

В. Н. Хмелев*, А. В. Шалунов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок,
А. Н. Сливин

*Бийский Технологический институт ГОУ ВПО АлтГТУ, г. Бийск, 659305, Трофимова, 27
Лаборатория акустических процессов и аппаратов***

Применение ультразвукового распыления в процессе производства полупроводниковых приборов

Получена 20.10.2005, опубликована 02.11.2005

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.

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 пластин на чипы (кристаллы).

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. При этом необратимые изменения топографии поверхности происходят в результате флуктуаций давления, возникающих в тонком слое жидкости, разделяющем абразивные частицы и полируемую поверхность. Это позволяет существенно уменьшить характерный размер шероховатостей, и делает возможным производство микросхем с семью-восемью слоями металлизации.

* e-mail: vnh@bti.secna.ru

** <http://www.u-sonic.ru>

1. ПРОБЛЕМЫ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

К сожалению, технология CMP, 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. Снижение качества конечного продукта и увеличение его стоимости обусловлено:

1. Возникновением неоднородностей на полируемой поверхности, вызванным неравномерным распределением полирующей жидкости по полируемой поверхности;
2. Высоким расходом дорогих абразивных материалов и ультрачистой воды [1].

Анализ особенностей практической реализации CMP процесса позволил установить, что выявленные 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.

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

2. ВЫБОР ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В результате теоретических исследований, проведенных на основании требований к CMP 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:

1. 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.
2. 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 CMP процесса, согласно которым процесс должен осуществляться в сверхчистой среде с содержанием частиц не более десятка в 1 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.

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 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

$$\lambda_k = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}}, \quad (2)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, ρ — плотность жидкости, f — частота УЗ колебаний.

Таким образом, выбор резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы обусловлен требуемым средним диаметром капель формируемого аэрозоля при условии обеспечения необходимой производительности распыления. Выбор среднего диаметра капель аэрозоля осуществлялся опытным путем с учетом двух условий. Первое условие заключается в том, что средний диаметр формируемых капель должен быть минимальным, но достаточным для того, чтобы 99% формируемых капель достигали полируемой поверхности, без образования тумана и оседания на стенках

оборудования. Вторым условием является обеспечение производительности распыления в пределах от 0,2 мл/с до 1,2 мл/с (повышение дисперсности обуславливает снижение производительности распыления), что обусловлено требованиями по достаточности количества полировочной жидкости для реализации СМР 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 капель 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 капель аэрозоля.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

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

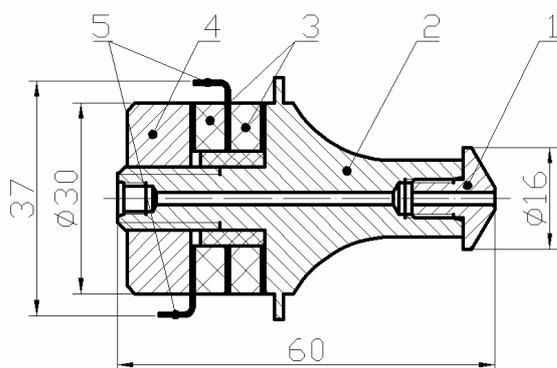


Рис. 1. Колебательная система (вариант 1)

Колебательная система состоит из сменного рабочего инструмента 1, концентратора УЗ колебаний 2, пьезокерамических элементов 3, частотнопонижающей накладке 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 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 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.

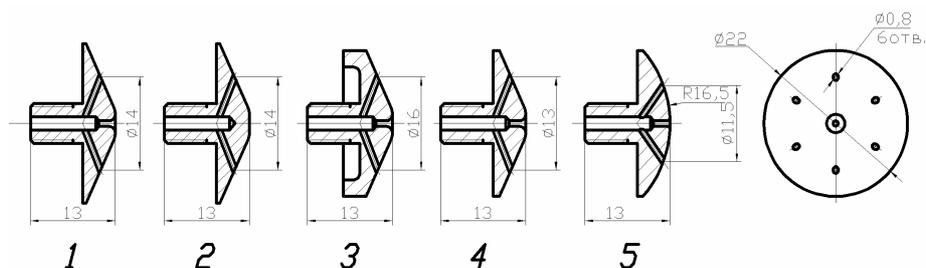


Рис. 2. Рабочие инструменты с круглой формой излучающей поверхности

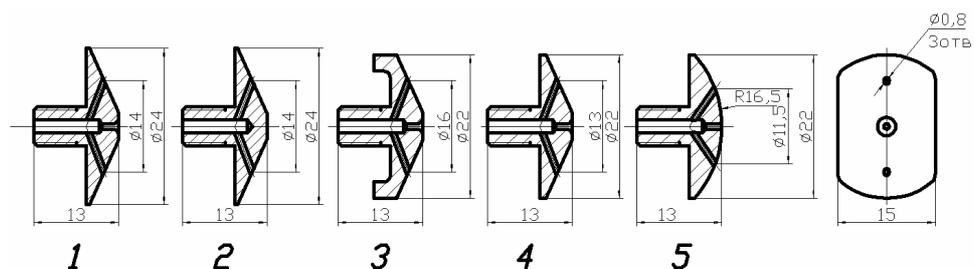


Рис. 3. Рабочие инструменты с эллиптической формой излучающей поверхности

Проведенные эксперименты показали, что рабочие инструменты, имеющие круглую форму поверхности распыления, не дают существенного увеличения площади факела распыления при малых расходах распыляемой жидкости (близких к 0,2 мл/с), т. к. жидкости оказывается недостаточно для распределения по всей поверхности распыления. Для устранения этого недостатка, форма поверхности распыления была изменена, как показано на рис. 3.

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

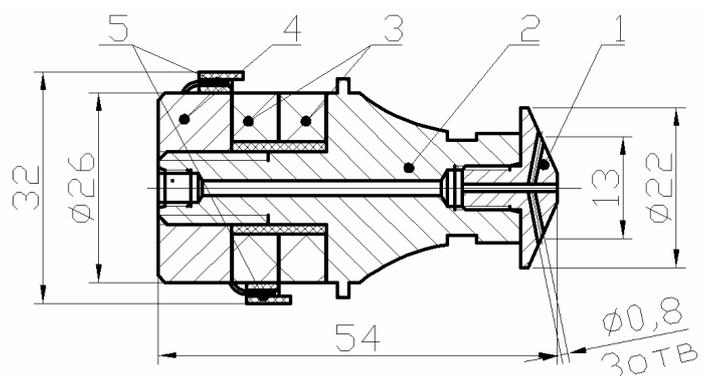


Рис. 4. Разработанная колебательная система (вариант 2)

Дальнейшие 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/с (см. рис. 5).

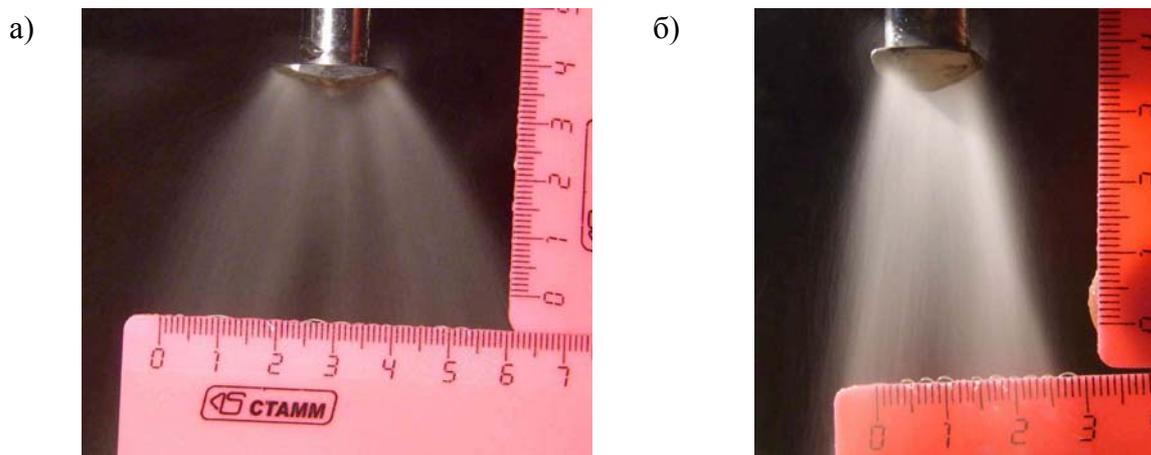


Рис. 5. Формируемые факелы распыления
а) вид спереди (большая ось), б) вид сбоку (малая ось)

Для питания колебательной системы был разработан генератор электрических сигналов УЗ частоты, структурная схема которого представлена на рис. 6.

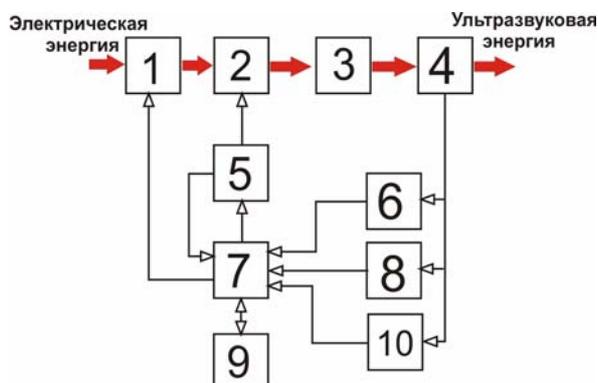


Рис. 6. Структурная схема ультразвукового генератора

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 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 СМР процесса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований и разработок был создан УЗ аппарат, предназначенный для осуществления распыления полирующей жидкости в ходе СМР процесса. Внешний вид разработанного аппарата представлен на рис. 7. На рис. 8 показана колебательная система, установленная на оборудовании для СМР процесса. Ниже (таблица 1) приведены технические характеристики разработанного аппарата.



Рис. 7. Разработанный УЗ аппарат для распыления жидкостей



Рис. 8. Применение УЗ аппарата для распыления в составе оборудования для СМР 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, сантипуаз, не более	4
Средний диаметр каплеь, 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	80×180×100
Габаритные размеры УЗ колебательной системы, мм	67×56×56

ВЫВОДЫ

В результате выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Установлено, что причиной снижения эффективности CMP процесса при производстве полупроводников является неравномерное распределение полирующей жидкости по поверхности полировального круга.
2. Показано, что наиболее эффективным способом обеспечения равномерного распределения полирующей жидкости в CMP процессе является ультразвуковое распыление.
3. 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.
4. 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/с, 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.