

**УДК 681.5**

**Бессонов Андрей Вячеславович**, студент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

**Барышникова Елизавета Петровна**, студент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

**Научный руководитель** — Соловьёв Владимир Анатольевич, доцент кафедры «Проектирование и технология производства ЭА», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

### **ТРУДНОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВНУТРЕННЕГО МОНТАЖА**

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены технология внутреннего монтажа, преимущества и недостатки её использования. Выделены проблемы, решение которых необходимо для повсеместного применения технологии. Подробно описаны основные этапы технологического процесса и отличия внутреннего монтажа от подобных технологий. Выявлены основные преимущества и недостатки внутреннего монтажа в масштабе производства, а также основные проблемы данной технологии. Найдены решения, способные сделать внутренний монтаж более доступной и используемой технологией. Даны описания этих решений в рамках производства и сделаны выводы по наиболее оптимальному их внедрению.

**Annotation.** In this paper, the technology of embedded die, the advantages and disadvantages of its use are considered. The problems that need to be solved for the widespread use of technology are highlighted. The main stages of the technological process and the differences between embedded die and similar technologies are described in detail. The main advantages and disadvantages of embedded die on a production scale, as well as the main problems of this technology, are revealed. Solutions have been found that can make embedded die a more accessible and usable technology. Descriptions of these solutions within the framework of production are given and conclusions are drawn on the most optimal implementation.

**Ключевые слова:** внутренний монтаж, 3D-компоновка, встраиваемые компоненты, компаунд, адгезив.

**Keywords:** Embedded die, 3D-layout, embedded components, compound, adhesive.

**Введение.** Запросы потребителей электроники на миниатюризацию, повышение плотности компонентов и сохранение рабочих показателей приводят к тому, что уже сейчас в производство активно внедряется внутренний монтаж, который объединяет процессы создания печатных плат и монтажа компонентов. Благодаря этому значительно сокращается цикл производства сборочной ячейки, однако процесс изготовления печатных плат усложняется дополнительными технологическими операциями. При этом платы, изготавливаемые такими методами, требуют новых подходов в проектировании, а также новых возможностей, которыми обладают не все САПРы (системы автоматизированного проектирования), из-за чего проектирование, а также создание технических документов для производства таких плат ограничено. Помимо этого, существуют и другие проблемы, связанные с технологиями внутреннего монтажа, и которые требуют решения. В данной статье представлен ряд актуальных проблем, сдерживающих внедрение внутреннего монтажа в производство, а также решения этих проблем, которые должны сделать данную технологию более доступной.

**Цель работы.** Изучить технологии внутреннего монтажа, их преимущества и недостатки, а также определить проблемы, которые необходимо решить для дальнейшего развития этих технологий.

**Задачи:**

- определить сущность внутреннего монтажа и его особенности;
- выявить преимущества и недостатки внутреннего монтажа в сравнении с другими технологиями сборки;
- изучить актуальные проблемы, возникающие при внедрении технологий внутреннего монтажа в производство и возможные способы их решить.

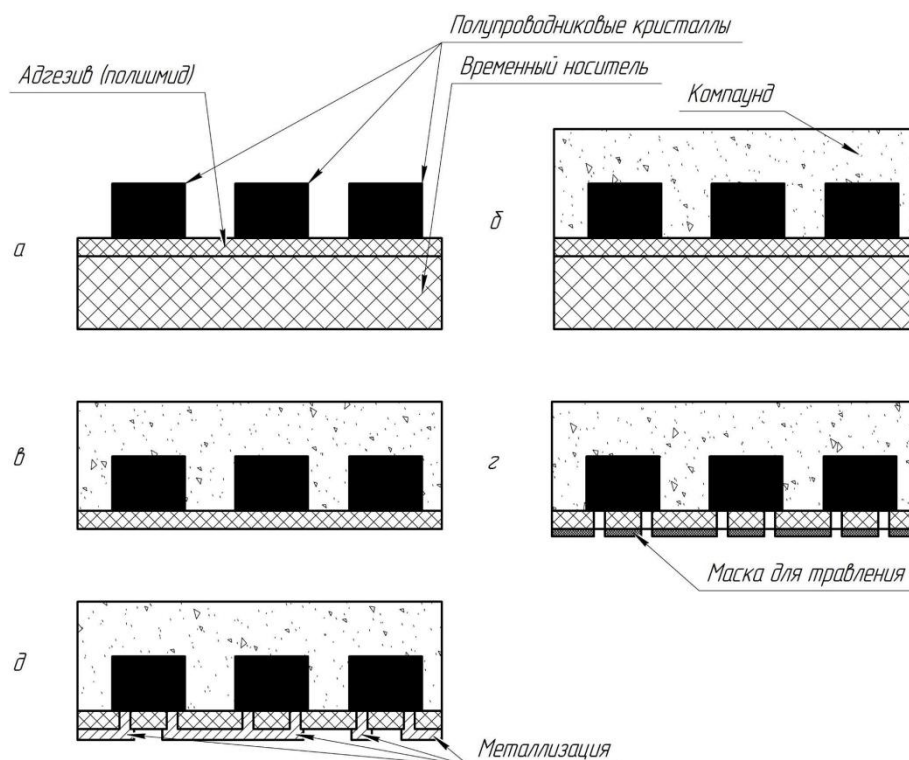
**Концепция внутреннего монтажа, его особенности.** Внутренний монтаж - установка бескорпусных кристаллов (полупроводниковых приборов) во внутренние слои печатной платы. Разработчикам радиоэлектронной

аппаратуры необходимо уместить большое количество функционала в электронную ячейку небольших размеров.

С каждым годом сложность электроники растёт, вместе с ней развивается и тренд на миниатюризацию. Устройства стали более компактными при переходе с выводного монтажа на поверхностный - на одной и той же площади стало возможно разместить большее число компонентов. Сейчас мы дошли до того, что размеры компонентов поверхностного монтажа стали довольно небольшими, сопоставимыми с размерами кристалла соли, и меньше их сделать уже не получится. Для дальнейшей миниатюризации необходим совершенно новый подход - размещение компонентов не на поверхности, а в объёме печатной платы (ПП) [1].

При размещении компонентов в объёме ПП отпадает необходимость в корпусе - защитную функцию будет выполнять сама ПП [2]. Таким образом, на поверхности печатной платы освобождается место для монтажа иных компонентов, которые нельзя разместить в объёме: габаритные компоненты (трансформаторы, источники питания, дроссели, конденсаторы с большой ёмкостью), компоненты с высокой теплоотдачей и тп.

Рассмотрим типовую последовательность действий при изготовлении сборки с использованием технологии внутреннего монтажа (Рисунок 1). Первым шагом на временный носитель с реперными знаками для точного позиционирования при помощи адгезива, например, полиимида, устанавливаются полупроводниковые кристаллы (а). Далее полученная заготовка герметизируется компаундом (б), после застывания которого временный носитель удаляется (в). Затем происходит травление адгезива в местах выводов полупроводниковых кристаллов (г) с последующей металлизацией полученных отверстий и нанесением проводящего рисунка на поверхность (д) [3].



**Рисунок 1** - Этапы сборки с использованием внутреннего монтажа.

**Преимущества и недостатки внутреннего монтажа.** Хотя внутренний монтаж и является не до конца изученной технологией, он уже активно внедряется в производство, что позволяет в его масштабе оценить все плюсы и минусы данной технологии. Одним из главных преимуществ внутреннего монтажа перед другими является существенное повышение интеграции из-за того, что внутренний монтаж позволяет располагать компоненты не только на поверхностях ПП, но и в её внутренних слоях [1]. Благодаря этому уменьшается плотность проводящих структур ПП, а также количество слоёв ПП, и одновременно увеличивается плотность размещения компонентов относительно площади ПП и, соответственно, функциональность. Это позволяет создавать устройства с гораздо меньшими габаритами и отвечает тренду на миниатюризацию.

Поскольку плотность проводников при внутреннем монтаже уменьшается, а значительная часть компонентов располагается внутри ПП, то количество паразитных явлений, таких как емкости и индуктивности, будет значительно ниже [1], что способствует более стабильной работе устройства, а также более точным выходным параметрам. Помимо этого, встраивание компонентов в

основание ПП даёт больше возможностей для теплоотвода в виде радиаторов, микротрубок и систем фазовых переходов, которые также встраиваются в подложку рядом с сильно нагревающимися элементами [1]. Компоненты, находящиеся во внутренней структуре платы, защищены от механических воздействий [2]. Это повышает надёжность модуля, а также его долговечность.

Так как компоненты, помещенные внутрь подложки, не имеют выводов, способных принимать внешние электромагнитные явления и работать в качестве “антенны” [4], такие компоненты практически не подвергаются влиянию данных явлений. Этому благоприятствует и отсутствие операций пайки и сварки в технологическом процессе [1]. Поэтому модули, изготовленные с применением технологии внутреннего монтажа, имеют более высокую стабильность работы, их нельзя взломать или вывести из строя путём воздействия электромагнитных волн.

Благодаря использованию на производстве таких методов, для создания проводящих дорожек, как сухое травление и вакуумное напыление, последние можно получить с более высокими топологическими нормами, чем при использовании “мокрых” методов формирования проводящего рисунка [2]. Данные методы не подразумевают использование опасных химикатов, поэтому являются экологичными, и их использование исключает возникновение кислотных ловушек, которые впоследствии могут разрушить структуру платы и вызвать сбой в работе модуля [5]. Одновременно, проводящий рисунок, выполненный такими методами, получается более однородным и потому обладает улучшенными электрическими параметрами [1].

Поскольку при технологии внутреннего монтажа происходит объединение двух технологических процессов - изготовления печатных плат и монтажа компонентов - снижаются затраты на производство, так как внутренний монтаж позволяет сэкономить на сборке и корпусировании больших интегральных схем, а также на материалах и на энергии [1, 2]. Исчезает промежуточный этап, когда готовые платы передают на линию сборки, возрастает производительность.

Однако, у объединения двух процессов есть и негативные стороны. Хоть

данная технология и увеличивает производительность производства в целом, она делает технологический процесс изготовления модуля более сложным [2]. Некоторые операции исчезают за ненадобностью (например, пайка), но по итогу количество операций становится больше и это может сказаться на качестве модуля.

Помимо этого внутренний монтаж использует методы, требующие не только дорогого оборудования и квалифицированных специалистов, но и определённые затраты на расходные материалы, такие как высокоточные маски, используемые в процессах вакуумного напыления и дорогостоящие токсичные газы, используемые в процессе сухого травления [5].

Главный недостаток внутреннего монтажа перед другими технологиями связан с тем, что после того, как компонент помещён в полость основания платы и загерметизирован там же, его невозможно извлечь, не повредив структуру платы, из-за чего модули, сделанные по данной технологии, не являются ремонтпригодными. При этом, если какой-либо из компонентов окажется неисправным, это автоматически делает неисправным весь модуль, поскольку заменить его нельзя. Поэтому у модулей, изготовленных таким методом повышенная вероятность брака.

Также важной проблемой технологий внутреннего монтажа является возникновение термомеханических напряжений во время нагрева платы. Эти напряжения вызваны различием у материалов, из которых состоит плата, температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) и термической обработкой самой платы при различных технологических операциях. С течением времени термомеханические напряжения способны вывести устройство из строя, разрушить его структуру и расслоить на отдельные слои [6].

Чтобы создать модуль, нужно его сначала спроектировать в САПРе, который способен воссоздать все необходимые части модуля с их параметрами. И здесь можно столкнуться с тем, что не все САПРы способны проектировать модуль с внутренним монтажом, поскольку у него компоненты находятся не на поверхностях модуля, а внутри платы. Проектирование подобных модулей, как

и процесс их производства, сложнее, нежели у обычных модулей с поверхностным монтажом, поэтому на данный момент оно активно развивается вместе с соответствующими программами. Однако, проектирование модулей требует не только более продвинутого САПРа, но и более квалифицированных специалистов.

### **Проблемы технологий внутреннего монтажа и варианты их решения.**

На сегодняшний день существует несколько проблем, препятствующих активному внедрению внутреннего монтажа. Одной из них является фиксация полупроводниковых кристаллов на временный носитель. У данного процесса есть несколько нюансов, вызывающих вопросы.

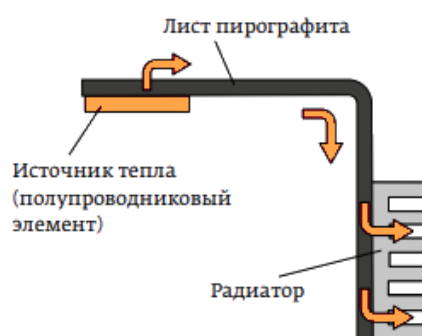
Первый - подбор материала для временного носителя. К нему предъявляются жёсткие требования: хорошая адгезия, устойчивость к высоким температурам и химически агрессивным средам - чтобы выдержать процессы отверждения адгезива и компаунда. Также материал должен иметь ТКЛР (температурный коэффициент линейного расширения) схожий с ТКЛР адгезива и кристалла. В противном случае при изменении температуры возникают напряжения внутри материалов, возможна деформация, из-за которой необходимая точность не может быть достигнута [3].

Второй нюанс заключается в риске повреждения кристалла при удалении временного носителя. В процессе травли носителя химически агрессивная среда может причинить вред кристаллам, но при правильном сочетании реагентов, концентраций и термического режима вероятность подтравливания кристаллов становится близкой к нулю. Существует иной подход решения данной проблемы - покрытие временного носителя тонким слоем водорастворимого хлорида калия перед нанесением адгезива. Для удаления временного носителя будет достаточно поместить заготовку в чистую воду, которая не навредит кристаллам [7].

Чтобы создать электронную ячейку с применением встроенных компонентов, нужно сначала спроектировать её, и главным ограничением в разработке и проектировании микросхем с внутренним монтажом является

функционал САПРов, применяемых для этих целей. Одновременно, поскольку технология предполагает расположение кристаллов внутри основания платы, возникает необходимость других подходов в решении некоторых задач, таких как теплоотвод, создание проводящих структур, которые не будут конфликтовать друг с другом (и с компонентами), соблюдение топологических норм и другие. Не все программы способны решить данные задачи, однако уже сейчас идёт активное развитие САПРов, в том числе под задачи разработки модулей со внутренним монтажом.

Одной из таких задач является создание систем теплоотвода, которые необходимо разместить, задать свойства и промоделировать для выбора оптимального варианта, который в дальнейшем будет реализован в производстве. Например, сейчас одним из вариантов встроенного теплоотвода являются системы на основе листового пирографита, который благодаря высокой теплопроводности и малой толщине позволяет создать проводники тепла от нагреваемых компонентов к радиаторам (Рисунок 1) [8]. Также для охлаждения микросхем используются системы фазовых переходов, охладительные микротрубки, теплопроводные пластины, теплоотводящие отверстия и другие методы, которые можно применить внутри модуля [1, 9].

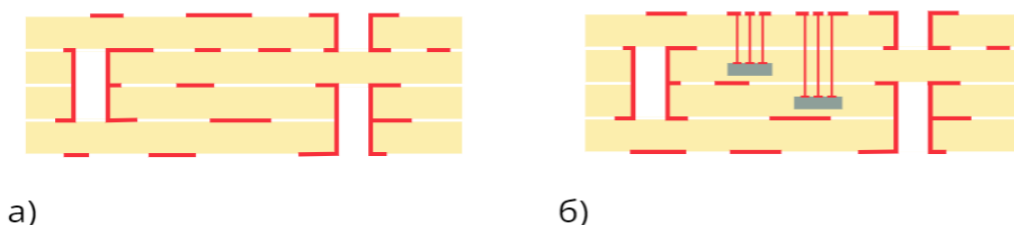


**Рисунок 2** - Система теплоотвода на основе листового пирографита [8].

Так как при проектировании компоненты располагаются не только на поверхностях платы, но и внутри неё, то встаёт вопрос о соблюдении классов

точности в рамках программы. Возникает необходимость проверки правил не только по осям X и Y, но и по оси Z, чтобы избежать ошибок в работе устройства [9]. Помимо этого, некоторые программы не позволяют расположить компонент на определённом расстоянии от поверхности платы, что необходимо в случае разработки микросхем со встроенными компонентами. Параллельно встаёт вопрос о размещении компонентов в так называемых “технологических” слоях, которые не будут контактировать с какой-либо металлизацией [9]. Поскольку встраиваемый компонент обладает определёнными габаритами, их приходится учитывать при создании полости, в которой он находится, и при дальнейшем проектировании.

После расположения компонентов необходимо произвести трассировку платы, сформировав проводящий рисунок на всех её слоях. И тут также возникает загвоздка - чтобы соединить контактные площадки встроенного компонента с рисунком на каком-либо проводящем слое, необходимы переходные отверстия. Однако большинство программ могут формировать эти отверстия только между двумя сигнальными слоями, а контактные площадки компонента могут располагаться не на уровне сигнального слоя (Рисунок 3) [10]. В таком случае приходится создавать отдельные файлы сверловки, которые потом будут использоваться для формирования микроотверстий, соединяющих сигнальный слой с встроенными компонентами.



**Рисунок 3** - Переходные отверстия а) в многослойной печатной плате; б) в модуле со встроенными компонентами.

Когда плата со всеми элементами спроектирована и утверждена, её

необходимо преобразовать в набор файлов, которые будут переданы на производство. Но в случае платы со встроенными элементами, которые будут встраиваться в неё прямо в процессе изготовления, возникает вопрос того, какие именно файлы и с какими данными требуются для данного технологического процесса [9]. В отличие от обычной печатной платы, здесь понадобятся данные о полостях, в которых необходимо расположить компоненты, данные о координатах этих компонентов, данные о переходных отверстиях, которые соединяют контактные площадки встроенных компонентов с проводящими слоями и которые отличаются от типичных переходных отверстий в печатных платах и другие данные, которые нельзя получить в программе, не обладающей соответствующим функционалом, поэтому их приходится формировать в отдельных программах, что усложняет работу проектировщика, увеличивает время, затрачиваемое на проектирование и снижает производительность.

Введение технологии 3D-компоновки элементов безусловно способствует миниатюризации электронных ячеек, но значительно повышает конечную стоимость устройства. От поверхностного монтажа отказаться нельзя, так как суть внутреннего монтажа - освободить место на поверхности ПП. Технологические процессы установки компонентов на поверхность остаются вместе со всеми затратами на них. Для 3D-компоновки необходимо усложнить производственный цикл путём внедрения нового оборудования и найма дополнительных сотрудников, что увеличивает затраты фирмы на выпуск устройства.

Хоть внутренний монтаж и обладает определёнными преимуществами, он может оказаться неэффективной в тех случаях, когда миниатюризация устройства не приносит значительной пользы конечному потребителю. В таких ситуациях, человек, осознавая, что дополнительные затраты на миниатюризацию не оправданы, не будет готов переплачивать за продукт, который не предлагает ему ощутимых преимуществ [1].

Вторая проблема заключается в сложности приобретения бескорпусных компонентов. Технология новая, и в наши дни повсеместно не применяется, поэтому производители компонентов не успели адаптировать многие

полупроводниковые кристаллы для технологии внутреннего монтажа [11].

Третья проблема заключается в рисках для предприятия-производителя. Может получиться так, что разработанный технологический процесс не будет стабильным, с большим количеством брака. Среди производителей устройств с применением технологии внутреннего монтажа всё ещё нет определённого стандарта - каждый использует свои наработки, что говорит о технологии как о только-только развивающейся и связанных с этим рисках для производителя.

После завершения производства изделие требует проверки качества, которая позволяет выявить дефекты и устранить непригодные для использования экземпляры из партии, либо исправить ошибки, чтобы минимизировать выход брака. Однако в случае внутреннего монтажа, если будет обнаружен нерабочий компонент, встроенный в основание платы, его нельзя будет заменить, что в свою очередь делает неработоспособной весь модуль. В таком случае, выход бракованных модулей, изготовленных по технологии внутреннего монтажа, является слишком высоким, делая производство нерентабельным. На сегодняшний день, при выявлении нерабочего модуля, его дешевле заменить, нежели пытаться обнаружить причину поломки и её устранить, следовательно, важно повысить выход годных модулей.

Чтобы решить данную проблему, необходимо принять несколько решений, касающихся контроля качества модулей., Во-первых, ввести входной контроль, то есть проверка работоспособности всех компонентов перед использованием их в производстве. Во-вторых, принять ограничение по количеству встроенных кристаллов, например, пять, чтобы уменьшить риски выхода из строя всего модуля. В-третьих, производить контроль технологических операций на промежуточных этапах изготовления модуля. Все эти меры должны значительно повысить выход годных модулей [9].

**Выводы.** Технология внутреннего монтажа перспективна, так как решает проблему миниатюризации сложных электрических устройств. На сегодняшний день технология находится только в начале своего развития и имеет множество проблем, которые необходимо решить для того, чтобы она

стала дешёвой и производители смогли её применять повсеместно без риска большого количества бракованных изделий. Необходимо добавить поддержку размещения кристаллов в объёме в САПРах, подобрать материалы и техпроцессы, которые будут оптимальны для каждого вида ПП и автоматизировать контроль качества на каждом этапе. Только решение данных проблем позволит без особых затрат внедрять технологию в производства электронной аппаратуры, что повысит функциональность устройств и снизит их стоимость для конечного потребителя.

### Список литературы

1. Д. Вертянов, С. Евстафьев, П. Виклунд, В. Сидоренко. Технологии внутреннего монтажа бескорпусных элементов и особенности проектирования микросистем со встроенными кристаллами, часть 1. Электроника: наука, технологии, бизнес. 2020. № 6. С. 96-102.
2. С.П. Тимошенко, К.С. Тихонов, А.Ю. Титов, В.С. Петров. Разработка технологий внутреннего монтажа бескорпусных кристаллов на гибкие коммутационные платы. Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. С. 351-356.
3. Вертянов, Д. В., Сидоренко, В. Н., Беляков, И. А. Особенности процессов сборки бескорпусных микросхем в технологии изготовления микросборок на основе внутреннего монтажа. Наноиндустрия. 2020. № 2. С. 396-406.
4. Е. Назаров. Технология внутреннего монтажа кристаллов, полупроводниковых приборов и ИС, содержащих микроэлектронные механические системы и наногетероструктуры. Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2007. № 3. С. 65-67.
5. Д. А. Котов, Ю. А. Родионов, А. А. Ясюнас, Н. С. Ковальчук. Технологические процессы осаждения и травления в технологии изготовления ИМС и МЭМС. Минск, Минск БГУИР, 2020. С. 68.
6. М. Д. Кочергин, К. К. Удодова, И. А. Беляков, Д. В. Вертянов, А. А. Гаврилова. Исследование влияния модификации поверхностей промоторами адгезии на основе аminosилана и эпоксисилана на адгезию полиимидных диэлектриков к кремнию и меди в слоях перераспределения. Наножурнал. 2023. № 1. С. 16-30.

7. Д.В. Вертянов, Н.Е. Коробова, А.В. Погудкин, В.Д. Кравцова. Физико-технологические особенности процесса установки кристаллов на временный носитель в технологии внутреннего монтажа. Журнал технической физики. 2020. № 10. С. 1750-1757.
8. А. Абрамов, Ю. Боброва. Печатные платы со встроенным теплоотводом на основе листового пирографита. Электроника: наука, технологии, бизнес. 2020. № 9. С. 82-88.
9. Д. Вертянов, С. Евстафьев, П. Виклунд, В. Сидоренко. Технологии внутреннего монтажа бескорпусных элементов и особенности проектирования микросистем со встроенными кристаллами, часть 2. Электроника: наука, технологии, бизнес. 2020. № 7. С. 144-148.
10. А. Чернышов. Встраивание электронных компонентов – общие рекомендации. Электроника: наука, технологии, бизнес. 2020. № 2. С. 130-142.
11. Л.Чанов. Интервью с Андреем Буянкиным, главным специалистом и заместителем главного конструктора ОКР АО «Концерн «Вега», и Сергеем Пурыйжинским, директором Экспериментально-технологического центра и главным конструктором ОКР АО «МРТИ РАН». Журнал "Электронные компоненты" : [сайт]. URL: <https://elcomdesign.ru/uncategorized/mikroelektronika-3d-tehnologii-pechatnyh-plat-i-finansovye-problemy>

### References

1. D. Vertyanov, S. Evstafiev, P. Wiklund, V. Sidorenko. Technologies of internal assembly of coreless elements and design features of microsystems with embedded crystals, part 1. Electronics: science, technology, business. 2020. № 6. С. 96-102.
2. S.P. Timoshenkov, K.S. Tikhonov, A.Y. Titov, V.S. Petrov. Development of technologies of internal mounting of coreless crystals on flexible switching boards. Engineering Bulletin of Don. 2012. № 3. С. 351-356.
3. Vertyanov, D. V., Sidorenko, V. N., Belyakov, I. A. Peculiarities of the assembly processes of coreless microcircuits in the technology of manufacturing microassemblies on the basis of internal mounting. Nanoindustry. 2020. № 2. С. 396-406.

4. E. Nazarov. Technology of internal assembly of crystals, semiconductor devices and ICs containing microelectronic mechanical systems and nanoheterostructures. Production of electronics: technologies, equipment, materials. 2007. № 3. C. 65-67.
5. D. A. Kotov, Y. A. Rodionov, A. A. Yasiunas, N. S. Kovalchuk. Technological processes of deposition and etching in the technology of manufacturing of ICs and MEMS. Minsk, Minsk BSUIR , 2020. C. 68.
6. M. D. Kochergin, K. K. Udodova, I. A. Belyakov, D. V. Vertyanov, A. A. Gavrilova. Investigation of the influence of surface modification with adhesion promoters based on aminosilane and epoxysilane on the adhesion of polyimide dielectrics to silicon and copper in redistribution layers. Nanojournal. 2023. № 1. C. 16-30.
7. D.V. Vertyanov, N.E. Korobova, A.V. Pogudkin, V.D. Kravtsova. Physico-technological peculiarities of the process of crystal installation on a temporary carrier in the technology of internal assembly. Journal of Technical Physics. 2020. № 10. C. 1750-1757.
8. A. Abramov, Y. Bobrova. Printed circuit boards with built-in heat sink on the basis of pyrographite sheets. Electronics: science, technology, business. 2020. № 9. C. 82-88.
9. D. Vertyanov, S. Evstafiev, P. Wiklund, V. Sidorenko. Technologies of internal assembly of coreless elements and peculiarities of design of microsystems with embedded crystals, part 2. Electronics: science, technology, business. 2020. № 7. C. 144-148.
10. A. Chernyshov. Embedding electronic components - general recommendations. Electronics: science, technology, business. 2020. № 2. C. 130-142.
11. L. Chanov. Interview with Andrey Buyankin, Chief Specialist and Deputy Chief Designer of R&D of JSC ‘Concern ‘Vega’, and Sergey Puryzhinsky, Director of the Experimental-Technological Centre and Chief Designer of R&D of JSC ‘MRTI RAS’. Journal ‘Electronic Components’: [website]. URL: <https://elcomdesign.ru/uncategorized/mikroelektronika-3d-tehnologii-pechatnyh-plat-i-finansovye-problemy>