

# Техническая левитация: обзор методов

Владимир Уразаев,  
к. т. н.

urazaev@yandex.ru

## Начало

Появление этой статьи автор связывает с двумя знаковыми событиями.

Наконец-то после долгих лет забвения в России планируется организовать современное производство интегральных схем. Вести об этом событии разнеслись по всему миру. Так в Интернете на сайте «Русская Корея» [1] появилось объявление следующего содержания (рис. 1).

Уточню, что обитателями этого сайта являются в основном российские специалисты, работающие ныне в различных подразделениях компании Samsung, которая является лидером корейской электроники, да и не только корейской. К сожалению, форма и содержание этого объявления вызвали здесь немало улыбок.

Гораздо солиднее выглядят другие, более свежие, новостные сообщения [2]. Госдума в первом чтении приняла законопроект о создании Российской корпорации нанотехнологий (ГК «Роснанотех»). Впечатляет и планируемый объем финансирования исследований по нанотехнологиям — 180 миллиардов рублей.

В свете этих событий содержание статьи, думаю, будет представлять не только теоретический, но и практический интерес. А речь пойдет об использовании левитации (бесконтактных методов транспорта и не только транспорта) в микроэлектронике. В отечественной литературе в этой области по изве-

стным причинам имеется «черная дыра». Поэтому основу обзора составляют преимущественно англоязычные публикации и патенты последних лет.

«Википедия» утверждает, что левитация (levitation) — это способность человека при определенном магическом развитии событий преодолевать гравитацию [3]. Способность человека к левитации пока не признана наукой, хотя есть неподтвержденные сведения о наличии таких способностей у йогов. А вот в применении к неодушевленным предметам этот термин используется вполне обоснованно, и в подтверждениях этот факт не нуждается. Различные методы технической левитации используются уже давно и, как следует из статьи [4], по мере развития техники они становятся все более и более актуальными. Почему? Преимуществ не счесть. В каждой конкретной области технического применения левитации они свои. В микроэлектронике следует акцентировать внимание лишь на некоторых.

Микроминиатюризация, а в последние годы даже наноминиатюризация — магистральное направление развития микроэлектроники. Как следствие, новые технологии требуют все большей и большей чистоты всего — оборудования, материалов, воздуха, воды и т. д. Чрезвычайно важно уменьшить количество посторонних частиц, контактирующих с поверхностью изделий микроэлектроники на всех стадиях их изготовления. Использование технической левитации — идеальное решение этой задачи.

Технологические процессы, используемые ныне при изготовлении классических микросборок, базируются на механических контактах, следствием чего может быть их разрушение. Бесконтактные методы исключают высокое локальное давление, имеющее место при механическом контакте. Поэтому появляется возможность манипулировать проблемными компонентами (ломкими, чувствительными, «свеженарисованными», микронных размеров).

И не только микронных! В последние годы размер полупроводниковых пластин (wafer), используемых в полупроводниковом производстве, наоборот, существенно увеличился (до диаметра 300 мм и толщины 0,7 мм). Новое оборудование изготавливается с учетом того, что эти размеры станут еще больше. Увеличение размеров, а, следовательно, и массы хрупких пластин, увеличило вероятность их излома при использовании традиционных контактных транспортных систем (роликовые и ленточные конвейеры, «руки» роботов-манипуляторов).

Резюмируя, можно сказать, что взоры технологов устремлены в сторону бесконтактных устройств. Основные принципы, на которых базируется ныне техническая левитация, показаны на рис. 2.

учебная РАБОТА  
СПЕЦВЫП

ГАЗЕТА ЗЕЛЕНОГРАДА «СОРОК ОДИН»

mkr n Лидер sitronics российской электроники

ООО «НИИМЗ и Микрон»

Занято с одним из ведущих мировых производителей чипов открыт первое в России производство современных микросхем интегральных схем с топологическим размером 0,18 мкм

В новое производство приглашаются специалисты, имеющие опыт работы в области микроэлектроники, в том числе за рубежом, а также выпускники профильных вузов

НА СЛЕДУЮЩИЕ ВАКАНСИИ:

- ведущий технолог
- ведущий инженер
- инженер по оборудованию
- инженер по микроэлектронике (микротехника, обеспечение микроклимата)
- инженер-технолог (по качеству)
- инженер-технолог (по логистике)
- специалист в области логистики
- специалист по обеспечению производства
- схемотехник

ТРЕБОВАНИЕ

— высшее профильное образование

— опыт работы в области производства интегральных микросхем, знание английского языка

Возможны, прошедшим отбор, предоставляются обучение и стажировка за рубежом, уникальная возможность работать в самом современном производстве интегральных микросхем в России. Обеспечение социального пакета гарантируется.

Зарплата высокая

Контактные тел.: 229-7067, 229-7059, 229-7063 (ф.)

Е-mail: mkr@sitronics.ru, sitronics@sitronics.ru

ООО «НИИМЗ и Микрон»

СРОЧНО! ПРИГЛАШАЮТ на рабочие места:

- операторы прецизионной фотолитографии
- операторы элевонных процессов
- операторы диффузии
- сборщики микросхем
- измерители электрофизических параметров
- наладчики технологического оборудования
- электрики
- слесари-ремонтники
- слесари-сантехники
- тракторист

Современная зарплата и социальный пакет

229-7067 mkr@mikron.ru

На постоянную работу в Зеленограде требуется:

ИНЖЕНЕР-ПРОГРАММИСТ

В/о (жен.), знание MS Access 97/2000, MS SQL Server 7.0/2000 на Visual Basic 5.0 и Visual C++ 6.0, опыт: 1-2, на уровне члена тех. документации. Опыт работы обязательно

Резюме отправлять по эл. почте: ermlgor@elvees.com

На постоянную работу в Зеленограде требуется:

ОФИС-МЕНЕДЖЕР

Жен., 22-35 лет, в/о, обязательно знание ПК, ораторские способности, 3/м достойная, по рев. собеседованию

Рис. 1. Объявление на сайте «Русская Корея»

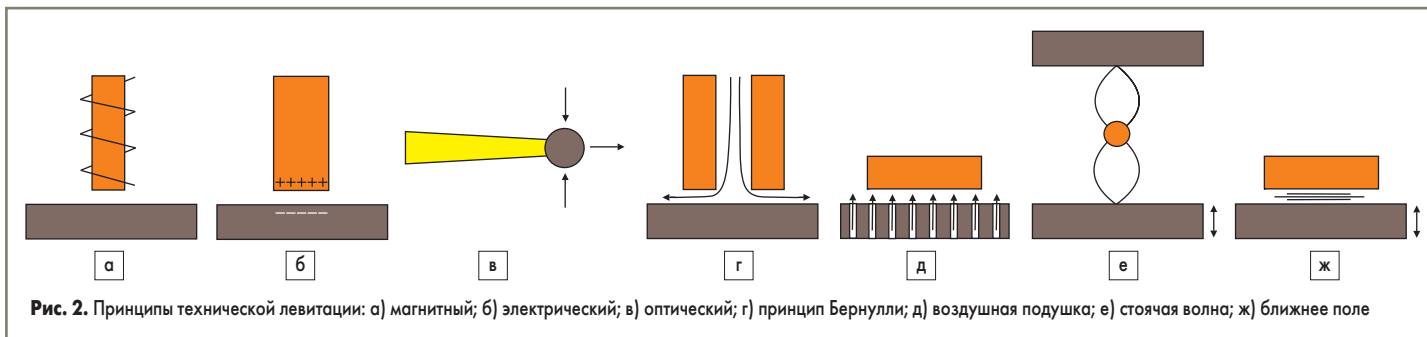


Рис. 2. Принципы технической левитации: а) магнитный; б) электрический; в) оптический; г) принцип Бернулли; д) воздушная подушка; е) стоячая волна; ж) ближнее поле

**Магнитная левитация**

Было бы удивительно, если бы «поезда на магнитной подушке» обошли стороной полупроводниковое производство. Летают — в патентах, имеющих самое прямое отношение к этому производству [5]. Правда, летают не поезда, а всего лишь унифицированная тара с кремниевыми пластинами (FOUP — front opening unified pod) — от одной операции к другой.

Магнитная левитация (рис. 2а) может быть реализована тремя способами: с использованием постоянного магнита, электромагнита или сверхпроводящего магнита. Использование электромагнитной левитации лимитируется материалами с высокой электрической проводимостью и низкотемпературными применениями. Имеется два основных типа магнитной левитации. К первому относятся электромагнитные системы (EMS), ко второму — электродинамические (EDS) [6].

В электромагнитных системах сила притяжения генерируется между нормальным электромагнитом и ферромагнитным проводником. Равновесное положение не стабильно. Чтобы гарантировать стабильность, необходимо использовать системы автоматического контроля и управления.

Электродинамическая левитация основана на возникновении в проводящих материалах вихревых токов. Вихревые токи могут быть индуцированы переменным магнитным полем. Часть электродинамических систем базируется на силах, возникающих при взаимодействии между магнитным полем, генерируемым сверхпроводящими магнитами, и стационарными катушками, расположенными в направляющем пути. Другие варианты электродинамических систем основаны на силах, генерируемых переменным током, который индуцирует вариации магнитного поля. В электродинамической левитации используются силы отталкивания. Как следствие, она пассивно стабильна.

Кроме того, известны гибридные системы. Системы левитации, использующие постоянные магниты, всегда гибридные, поскольку силы левитации, генерируемые постоянным магнитом, никогда полностью не стабильны во всех степенях свободы.

К сожалению, магнитная левитация применима только по отношению к магнитным материалам. Кремниевые пластины такими свойствами, увы, не обладают. А очень хотелось бы оперировать таким образом не только с FOUP. Как быть?

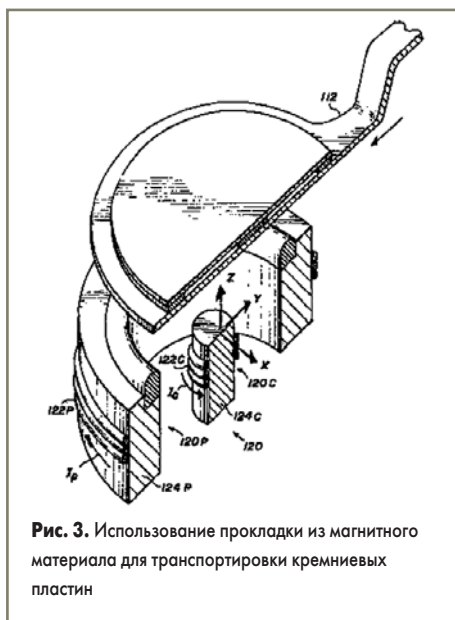


Рис. 3. Использование прокладки из магнитного материала для транспортировки кремниевых пластин

Самый простой путь — использовать посредник (магнитный посредник). В патенте [7] приводится именно этот способ (рис. 3).

Полупроводниковая пластина по периферии снабжается прокладкой из магнитного материала, выполненной в виде кольца. Электромагнит формирует постоянное магнитное поле, взаимодействующее с магнитной прокладкой. Магнитное поле может изменять свое направление, чтобы поднимать или опускать кремниевую пластину.

Техническое решение, предложенное в патенте [8], по критерию «идеальность» стоит на ступеньку выше. Используются собственные ресурсы полупроводниковой пластины, а также ресурсы технологического процесса изготовления микросхем. Предлагается в полупро-

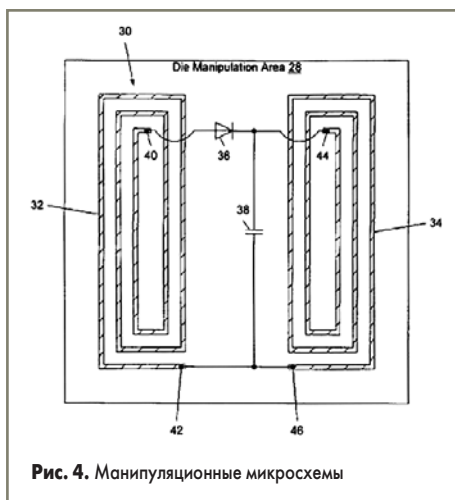


Рис. 4. Манипуляционные микросхемы

водниковой пластине на свободных местах фронтальной поверхности и/или на обратной стороне в едином технологическом цикле сформировать дополнительные микросхемы, включающие индуктивные катушки (источник магнитного поля). Единственное назначение этих микросхем (рис. 4) — взаимодействие с внешним магнитным полем.

Магнитного материала в кремниевой пластине нет, а магнитное поле образуется! Следовательно, используя внешнее магнитное поле, этой пластиной можно бесконтактно манипулировать. Как — это уже дело техники. Не правда ли, очень красивое техническое решение?

**Электрическая левитация**

Электрические методы (рис. 2б) в отличие от магнитных могут быть использованы для манипулирования изделиями из различных материалов: проводников, полупроводников и диэлектриков. Разграничения существуют только между электростатической и электродинамической левитацией.

Как правило, сочетание двух слов — «микросхема» и «электростатика» — вызывает у технологов неприятные ассоциации, поскольку с последней им приходится постоянно бороться. И не только им. Электрические разряды способны, во-первых, вывести их строя микросхемы, а во-вторых, вызывают неприятные болевые ощущения у человека. Несмотря на это, осуществляются попытки (успешные попытки!) использовать электростатический метод левитации в производстве изделий микроэлектроники.

При этом статическое электрическое поле может быть использовано для притяжения и ориентации микрокомпонентов. Для гарантии стабильности сил притяжения необходимо использовать систему контроля с обратной связью. Кроме того, стабильность электростатической левитации наблюдается только при низких температурах. При высоких температурах статические заряды непрерывно дегенерируют (стекают). Метод применим для левитации относительно больших объектов.

Электростатическая левитация довольно успешно развивается на исследовательском уровне. Преимущество этого метода заключается в близком к нулевому контактом давлении (near-zero contact pressure). Поэтому эксклюзивной областью его применения является транспортировка очень тонких пластин, например тонких стеклянных панелей. С не меньшим успехом электростатическая ле-



Рис. 5. Устройство для электростатической левитации кремниевых пластин

витация может быть использована, точнее уже используется, для транспортировки более толстых пластин — кремниевых — в полупроводниковом производстве [9]. На рис. 5 показана реальная система транспорта кремниевых пластин с использованием метода электростатической левитации.

Электродинамическую левитацию иначе называют пикобалансированием: используется комбинация постоянного и переменного (осциллирующего) электрических полей. При корректном применении осциллирующая компонента оказывает стабилизирующее воздействие по отношению к манипулируемым объектам. Этот способ может быть применен по отношению к объектам с малым зарядом. Его недостаток — малая стабильность и размерные ограничения по отношению к манипулируемым объектам.

### Оптическая левитация

Из студенческого юмора:

— Что такое оптическая левитация?

— Это когда Левитан могучим басом читает лекции по оптике.

Возможность движения частиц под действием света была предсказана еще Кеплером. Корпускулярная теория света стала еще одним шагом на пути физического обоснования этой идеи. Существование светового давления было доказано российским ученым П. Н. Лебедевым. Но другой ученый — Дж. Пойтинг, признавая это существование, заявил, что «малость светового давления исключает его из рассмотрения в земных делах».

Все течет, все изменяется... И о возможности практического использования оптической левитации современные ученые говорят уже всерьез. Еще в начале прошлого века Эренхатом был открыт эффект движения частиц пыли, взвешенных в воздухе в луче мощной лампы, причем некоторые частицы двигались не по направлению к источнику света, а в обратном направлении [10]. Этот эффект, названный фотофорезом, нельзя было объяснить действием только силы светового давления. Движение частиц в направлении распространения света было названо положительным фотофорезом, а движение в обратном направлении — отрицательным фотофорезом.

Объясняется указанный эффект следующим образом [11]. Поглощение света частицей приводит к распределению электромагнитной энергии падающего оптического излучения по объему частицы. Внутри частицы возникают источники тепловой энергии с некоторой объемной плотностью, которые неоднородно нагревают частицу. Молекулы газа после со-



Рис. 6. Компоненты сил, действующих на макрочастицу в лазерном луче

ударения с поверхностью частицы отражаются от нагретой стороны частицы с большей скоростью, чем от холодной. В результате частица приобретает некомпенсированный импульс, направленный от ее горячей стороны к холодной. В зависимости от размеров и оптических свойств материала частицы более горячей может оказаться как освещенная (положительный фотофорез), так и теньевая сторона частицы (отрицательный фотофорез). Кроме того, если поток излучения неоднороден по сечению, то может возникнуть и поперечное (относительно направления распространения излучения) движение частицы в газе.

В последние годы интерес к фотофорезу резко возрос. Этому способствовало развитие лазерной техники. Первая публикация об оптической левитации при воздействии видимого лазерного луча относится к 1970 году [12]. Далее были предложены многочисленные варианты практического применения эффекта: разделение частиц в жидкости, оптическая левитация частиц в воздухе (и в вакууме!), захват и удержание частиц в лазерном луче и т. д. Высокая монохроматичность лазерного излучения и возможность перестройки длины волны позволяют легко управлять движением макрочастиц. Распределение сил, действующих на частицу в слабо сходящемся лазерном луче, показано на рис. 6.

К сожалению, говоря о компонентах сил, имеющих место в оптической левитации, подразумевают наноньютоны (нН) и даже их доли. Как следствие, потенциальная область применения такого метода очевидно так же имеет приставку «нано» — нанотехнологии.

### Аэродинамическая левитация

Аэродинамическая левитация в отличие от оптической левитации «твердо стоит на ногах» в области макро- и микротехнологий. В одной из разновидностей этого метода вновь присутствует слово «подушка». Воздушную подушку получить очень просто. Достаточно в подложке-носителе просверлить много отверстий и продуть через них сжатый воздух (рис. 2д). Подъемная сила воздуха уравновешивает вес изделия, и оно начинает «парить» в воздухе. Недостатком этого метода является отсутствие центрирующего эффекта.

Другой метод аэродинамической левитации функционально самостоятелен. В физике известно много интересных эффектов и парадоксов. В некоторых случаях парадоксально ведут себя и воздушные струи [13].

На рис. 7 показано устройство для демонстрации всасывающего действия струи воздуха.



Рис. 7. Устройство для демонстрации всасывающего действия струи воздуха

К торцу металлической трубки припаявается диск с отверстием посередине и тремя спицами-ограничителями, на которые свободно надевается другой (сплошной) диск. В трубку подается сжатый воздух. Поток воздуха проходит в зазор между дисками, давление воздуха в зазоре падает ниже атмосферного, и подвижный диск притягивается к неподвижному. Поток воздуха прекращается, и диск под действием собственного веса падает на ограничитель. Вновь возникает зазор, и все повторяется сначала — много-много раз. Диск вибрирует с большой частотой и громким шумом.

Итак, выталкивающая струя оказывает всасывающее действие. А если сделать наоборот? Вероятно, всасывающая струя будет оказывать выталкивающее действие. Так ли это? Смотрите рис. 8.

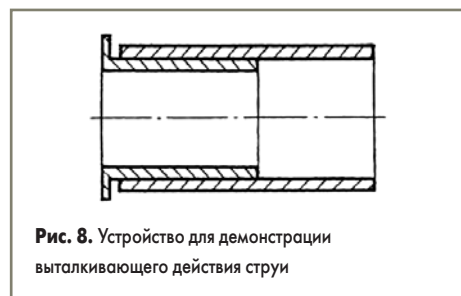


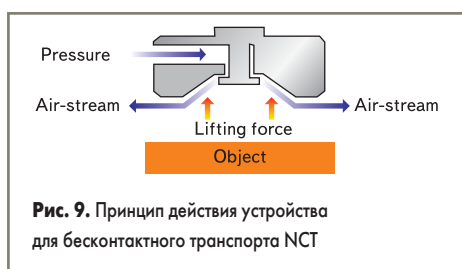
Рис. 8. Устройство для демонстрации выталкивающего действия струи

Устройство состоит из двух трубок, входящих друг в друга с небольшим зазором. На торце трубки малого диаметра сделан фланец. Если вставить одну трубку в другую и сильно втянуть воздух через свободный конец большой трубки, то маленькая трубка вылетит из нее с большой скоростью. Объяснение этого неожиданного явления довольно простое. Воздух, входя в отверстие трубки, с большой скоростью обтекает фланец. Давление на верхней поверхности фланца падает, а на нижней остается равным атмосферному. Сила, пропорциональная разности давлений, выталкивает трубку.

Эти эксперименты наглядно демонстрируют свойства воздушных потоков, описываемые уравнением Бернулли. Согласно этому уравнению, чем выше скорость потока жидкости или газа, тем меньше давление внутри них и наоборот.

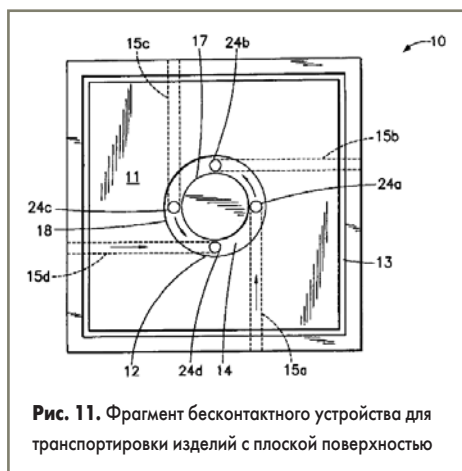
Некоторые эффектные физические явления (фокусы) так и остаются на страницах научно-популярной литературы. А какие-то из них находят широкое практическое применение в науке и технике. К таким эффектам по праву принадлежит явление, в основе которого лежит уравнение Бернулли. Реальные примеры: известный всем пульверизатор, известный многим водоструйный вакуумный насос, известный специалистам в области измерений расходомер и т. д.

Не менее реальный пример — использование этого же эффекта в устройстве для бесконтактного транспорта NCT (non-contact transport unit) [14]. Принцип действия этого устройства показан на рис. 9.



NCT представляет собой плоский алюминиевый диск диаметром от 20 до 60 мм и толщиной 17 мм. Диск имеет резьбовое отверстие, к которому подсоединяется шланг со сжатым воздухом. Внутри этого диска реализуется «форсунка Бернулли». Давление воздуха, проходящего через сужение, падает ниже атмосферного, и в нижней конусовидной части диска возникает вакуум. Как следствие, на объект действует подъемная сила. Поток воздуха, выходящий из форсунки наружу, отталкивает объект от поверхности NCT, противодействуя касанию. Таким образом реализуется состояние динамического равновесия — левитации.

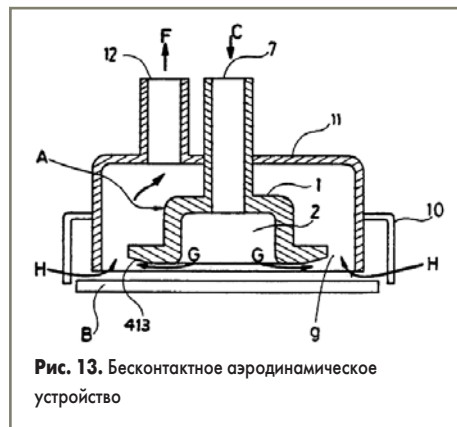
Подъемная сила одной из модификаций устройства NCT диаметром 60 мм при давлении сжатого воздуха 0,6 МПа составляет 6 Н. При этом расход сжатого воздуха, приведенный к нормальному давлению, составляет 210 л/мин.



NCT — это простое и надежное универсальное устройство, которое может быть использовано в различных отраслях промышленности: пищевой, фармацевтической и, конечно же, в области электроники (рис. 10).

Специализированные устройства, в которых также используется принцип Бернулли, можно обнаружить в патентной документации, имеющей самое прямое отношение к микроэлектронике. В патенте [15] аналогичное устройство реализовано непосредственно в «руке»-манипуляторе робота, предназначенного для перемещения полупроводниковых пластин. На рис. 11 показано конструктивное устройство фрагмента другой «руки» [16]. Патентная заявка была сделана на бесконтактный держатель для изделий с плоской поверхностью. В описании изобретения вновь упоминается принцип Бернулли. Конструктивное устройство реализуется несколько иначе. В держателе делается кольцевое углубление 14 (рис. 11), в которое с четырех сторон тангенциально (по касательной) подается сжатый воздух. Циркулирующий поток газа формирует в прилегающей к поверхности держателя области давление, распределение которого показано на рис. 12. Внутри кольцевой зоны получается вакуум, снаружи — небольшое избыточное давление. Прямая аналогия — смерч. В итоге вновь достигается динамическое равновесие — парение объекта вблизи поверхности манипулятора.

Еще один вариант бесконтактного аэродинамического устройства реализован в патенте [17]. В данном случае левитация достигается в результате сочетания избыточного давления и вакуума (рис. 13). Это решение не так идеально, как упоминаемые выше, но, думаю, не менее эффективно.



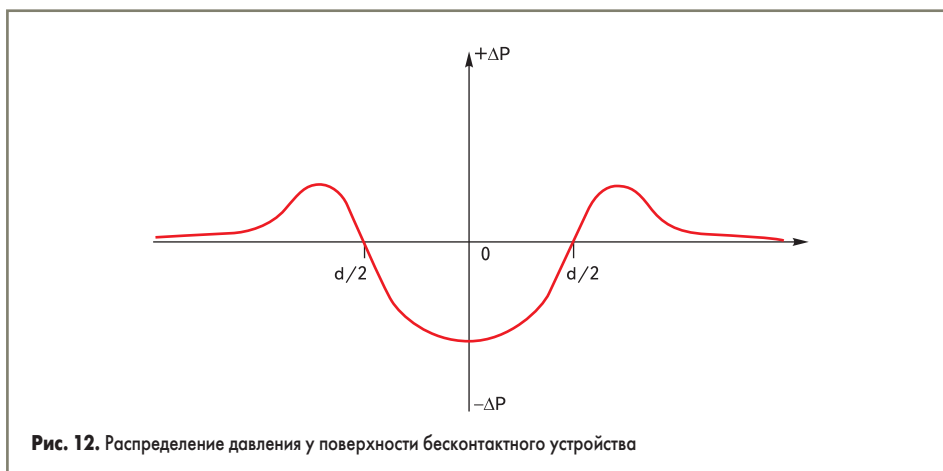
### Ультразвуковая акустическая левитация

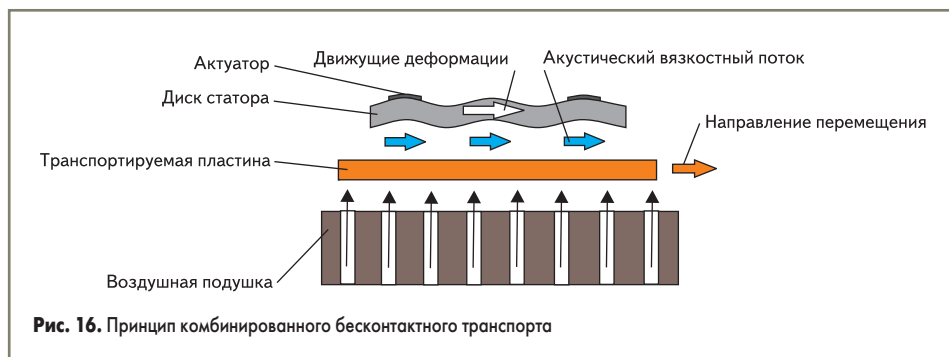
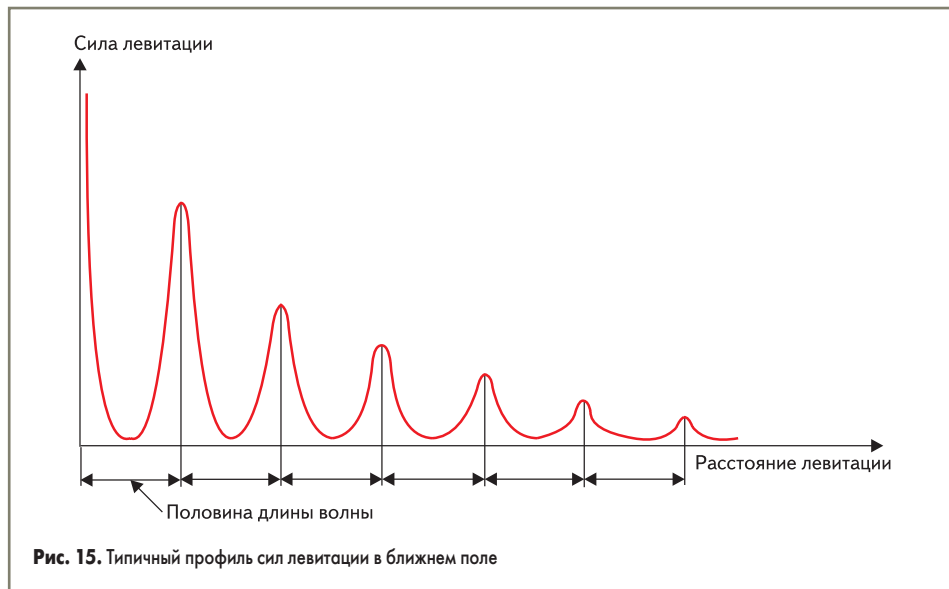
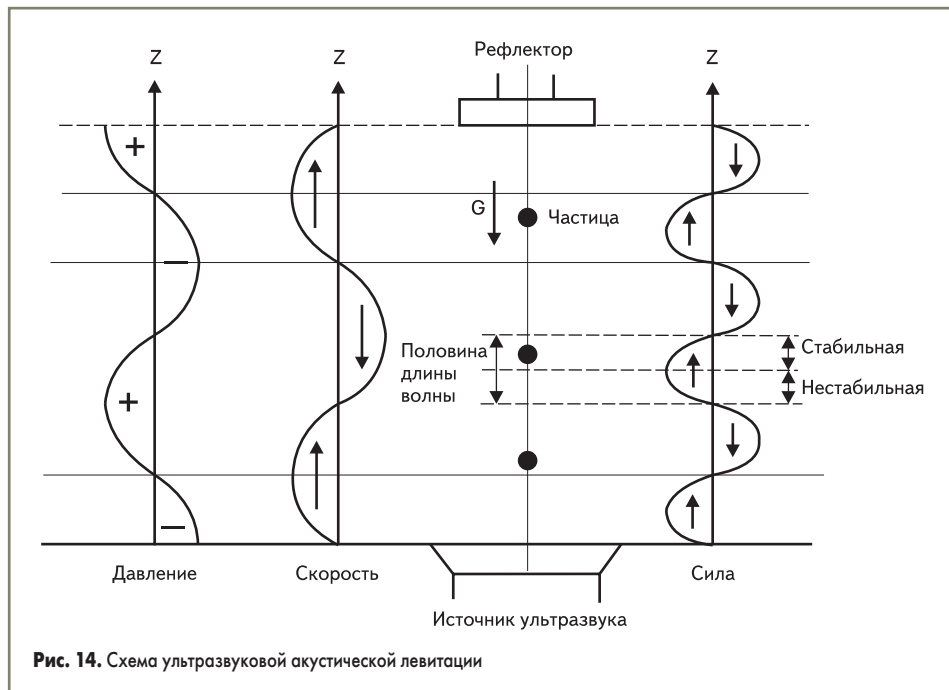
Последний способ — бесконтактное манипулирование объектами с использованием акустических волн. В литературе известны два варианта: левитация в стоячей волне и левитация в ближнем поле [18]. В стоячей волне (рис. 2е) небольшие объекты могут «зависать» в узлах давления между излучателем и рефлектором. В ближнем поле рефлектор замещается самим левитирующим объектом (рис. 2ж).

Силы, возникающие в акустической стоячей волне, способны удерживать в подвешенном состоянии в газовой атмосфере и в иных земных условиях объекты массой в несколько граммов. Схема ультразвуковой акустической левитации показана на рис. 14.

На рис. 14 показано распределение акустического давления, акустической скорости и аксиальной подъемной силы в стоячей волне. Чтобы генерировать стоячую волну, излучатель размещается на фиксируемой дистанции от рефлектора, которая в идеале делится на половину длины волны.

В условиях микрогравитации объекты (частицы) должны позиционироваться точно в узловых точках (точках с нулевым акустическим давлением). Чтобы удовлетворить требованиям уравнения Бернулли, акустическая скорость и акустическое давление смещены на 90°. Поэтому узлам акустического давления отвечает максимальная акустическая скорость. В узле акустического давления сила левитации равна нулю. В земной атмосфере взвешенные частицы будут позиционироваться ниже узла акустического давления и стабилизироваться





силами левитации, возникающими в антисимметричной части волны акустического давления. В зависимости от выбранного узла стабильная левитация может наблюдаться в аксиальном потоке, который поднимается вверх или опускается вниз.

Другой подход к использованию ультразвука заключается в левитации планарных объектов вблизи поверхности манипулятора, снабженного высокочастотным излучателем. Эта технология называется левитацией

в ближнем поле. В ближнем поле высокочастотного ультразвукового излучателя объект поднимается благодаря непосредственному излучению снизу. Он сам выполняет функцию рефлексора.

Центрирующие силы в ближнем поле получают различными способами: могут быть установлены под углом излучателя или может изменяться сила левитации.

Планарные объекты левитируют над ультразвуковым излучателем на расстоянии поло-

вины длины стоячей волны. Типичный профиль сил левитации показан на рис. 15.

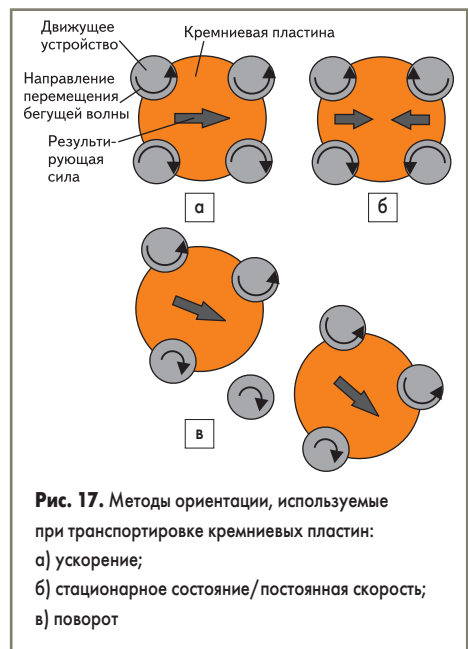
Из этого графика следует, что сила левитации в ближнем поле обратно пропорциональна расстоянию. В интервалах, кратных половине длины волны, есть дополнительные пики, где объект может быть «подвешен». Однако подъемная сила уменьшается с увеличением расстояния.

Главное преимущество ультразвуковой акустической левитации заключается в полной независимости от вида материала (проводник или диэлектрик, магнитный или немагнитный и т. д.).

### Комбинаторика

В «свежеиспеченной» статье [19] предлагается новая бесконтактная транспортная система, в которой объединены два принципа левитации: аэродинамический и акустический. Как уже упоминалось ранее, аэродинамическая воздушная подушка обладает принципиальными недостатком — нестабильностью в горизонтальном направлении из-за отсутствия центрирующего эффекта. В комбинированной транспортной системе этот недостаток превратился в достоинство. Кремниевая пластина «парит» в воздухе благодаря воздействию аэродинамических сил, а транспортируется акустическим вязкостным потоком, индуцируемым стоячей волной при деформации диска-статора (рис. 16).

Кольцеобразный пьезоэлектрический преобразователь, смонтированный на диске статора, излучает ультразвуковые колебания. Как следствие, статор генерирует бегущую волну, распространяющуюся по окружности и имеющую амплитуду колебаний около 3 мкм. Оптимальные параметры пьезоэлектрического преобразователя (актуатора) и конструктивные характеристики статора были подобраны разработчиками экспериментально. Затем было сконструировано реальное устройство с вращающимся диском диаметром 95 мм. Электрическая мощность этого устройства со-



ставляла 70 Вт при пиковом напряжении до 200 В. Вращающий момент  $8,5 \times 10^{-5}$  Н·м был получен при зазоре между статором и пластиной 120 мкм. Почему диск-статор еще и вращается, можно понять, посмотрев на рис. 17.

Вертикальная составляющая акустического давления, направленная вниз, уравновешивает аэродинамическое давление, направленное вверх. Поэтому кремниевая пластина приобретает «стабильное» вертикальное положение. Одновременно горизонтальная (круговая) составляющая вызывает акустический вязкостный поток вблизи поверхности пластины. Он ответственен за перемещение. Однако когда к транспортируемой пластине обращена вся поверхность диска статора, крутящий момент намного больше, чем сила передвижения в прямом направлении. Выход из этой ситуации довольно прост. Предложено использовать только половину поверхности диска статора, а точнее — использовать много таких дисков, размещаемых по обеим сторонам транспортного конвейера. Если же быть предельно точным, то диски статора должны еще иметь возможность изменять направление вращения и скорость вращения. Первое необходимо для изменения направления движения, второе — для осуществления поворота.

Бесконтактное устройство, основанное на сочетании (комбинировании) двух принципов технической левитации, показало свою эффективность и работоспособность при транспортировке кремниевых пластин диаметром 150 мм и толщиной 0,3 мм. При этом скорость перемещения составила 60 мм/с.

### Забудем о транспорте

До сих пор, говоря о технической левитации, мы подразумевали не просто «парение», но еще и передвижение. Технологические процессы изготовления изделий микроэлектроники, как правило, состоят из многочисленных стадий (операций), которые осуществляются в разных местах, на разном оборудовании. Поэтому без транспорта не обойтись.

Бесконтактные методы и устройства могут быть использованы и непосредственно при осуществлении технологических операций. В данном случае бывает достаточно всего

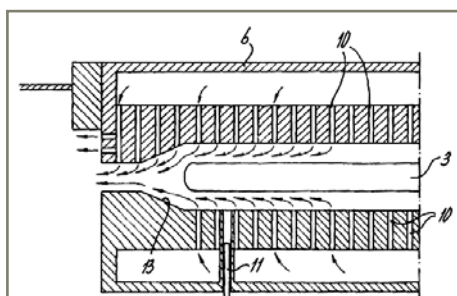


Рис. 18. Фрагмент устройства для поддержки полупроводниковой пластины в течение технологического процесса

лишь одного «парения». С технической точки зрения реализация таких решений может быть осуществлена гораздо проще. В процессе анализа патентной документации были найдены несколько интересных изобретений, основанных на использовании аэродинамической левитации.

В патенте [20] предлагается использовать метод бесконтактной «поддержки» полупроводниковых пластин в течение технологического процесса и устройство для его осуществления. Рис. 18 поясняет это техническое решение.

Вместо механической поддержки полупроводниковая пластина поддерживается потоками газа, вытекающего из большого количества отверстий 10, расположенных в верхней и нижней стенках секций 6.

От себя добавим, что в этом устройстве довольно просто можно решить еще одну задачу. Обычно, «правильные» операции в технологии изготовления полупроводниковых микросхем осуществляются только на одной стороне пластины. Обратную сторону пластины приходится защищать, что не так просто. В другом варианте следы от «правильных» операций, оставшиеся на обратной стороне пластины, приходится удалять. Для этого необходимы дополнительные технологические операции со всеми вытекающими из этих дополнений неприятными экономическими последствиями. В данном устройстве от этих неприятных последствий можно избавиться, если газовая подушка, соприкасающаяся с обратной стороной пластины, создается путем подачи инертного газа.

С использованием технической левитации можно решить другую, не менее актуальную задачу, имеющую место в технологиях полупроводникового производства. Дело в том, что большинство операций в этих технологиях являются высокотемпературными. Так, температура проведения классической операции окисления кремния достигает 1200 °С. По этой причине значительная часть внутреннего объема оборудования используется непроизводительно. Этот объем занимают многочисленные транспортные единицы (FOUP), заполненные кремниевыми пластинами, в которых ничего кроме охлаждения не осуществляется. Увы, пластины, нагретые до такой высокой температуры, невозможно сразу же взять и отправить на другую операцию. Возникают проблемы с термостойкостью поверхностей манипуляторов и FOUP, увеличением вероятности загрязнений поверхности пластин и т. д. и т. п.

В химических технологиях для интенсификации процессов теплообмена широко используется метод кипящего слоя. Скорость передачи тепла от газа к поверхности кипящих (подвешенных в потоке газа) частиц и в обратном направлении приближается к звуковой [21]. Подвешивать в воздухе кремниевые пластины для повышения скорости их охлаждения предлагается в патенте [22]. В данном случае речь идет о конструкции бесконтактной охлаждающей станции для кремниевых пластин (рис. 19).

Подача газа осуществляется через штуцер 42, подсоединенный к внешнему источнику. На верхней стенке охлаждающей станции есть многочисленные отверстия для выхода газа, которые направляют газовый поток вдоль верхней поверхности кремниевой пластины 38. Над поверхностью пластины создается область пониженного давления, и пластина «подвешивается» внутри охлаждающей станции. А обеспечивающий это «подвешивание» газ одновременно и отводит от пластины тепло. В данном случае классический недостаток бесконтактных аэродинамических устройств, реализованных с использованием принципа Бернулли, (очень большой расход газа) приносит пользу. Чем больше расход газа — тем быстрее происходит охлаждение. Для дополнительного охлаждения пластины газ подается еще и снизу.

### Заключение

Сравнительная характеристика различных методов технической левитации приведена в таблицах 1 и 2 [4].

И все же, обобщая, можно сказать следующее.

Магнитный и электростатический методы левитации в ближайшем будущем, скорее всего, несколько уступят свои позиции, поскольку их сложно применять по отношению ко всем видам материалов. Кроме того, они обычно требуют наличия систем автоматического контроля и регулирования.

Оптическая левитация ограничивается очень маленькими и относительно прозрачными

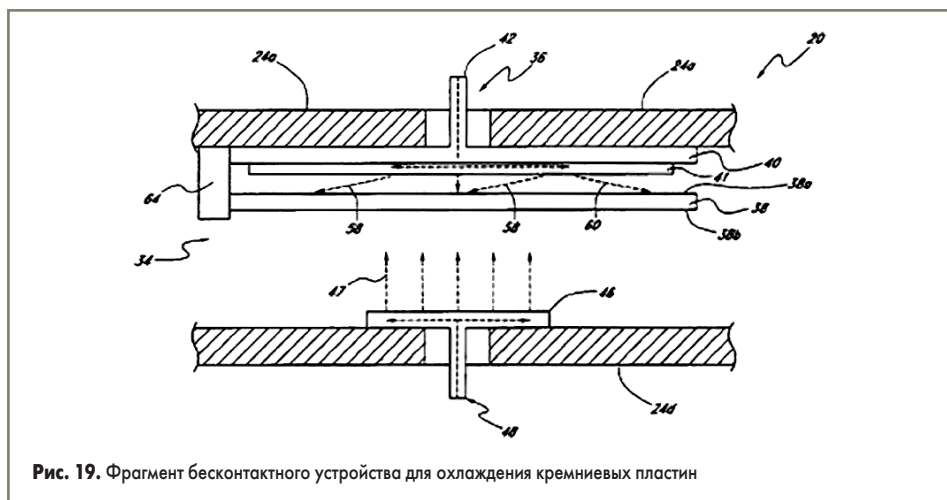


Рис. 19. Фрагмент бесконтактного устройства для охлаждения кремниевых пластин

Таблица 1. Сравнение различных методов технической левитации

Метод левитации	Форма и размер объекта	Ограничения по материалам	Максимум подъемной силы	Стабильность
Электромагнитная	Без ограничений	Ограничение проводящими материалами	Не лимитируется	Нестабильная без системы автоматического регулирования и управления
Электродинамическая	Не применима к микроэлектронным компонентам	Ограничение проводящими материалами	Не лимитируется	Стабильная
Электростатическая	—	Сила зависит от типа материала; лучший контроль для проводящих материалов	Не лимитируется	Нестабильная без системы автоматического регулирования и управления. Дестабилизирующие воздействия индуцируются трибозлектростатикой
Оптическая	Небольшие частицы сферической формы диаметром до 50 мкм	Более высокий коэффициент преломления, чем в окружающем пространстве; диэлектрик; относительная прозрачность	0,1–1 нН	Условие стабильности — определенное соотношение коэффициентов преломления; осцилляции лучше затухают в жидкости; нестабильность из-за термических эффектов в окружающем пространстве
Принцип Бернулли	Объекты, содержащие как минимум одну плоскую поверхность	Не слишком податливые; не слишком пористые	—	Нарушение стабильности в поперечном направлении — покачивание (пластина не остается параллельной по отношению к поверхности сопла)
Воздушная подушка	Плоские объекты	Нет	0,1–10 Н	Горизонтальная нестабильность из-за отсутствия центрирующего эффекта
Стоячая волна	Различная форма; размер меньше чем одна восьмая длины волны	Нет	10 мН	Осевая стабильность; естественный центрирующий эффект, как в принципе Бернулли; ориентация контролируется асимметрией поля; акустический поток является причиной дестабилизирующей силы
Ближнее поле	Плоские объекты; предпочтительно тонкие пластины	Нет	Не лимитируется	Центрирующий эффект достигается регулированием вида колебаний

Таблица 2. Сравнение различных методов технической левитации

Метод левитации	Ограничения окружающего пространства и взаимодействий	Сложность и компактность	Способность к микроперемещениям
Электромагнитная	Ограничена низкотемпературными применениями; соседство процессов, возмущаемых сильным магнитным полем	Большие размеры и масса электромагнита; нуждается в экранировании	Перемещение непроводящих деталей при присоединении к ним металлических устройств (механический контакт)
Электродинамическая	Ограничена низкотемпературными применениями; соседство процессов, возмущаемых сильным магнитным полем и вихревыми токами	Нуждается в жидком азоте для охлаждения сверхпроводящего магнита (если используется); нуждается в экранировании	Низкие транспортные способности; затруднен доступ к деталям
Электростатическая	Ограничена низкотемпературными применениями; отсутствие частиц пыли; низкий уровень влажности	Необходима чистая окружающая среда	—
Оптическая	Прозрачность окружающей среды; лучше контроль в жидкости	—	Очень большие ограничения по частицам и их окружению
Принцип Бернулли	Невозможно использовать в вакууме; невозможно использовать по отношению к пылевым частицам	Нуждается в применении внешнего источника сжатого воздуха, специальных фильтров и систем рециркуляции	Слабая поперечная стабильность
Воздушная подушка	Невозможно использовать в вакууме; невозможно использовать по отношению к пылевым частицам	Нуждается в применении внешнего источника сжатого воздуха, специальных фильтров и систем рециркуляции	Нет поперечной стабильности
Стоячая волна	Невозможно использовать в вакууме; неинтрузивная техника	Очень компактная система	Захват, ориентационное позиционирование и отпускание деталей с радиальным центрирующим усилием
Ближнее поле	Невозможно использовать в вакууме; неинтрузивная техника	Очень компактная система.	Захват и транспортировка деталей бегущей волной

частицами в прозрачной окружающей среде. Ясно, что ограничения по характеру частиц и окружающей среде пока что делают непри-

емлемым ее использование по отношению к современным микросборкам. Этот метод позволяет генерировать усилия величиной

1 нН, которые слишком малы для того, чтобы манипулировать компонентами с размером более чем 100 мкм. Хотя, все течет, все изменяется. Развитие нанотехнологий идет непредсказуемо высокими темпами. По отношению к MEMS эти выводы уже становятся ложными.

Остается выбор между аэродинамической и ультразвуковой акустической левитацией. К такому выводу приходят авторы статьи [4]. Но аэродинамическая левитация, к сожалению, «дарит» нам плохую поперечную стабильность и требует сложного исполнения, поскольку нуждается во внешнем источнике сжатого воздуха. Ультразвуковая акустическая левитация пока еще не получила такого широкого практического использования, как метод, в основе которого лежит уравнение Бернулли. Левитация с использованием стоячей волны более предпочтительна для захвата, ориентации, позиционирования и отпуска небольших изделий различной формы. Левитация в ближнем поле больше подходит для управления движением и транспорта плоских изделий.

В итоге напрашивается другой вывод — нет в мире совершенства. Хотя к совершенству можно все-таки немного приблизиться. По мнению автора этой статьи, магистральное направление в области технической левитации, скорее всего, скрывается за словом «комбинаторика». В результате удачного объединения двух или более альтернативных систем, как правило, появляются новые технические решения, сочетающие достоинства и исключающие недостатки их составляющих. Об этом говорит история развития техники вообще, а не только в области микроэлектроники [23]. Реальный пример такого сочетания приведен и в этой статье — бесконтактный транспорт пластин с одновременным использованием ультразвуковой и аэродинамической левитации.

Очень хочется, чтобы следующий реальный пример родился не в университетах Японии, а ... сами догадываетесь где. Удачи!

#### Литература

- <http://www.russiankorea.com/x/rus/forum/viewtopic.php?t=10997&p=93473>
- <http://www.lenta.ru/news/2007/06/14/nano/>
- <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F>
- Vandalae V., Lambert P., Delchambre A. Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation // Precision Engineering, Volume 29, Issue 4, October 2005, pp. 491–505.
- Miller K. C. Wafer transport device. US Pat. No 5,417,537 (1995).
- Zheng X. J., Wu J. J., Zhou Y-H. Effect of spring non-linearity on dynamic stability of a controlled maglev vehicle and its guideway system // J Sound Vib 279, 2005, pp. 201–215.
- Ebbing P., Ford J. Magnetic semiconductor wafers with handling apparatus and method. US Pat. No 5,224,581 (1993).
- Conboy M. R. Apparatus for the non-contact manipulation of a semiconductor die. US Pat. No 6,005,281 (1999).

9. [http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/solar/bp\\_solar\\_global/STAGING/local\\_assets/downloads\\_pdfs/pq/PVMat\\_2004\\_Annual\\_report.pdf](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/solar/bp_solar_global/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/pq/PVMat_2004_Annual_report.pdf)
10. Ehrenhaft F. // Ann. Phys. 1918. Bd 55, pp. 81–132.
11. Яламов Ю. И., Хасанов А. С. Фотофорез гетерогенных по теплопроводности крупных аэрозольных частиц // Журнал технической физики. 1998. Т. 68, № 4 // <http://www.ioffe.spb.ru/journals/jtf/1998/04/p1-6.pdf>
12. Ashkin A. Acceleration and trapping of particules by radiation pressure // Phys. Rev. Lett. 24, No 4, 1970, pp. 156–159.
13. <http://www.nkj.ru/archive/articles/2206/>
14. [http://www.mage.lt/promo/naujienos/bekontakciai\\_griebtuvai.lv.html](http://www.mage.lt/promo/naujienos/bekontakciai_griebtuvai.lv.html)
15. Goodwin D. L., Grabb R., Robinson M., Ferro A. P. Wafer handling system with Bernoulli pick-up. US Patent No 5,080,549 (1992).
16. Siniaguine O., Steinberg G. Non-contact holder for wafer-like articles. US Patent No 6,099,056 (2000).
17. Akashi H. Non-contact conveying device. US Patent No 5,067,762 (1991).
18. Hoppner J. Verfahren zur beruhrungslosen handhabung mittels leisungsstarker schallwandler. PhD thesis. Technische Universitat Munchen, 2002.
19. Isobe H., Fushimi M., Oosuka M., Kyusojn A. Non-contact Transportation of Flat Panel Substrate by Combined Ultrasonic Acoustic Viscous and Aerostatic Forces // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. Volume 8, No 2, April 2007, pp. 44–48.
20. Hendrik E., Granneman A. Method and apparatus for supporting a semiconductor wafer during processing. US Patent No 6,183,565 (2001).
21. Дикарев В. И. Справочник изобретателя. СПб.: Лань, 1999.
22. Aggarwal R., Haro B. Non-contact cool-down station for wafers. US Patent No 7,147,720 (2006)
23. Герасимов В. М., Литвин С. С. Зачем технике плюрализм: развитие альтернативных технических систем путем их объединения в над-систему // ТРИЗ. 1990. № 1, стр. 11–26 // <http://www.metodolog.ru/00594/00594.html>