

# Ультразвуковое Распыление в Технологии Химико-Механического Полирования Полупроводниковых Пластинок

Владимир.Н. Хмелев, Андрей.В. Шалунов, Елена.С. Смердина

Бийский технологический институт (филиал) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

**Анотация**—В статье исследуются причины, снижающие эффективность одного из основных процессов при производстве полупроводников — химико-механического полирования (СМР). На основе проведенного анализа и практических экспериментов предлагается возможный путь решения проблемы, основанный на использовании ультразвукового распыления полирующей жидкости. Приводятся технические решения, позволившие разработать ультразвуковой аппарат с возможностью встраивания в существующее оборудование для СМР процесса.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектроника на сегодняшний день является одной из самых передовых и быстро развивающихся областей науки и промышленности. Это связано в первую очередь с высокой потребностью рынка в полупроводниковых устройствах и относительно низкой себестоимостью единицы готовой продукции, обусловленной массовостью производства. Полупроводниковое производство представляет собой многоэтапный процесс, основными стадиями, которого являются: литография, химико-механическое полирование (СМР — chemical mechanical polishing) и нарезка полупроводниковых пластинок на чипы (кристаллы).

Технология химико-механического полирования используется для улучшения качества формируемой структуры при нанесении нескольких слоев металла (соединителей активных элементов кристалла) на кремниевую подложку [1]. Полировка поверхности подложки перед нанесением очередного слоя металла осуществляется с помощью специальных жидкостей, содержащих частицы абразивного материала и щелочные химические вещества. Типичный режим полировки заключается в том, что абразивные частицы не вступают в прямой контакт с неровностями обрабатываемого материала. При этом необратимые изменения топографии поверхности (полировка) происходят в результате:

- флуктуаций давления, возникающих в тонком слое

жидкости, разделяющем абразивные частицы и полируемую поверхность;

- осуществления химической реакции между полировальной жидкостью и удаляемым (или удаляемыми) материалом.

Это позволяет существенно уменьшить характерный размер шероховатостей, и делает возможным производство микросхем с восемью и более слоями металлизации.

Так как, химико-механическое полирование, в процессе изготовления полупроводниковой пластины, производится многократно (перед на несением каждого слоя металлизации), то качество полирования является определяющим для всего технологического цикла производства полупроводниковых приборов. Кроме этого, переход на 0,13 мкм, 0,090 мкм и 0,065 мкм нормы технологического процесса, предъявляет повышенные требования к плоскостности и однородности поверхности для обеспечения точной фокусировки инструментов фотолитографии. Таким образом, обеспечение высокого качества химико-механического полирования является основной проблемой полупроводникового производства.

К сожалению, технология СМР, являющаяся на сегодняшний день базовой при производстве микросхем, обладает рядом недостатков, которые обуславливают снижение качества, появление брака и, как следствие, возникновение у компаний производителей микроэлектроники значительных финансовых потерь.

## II. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ НЕДОСТАТКОВ СМР ТЕХНОЛОГИИ

Анализ особенностей практической реализации СМР процесса [1] позволил установить, что его недостатки обусловлены неравномерной подачей полирующей жидкости на рабочую поверхность полировочного круга. Причиной является используемый способ подачи полирующей жидкости — истечение из калиброванного отверстия, расположенного перед полировочным кругом,

который:

- не позволяет реализовать все возможности СМР технологии, из-за неравномерного распределения полировальной жидкости по поверхности полирующего круга;

- вызывает высокие непроизводительные потери полировальной жидкости;

- не позволяет обеспечить требуемую глубину проникновения полировальной жидкости в материал полирующего круга;

- приводит к неравномерному распределению частиц абразивного вещества внутри полировальной жидкости, обусловленное движением полировальной жидкости по полирующему кругу под действием центробежных сил.

Очевидно, что повышение эффективности СМР процесса возможно за счет реализации нового способа подачи полирующей жидкости, обеспечивающего равномерное распределение полирующей жидкости по поверхности полировочного круга.

### III. ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В результате теоретических исследований, проведенных на основании требований к СМР процессу, было установлено, что одним из возможных путей решения проблемы является модернизация системы подачи жидкости на полирующий круг, основанная на использовании мелкодисперсного распыления жидкости. Причем факел распыления может иметь как круглую, так и эллиптическую формы. Это позволит:

- обеспечить равномерное распределение полирующей жидкости по поверхности кремниевой пластины, создавая тем самым как равномерные значения флуктуаций давления, которые воздействуют на неровности пластины, так и равномерное распределение химических реагентов по поверхности полирования;

- снизить расход дорогостоящих полирующих материалов, благодаря нанесению на полируемую кремниевую пластину равномерного слоя полирующей жидкости строго определенной толщины.

Исследование технических возможностей существующих методов распыления жидкостей позволило установить непригодность методов, использующих для распыления жидкости воздух или газ под давлением. Причина этого заключается в жестких требованиях к чистоте СМР процесса, согласно которым процесс должен осуществляться в сверхчистой среде с содержанием частиц не более десятка в  $1\text{ м}^3$ . Использование больших объемов сверхчистого газа экономически не целесообразно и технически не реализуемо. Поэтому при реализации подачи полирующей жидкости распылением необходимо применять способ, не использующий потоков воздуха или каких либо других загрязняющих факторов.

Таким способом является ультразвуковое распыление

жидкостей. При ультразвуковом способе распыления жидкостей, обладающих сравнительно небольшой вязкостью (не более 3...5 сПз (сантипуаз)), образование капель аэрозоля осуществляется путем отрыва капелек жидкости от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды, образующихся на поверхности жидкости, колеблющейся под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности [2]

Основными достоинствами УЗ способа распыления являются: малая энергоемкость процесса, отсутствие дополнительных расходных материалов (газ, растворители и т. д.), возможность получения факела распыления произвольной формы (например, прямоугольной или треугольной), высокое качество и равномерность получаемых покрытий.

При этом, в случае применения УЗ распыления в системе подачи жидкости в установках для СМР процесса, образующееся монодисперсное множество капель аэрозоля полировальной жидкости, при попадании на поверхность полирующего круга обеспечивает наличие на нем равномерного и непрерывного вдоль поверхности, строго дозированного слоя полировальной жидкости, недостижимого другими способами подачи полировальной жидкости. Кроме этого, применение ультразвукового распыления обеспечивает равномерное распределение частиц абразивного вещества в слое полировальной жидкости. Это происходит по следующим причинам:

- под действием ультразвуковых колебаний происходит разрушение конгломератов, образованных за счет слипания нескольких частиц абразивного вещества;

- при ультразвуковом распылении частицы абразивного вещества оказываются заключенными в объем жидкости сферической формы, т.е. внутри капли аэрозоля. При соблюдении условия равномерности распределения капель в факеле распыления, распределение частиц абразива также будет равномерным.

### IV. ТЕОРИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ

При практической реализации УЗ распыления, для создания УЗ колебаний могут использоваться как пьезоэлектрические, так и магнитострикционные преобразователи. Пьезоэлектрические преобразователи обладают рядом неоспоримых преимуществ (меньшие габаритные размеры, более высокий КПД, не требуют применения принудительного охлаждения) по сравнению с магнитострикционными. Поэтому для ультразвукового распыления, применительно к СМР процессу была предложена и разработана ультразвуковая колебательная система на основе пьезоэлектрического преобразователя [3]. В основу положена конструктивная схема полуволновой ультразвуковой колебательной системы со ступенчато-

экспоненциальным переходом [4]. Достоинствами такой колебательной системы являются более высокие коэффициенты электромеханического преобразования и усиления механических колебаний при меньших габаритных размерах по сравнению с классическими двухполуволновыми колебательными системами. Резонансная частота колебательной системы определяет средний диаметр каплей формируемого аэрозоля, который равен:

$$D = aI_K, \quad (1)$$

где  $a$  — коэффициент пропорциональности (частично зависит от вязкости жидкости),  $I_K$  — длина капиллярных волн, образующихся на поверхности слоя жидкости, которая равна:

$$I_K = \sqrt[3]{\frac{8ps}{rf^2}}, \quad (2)$$

где  $S$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $r$  — плотность жидкости,  $f$  — частота УЗ колебаний.

Таким образом, выбор резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы обусловлен требуемым средним диаметром каплей формируемого аэрозоля при условии обеспечения необходимой производительности распыления. Выбор среднего диаметра каплей аэрозоля осуществлялся опытным путем с учетом двух условий. Первое условие заключается в том, что средний диаметр формируемых каплей должен быть минимальным, но достаточным для того, чтобы 99% формируемых каплей достигали полируемой поверхности, без образования тумана и оседания на стенках оборудования. Вторым условием является обеспечение производительности распыления в пределах от 0,2 мл/сек. до 1,2 мл/сек (повышение дисперсности обуславливает снижение производительности распыления), что обусловлено требованиями по достаточности количества полировочной жидкости для реализации CMP процесса [1]. Экспериментальные исследования процесса распыления с различной производительностью и дисперсностью аэрозоля позволили установить, что выполнение перечисленных условий может быть реализовано при формировании аэрозоля со средним диаметром каплей 80 мкм.

Следовательно, согласно приведенным выше формулам, резонансная частота колебательной системы должна быть равна 40 кГц. В этом случае обеспечивается необходимая производительность при минимально возможном среднем диаметре каплей аэрозоля.

## V. РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ

На основании данных, полученных в результате проведенных экспериментов, была разработана ультразвуковая колебательная система, предназначенная для встраивания в существующее оборудование для CMP процесса. На рис. 1 представлен эскиз разработанной колебательной системы.

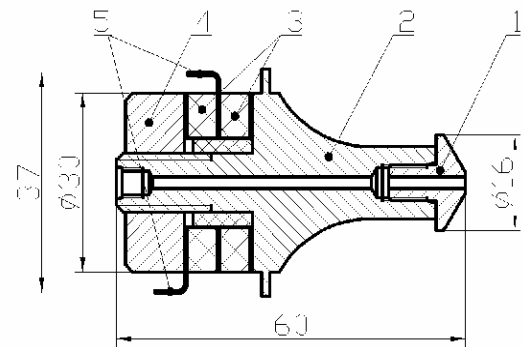


Рис. 1. Колебательная система (вариант 1)

Колебательная система состоит из сменного рабочего инструмента - 1, концентратора УЗ колебаний - 2, пьезокерамических элементов - 3, частотопонижающей накладки - 4, электродов - 5. Необходимость выполнения рабочего инструмента сменным обусловлена тем, что конфигурация его поверхности является определяющей для обеспечения заданной формы факела распыления. Следовательно, изменением формы рабочего инструмента (при замене инструмента) можно добиться требуемого факела распыления.

В результате экспериментальных исследований процесса распыления разработанной колебательной системой с рабочим инструментом грибовидной формы с одним центральным отверстием, было установлено, что она обеспечивает распыление с диаметром покрытия поверхности до 30 мм при размещении колебательной системы на расстоянии 40 мм от полируемой пластины (при требовании к диаметру покрытия не менее 50 мм). Как показал анализ результатов, причиной недостаточного диаметра покрытия является малая площадь рабочего инструмента. Однако, предпринятые попытки увеличения площади рабочего инструмента не принесли положительных результатов. Визуальные наблюдения процесса распыления позволили установить, что при истечении жидкости из центрального канала, жидкость распределяется по поверхности излучения в направлении от центрального канала к краям рабочего инструмента под действием разряжения вызванного колебаниями поверхности излучения с ультразвуковой

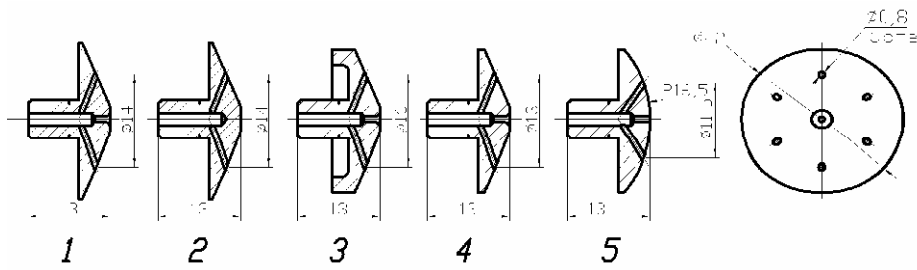


Рис. 2. Рабочие инструменты с круглой формой излучающей поверхности

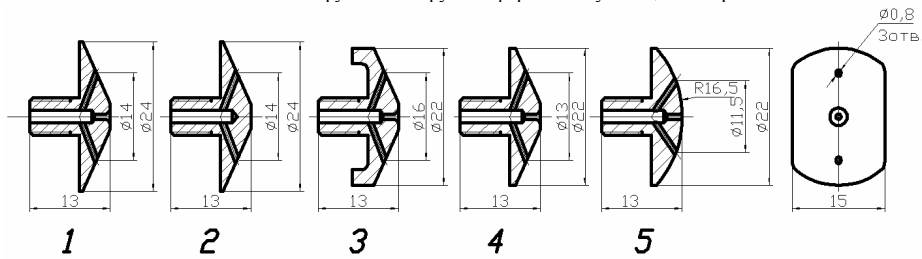


Рис. 3. Рабочие инструменты с эллиптической формой излучающей поверхности

частотой [5]. При увеличении площади поверхности рабочего инструмента, глубины создаваемого разряжения оказывается недостаточно, для полного покрытия жидкостью всей поверхности, и она распыляется, не успев заполнить всю поверхность излучения (поверхность рабочего инструмента).

Анализ научно-технической и патентной литературы показал, что существующая проблема недостаточной площади распыления решается путем применения дополнительных воздушных потоков, увеличивающих размеры факела распыления [6]. Однако данный подход не может быть применен в силу описанных особенностей реализации СМР процесса.

В связи с этим, увеличение площади распыления, было решено достичь за счет выбора оптимальной формы рабочего инструмента и использования дополнительных каналов подачи распыляемой жидкости. Для определения необходимой формы рабочего инструмента, и места выхода дополнительных каналов на излучающую поверхность было изготовлено и исследовано несколько вариантов рабочих инструментов, схематично представленных на рис. 2 и

на рис. 3.

Одна часть инструментов имела круглую форму излучающей поверхности, другая — форму близкую к эллиптической. Критерием отбора наилучшего образца инструмента служил факт получения максимального диаметра распыления, при сохранении равномерности факела распыления

Наилучшие результаты распыления получены при использовании рабочего инструмента №4. В результате ультразвуковая колебательная система приобрела вид, показанный на рис. 4. Обозначения на рисунке 4 соответствуют обозначениям рис. 1

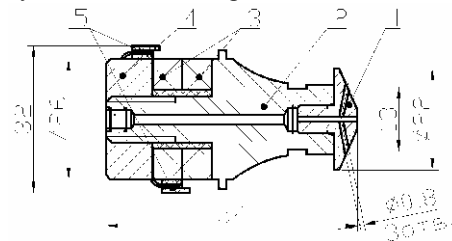


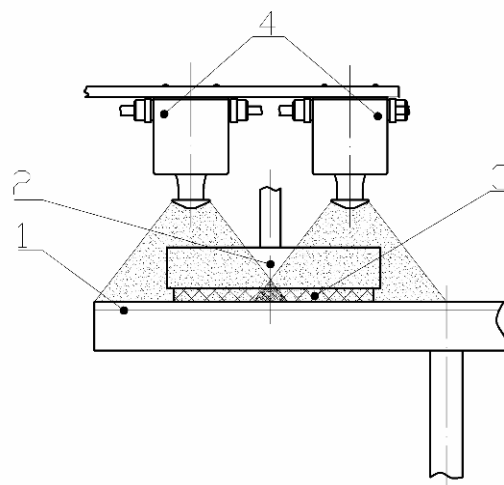
Рис. 4. Разработанная колебательная система (вариант 2)

Дальнейшие исследования процесса распыления показали, что применение дополнительных каналов позволяет реализовать ультразвуковое распыление с факелом эллиптической формы, большая ось которого превышает 65 мм, уже на расстоянии 40 мм от рабочей поверхности окончания пьезоэлектрической колебательной системы. Измерения проводились при номинальном расходе полирующей жидкости, равном 0.5 мл/сек. (см. рис. 5). Таким образом, варьируя расстоянием между рабочей поверхностью колебательной системы и полирующим кругом можно достичь необходимой площади покрытия поверхности полирующего круга.

На рисунке 6 представлен возможный вариант размещения разработанных ультразвуковых колебательных систем в составе эксплуатирующихся в настоящее время аппаратов для химико-механической полировки. Количество устанавливаемых ультразвуковых распылителей (УЗ колебательных систем) может быть различным (на рисунке 6 изображено 2 распылителя).

Необходимость использования нескольких ультразвуковых распылителей обусловлена возможностью получения факела распыления необходимой ширины вдоль радиуса полирующего круга, с заданным распределением количества полировальной жидкости.

Рассмотрим вариант использования двух ультразвуковых распылителей.

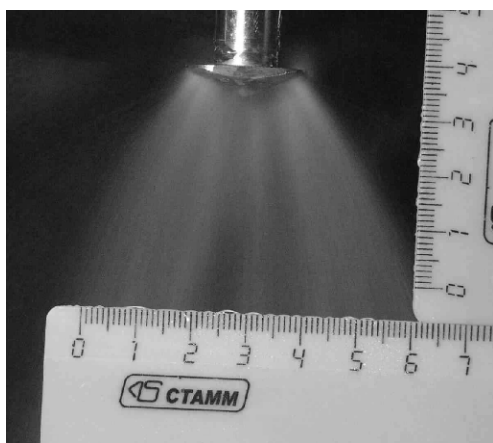


- 1 – полирующий круг,  
2- устройство перемещения и удержания полируемой полупроводниковой пластины,  
3 – полупроводниковая пластина,  
4 – ультразвуковые распылители

Рис 6. Вариант применения двух ультразвуковых распылителей

В этом случае, граничная зона между площадями поверхности полирующего круга, покрываемыми каждым из распылителей, выбрана на линии, соответствующей перемещению центральной точки поверхности полируемой полупроводниковой пластины. Так как при вращательном перемещении полупроводниковой пластины относительно полирующего круга линейная скорость перемещения центра полупроводниковой пластины минимальна, то последствия, вызванные возможной неоднородностью распределения полировальной жидкости на граничной зоне, сведены к минимуму

Таким образом, применение ультразвукового



а) Вид спереди (большая ось)



б) Вид сбоку (малая ось)

Рис. 5. Формируемый факел распыления

распыления в системе подачи жидкости в оборудовании для CMP процесса, делает возможным выполнение основного условия эффективности химико-механического полирования, а именно, обеспечение равномерной подачи полирующей жидкости на полировальный круг, т.е. предложенный гарантировать достаточность полировального материала в каждой точке поверхности полирующего круга.

На основании результатов проведенных научно-исследовательских и конструкторских работ был разработан и изготовлен комплект оборудования предназначенного для установки в оборудование для CMP процесса созданное на основе способа принятого за прототип. Комплект оборудования включает в себя:

- ультразвуковой распылитель на основе полуволновой пьезоэлектрической колебательной системы со ступенчато-экспоненциальным переходом, проточного типа (рис. 4.);

- генератор электрических колебаний ультразвуковой частоты для питания УЗ колебательной системы, с блоком автоматики и сопряжения с оборудованием для химико-механического полирования.

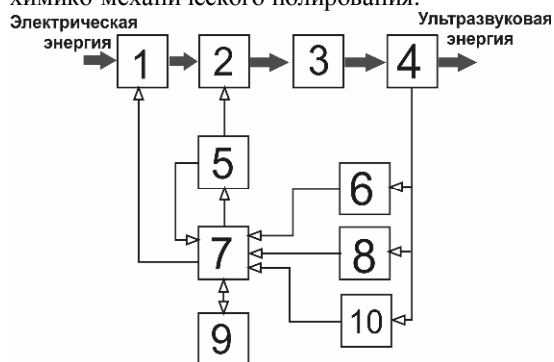


Рис. 7. Структурная схема ультразвукового генератора

Структурная схема разработанного генератора представлена на рис. 7. Работает генератор электрических сигналов УЗ частоты следующим образом. Блок 1, представляющий собой регулируемый источник постоянного напряжения, преобразует напряжение промышленной сети (220 В, 50-60 Гц) в требуемое постоянное напряжение, которое поступает на транзисторный инвертор 2. Частота преобразования инвертора задается управляемым генератором ультразвуковой частоты 5. На выходе инвертора 2 формируется напряжение прямоугольной формы, с амплитудой, равной амплитуде напряжения на выходе источника 2.

На согласующей цепи 3 происходит выделение первой гармоники сформированного сигнала прямоугольной формы и его усиление. С выхода цепи согласования электрический сигнал поступает на электроды пьезоэлементов колебательной системы 4.

Элементы блок-схемы 6, 8, 10 выделяют амплитудные значения напряжения на пьезоэлементах, тока механической ветви и сигнала, фазочастотная характеристика которого соответствует фазочастотной характеристике тока механической ветви ультразвуковой колебательной системы.

В качестве узла 7 используется микроконтроллер, работающий по специальной программе и координирующий работу всех остальных узлов ультразвукового генератора. Он реализует алгоритмы управления и стабилизации амплитуды механических колебаний ультразвуковой колебательной системы, осуществляет контроль резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы, и в случае ее изменения реализует алгоритм подстройки частоты задающего генератора под изменяющееся значение резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы.

Узел 9 осуществляет связь УЗ генератора с внешним управляющим устройством, которое осуществляет общее управление работой УЗ аппарата (включение и выключение ультразвука, задание мощности, программирование таймера), а также осуществляется контроль над основными параметрами ультразвукового генератора.

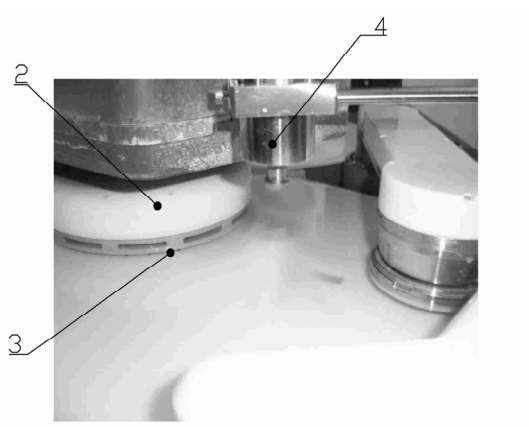
Связь осуществляется по последовательному интерфейсу RS-232. Этот узел обеспечивает возможность функционирования УЗ генератора в составе существующего оборудования для CMP процесса.

В результате проведенных исследований и разработок был создан УЗ аппарат, предназначенный для осуществления распыления полирующей жидкости, в ходе CMP процесса.

Внешний вид разработанного аппарата представлен на рис. 8. На рис. 9 показана колебательная система, установленная на оборудовании для CMP процесса. Ниже приведены технические характеристики разработанного аппарата.



Рис. 8. Разработанный УЗ аппарат для распыления жидкостей



1 – полирующий круг,  
2- устройство перемещения и удержания полируемой полупроводниковой пластины, 3 – полупроводниковая пластина, 4 – ультразвуковая колебательная система

Рис. 9. Применение УЗ аппарата для распыления в составе оборудования для CMP процесса

Таблица 1. Технические характеристики

Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Частота напряжения питающей сети, Гц	50/60
Максимальная потребляемая мощность, ВА	50
Частота возбуждаемых механических колебаний, кГц	40±3
Диапазон регулирования выходной мощности, %	20-100
Вязкость распыляемой жидкости, не более, сантипуаз	4
Средний диаметр капель, мкм, не более	80
Номинальная производительность, мл/с, (для воды)	0,5
Максимальная производительность, мл/с, (для воды)	1,2
Габаритные размеры электронного блока, мм	80x180x100
Габаритные размеры УЗ колебательной системы, мм	67x56x56

В результате выполнения работы были получены следующие результаты:

- установлено, что причиной снижения эффективности CMP процесса при производстве полупроводников

является неравномерное распределение полирующей жидкости по поверхности полируемого круга;

- Показано, что наиболее эффективным способом обеспечения равномерного распределения полирующей жидкости в CMP процессе является ультразвуковое распыление;

- На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложена и разработана УЗ колебательная система с рабочим инструментом эллиптической формы с тремя каналами подачи распыляемой жидкости, и для ее питания создан генератор электрических колебаний УЗ частоты;

- разработанный УЗ аппарат позволил осуществить формирование факела распыления эллиптической формы с большей осью, размером не менее 65 мм, при номинальном расходе жидкости равном 0.5 мл/сек, что обеспечило возможность его применения в составе существующего оборудования для CMP процесса.

#### Литература

1. Joseph M. Steigerwald, Shyam P. Murarka, Ronald J. Gutmann. Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials.
2. Мощные ультразвуковые поля. Под ред. Л. Д. Розенберга. М., Наука, 1968.
3. Теумин И. И. Ультразвуковые колебательные системы. М.: Машгиз, 1959, 331 с.
4. Патент РФ №2141386. Ультразвуковая колебательная система.
5. Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Л. Д. Розенберга М., Наука, 1970.
6. Harvey L. Berger. Ultrasonic Liquid Atomization, Theory and Application. P.H. Publishers 2002, p.169.