленнее, чем процесс удаления пленки загрязнений, и не сопровождается повреждением детали и изменением физико-механических свойств материала.

Любое загрязнение можно охарактеризовать совокупностью вышеперечисленных признаков в различных сочетаниях. Например, тонкие жировые пленки на металлической поверхности, когда их очистка производится в воде, относятся к числу кавитационно стойких, слабо связанных с очищаемой поверхностью, химически не взаимодействующих с моющей жидкостью. Поэтому УЗО таких пленок в воде неэффективна и для обеспечения высококачественной очистки необходимо применить химически активную моющую жидкость, а параметры УЗ-поля подбирать такие, которые обеспечивали бы образование интенсивных акустических течений.

Для изделий электроники и электронно-оптических изделий загрязнения являются следствием сборочно-монтажных процессов и подразделяются на

пленочные полярные, неполярные и твердые частицы [2]. Удаление таких загрязнений требует оптимизации параметров УЗ-воздействия и соответствующего выбора моющей жидкости. Перечень наиболее распространенных загрязнений и их классификация по характерным признакам приведены в табл. 1.1.

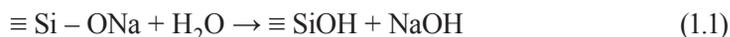
Таблица 1.1. Классификация и свойства загрязнений

Виды загрязнений	Свойства загрязнений	
Кавитационно нестойкие	Пыль, шлам после травления	Слабо связаны с поверхностью, химически не взаимодействуют с моющей жидкостью
	Неполярные загрязнения в виде масел, паяльных масок	Прочно связаны с очищаемой поверхностью, химически не взаимодействуют с моющей жидкостью
	Лаковые пленки, краски	Прочно связаны с поверхностью, химически взаимодействуют с моющей жидкостью
	Продукты коррозии Полярные загрязнения в виде остатков флюсов	Прочно связаны с поверхностью, химически взаимодействуют с агрессивными жидкостями
Кавитационно стойкие	Полировальные пасты	Слабо связаны с поверхностью, химически взаимодействуют с моющей жидкостью
	Оксидные пленки, нагар, смолистые осадки, канифоль, припойная паста	Прочно связаны с поверхностью, химически не взаимодействуют с моющей жидкостью
	Жировые пленки, отпечатки пальцев	Прочно связаны с поверхностью, химически взаимодействуют с моющей жидкостью

Классификация загрязнений позволяет определить области применения УЗО. Если загрязнение прочно связано с очищаемой поверхностью, химически не взаимодействует с моющей жидкостью и его кавитационная стойкость равна или превосходит кавитационную стойкость материала детали, например пригары формочной земли на поверхности литых алюминиевых деталей, то для удаления таких загрязнений нельзя рекомендовать применение УЗО. Приведенный перечень загрязнений характерен для большинства типов оптических модулей (ОМ) и электронных модулей (ЭМ). Значение классификации загрязнений состоит в том, чтобы определить, по какому из признаков легче удалять их с поверхности. Определив этот признак, можно правильно выбрать технологию УЗО (моющие среды и параметры звукового поля).

С поверхности оптических изделий (ОИ) в основном подлежат удалению два основных вида загрязнений: отпечатки пальцев, пыль. В состав отпечатков пальцев входят соли неорганических кислот, жирные кислоты и аминокислоты, высокомолекулярные соединения и вода. Характер взаимодействия отпечатков пальцев с поверхностью стекла сложный. Он включает простое механическое сцепление, межмолекулярное и химическое взаимодействие, вследствие чего удаление отпечатков пальцев требует разработки специальных моющих растворов. Пыль в основном механически связана с поверхностью стекла и удаляется в моющих растворах под воздействием ультразвука.

При взаимодействии стекла с водными растворами происходит два вида реакций: выщелачивание и селективное удаление растворимых компонентов стекла



и разрушение кремниевого структурного каркаса стекла



При этом на стекле образуется коррозионный слой, толщина которого зависит от состава стекла и условий воздействия на него раствора.

Кроме этого, с поверхности оптических деталей должны удаляться блокировочные смолы на основе пека соснового и канифоли по РТМ 3-72-70, лаки на основе фенолформальдегидной смолы по ГОСТ 18694-80, смазочно-охлаждающие жидкости типа масла приборного МВП по ГОСТ 1805-76, следы полирита по ТУ 48-4-244-87, стекольного шлама с поверхности химически стойких и части номенклатуры нестойких марок бесцветных стекол в соответствии с ГОСТ 13659-78 и цветных стекол в соответствии с ГОСТ 9411-91 после операций полирования, центрирования и фасетирования.

Разрушение поверхностных пленок в жидкости под воздействием ультразвука происходит благодаря кавитации и акустическим течениям. При очистке контактным методом, когда УЗК возбуждаются в самом изделии, определенную роль могут играть знакопеременные напряжения, возникающие в пленке загрязнений при изгибных колебаниях и способствующие отслаиванию пленки, если ее усталостная прочность незначительна.

Интенсивность кавитации, скорость и характер акустических течений, величина радиального давления и амплитуда колебаний изделий зависят от частоты и интенсивности УЗ-поля, физических свойств жидкости и в особенности – от ее температуры. Разрушение, отделение и растворение пленки загрязнений при УЗО происходят благодаря совместному действию химически активной среды и факторов, возникающих в жидкости в УЗ-поле [1, 3].

Выбор моющих сред определяется видом загрязнения, материалом, из которого изготовлена очищаемая деталь, ее конструктивными особенностями, а также оптимальными условиями формирования кавитационной области с регулируемой эрозионной активностью. Для очистки полупроводниковых и электровакуумных изделий, а также деталей с гальваническими покрытиями используют органические растворители (трихлорэтилен и др.). Эти растворители можно легко регенерировать, они имеют высокое давление пара, что исключает возможность повреждения полупроводниковых элементов и покрытий вследствие микроударных нагрузок. При очистке в органических растворителях не требуется подвергать детали защите от коррозии, облегчается сушка изделий после очистки.

Однако органические растворители не следует применять для удаления пленок, имеющих высокую кавитационную стойкость, химически не взаимо-

действующих с моющей жидкостью (полировальные пасты, смазка после прокатки). Для очистки от подобных загрязнений выгоднее использовать водные щелочные или нейтральные растворы с добавкой поверхностно-активных веществ, так как в этих растворах при одинаковой акустической энергии формируется кавитационная область с более высокой эрозионной активностью, чем в органических растворителях, и разрушение пленки загрязнений протекает в водных растворах более эффективно.

Для ЭМ после монтажа компонентов важно удалять остатки канифольных флюсов, содержащие абиетиновую кислоту, активированных флюсов, содержащие салициловую или другие органические кислоты, чтобы исключить процессы деградации контактных соединений [4]. Продолжительность УЗО колеблется от нескольких секунд до 15 мин при мощности 250 Вт и зависит от вида загрязнения и количества загрязнений на единице площади поверхности, подвергаемой очистке [5]. Если количество загрязнений на поверхности изделия превышает 200 мг/м<sup>2</sup>, то УЗО целесообразно сочетать с химическими методами обезжиривания [6], используя очистку в УЗ-поле на конечной стадии удаления пленки загрязнений для получения высокого качества очистки поверхности при плотности мощности до 10 Вт/л.

При пульсациях кавитационных пузырьков на пленку загрязнений воздействуют динамические нагрузки. Кавитационные пузырьки производят микроударное разрушение поверхностной пленки. Микроударные нагрузки характеризуются резким возрастанием давлений до значительной величины, за которым следует столь же быстрое уменьшение нагрузки. Распределение напряжений, вызванных такими нагрузками, отличается локальностью и сильной неравномерностью, что приводит к появлению в пленке загрязнений трещин, а также следов эрозии, которые наблюдаются на поверхности пленки в виде точечных кратеров. Захлопывающиеся кавитационные полости могут создавать локальные давления до 50 МПа и тепловые поля до 6000 К [7–9].

По критерию технологических возможностей удаления загрязнений кавитационные полости предложено классифицировать на захопывающие и пульсирующие [10]. Первые, размером порядка 10<sup>-6</sup> м, создают кавитационное давление в жидком объеме и микроударные нагрузки, а вторые – микропотоки и ускоряют конвективную диффузию. Увеличение конвективной диффузии в кавитационных полях приводит к ускорению удаления загрязнений со сложнопрофилированных поверхностей, например, печатных плат электронных модулей с плотным монтажом [11].

Повышать эрозионную активность моющей жидкости следует лишь в тех случаях, если необходимо удалять пленки с высокой кавитационной стойкостью, прочно связанные с очищаемой поверхностью и химически не взаимодействующие с моющей жидкостью. Однако необходимо учитывать, что микроударному разрушению может подвергнуться не только пленка загрязнений, но и очищаемый материал. Установлено, что кавитационные пузырьки могут пульсировать на очень близких расстояниях от поверхности, примерно до десятков нм

[12]. Поэтому при удалении загрязнений, прочно связанных с очищаемой поверхностью, в ряде случаев проводят очистку в несколько этапов, снижая интенсивность кавитации по мере разрушения пленки загрязнений. Пульсирующие пузырьки в основном не создают на границе жидкость – твердое тело значительных микроударных нагрузок [13].

Известны три возможных механизма разрушения поверхностных пленок пульсирующими кавитационными пузырьками: отслоение, струйная очистка, эмульгирование [14]. Характер этих процессов во многом зависит от критических размеров кавитационных пузырьков [15]. Отслоение пленок пульсирующими пузырьками подробно изучено с помощью высокоскоростной киносъемки. Объектом исследований были стеклянные пластинки с нанесенным на их поверхность слоем канифоли с добавлением сажи. Полученные кинофрагменты позволили установить следующий механизм разрушения пленок: пульсирующий пузырек «прилипает» к поверхности пластинки и к внутренней поверхности отслоившейся пленки, как это схематично показано на рис. 1.1, а. При интенсивных колебаниях пузырька на пленку начинают действовать силы, отрывающие ее от поверхности пластинки. Если силы сцепления пленки с поверхностью превосходят прочность самой пленки, то свободный кусочек ее отрывается и уносится микропотоками вблизи межфазной границы раздела сред (рис. 1.1, б). Если же прочность пленки превосходит силы сцепления, то пленка отслаивается с поверхности. Некоторые пузырьки после многократных пульсаций захлопываются с большой скоростью, и в этом случае пленка загрязнений разрушается аналогично случаю, рассмотренному для кавитирующего пузырька.

Иной механизм разрушения под действием пульсирующих пузырьков при удалении тонких пленок со слабой адгезией к поверхности, например, слоя туши на пластинке из органического стекла. Пульсирующий пузырек, перемещаясь по очищаемой поверхности, оставляет в пленке загрязнений «расчищенные дорожки», направление которых совпадает с траекторией движения пузырька. В этом случае разрушающее действие кавитационных пузырьков можно объяснить ударами струек жидкости о поверхность образца при делении крупных неустойчивых пузырьков на более мелкие. Пульсирующие пузырьки,

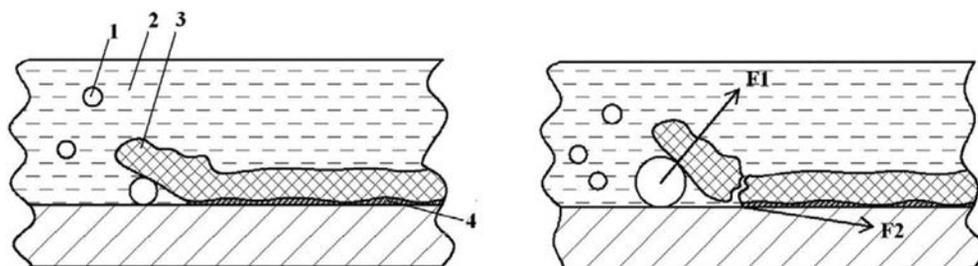


Рис. 1.1. Схема отслоения пленки кавитационным пузырьком: а – «прилипание» пузырька к пленке; б – разрыв пленки на куски

разрушая пленки со слабой адгезией к поверхности, почти не оказывают воздействия на пленки, прочно связанные с очищаемой поверхностью.

С помощью скоростной киносъемки показано, что очистка при воздействии ультразвука в нейтральной среде от пленок с высокой адгезией (расплавленная канифоль на разогретом органическом стекле) не приводит к их разрушению даже при длительной выдержке образца в УЗ-поле [16].

Исследовано эмульгирование вязких пленок в химически нейтральной жидкости. Объектом исследования служили стеклянные пластинки, на одну из сторон которых наносился слой технического вазелина различной толщины. Рабочей жидкостью служила вода. Исследование проводилось визуальным наблюдением через микроскоп и фотографированием процесса УЗО во времени [17]. Механизм разрушения пленки был следующим: газовые пузырьки, имевшиеся в толще пленки, пульсируя в УЗ-поле и перемещаясь под действием акустических течений, увлекали за собой часть окружающего вещества (жира). Перемещение массы пленки приводило к ее разрывам. Одновременно шел другой процесс: кавитационные пузырьки расплывали мельчайшие капли воды на поверхности жировой пленки, обволакивающей газовый пузырек. Поскольку пульсирующий пузырек является своеобразным источником УЗ-колебаний, капельки жидкости с его поверхности могут отбрасываться, дробиться, и наблюдается явление, напоминающее распыление тонкого слоя жидкости на поверхности излучателя.

Газовые пузырьки играют, следовательно, двоякую роль: притягивают капли жидкости за счет микропотоков, а затем дробят и разбрасывают попавшие на их поверхность капли, образуя тонкодисперсные эмульсии. При колебаниях пленки, состоящей из мелких капелек воды и жира, а также мельчайших газовых пузырьков, последние постепенно вытесняются к границе: эмульсия – рабочая среда – пластинка. Вблизи поверхности капли газовые полости при пульсациях создают особо интенсивные фонтанчики брызг, что способствует образованию эмульсии жира в воде.

По мере проникновения водяных капель в толщу жира существенно изменяются физико-механические свойства жировой пленки и уменьшается прочность ее сцепления с поверхностью, что облегчает удаление пленки. Разрушение пленки загрязнений в этом случае начинается в поверхностном слое, и чем толще слой жира, тем труднее удаляется пленка, так как легко деформируемые нижние слои жира играют роль демпфера, препятствующего разрушению пленки кавитационными пузырьками. Очевидно, что и при очень тонкой жировой пленке ее удаление с поверхности будет также затруднено, так как отсутствуют условия для образования капелек жира из-за малого количества оставшихся загрязнений.

В кавитационных исследованиях редко принимается во внимание электрический заряд пузырьков, тогда как большинство из них имеет поверхностный слой заряда, который может играть большую роль в устойчивости зародышей в жидкости [18]. Источник электрических зарядов связан с наличием ионов

растворенных в воде веществ, которые при разрыве жидкости распределяются на противоположных сторонах возникшей полости. Первоначально, когда расстояние между стенками полости межмолекулярного порядка, в результате флуктуационных процессов это распределение отличается от равномерного, и поверхности возникающей полости становятся носителями электрических зарядов противоположных знаков. Рассматривая кавитационную полость как плоский конденсатор, Я. Френкель установил, что напряженность электрического поля  $E$  внутри полости равна  $4\pi\varepsilon\sqrt{\frac{\delta N}{S}}$ , где  $S$  – площадь сечения полости,  $\delta$  – ее толщина,  $N$  – число диссоциированных молекул в единице объема,  $\varepsilon$  – заряд одновалентного иона [19]. Дальнейший рост каверны происходит при сохранении ею сферической формы, и это приводит к уменьшению напряженности поля. Следствием этого предположения является вывод, что электрический разряд может происходить только в первой фазе развития полости, и, если полость с самого начала имеет сферическую форму, постепенно увеличиваясь в размерах, механизм флуктуации, соответствующий созданию электрического поля в каверне, будет неэффективным. В случае УЗ-кавитации вследствие большой скорости изменения давления образование электрических зарядов может быть следствием в основном флуктуационных процессов [20].

При удалении нерастворимых загрязнений в химически нейтральных растворах скорость очистки зависит от интенсивности УЗ-кавитации. При удалении растворимых загрязнений существенную роль играют акустические течения, в особенности вихревые микротоки, возникающие в пограничном слое, которые интенсифицируют поступление свежих порций растворителя к поверхности твердого тела [21, 22]. Уменьшение толщины ламинарного слоя у границы с твердым телом является главным отличием перемешивания жидкости в звуковом поле от любых методов механического перемешивания. Этим можно объяснить эффективное удаление растворимых загрязнений на высоких частотах, когда интенсивность УЗ может быть ниже пороговой и кавитация в жидкости не наблюдается [23].

Для удаления загрязнений субмикронных размеров (менее 100 нм) с поверхности ОД используют интенсивные микротоки, создаваемые в жидких средах на частотах порядка 1 МГц источниками УЗ-мощностью 100 Вт. Гиперзвуковые колебания эффективно удаляют как органические, так и неорганические частицы с поверхностей полупроводниковых пластин и миниатюрных электронных изделий: БИС и СБИС, не повреждая их [24, 25]. Высокочастотный ультразвук эффективен в жидких средах по следующим причинам: длина волны сравнима с размерами частиц, вязкий поверхностный слой тонкий, силы радиационного давления превышают типичные значения сил адгезии частиц к поверхности [26, 27].

Для очистки ЭМ также желательно применять высокочастотный ультразвук, так как полупроводниковые приборы вследствие резонансных явлений

на низких частотах (18–22 кГц) могут выйти из строя при создании интенсивных кавитационных полей в жидких средах [28].

Одновременное применение импульсного модулирования УЗ-поля, дегазации и охлаждения жидкости, повышения статического давления намного превосходит сумму результатов, достигаемых каждым из методов в отдельности, т. е. имеет место существенное неаддитивное сложение эффектов. В результате достигнуто более чем 200-кратное увеличение интенсивности кавитации по сравнению с непрерывным режимом при нормальных условиях. Переход к импульсному режиму вызывает такие качественные изменения как увеличение статического давления, увеличение максимальной энергии импульсов и относительной доли высокоэнергетических импульсов [29].

Для обеспечения качественной очистки поверхности ОМ необходима высокая равномерность УЗ-поля. Обеспечить равномерное воздействие УЗ-поля в жидкости возможно в основном двумя способами. Первый состоит в разработке УЗ-ванн с равномерным полем излучения, создаваемым изгибно-колеблющейся диафрагмой, возбуждаемой системой распределенных магнетострикционных преобразователей, закрепленных попарно в пучностях изгибных колебаний пластины или пьезокерамических преобразователей, укрепленных на стенках тонкостенной ванны в определенном порядке [30]. Второй заключается в разработке специальных устройств, обеспечивающих равномерную очистку с неравномерным полем за счет электрического или механического сканирования поля по поверхности изделий.

Разрушение поверхностных пленок в жидкости под действием ультразвука происходит в результате кавитации и акустических течений, причем основной вклад принадлежит кавитации. В связи с этим обоснована необходимость равномерности кавитационной области. Однако распределение кавитационных пузырьков в кавитационной области в большинстве случаев далеко от равномерного. В жидкой среде количество кавитационных пузырьков существенно превышает число их зародышей. Вокруг захлопывающегося пузырька идет процесс размножения зародышей, в результате чего появляются скопления пузырьков той или иной формы. Наличие таких скоплений существенно нарушает равномерность распределения пузырьков: в скоплениях число их велико, а в пространстве между скоплениями мало или даже равно нулю. Как правило, скопления возникают на границе раздела «жидкость – твердое тело», где всегда в достаточном количестве присутствуют кавитационные зародыши. Часто можно наблюдать скопления кавитационных пузырьков, имеющих форму тяжей, которые исходят из одной точки. Причины образования скоплений такой формы пока не ясны, однако конфигурация тяжей существенно меняется при незначительном изменении рабочей частоты. Отсюда можно предположить, что тяжести связаны с интерференционной структурой ближнего поля излучателя – единственным фактором, сильно реагирующим на незначительные изменения частоты.

Таким образом, достаточно трудно получить в технологическом объеме УЗ-ванны равномерную кавитационную область. В наиболее часто используемых конструкциях дном ванны служит излучающая диафрагма преобразователя ПМС-6-22 [30]. Распределение акустического давления, создаваемого такими системами, крайне неравномерно – до 50 %. В центре ванны над диафрагмой давление принимает максимальное значение и уменьшается к краю мембраны. Иногда для обеспечения равномерности ультразвукового поля на большой площади используют изгибно-колеблющуюся диафрагму, возбуждаемую системой распределенных магнитострикционных преобразователей, припаянных попарно в пучностях изгибных колебаний пластины. Такую конструкцию имеет преобразователь ПМС-38. Однако значение акустического давления над такой системой также имеет максимумы и минимумы. Кроме того, сборка и настройка таких систем чрезвычайно сложна. Таким образом, необходима разработка УЗ-ванн с распределенными по площади малогабаритными преобразователями, обеспечивающими высокую равномерность УЗ-поля.

## **1.2. Ультразвуковые технологические системы для удаления загрязнений**

При УЗ-очистке оптических и электронных изделий основным требованием, предъявляемым к УЗ-технологическим системам оборудования, является высокая равномерность воздействия УЗ-колебаний на изделия. Поэтому для возбуждения УЗ-колебаний используют различное число пакетных пьезоэлектрических преобразователей мощностью (50–100 Вт), закрепленных на боковых стенках и днище ванны в определенном порядке, с параллельным их подключением к генератору. В этом случае эффективность и устойчивость работы преобразователей зависит от ширины полосы преобразования, поскольку в большей степени перекрываются АЧХ отдельных преобразователей, что позволяет скомпенсировать неизбежный разброс их собственных резонансных частот.

Более перспективной является система с распределенными пьезоэлектрическими преобразователями, построение которой аналогично плоской сфазированной антенной решетке СВЧ-диапазона. УЗ-преобразователи установлены в узлах решетки треугольной структуры с длиной стороны кратной  $\lambda/\sqrt{3}$  [31] (рис. 1.2).

Такое расположение пьезоэлектрических преобразователей (ПП) создает наиболее равномерное по площади поле при трехфазном возбуждении за счет суперпозиции УЗ-волн, излучаемых ПП, подключенных к разным каналам. ПП разбиты на три группы – по 4 ПП в каждой группе. Расстояние между центрами в группе кратно длине волны распространяющихся в жидкости УЗ-волн. ПП в каждой группе электрически соединены параллельно и подключены к соответствующим каналам А, В или С УЗ-генератора [32] (рис. 1.3).

Каналы представляют собой транзисторные автогенераторы, выполненные по полумостовой схеме с индуктивной обратной связью по току, работаю-

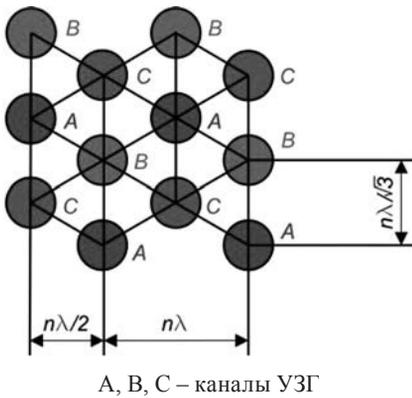


Рис. 1.2. Расположение УЗ-преобразователей

А, В, С – каналы УЗГ

в результате чего сигналы на выходе каналов сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ , а на ПП поступают группы импульсов УЗ-колебаний, сдвинутые по фазе на тот же угол (рис. 1.4). Область наибольшего акустического давления, соответствующая максимальному напряжению на ПП, последовательно перемещается от преобразователя А к В и от В к С (или наоборот при перефазировке каналов) в каждой группе из трех ПП. В результате возникают направленные потоки жидкости из зоны большего акустического давления в зону меньшего. Так как движение областей происходит со сравнительно низкой частотой (100 Гц), то в жидкой среде с определенной вязкостью возникают вихревые макротоки, которые наряду с микропотоками, возникающими в процессе УЗ-воздействия (потоки, возникающие в вязком пограничном слое вблизи препятствий, Шлихтинговское течение, Рэлеевское течение и т. д.), интенсифицируют процессы массопереноса и растворения, а следовательно, и процесс очистки. Поскольку автогенераторы питаются пульсирующим напряжением, из-за нелинейной зависимости параметров пьезоэлементов, наблюдается эффект периодического качания частоты, что дополнительно способствует усреднению

в ключевом режиме. Блок питания каждого канала собран по двухполупериодной схеме выпрямления без фильтрации, за счет чего осуществляется амплитудная и частотная модуляция выходного сигнала частотой 100 Гц. Выходной сигнал представляет собой сумму трех гармонических колебаний с основной частотой  $\omega$  и боковыми частотами  $(\omega+100)$  Гц и  $(\omega-100)$  Гц.

Выпрямители блоков питания каналов через понижающие трансформаторы подключены к соответствующим фазам трехфазной сети переменного

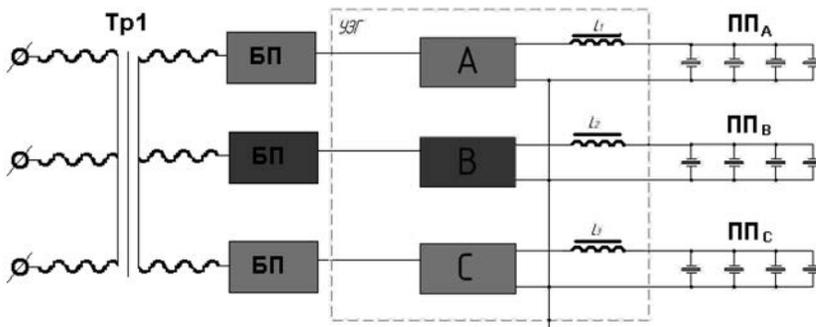


Рис. 1.3. Схема УЗ-генератора: А, В, С – каналы УЗГ;  $L_1, L_2, L_3$  – дроссели согласования; ПП1–ПП12 – пьезоэлектрические преобразователи

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Автоматизированные технологические комплексы удаления загрязнений с микропрофильных поверхностей оптико-электронных изделий</b> .....	5
1.1. Методы и устройства удаления загрязнений с микропрофильных поверхностей ...	5
1.2. Ультразвуковые технологические системы для удаления загрязнений.....	13
1.3. Автоматизированные технологические комплексы удаления загрязнений с микро-рельефных поверхностей оптико-электронных изделий.....	25
Список литературы к главе 1.....	37
<b>Глава 2. Технологические системы «мягкой» СВЧ-вакуумно-плазменной обработки материалов</b> .....	40
2.1. Конструктивные особенности СВЧ-разрядных систем резонаторного типа .....	40
2.2. Особенности возбуждения и поддержания СВЧ-разряда низкого вакуума в плазмотронах с аппликаторами резонаторного типа .....	48
2.3. Схемотехнические решения источников питания СВЧ-магнетронов в составе плазменного технологического оборудования .....	55
Список литературы к главе 2.....	67
<b>Глава 3. Магнетронные системы формирования функциональных слоев в изделиях микроэлектроники</b> .....	71
3.1. Принцип действия и рабочие параметры магнетронных распылительных систем....	71
3.2. Высоковакуумное магнетронное распыление .....	80
3.3. Методы генерации магнетронного разряда при пониженном давлении .....	88
3.4. Самораспыление .....	97
3.5. Ионно-ассистированное магнетронное распыление.....	98
Список литературы к главе 3.....	107
<b>Глава 4. Высокочастотные технологические системы формирования контактных соединений при сборке изделий электроники</b> .....	111
4.1. Методы и устройства ВЧ-нагрева при сборке изделий электроники .....	111
4.2. Технологические модули ВЧ-нагрева в электронике .....	115
4.3. Программное управление температурными профилями ВЧ-нагрева при формировании контактных соединений в изделиях электроники.....	119
Список литературы к главе 4.....	128
<b>Глава 5. Технологические процессы и оборудование для производства микроэлектромеханических систем</b> .....	130
5.1. Диффузионная сварка подложек микроэлектромеханических систем.....	130
5.2. Установка диффузионной сварки МЭМС ЭМ-4044 .....	135

5.3. Лазерная микрообработка подложек СВЧ-модулей.....	140
5.4. Оборудование лазерной микрообработки подложек МЭМС ЭМ-290.....	145
Список литературы к главе 5.....	150
<b>Глава 6. Технологические комплексы контроля топологии микро- и наноструктур ...</b>	<b>151</b>
6.1. Виды контроля в процессах формирования микро- и наноструктур.....	151
6.2. Контроль критических размеров и координат элементов при формировании топологии микро- и наноструктур.....	153
6.3. Контроль на соответствие проектным данным.....	173
6.4. Технология изготовления фотошаблонов с расширенным набором контрольных операций.....	178
Список литературы к главе 6.....	186
<b>Глава 7. Кластерный нанотехнологический комплекс с импульсным лазерным осаждением пленок .....</b>	<b>188</b>
7.1. Характеристики и назначение комплекса.....	188
7.2. Аппаратура контроля параметров нанесенных слоев .....	191
7.3. Физико-химические процессы при лазерной абляции.....	195
7.4. Алгоритм процессов импульсного лазерного осаждения пленок.....	205
7.5. Влияние параметров импульсного лазерного осаждения на свойства пленок.....	216
7.6. Применение нанокристаллических пленок VO <sub>x</sub> в ИК-фотоприемниках, сенсорах и мемристорах.....	235
Список литературы к главе 7 .....	240
<b>Заключение .....</b>	<b>242</b>
<b>Приложение .....</b>	<b>244</b>

Научное издание

**Достанко** Анатолий Павлович  
**Аваков** Сергей Мирзоевич  
**Агиев** Олег Алексеевич и др.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ  
ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Редактор *Т. В. Лантёнок*  
Художественный редактор *И. Т. Мохнач*  
Технический редактор *О. А. Толстая*  
Компьютерная верстка *Ю. А. Агейчик*

Подписано в печать 16.05.2016. Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 20,48. Уч.-изд. л. 15,6. Тираж 120 экз. Заказ 106.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом  
«Беларуская навука». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013.  
Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.