

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

*В.Н. Хмельёв, А.В. Шалунов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин
Бийский технологический институт АлтГТУ*

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 проблем, основанный на использовании ультразвукового распыления полирующей жидкости. Приводятся технические решения, позволившие разработать ультразвуковой аппарат с возможностью встраивания в существующее оборудование для СМР процесса.

Микроэлектронные технологии на сегодняшний день являются 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 пластин на чипы.

Технология химико-механического полирования (СМР) 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. Таким образом, необратимые изменения топографии поверхности происходят в результате флуктуаций давления, возникающих в тонком слое жидкости, разделяющем абразивные частицы и поверхность. Это позволяет существенно уменьшить характерный размер шероховатостей, и делает возможным производство микросхем с семью – и восемью слоями металлизации.

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. Снижения качества происходит по следующим причинам:

1. Возникновение неоднородностей на полируемой поверхности, вызванное не равномерным распределением полирующей жидкости.
2. Высокий расход дорогих абразивных материалов и ультрачистой воды [1], увеличивающий себестоимость технологического процесса.

Анализ особенностей реализации СМР процесса показал, что выявленные недостатки обусловлены неэффективной организацией подачи полирующей жидкости на рабочую поверхность полировочного круга. В существующем оборудовании для СМР процесса подача полирующей жидкости реализуется путем ее истечения из калиброванного отверстия, расположенного перед полировочным кругом, что, не является оптимальным решением. Таким образом, повышение эффективности СМР процесса возможно за счет реализации нового способа подачи полирующей жидкости.

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 с использованием 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 равномерное распределение химических реагентов по поверхности полирования.

- Снизить расход дорогостоящих полирующих материалов, благодаря нанесению на полируемую кремневую 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 СМР процессу, согласно которым процесс должен осуществляться в сверхчистой среде с содержанием частиц не более 2000 в 1 мл. В связи с этим возникает необходимость в использовании больших объемов сверх чистого газа, что экономически не целесообразно, и вызывает дополнительное загрязнение полируемой пластины, связанное с остаточной загрязненностью газа. Поэтому, при реализации распыления необходимо применять способ, не использующий потоков воздуха или каких либо других загрязняющих факторов. Таким способом является ультразвуковой способ распыления жидкостей.

При ультразвуковом способе распыления жидкостей, обладающих сравнительно небольшой вязкостью (не более 3...5 спз), 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.

Для создания УЗ колебаний могут использоваться как пьезоэлектрические, так и магнитострикционные преобразователи. Пьезоэлектрические преобразователи обладают рядом неоспоримых преимуществ (меньшие габаритные размеры, более высокий КПД, во многих случаях 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]. За основу была взята конструкционная схема разработанной авторами полуволновой ультразвуковой колебательной системы с экспоненциальным переходом [4]. Достоинствами

такой колебательной системы являются ее более высокий КПД и меньшие габаритные размеры по сравнению с классическими колебательными системами, построенными по двух-полуволновым схемам, включающим преобразователь Ланжевена, и концентратор. Резонансная частота такой колебательной системы определяет средний диаметр капель формируемого аэрозоля, который равен:

$$D = a * \lambda_K, \quad (1)$$

где a – коэффициент пропорциональности (частично зависит от вязкости жидкости);

λ_K – длина капиллярных волн образующихся на поверхности слоя жидкости, которая равна:

$$\lambda_K = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}},$$

(2)

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

ρ – плотность жидкости;

f – частота УЗ колебаний.

Таким образом, для выбора резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы необходимо определиться с требуемым средним диаметром капель формируемого аэрозоля, при условии обеспечения необходимой производительности распыления. Выбор среднего диаметра капель аэрозоля осуществлялся опытным путем по двум критериям. Первым условием являлось то, что диаметр капли должен быть как можно меньшим, при условии, что получающейся массы капли достаточно для того, чтобы 99% формируемых капель достигли полируемой поверхности, без образования тумана и оседания на стенках оборудования. Вторым условием, было обеспечение производительности распыления в пределах от 0,2 мл/сек. до 1,2 мл/сек. Данные о требуемой

производительности были взяты из требований к СМР процессу [1]. В результате проведения эксперимента было установлено, что необходимый средний диаметр каплей соответствует 80 мкм и, следовательно, согласно приведенным выше формулам, требуемая резонансная частота колебательной системы должна быть равна 40кГц. Таким образом, удалось установить минимально возможный средний диаметр каплей аэрозоля, обеспечивающий отсутствие непроизводительных потерь полирующей жидкости на образование тумана и «опыла», а также рабочую частоту УЗ колебаний, на которой обеспечивается необходимая производительность.

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

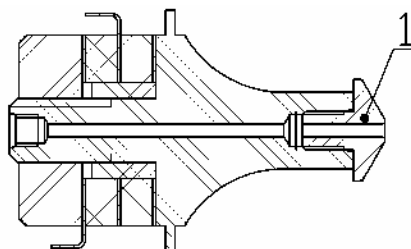


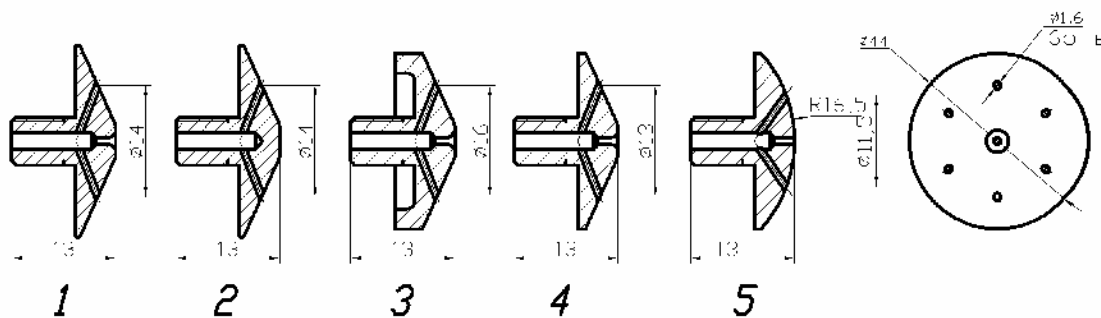
Рисунок 1 – Колебательная система

Колебательная система имеет сменный рабочий инструмент (1). Это необходимо т.к. форма рабочего инструмента является определяющей для обеспечения заданной формы факела распыления и, следовательно, изменением формы рабочего инструмента можно добиться требуемого факела распыления.

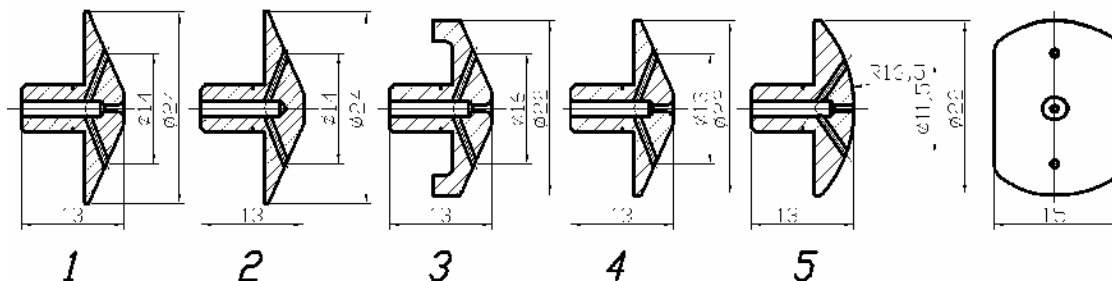
В результате экспериментов, проведенных с разработанной колебательной системой, было установлено, что она не позволяет осуществлять распыление с требуемым диаметром покрытия поверхности, который должен быть не менее 50 мм (существующие установки обеспечивают размещение колебательной системы на расстоянии 40 мм от полируемой пластины). Анализ процесса распыления показал, что площадь рабочего инструмента (1) колебательной системы является недостаточной. Однако предпринятые попытки увеличить площадь рабочего инструмента не принесли положительных результатов. Причина этого заключается в следующем: при истечении жидкости из центрального канала, жидкость распределяется по поверхности излучения в направлении от центрального канала к краям рабочего инструмента. Это происходит под действием разряжения вызванного колебаниями поверхности излучения с ультразвуковой частотой [5]. При неоптимальной площади поверхности излучения, 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 в зарубежной практике 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 рисунке 2. Одна часть инструментов имела круглую форму излучающей поверхности, другая форму близкую к эллиптической. Критерием отбора наилучшего образца служил факт получения максимального диаметра распыления, при сохранении равномерности факела распыления.



а) рабочие инструменты с круглой формой излучающей поверхности



б) рабочие инструменты с эллиптической формой излучающей поверхности

Рисунок 2 – Разработанные варианты рабочих инструментов

Проведенные эксперименты показали, что рабочие инструменты имеющие круглую форму поверхности распыления, не дают существенного увеличения площади факела распыления при малых расходах распыляемой жидкости (менее 0,2 мл/сек), т.к. жидкости оказывается недостаточно для распределения по всей получившейся поверхности распыления. Для устранения

это недостатка, форма поверхности распыления была изменена на близкую к эллиптической, как показано на рис. 2 б.

В результате проведения исследований было установлено, что наилучшие результаты получены при использовании образца №4. В результате ультразвуковая колебательная система приобрела вид, показанный на рис. 3.

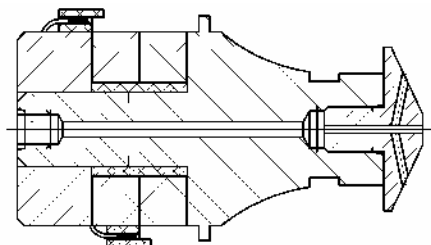
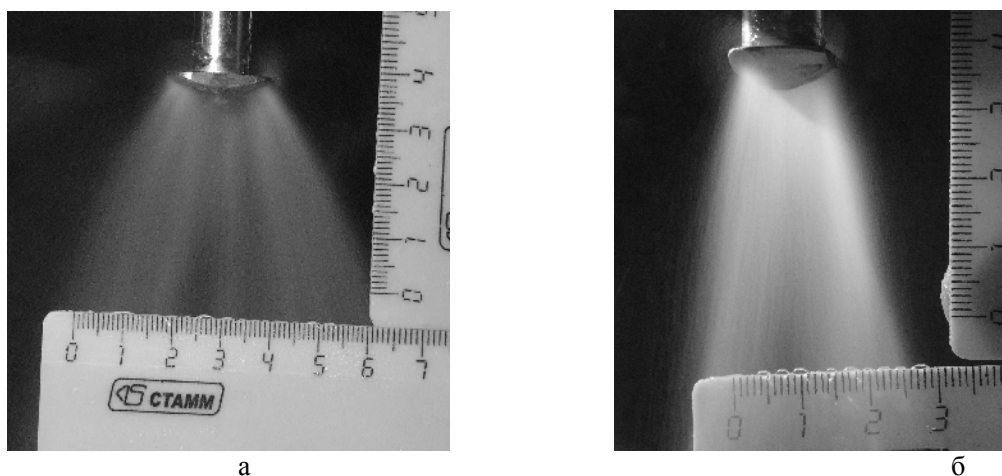


Рисунок 3 – Разработанная колебательная система

Проведенные исследования процесса распыления показали, что применение дополнительных каналов позволило реализовать ультразвуковое распыление с факелом эллиптической формы, большая ось которого превышает 65 мм. Измерения проводились при номинальном расходе полирующей жидкости, равном 0.5 мл/сек. (рис. 4).



а – вид спереди (большая ось); б – вид сбоку (меньшая ось)

Рисунок 4 – Формируемые «факелы» распыления

Для питания разработанной колебательной системы был создан специализированный генератор электрических сигналов УЗ частоты, структурная схема которого представлена на рис. 5.

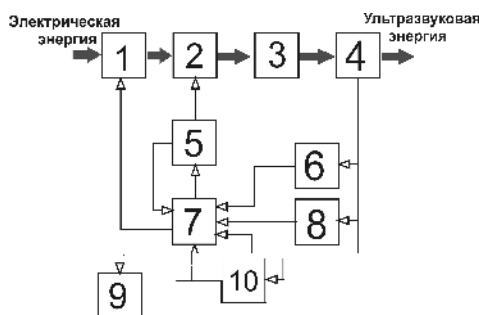


Рисунок 5 – Структурная схема ультразвукового генератора

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 напряжению на выходе источника 2, которое поступает на согласующую цепь 3, где происходит выделение его первой гармоники и усиление. С выхода цепи согласования напряжение поступает на пьезоэлементы 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, который работает по специальной программе и координирует работу всех остальных узлов ультразвукового генератора, а именно 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 за основными параметрами ультразвукового генератора. Связь осуществляется по последовательному интерфейсу RS-232. Этот узел необходим для обеспечения возможности функционирования УЗ генератора в составе существующего оборудования для СМР процесса.

Таким образом, в результате работ проведенных в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института, был разработан УЗ аппарат, предназначенный для осуществления процесса распыления полирующей жидкости, в ходе осуществления СМР процесса. Внешний вид разработанного аппарата представлен на рисунке 6. На рис. 7 показана колебательная система, установленная на оборудовании для СМР процесса.

Ниже приведены технические характеристики разработанного аппарата.



Рисунок 6 – Разработанный УЗ аппарат для распыления жидкостей



Рисунок 7 – Применение УЗ аппарата для распыления в составе оборудования для СМР процесса

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 |

Таким образом, в результате выполнения работы получены следующие результаты:

1. Выявлены недостатки ограничивающие эффективность СМР процесса.
2. Показан возможный путь устранения выявленных недостатков, за счет осуществления подачи полирующей жидкости путем ее распыления на полирующий круг. Установлено, что наиболее эффективным в случае СМР процесса, является ультразвуковое распыление.
3. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана оптимальная конструкция УЗ колебательной системы, и для ее питания создан специализированный генератор электрических колебаний УЗ частоты.
4. Разработанный УЗ аппарат обеспечил факел распыления эллиптической формы с большей осью не менее 65 мм, при номинальном расходе жидкости равном 0.5 мл/сек, что обеспечило возможность его применения в составе существующего оборудования для СМР 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. US patent № 6,585,570.