

# УСТАНОВКА РЕАКТИВНОГО ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ "Эра-3М"

Одна из важнейших технологических операций при изготовлении современных полупроводниковых приборов с минимальными размерами элементов 0,1 мкм и менее – прецизионное вытравливание сформированного литографией рисунка. Для этого скорость травления в направлении, перпендикулярном поверхности, должна быть максимальной, а в боковом направлении – минимальной. Но анизотропное травление некоторых специальных материалов (нитрида кремния, двуокиси кремния, нитрида галлия, арсенида галлия и т.п.) с помощью традиционных химических процессов – задача практически неразрешимая. С ней может справиться ионное травление. Но из-за высокой энергии ионов (порядка 500–1500 эВ) глубина нарушенного слоя в полупроводнике достигает 20 нм, что резко ухудшает параметры полупроводникового прибора. Лучшие результаты обеспечивает реактивное ионное травление. Поэтому несомненный интерес представляет созданная в НПП "Тирс" установка реактивного ионного травления, отвечающая основным требованиям технологии производства полупроводниковых приборов, т.е. позволяющая травить необходимые материалы как с высокой скоростью, так и с максимальной анизотропией.

**Конструкция установки.** При реактивном ионном травлении поверхность материала подложки бомбардируется направленным потоком ионов и ненаправленным потоком радикалов, образующихся в результате диссоциации технологического газа в плазме [1]. Энергия ионов при этом не превышает 50–200 эВ, что в большинстве случаев безопасно для кристаллической решетки полупроводника. Необходима высокая скорость травления достигается благодаря химическому взаимодействию активированных частиц технологического газа с материалом подложки, в результате чего образуются летучие продукты, удаляемые откачными средствами. В рассматриваемом устройстве новой конструкции – так называемом "источнике ионов высокой плотности" [2] эти потоки формируются в индукционном ВЧ-плазменном разряде, известном как "трансформаторно-связанная плазма" [3–6].

Е.Берлин, Н.Морозовский, Л.Сейдман

Установка реактивного ионного травления выполнена в виде двух отдельных модулей: рабочей камеры с вакуумным постом и стойки питания и управления.

**Вакуумная (рабочая) камера** содержит: водоохлаждаемый столик диаметром 160 мм, на котором размещаются обрабатываемые подложки диаметром до 150 мм; излучатель ВЧ-мощности (антенну), обеспечивающий равномерную обработку подложек; устройство лазерного контроля глубины травления, смонтированное на специальном каркасе и подключенное к блоку управления с выходом на самописец; размещенную в плоскости столика за пределами вакуумного объема на специальных кронштейнах электромагнитную систему, состоящую из двух электромагнитных катушек с сердечником и двух плоскопараллельных магнитопроводов (рис. 1).

Столик крепится на верхней крышке вакуумной камеры, через которую проходят электрические выводы и вывод зонда Ленгмюра, предназначенного для контроля плотности ионного тока. Антенна представляет собой цилиндр внешним диаметром 220 мм и высотой 50 мм. Для нее предусмотрены коаксиальный герметичный подвод ВЧ-мощности и вводы водяного охлаждения. Корпус антенны, отделяющий ее от плазмы, сделан из кварца толщиной 4 мм. Внутри корпуса расположены четыре спиральные катушки, витки которых выполнены из плоской меди толщиной 2 мм. Особенность конструкции антенны – вложение спиралей друг в друга, т.е. совмещение их в одном объеме. Это позволило уменьшить габариты антенны и сконцентрировать излучаемую ею мощность. Поэтому при сравнительно невысоких значениях ВЧ-мощности удалось получить высокую концентрацию плазмы. Антенна смонтирована на отдельном фланце и располагается соосно с рабочим столиком на расстоянии 90 мм от обрабатываемой подложки. На этом же фланце вне камеры монтируется специальное устройство согласования антенны с генератором.

Назначение электромагнитной системы – создание в случае необходимости в рабочей зоне магнитного поля, например при работе с сильно диссоциирующими газами, когда закивание плазмы в камере вызывает резкое изменение давления и требуется "досогласовывать" ВЧ-мощность с плазмой. Заранее созданное магнитное поле напряженностью всего 10–15 Гс существенно упрощает процесс такого согласования. Потребляемый системой ток регулируется от нуля до 3 А.

Вакуумная система установки подсоединена к вакуумной камере через электромеханический затвор ЗВЭ-160. В нее входят форвакуумный насос 2НВР-16DSP, диффузионный насос Н-160 со скоростью откачки 0,7 м<sup>3</sup>/с и заливная азотная ловушка с диаметром условного прохода 160 мм. Ловушка с жидким азотом позволяет существенно снизить влияние на процесс травления водяных паров, попадающих в рабочую камеру из остаточных газов. Она также конденсирует летучие продукты реакции травления и большинство применяемых рабочих газов, практически полностью предотвращая их попадание в диффузионный насос. Дроссельная заслонка в патрубке, соединяющем вакуумную камеру с откачной системой, позволяет плавно регу-



лизовать скорость откачки камеры: иногда для облегчения зажигания плазмы при предельно низких рабочих давлениях необходимо уменьшать эффективную скорость откачки и, тем самым, увеличивать давление рабочих газов в камере. После зажигания заслонка снова открывается. Масло в обоих насосах меняется одновременно через два месяца двухсменной работы (срок, в течение которого накапливается достаточно большой объем токсичных газов и продуктов травления).

Все газовые магистрали установки выполнены из нержавеющей стали. Система управления газонапуском находится на лицевой панели вакуумного поста в удобном для оператора месте.

Газовая система установки состоит из трехканального устройства управления газонапуском и трех каналов газонапуска на базе расходомера РРГ-9 с электромагнитными запорными клапанами. Расход рабочего газа регулируется от 0 до 0,1 Вт. Пересчет показаний расходомера в вольтах в поток соответствующих газов, выраженный в ваттах, осуществляется путем умножения показаний на градуировочный коэффициент, свой для каждого газа: аргона, кислорода, шестифтористой серы и четыреххлористого кремния.

**Стойка питания и управления** располагается вплотную к вакуумному посту. Она состоит из блока управления вакуумной системой, ВЧ- и НЧ-генераторов, многоканального вакуумметра БГДВ, источников питания электромагнитов и лазера. Ее мощность не превышает 7 кВА. Сверху на стойке крепится ВЧ-генератор УВ-1 на частоту 13,56 МГц, выходная мощность которого регулируется в диапазоне от нуля до 1000 Вт. В этот генератор, предназначенный для питания антенны, встроено устройство управления схемой согласования мощности антенны с плазмой. Над ВЧ-генератором расположен НЧ-генератор, с выхода которого снимается сигнал смещения рабочего столика в виде меандра. Частота НЧ-генератора 100 кГц, поэтому ему не требуется согласующего устройства. В генераторе предусмотрена возможность измерения напряжения автосмещения столика. Он также индицирует ионный ток в цепи генератора и амплитудное значение НЧ-напряжения. Для обеспечения последующей модернизации установки вместо НЧ-генератора для питания рабочего столика на стойке может быть установлен второй генератор типа УВ-1. При этом на кожухе согласующего устройства антенны следует установить отдельный прибор измерения автосмещения столика, а само согласующее устройство расположить в нижней задней части рабочей камеры и соединить его ВЧ-кабелем с рабочим столиком и ВЧ-генератором, подающим смещение на столик.

Кроме электропроводки к установке подводятся:

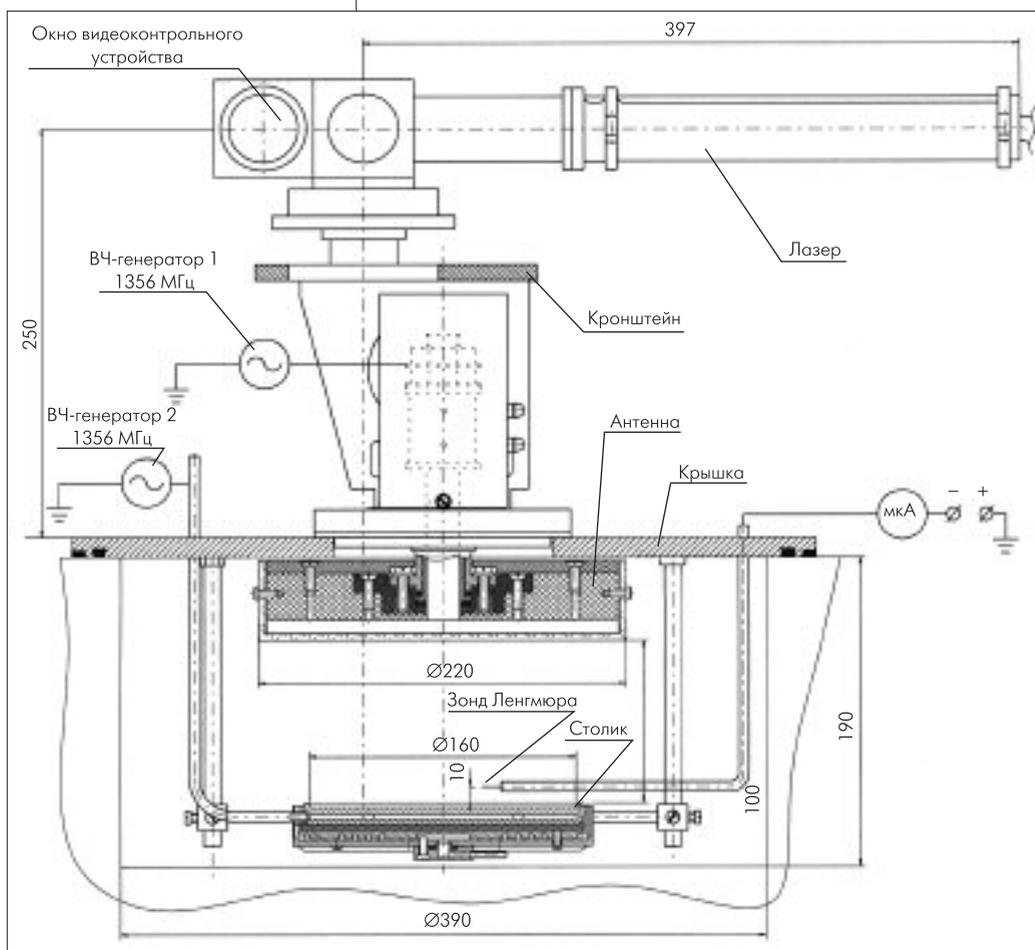
- линии подачи охлаждающей воды с температурой от 10 до 25°C под давлением от  $3 \cdot 10^5$  до  $5 \cdot 10^5$  Па;
- линия технологических газов с давлением  $10^5$ – $1,5 \cdot 10^5$  Па;

- магистраль сухого азота, используемого для двух-трехкратной очистки камеры от остатков технологических газов и в качестве газобалласта;
- линия слива охлаждающей воды;
- магистраль вытяжки выхлопа форвакуумного насоса.

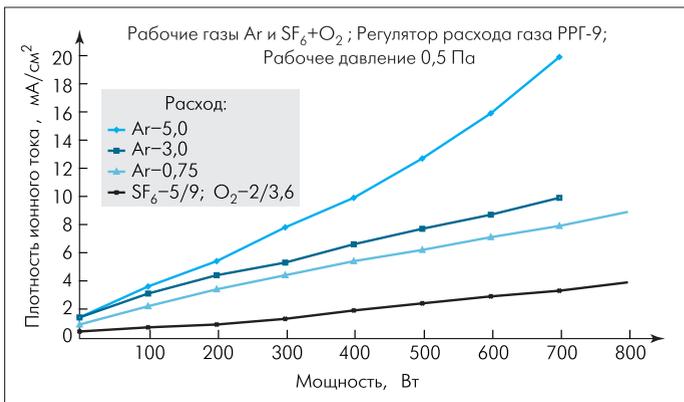
**Работа установки.** После установления в камере требуемого по технологии остаточного давления (реально достижимое не хуже  $6 \cdot 10^{-4}$  Па) в нее напускают технологические газы. Чем ниже их рабочее давление, тем ниже скорость травления, но выше его анизотропия. Поэтому для прецизионного травления рабочее давление выбирается равным примерно  $6 \cdot 10^{-2}$  Па, а для ускоренного травления –  $4 \cdot 10^{-1}$  Па. Затем включается ВЧ-генератор в режиме стабилизированной мощности.

Измерения параметров плазмы показали, что плотность ионного тока практически линейно зависит от ВЧ-мощности, подводимой к антенне (рис.2). А от плотности этого тока, в свою очередь, непосредственно зависит плотность плазмы, что и позволяет оценить ее по графикам, приведенным на рис.2. Согласно оценочному расчету, при мощности 800 Вт концентрация плазмы превышает  $1 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Кроме того, из рис.2 следует, что значение плотности ионного тока увеличивается с ростом давления технологического газа (пропорционального потоку).

Без подачи на столик ВЧ- или НЧ-мощности его потенциал относительно плазмы составляет всего несколько вольт. Этот потенциал, определяющий энергию ионов, бомбардирующих поверхность столика, возрастает при подаче на него мощности ВЧ- или НЧ-генератора. Максимальное значение этой мощности зависит от стойкости используемых фото- или электронорезистов. В проводимых экспериментах



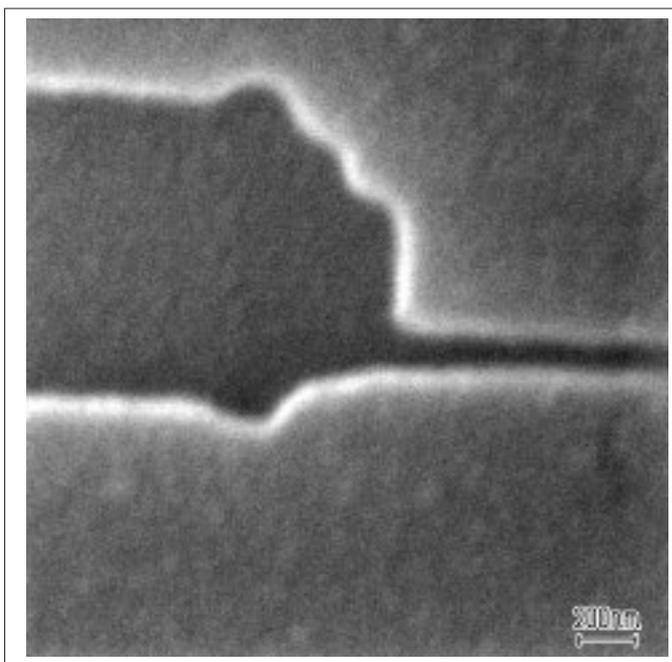
**Рис. 1. Конструкция вакуумной камеры**



**Рис.2. Зависимость плотности ионного тока на зонде от подаваемой ВЧ-мощности при фиксированных значениях расхода газа**

точное значение мощности (от 70 до 300 Вт в случае ВЧ-генератора) устанавливали так, чтобы потенциал автосмещения был равен 150–200 В. В этом диапазоне потенциала скорость травления окисла кремния составляла 0,4 мкм/мин, кремния – 1 мкм/мин и нитрида галлия – 0,12 мкм/мин (естественно, в различных технологических средах и при различных давлениях).

**Применение установки.** Установка "Эра-3М" использовалась при изготовлении полевых СВЧ-транзисторов (30–40 ГГц) на арсениде галлия для получения в диэлектрическом покрытии окон сверхмалых размеров. В качестве покрытия использовался нитрид кремния. Окна формировались с помощью электронно-лучевой литографии высокого разрешения и последующего травления в плазме фреона-218 при давлении примерно 0,1 Па. Мощность обоих генераторов – подключенных к излучателю источника плазмы и к столику – не превышала 150 Вт. Скорость травления нитрида кремния составляла 0,14 мкм/мин. При этом скорость бокового травления была на два порядка меньше. Равномерность травления на пластине диаметром 150 мм была не хуже ±3%. Ширина полученной "канавки" не превышала 0,1 мкм при толщине диэлектрика 0,15 мкм (рис.3). При этом низкая энергия ионов, бомбардирующих подложку (не более 150–200 эВ), позволяла получать низкий уровень радиационных повреждений арсенидгаллиевой подложки.



**Рис.3. Микрофотография полученной на установке "Эра-3М" структуры**

Установка была использована также для травления выращенных на сапфировой подложке эпитаксиальных структур нитрида галлия при производстве светодиодов синего излучения. Процесс проводили в плазме смеси газов, содержащих хлористые соединения при очень низких рабочих давлениях (менее 0,1 Па). Мощность в антенне не превышала 400 Вт, смещение при использовании НЧ-генератора – 200 В. Глубина травления составляла 1,4 мкм, скорость травления – не менее 0,12 мкм/мин. Точность прекращения процесса травления по достижении заданной глубины была не хуже 100 нм (при использовании лазерного измерителя). Здесь проявилось одно из главных достоинств установки – малые радиационные повреждения приповерхностных слоев нитрида галлия благодаря низкой энергии ионов. В результате к протравленным областям получены контакты хорошего качества.

При травлении монокристаллического кремния на установке "Эра-3М" скорость травления при давлении элегаза 0,5 Па и мощности антенны 750 Вт достигала 3 мкм/мин. В том же процессе скорость травления термически выращенной двуокиси кремния была в пять раз ниже. При травлении такой же пленки, но с маской из обычного фоторезиста, с использованием гелиевого теплоотвода скорость составила 0,4 мкм/мин при очень высоком разрешении. Селективность по поликремнию составила 1/3, что при равномерности травления ±1% на подложке диаметром 150 мм представляется вполне достаточным.

Как уже отмечалось, установка проектировалась как универсальная. Поэтому кроме реактивного ионного травления на ней проводили травление систем металлизации полупроводниковых приборов в среде аргона. Травление шло исключительно за счет ионной бомбардировки пластины. Скорость травления золота составляла 0,2 мкм/мин. В тех же условиях проводили травление материалов типа КРТ на подложке с маской на основе позитивного фоторезиста. Время травления на глубину 12 мкм составило 25 мин. Хорошие результаты достигнуты и при травлении пленок алюминия на пластинах из арсенида галлия. При травлении через маску из резиста были получены линии субмикронных размеров (0,5 мкм) и с вертикальными стенками. Особенности устройства позволяют проводить процесс травления алюминия с различными, в том числе и малыми, скоростями. Это, в свою очередь, приводит к снижению тепловых нагрузок на фоторезистивную маску, благодаря чему на подложках с низкой теплопроводностью можно формировать рисунки с хорошим разрешением.

В настоящее время установки "Эра-3М" используются при серийном производстве полупроводниковых лазеров и светодиодов, обеспечивая хорошую воспроизводимость процессов травления гетероструктур и не вызывая радиационных повреждений приповерхностных слоев полупроводника.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Плазменная технология в производстве СБИС/ Под ред. Н.Айнспрука и Д.Брауна/ Пер. с англ. под ред. Е.С.Машковой. – М.: Мир, 1987. – 470 с.
2. Патент 2171555 РФ. Источник ионов высокой плотности/ Берлин Е.В. Приоритет от 06.03.00.
3. Патент 5683539 США. Inductively Coupled RF Plasma Reactor with Floating Coil Antenna for Reduced Capacitive Coupling / Xue-Yu Qian, Arthur H. Sato. Приоритет от 4.11.1997.
5. Патент 5685941 США. Inductively Coupled Plasma Reactor with Top Electrode for Enhancing Plasma Ignition/ John Forster, Baruey M.Cohen, Bradley O.Stimson, George Preux. 21.11.1995.
6. Патент 5580385 США. Structure and Method for Incorporating an Inductively Coupled Plasma Source in a Plasma Processing Chamber 3 Ajil P.Paranjpe, Cecil J. Davis, Robert T.Matthews.12.1994.