

С. В. Бордусов

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ СВЧ РАЗРЯДА В КИСЛОРОДЕ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220027, Республика Беларусь*

Методика удаления фоторезиста с подложек путем плазменного сжигания была введена в процессы изготовления полупроводниковых приборов и ИС около 30 лет назад [1]. С того времени технология приборов претерпела значительные и разносторонние усовершенствования и, в частности, некоторые технологические операции (задубливание фоторезиста излучением дальней области УФ спектра, процессы плазменного травления и ионной имплантации) сделали операцию плазменного удаления фоторезиста довольно затруднительной. Параллельно шло совершенствование методов плазменной обработки для переноса рисунка маски из фоторезиста на поверхность подложки, где требуется высокая устойчивость материала маски, и методов жидкостного удаления фоторезиста.

Основным требованием для плазменного метода является полное удаление фоторезиста после операции травления. Дополнительно требуется возможность автоматизации процесса, с быстрой поштучной обработкой подложек диаметром 150, 200 и, в перспективе, 300 мм. В технологии современных ИС необходимо также, чтобы полупроводниковые подложки со структурами приборов не подвергались ионной бомбардировке, которая может ускорить удаление фоторезиста, однако приводит к существенному загрязнению поверхности подложек и вызывает нежелательные изменения характеристик приборов. В определенных технологических процессах ионная бомбардировка неизбежна и необходима – например, для анизотропного ионно-химического сухого травления. Но при сухом удалении фоторезиста имеет место чисто химический процесс с термической активацией, где химическое воздействие вызывает атомарный кислород. Ионная бомбардировка подложек при этом не нужна, поэтому желательно избегать их прямого контакта с плазмой.

В целях анализа для оптимизации процесса основные факторы при удалении фоторезиста можно выразить через три кинетических параметра: 1 – состояние фоторезиста; 2 – концентрация атомарного кислорода; 3 – температура. При этом состояние фоторезиста не следует считать независимой переменной, так как оно определяется предшествующими операциями (задубливание и травление), но его надо удалить независимо от состояния. Следовательно, остаются лишь два варьируемых параметра, которые надо оптимизировать соответствующим выбором конструкции установки и условий обработки.

Поскольку атомарный кислород является основным реагентом в этом процессе [2], ядром установки для поштучной обработки должен быть эффективный источник, например, электроразрядного типа. При этом для предотвращения ионной бомбардировки подложки ее следует помещать за пределами зоны плазменного разряда, вниз по потоку газа. Разряд в таком реакторе должен создавать минимальные потенциалы плазменного слоя. Процессы с использованием плазмы (распыление и ионно-стимулированные химические реакции) поглощают значительную часть энергии разряда. Там, где эти процессы технологически не нужны, они представляют напрасно расходуемую и потенциально вредную энергию. Значения потенциалов в этих процессах обратно пропорциональны частоте разряда, поэтому в случае сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмы они должны составлять единицы вольт, что ниже порога распыления для большинства материалов. Генерируемый с помощью резонатора и удерживаемый в кварцевой трубе СВЧ разряд не нуждается в электродах и не создает загрязнения подложки.

Прямое сопоставление (по параметрам) эффективности диссоциации молекул в СВЧ разряде (2,45 ГГц) и в ВЧ разряде (13,56 МГц) затруднительно. Как показывает опыт, ВЧ разряд является более предпочтительным для ионно-стимулированных процессов, а СВЧ разряд уже многие годы применяют в источниках атомарных газов (для диссоциации молекул).

Для удаления фоторезиста важны температурная зависимость реакций и концентрация атомарного кислорода на поверхности фоторезиста. Главное ограничение для гетерогенных процессов состоит в уменьшении скорости реакций по причине расхода реагентов в результате медленного (относительно самой реакции) диффузионного поступления газообразных реагентов в поверхностный реакционный слой. Этот так называемый "эффект нагрузки" можно компенсировать, обеспечивая достаточный приток реагента к поверхности подложки. В итоге ограничивающим фактором становится скорость гетерогенной реакции. Сухое удаление фоторезиста действием атомарного кислорода особо чувствительно к "эффекту нагрузки", поскольку молекулы кислорода диссоциируют с некоторым трудом. Вследствие этого, как правило, удаление фоторезиста в сильно загруженных реакторах, при значительном обеднении газовой среды атомарным кислородом протекает очень неэффективно.

Для компенсации "эффекта нагрузки" требуется максимально увеличивать парциальное давление непрореагировавшего атомарного кислорода в рабочем объеме реактора с достаточным его притоком, тогда ход реакции не будет сколько-нибудь заметно влиять на концентрацию атомарного кислорода. При этом важно различить концентрацию атомарного кислорода и его массовый поток. Высокая концентрация активного реагента в потоке обеспечивает высокую начальную скорость реакции, тогда как большой поток массы поддерживает высокую скорость реакции, предупреждая обеднение среды атомарным кислородом.

На рис. 1 схематически показана конструкция СВЧ газоразрядной технологической системы, в которой исследовался процесс удаления фоторезистивных маскирующих слоев в послесвечении плазменного потока. В качестве плазменного источника использовался СВЧ плазмотрон 1 резонаторного типа, собранный на базе согнутого в кольцо прямоугольного волновода, имеющего на внутренней поверхности отверстия для поступления СВЧ энергии в резонирующую область. По оси волноводного излучателя располагалась кварцевая разрядная камера, в которой в условиях вакуума возбуждался газовый разряд 2. Обрабатываемые подложки 4 размещались в вакуумной камере 3 на горизонтальном подложкодержателе 5 ниже края разрядной камеры. Предусмотрено вращение подложкодержателя вокруг оси. Около разрядной камеры под подложкодержателем расположен нагреватель 6, обеспечивающий бесконтактный нагрев подложки до 550 К.

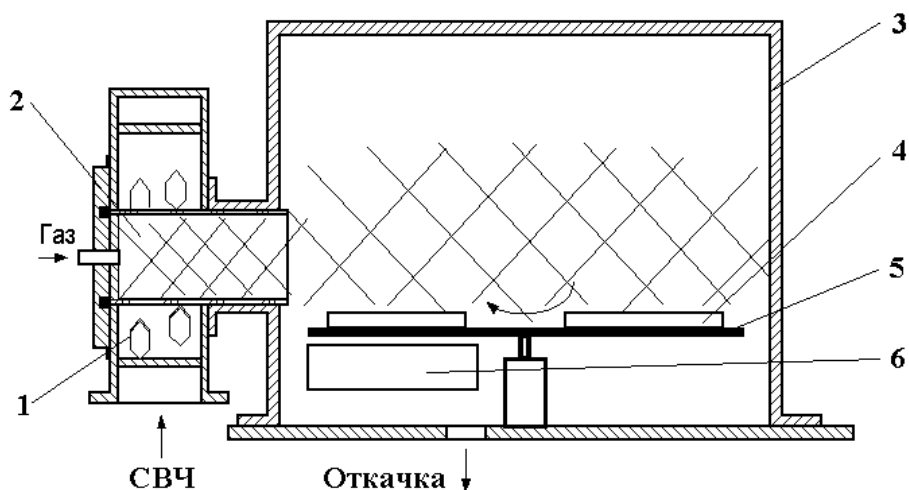


Рис. 1. Схема плазменной СВЧ разрядной системы: 1 – плазмотрон; 2 – зона СВЧ разряда; 3 – вакуумная камера; 4 – подложки; 5 – подложкодержатель; 6 – регулируемый нагреватель.

В такой системе подложки надежно защищены от непосредственного воздействия плазмы и генерируемого плазмой ультрафиолетового излучения. Конструкция разрядного устройства рассчитана на значительный газовый поток.

Эксперименты проводили с пленками нанесенного и обработанного по стандартным режимам позитивного фоторезиста AZ-1350J на подложках диаметром 150 мм; уровень мощности (на частоте 2,45 ГГц) составлял 600 Вт. Измерения толщины фоторезистивной пленки выполняли интерферометрическим методом.

Активность атомарного кислорода по отношению к фоторезисту очень высока, однако для ускорения процесса (ввиду умеренной энергии активации) требуется нагрев подложки. Экспериментально установлено, что нагрев подложек до температуры выше 450 К существенно ускоряет реакцию (причем в широком интервале других параметров), производя минимальный эффект термодеривации для подложки.

На рис. 2 показана зависимость скорости удаления фоторезиста от температуры подложки.

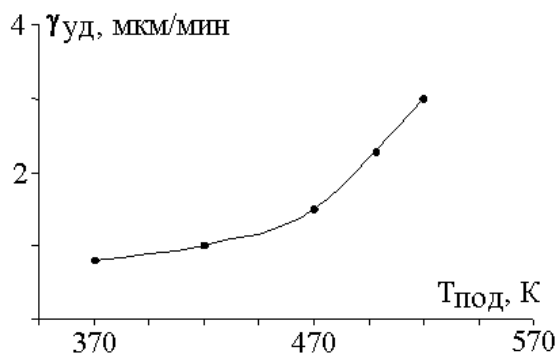


Рис. 2. Зависимость скорости удаления фоторезиста от температуры подложки.

Зависимость скорости удаления фоторезиста от давления кислорода носит экстремальный характер и достигает максимального значения при давлении 260 Па, что может быть объяснено достижением в этом случае оптимальных разрядных условий (рис. 3).

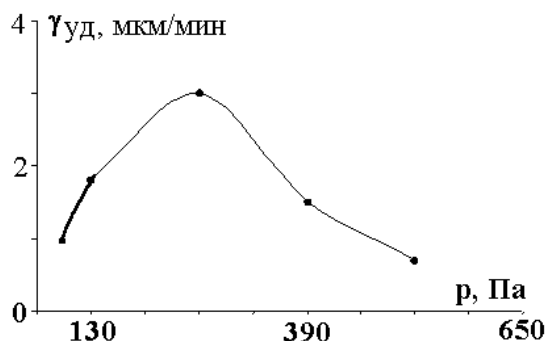


Рис. 3. Зависимость скорости удаления фоторезиста от давления в разрядной камере.

Важным фактором для этого процесса является избирательность воздействия относительно нижележащих слоев (обычно – SiO₂ и Si). Атомарный кислород не должен травить эти материалы. Измерения толщины слоев SiO₂ (100 нм) и поликремния (230 нм) не показали изменения толщины в результате обработки в течение 20 мин. Если принимать воспроизводимость измерения толщины слоев равной 1 нм, то при скорости стравливания фоторезиста 3 мкм/мин избирательность превышает $3 \cdot 10^4$, то есть оказывается бесконечно большой.

С увеличением расхода кислорода в скорости удаления фоторезиста достигается некоторый максимум. При значениях расхода газа выше оптимального скорость стравливания фоторезиста снижается.

Согласно теории, эффективность диссоциации кислорода в разряде и концентрация атомарного кислорода в области послесвечения должны снижаться с ростом расхода [3]. Однако концентрация в этом процессе не столь существенна, как интегральное количество атомарного кислорода в потоке над подложкой. Более того, большой расход реагента ослабляет "эффект нагрузки".

Важным фактором являются потери активного реагента из-за гомогенной и гетерогенной рекомбинации. В реакторе с конструкцией, показанной на рис. 1, время выхода атомарного кислорода из области свечения к поверхности подложки при оптимальных условиях составляло ~0,6 мс. Это примерно на три порядка величины меньше расчетного времени жизни для рекомбинационного образования молекул O₂ и O₃. Конечно, неизбежна также гетерогенная рекомбинация, но большой расход кислорода снижает ее влияние.

Добавление очень малых количеств фтор-углеродных соединений должно ускорять стравливание фоторезиста. Однако, поскольку атомарный фтор неизбежно вызовет также травление нижеле-

жащих кремнийсодержащих слоев, подобные добавки нежелательны.

Таким образом, процесс удаления фоторезистивных защитных покрытий в зоне послесвечения плазмы СВЧ разряда имеет высокие количественные и качественные показатели, что делает его весьма перспективным для применения в технологии изготовления БИС и СБИС при использовании подложек диаметром 150, 200 и 300 мм в условиях автоматизированного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменная технология в производстве СБИС. Пер. с англ. с сокращ. / Под ред. *Айнспрука Н., Брауна Д.* М., 1987. С. 10–11.
2. *Оулет Р., Барбье М., Черемисинофф П. и др.* Технологическое применение низкотемпературной плазмы. М., 1983. С. 54–62.
3. *Кузнецов В. И.* Травление и осаждение слоев с помощью химически активных частиц, создаваемых в плазме, отделенной от зоны обработки // *Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. Вып. 2.* (1668). М., 1992.

Поступила 07.08.2001

Summary

The results of experimental investigation the process of removing protoresistive protection layers in oxygen microwave discharge afterglow are presented. The process demonstrated a good characteristics and may be successfully used in very-large-scale integration (VLSI) processing with substrates diameter 150, 200 and 300 mm under conditions of fully automatized manufacture.

M. K. Bakhadir Khanov, Kh. M. Iliev

TENSO-HALL EFFECT IN COMPENSATED SILICON

*Tashkent State Technical University,
str. Universitetskaya, 2, 700095, Tashkent, Uzbekistan*

The results of recent investigations show that semiconductor materials compensated with deep impurities are very sensitive to external perturbations: light, temperature, deformations. This is due to the properties of impurities to produce deep energy levels in the forbidden band of the crystal. The nature of their creation is related to compound complexes of impurity atoms, inhomogeneous distribution of impurity potentials in crystal volume and the strong mechanical stress of the crystal lattice. When subjected to deformations, the states of the crystal in the lattice change as well as its charge state. This has to lead to an essential influence on electric and photoelectric properties of the crystal [1]. Therefore, the study of properties of compensated semiconductor materials with deeply lying impurity levels for external mechanical perturbation is a most simple and efficient method of investigating the states of the impurity atoms. On the basis of these materials one could create principally new, sensitive strain gauge transducers.

For this purpose B-doped, S-compensated, Si -samples of specific resistance at room temperature $\rho_0=40 \text{ Ohm/sm}; 1,47 \cdot 10^2 \text{ Ohm/sm}; 3,7 \cdot 10^3 \text{ Ohm/sm}$, i.e. the samples with different degrees of compensation were fabricated. They were out to be crystallographically (100) oriented along a big edge of the parallelepiped. Their dimensions were $6 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$. Compression X and current were aligned with the axis (100). The choice of this alignment was due to the fact that just there the highest tensor resistance of n-type Si-samples was observed [2]. The experiments were carried out at room temperature: the dependence of the resistivity on compression X was measured.