
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

С.В. Бордусов

СВЧ-ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

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

В последние годы наблюдается значительное возрастание интереса к практическому использованию СВЧ-энергии в промышленных целях [1, 2]. При этом отмечается, что быстрое внедрение СВЧ в народное хозяйство стало возможным благодаря разработке недорогих и надежных СВЧ-генераторов [3].

Широкое распространение в различных областях науки и техники СВЧ-энергия находит в виде плазмы газового СВЧ-разряда. Она используется для накачки газовых лазеров [4]; в технике спектрального анализа [5]; в качестве источников света в экспериментах по резонансной флюоресценции для измерений малых концентраций химически активных атомов и двухатомных радикалов [6]; для поверхностной активации полимеров [7]; для разрушения сильно токсичных и канцерогенных веществ [8]; для нанесения твердых покрытий, упрочнения, закалки [9]; в воздушно-реактивных двигателях для целей перемещений летательных аппаратов [4]; в плазмохимических процессах диссоциации воды при получении водорода – перспективного и экологически чистого топлива будущего [10]; синтеза субмикронных порошковых материалов при получении мелкодисперсных абразивов для резки и шлифовки пластин [11]; диссоциации сероводорода, CO_2 [12] и т.д.

К настоящему времени на базе СВЧ-техники разработано большое количество разновидностей устройств, позволяющих на их основе реализовать большинство технологических процессов производства интегральных схем: плазменную очистку и активирование поверхности подложек; эпитаксию; окисление, литографические процессы, включающие сушку, задубливание, экспонирование и удаление фоторезистивных слоев; все виды вакуумно-плазменного травления; осаждение тонких пленок, включающее плазмохимическое осаждение и катодное распыление; легирование (ионную имплантацию); термический отжиг полупроводниковых пластин; модификацию поверхности.

При этом основную роль в реализации вышеназванных процессов играет СВЧ-плазменная технология, так как плазма СВЧ-разряда является эффективным механизмом передачи мощности электромагнитного поля в газ и представляет собой чистый атомарный источник, в котором, как правило, отсутствуют металлические электроды, являющиеся источником загрязнений.

Рассмотрим некоторые характеристики и условия проведения технологических процессов микроэлектроники с использованием энергии СВЧ-полей.

Плазменная очистка и активирование поверхности подложек

Основным компонентом газовой смеси для очистки поверхности подложки от органических загрязнений с использованием СВЧ-разряда является кислород с небольшими (до 1% по объему) добавками аргона, азота или гелия. Добавки H_2 , N_2 , Ar , He катализируют процессы диссоциации молекул кислорода в плазме до атомарного состояния и тем самым ускоряют процесс очистки. Плазменная обработка используется также с целью удаления собственного оксида с поверхности Si в качестве предварительной очистки перед осаждением пленочных слоев различных материалов и составов. В этом случае используется H_2 с добавками H_2O и NF_3 . Как правило, процесс реализуется способом травления “вне зоны разряда” [13–15].

Эпитаксия

В сообщениях об использовании СВЧ-энергии в процессах эпитаксиального выращивания слоев аморфного кремния [16, 17] утверждается о хороших параметрах процессов и высоком качестве получаемых структур, не уступающим по свойствам пленкам, выращенным методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Плазменное окисление

Наибольшее число сообщений о процессах низкотемпературного окисления в кислородной плазме СВЧ-разряда относится к плазменному анодированию кремния (к примеру, [18–20]), хотя есть сведения и об окислении тонких металлических (Al, Ta, Ti, Nb) и полупроводниковых (GaAs, Si) пленок [21, 22]. При этом отмечается, что наряду с более высокими скоростями роста, пленки, формируемые в СВЧ-разряде, отличаются хорошими электрофизическими свойствами. В частности, в работах [18,19] сообщается о получении окисных пленок на кремнии со следующими параметрами: пробивное напряжение порядка $E_d \approx 3,9 \cdot 10^6$ В/см, плотность поверхностных состояний $N_{ss} = 9,5 \cdot 10^{11}$ см⁻², относительная диэлектрическая проницаемость в пределах $\epsilon_{ox} = 3,66–3,97$.

Литографические процессы

В процессе фотолитографии, которая в настоящее время находит наиболее широкое распространение в технологии производства ИС, СВЧ-энергия может использоваться на операциях плазменной очистки подложек, сушки слоя фоторезиста, экспонировании и удалении фоторезистивных маскирующих слоев травления рисунка.

Плазменная очистка подложек. Плазменная очистка подложек используется для повышения адгезии наносимого фоторезистивного слоя к поверхности материала и рассмотрена выше.

Сушка слоя фоторезиста. В сообщениях о применении СВЧ-энергии для сушки и задубливания фоторезистивных пленок при изготовлении их на кремниевых подложках [1, 23] указывается на высокую эффективность этого метода обработки. Процесс сушки длится несколько секунд. При этом сообщается, что при СВЧ-нагреве не только резко повышается производительность, но и устраняется опасность “перегрева” фоторезиста. Улучшается также качество проявления: изображение проявляется мгновенно после погружения в проявитель.

Экспонирование маскирующих слоев. Имеются сообщения [24, 25] об использовании в качестве источников света при экспонировании ламп СВЧ-разрядов низкого давления мощностью от 100 до 500 Вт, интенсивно излучающих в коротковолновой области спектра, что соответствует полосе максимальной чувствительности большинства фоторезистов (300–450 нм).

Удаление фоторезиста. Кроме плазмохимического метода удаления фоторезиста, который будет рассмотрен ниже, СВЧ-энергия может быть использована при удалении фоторезистивной пленки фототермическим методом [26,27], результатом которого является окислительная деструкция пленки в кислороде или кислородсодержащих газах. В [27] приведены результаты работ по удалению промышленно используемых фоторезистов PMMA, OMR, CMS, AZ-1350 J. Удаление фоторезиста осуществлялось при температуре подложки 400–430 К в атмосфере кислорода при давлении $6,6 \cdot 10^4$ Па и скорости потока 50 л/мин под воздействием ультрафиолетового излучения с плотностью потока энергии 2,4 Вт/см², создаваемого СВЧ-разрядной лампой, наполненной смесью аргона с парами ртути. В зависимости от режимов обработки и типа фоторезиста время полного удаления пленки лежит в интервале 15–30 мин.

Вакуумно-плазменное травление

Анализ литературы, посвященной вопросам травления материалов технологии микроэлектроники, показывает, что газовая плазма СВЧ-разряда используется для реализации практически всех процессов вакуумно-плазменного травления, за исключением ионно-плазменного травления. Это, по всей видимости, связано с особенностями поведения ионов (в частности, перемещением их под действием внешнего электромагнитного поля) в плазме, создаваемой СВЧ-полями.

Ионно-лучевое травление (ИЛТ). Процессы ИЛТ реализуются с помощью ионных источников различной конструкции [28], использующих в качестве рабочих газов H₂, He, Ar. Давление газов поддерживается в диапазоне $0,133–1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Использование СВЧ-разрядов позволяет эффективно формировать пучки ионов с энергией 10 – 100 эВ с большими поперечными сечениями (до Ø300 мм) различной конфигурации (круглые, овальные, кольцевые, прямоугольные, H-образные и т.д.). При

этом степень ионизации достигает 30% и выше, а концентрация электронов N_e во много раз (более 100) превышает критическую.

Радикальное травление (РТ). Радикальное травление с помощью плазмы СВЧ-разряда используется при удалении фоторезиста, травлении Si, SiO₂, Si₃N₄ [23, 29]. Процессы реализуются при низких температурах подложек (310–370 К) и характеризуются отсутствием радиационных повреждений и деградации электрофизических параметров обрабатываемых структур.

Реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ). При проведении процессов РИПТ обрабатываемые изделия находятся в контакте с плазмой СВЧ-разряда и размещаются, как правило, на электроде, подключенном к источнику СВЧ- [30], ВЧ- [31, 32], НЧ- [33] либо постоянного [34] напряжения. Возможно также их расположение в зоне разряда на заземленном подложкодержателе [35]. Эти процессы отличаются высокой степенью равномерности обработки по пластине – 96–97%, более высокими, по сравнению с обработкой в плазме ВЧ- либо НЧ-разряда, скоростями травления, возможностью селективного управления ходом процесса за счет изменения параметров сигнала, подаваемого на подложкодержатель-электрод.

Реактивное ионно-лучевое травление (РИЛТ). Процессы РИЛТ с использованием плазмы СВЧ-разряда реализуются в газоразрядных системах, использующих явление электронного циклотронного резонанса [28]. К настоящему времени имеются сообщения о травлении с помощью этих газоразрядных систем практически всех материалов микроэлектроники в очень широком наборе газов и их смесей.

Типовые технологические режимы обработки: степень предварительного вакуума не выше $7 \cdot 10^{-4}$ Па, рабочее давление порядка $5 \cdot 10^{-2}$ Па, плотность ионного тока – не менее 5 мА/см², энергия ионов в процессе травления – 20–40 эВ. Такие режимы позволяют осуществлять анизотропное травление с нулевым подтравом под маску с высокой селективностью травления материалов. Например, селективность травления Si к SiO₂ составляет 30:1, селективность травления Mo к SiO₂ – 40:1 и т.д.

Плазменное травление (ПТ). Плазменное травление реализуется в реакционно-разрядных камерах больших объемов [36–38], разработанных специально для обработки кремниевых пластин \varnothing 150 и 200 мм, при этом конструкции разрядных систем ориентированы на проведение процессов поштучной обработки с целью формирования рисунка в нанесенных на поверхность пленках, глубинного травления материала пластины и т.д.

Радиационно-стимулированное травление. Стимуляция процессов травления материалов может осуществляться потоками ионов, электронов и излучений (инфракрасным, видимой области, ультрафиолетовым и рентгеновским) [39]. При этом поток стимулирующего воздействия и поток частиц, производящих травление, генерируются независимо друг от друга и подаются к обрабатываемой поверхности. При такой организации процесса травления повышаются и количественные, и качественные показатели процесса. Так, например, в [40] предлагается способ, существенно повышающий скорость травления GaAs. Подложка GaAs с маской размещается в камере обработки на вращающемся держателе. С камерой обработки соединены камеры генерации плазмы и генерации ионов. В камеру генерации плазмы до определенного давления напускается Cl₂ и подается СВЧ-мощность. Под воздействием электронного циклотронного резонанса генерируется плазма. Путем подачи напряжения на вытягивающий электрод пучок ионов Cl⁺ направляется в камеру обработки на подложку. Одновременно в камере генерации ионов создаются ионы Ag⁺, которые также направляются на подложку. Ионная бомбардировка приводит к образованию в подложке аморфного слоя толщиной 20–30 нм. При таком способе подачи ионов Ag⁺ и Cl⁺ на подложке не образуются продукты, препятствующие быстрому травлению, и подложка не загрязняется. Таким образом становится возможной селективная сверхчистая обработка.

Осаждение тонких пленок

Плазмохимическое осаждение. Плазмохимическим методом с использованием СВЧ-разряда можно осаждать большое число неорганических и органических соединений – SiO₂, Si₃N₄, Si_xN_y, аморфный кремний, Cd, GeO₂, B₂H₃, Ti_xO_y, Sn_xO_y, Fe₂O₃, гексаметилдисилокан и т.д. [16, 41–44]. При проведении процессов плазменной полимеризации СВЧ-разряды являются более эффективными источниками радикалов и ионов [86], чем широко используемые разряды постоянного тока и ВЧ. И, как следствие этого, они позволяют проводить процессы с более высокими скоростями, обеспечивая большую производительность оборудования.

Катодное распыление. Катодным распылением с использованием СВЧ-разряда получают окисные, силицидные, нитридные и другие пленки [45–47], характеризующиеся большой прочностью сцепления с подложкой и высокими электрофизическими показателями.

Легирование (ионная имплантация)

Наиболее общим применением ионной имплантации, в случае использования в качестве источников ионов СВЧ-разряда [28, 48], является процесс ионного легирования кремния при изготовлении приборов. В качестве легирующей примеси используются ионы бора, индия, фосфора мышьяка с энергией в диапазоне 3–500 эВ, имплантируемые в приповерхностную область кремниевой подложки на глубину 10–100 нм. Нужную концентрацию легирующей примеси в кремнии в диапазоне 10^{14} – 10^{21} см⁻³ получают после отжига (нагрева до выбранной температуры в интервале 870–1270 К). Наряду с ионно-лучевой имплантацией СВЧ-разряды используются в процессах плазменно-ионной имплантации, основанных на приложении к подложке отрицательных импульсов высокого напряжения, обеспечивающих вытягивание ионов из плазмы и ускорение их по направлению к подложке [49]. Главное преимущество плазменно-ионной имплантации перед ионно-лучевой состоит в простоте обработки больших площадей или трехмерных объектов выпуклой формы и возможности использования широкой области ионных энергий от нескольких электрон-вольт до 250 кэВ.

Термический отжиг

Характерной чертой термического отжига в СВЧ-полях является то, что, в отличие от традиционных методов нагрева, при которых тепловой поток на пластину направляется извне, вызывая при этом значительный градиент температур между нагретой поверхностью и центром пластины, при СВЧ-обработке он поступает как бы от “внутреннего” источника тепла, так как пластина нагревается за счет выделения тепла в объеме материала [93].

Исследования по СВЧ-отжигу МОП-структур с мелкозалегающими переходами и БИС с субмикронными размерами [50, 51] показали эффективность данного метода нагрева полупроводниковых пластин. Для предотвращения возникновения разряда СВЧ-нагрев проводится, как правило, при давлении не выше 1 Па в атмосфере азота или аргона [52] при этом, в зависимости от режимов обработки, время выхода температуры подложки на стационарное значение составляет 1–2 минуты.

Модификация поверхности

Под модификацией поверхности в данном случае подразумевается азотирование (нитрирование) поверхности Si-подложек [53, 54] и металлических образцов [28, 55] с целью получения нитридных или оксинитридных слоев. Азотирование проводится как в самом СВЧ-разряде в азоте либо смеси N₂+H₂, так и в послесвечении (т.е. вне зоны разряда). Рабочие режимы процесса (СВЧ-мощность, нагрев подложек, давление и расход газа, состав газовой смеси и т.д.) зависят от обрабатываемого материала и конструктивных особенностей газоразрядного устройства. Формируемые этим способом слои имеют ряд преимуществ в сравнении с полученными термическим путем. Так, например, для тонких слоев нитрида или оксинитрида кремния это, прежде всего, лучшие электрические характеристики пробоя, стабильность зарядовых характеристик слоя при термических испытаниях, снижение потенциального барьера для носителей на границе нитрированного диэлектрика с подложкой для уменьшения питающих напряжений РПЗУ с электрическим перепрограммированием [56].

Подводя итоги обзора использования плазмы СВЧ-разряда в технологии микроэлектроники, необходимо отметить, что перспективы ее широкого внедрения в промышленность объясняются, прежде всего, тем, что реализуемым на ее основе процессам присущи высокая энергетическая эффективность, селективность, большая скорость и производительность. Важным фактором является также и то, что в СВЧ-разряде удается получить параметры плазмы (степень ионизации, температура электронов и удельный энергетический вклад), близкие к оптимальным для осуществления большинства плазменных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонтарев Г.Г., Глазырин Б.Н., Лысов Г.В. и др. Микроволновое технологическое оборудование и приборы // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1992. Вып. 10 (1681).

2. Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н. СВЧ-генераторы плазмы: физика, техника, применение. М., 1988.
3. Соколов И.В. Магнетроны для СВЧ-нагрева и источники СВЧ-энергии // Электронная промышленность. 1996. № 3. С. 4–9.
4. Батанов Г.М., Грицинин С.И., Касый И.А. и др. СВЧ-разряды высокого давления // Тр. физ.ин-та. АН СССР. 1985. Вып. 160. С. 174–203.
5. Carnahan Jon W. Microwave induces plasma: a versatile spectroscopic source // Amer.Lab. 1983. Vol. 15. N 8. P. 31–36.
6. Wagner H.Gr., Welzbacher U., Zelbner R. Rate measurements for the reaction $H_2+Cl_2 \rightarrow HCl+Cl$ by Lyman – L fluorescence // Ber. Bunsen Ges. Phys. Chem. 1976. Vol. 80. N 9. P. 902–908.
7. Neusch M., Kieser J. Surface activation of polymers in a microwave plasma // Vacuum. 1984. Vol. 34. N10-11. P. 959–961.
8. Bozzelli J.M., Barat R. Variable power microwaves discharge and cairty // Rev. Sci. Instrum. 1981. Vol. 52. N 4. P. 612–614.
9. Туманов Ю.Н. Низкотемпературная плазма и высокочастотные электромагнитные поля в процессах получения материалов для ядерной энергетики. М., 1989.
10. Мелих-Асланова Т.А., Русанов В.Д., Фридман А.А. и др. Получение водорода в неравновесной плазме СВЧ-разряда // Ин-т физ. АН АзССР. Препр. Вып. 100. 1984.
11. Троицкий В.Н. Основные проблемы синтеза нитридов в низкотемпературной плазме // Синтез в низкотемпературной плазме. М., 1980. С. 4–23.
12. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Плазмохимические процессы в СВЧ-разряде // Химия плазмы. 1984. Вып. 11. С. 200–241.
13. Techniques and application of plasma chemistry. Edited by J.R. Hollahan, A.T. Bell. Willey-Interscience Pub. 1974.
14. Microwave plasma clearing system // Microelectron J. 1995. Vol. 26. N 2–3. P. 11.
15. Kikuchi Jun, Nagasaka Mitsuaki, Fujimira Shuzo, Yano Hiroshi, Horuke Yashiro. Clearing of silicon surfaces by NF_3 – added hydrogen and water-vapor plasma down stream treatment // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 1996. Vol. 35. N 28. P. 1022–1026.
16. Kato I., Wakana S., Hara S. Etc. Microwave plasma CVD system for the fabrication of thin solid films // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 1996. Vol. 21. N 8. P. L470–L472.
17. Gao Junsi, Narashima Hiroshi, Sakai Naofami. Growth of epitaxial silicon film at low temperature usig sputtering-type electron-cyclotron resonance plasma // Jap. J. Appl. Phys. Pt 2. 1999. Vol. 38. N30. P. L220–L222.
18. Martiret C., Devine R.A.B. Low-temperature oxidation of Si in a microwave electron cyclotron resonance excited O_2 plasma // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. N23. P. 3500–3502.
19. Koromogawa Takashi, Yamasita Akihito. Negative ion assisted silicon oxidation in downstream of microwave plasma // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 1998. Vol. 35. N9A. P. 5028–5032.
20. Buin Octavian, Kennedy Gary P., Gatner Mariuca, Taylor Stephen. Structure analysis of silicon dioxide and silicon oxinitride films produced using an oxygen plasma // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. N6. P. 1700–1711.
21. Заявка 57-198266 Япония, МКИ³ C23 F7/02, C23C 11/14. Метод плазменной обработки.
22. Nakamura Ryuichi, Ikoma Hideaki. Magnetically excited plasma oxidation of GaAs // Jap. J. Appl. Phys. Pt 2. 1996. Vol. 39. N1A, P. L8–L11.
23. Попов В.К., Кондрашова А.Т. СВЧ – плазмохимическая обработка // Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технол., организ. произв. и оборудование. Вып 22(922). М., ЦНИИ “Электроника”. 1982.
24. Matthews J., Ury M., Birch A. et all. Microlithography techniques using a microwave powered deep UV source // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1983. P. 172–183.
25. Levine L.S., Ury M.G. Microwave – powered lamp technology for photoimaging // SME Techn. Pap. N437. 1985.
26. Bolon D.A., Kunz C.O. Ultraviolet depolymerisation of photoresist polymers // Polym. Eng. Sei. 1972. Vol. 12. N 2. P. 109–114.
27. Ozawa K., Sto T., Tahikawa H. UV resist – stripping for high – speed and damage – free process // Ex-tended Abstr. 15 Conf. Solid State Devices and Mater., Tokyo, 30 Aug. 1 Sept. 1983. Tokyo, P. 125–128.

28. Гуляев Ю.В., Яфаров В.К. Микроволновое ЭЦР вакуумно-плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) // Зарубежн. электр. техн. 1997. ¹ 1. С. 77–120.
29. Shi J., Kamareni M., Shaner D., Rounts S., Fink S., Ferris D. Damage reduction in dry resist stripping systems // Solid-State Technol. 1995. Vol. 38. N 10. P. 75–82.
30. Заявка 57-174465 Япония, МКИ³ C23 F1/08. Устройство для плазменного травления.
31. Патент 4581100 США, МКИ³ B44C 1/22. Способ травления при комбинированном возбуждении плазмы.
32. Doh Hyun-Ho, Yeon Chung-Kyu, Whang Ki-Woong. Effects of bias frequency on reactive ion etching lag in an electron cyclotron resonance plasma etching system // J. Vac. Sci. and Technol. A. 1997. Vol. 13. N 3. Pt 1. P. 664–667.
33. Arnal J., Pelletier J., Pomot C., Pelit B. et all. Plasma etching in magnetic multipole microwave discharge // Appl. Phys. Lett. 1984. Vol. 45. N 2. P. 132–134.
34. Pichot M.G. Microwave multipolar plasma etching at low pressure: a novel reactor concept // Microelectron. Eng. 1985. Vol. 3. N1/4. P. 411–418.
35. Патент 4559100 США, МКИ³ HOIL21/306. СВЧ-установка для плазменного травления.
36. Singar Peter. New frontiers in plasma etching // Semicond. Int. 1996. Vol. 19. N8. P. 152–154, 156, 158, 164.
37. Bowies Jeffercy H., Duncan Dwight, Walker David N. A large volume microwave plasma source // Rev. Sci. Instrum. 1996. Vol. 67. N 2. P. 455–461.
38. Shirai Haiyume, Sakuma Yoshikazu, Uegama Hiroyaki. The control of the high-density microwave plasma for large-area electronics // Thin Solid Films. 1999. Vol. 37. N 1–2. P. 12–17.
39. Данилин Б.С., Куреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М., 1987.
40. Заявка 60-165721 Япония. МКИ³ HOIL21/302. Способ реактивно-лучевого травления.
41. Loncar G. Present status of thin oxide films creation in a microwave plasma // Czechosl. J. Phys. 1980. Vol. B30. N 6. P. 688–708.
42. Fukuda Takyua, Saito Katsuaki, Ohue Michio. High-quality, high-rate SiO₂ and SiN films formed by 400 kHz bias electron cyclotron resonance-chemical vapor deposition // Jap. J. Appl. Phys. Pt2. 1995. Vol. 34. N7B. P. L937–L940.
43. Rack M.J., Hilt L.L., Vasileska D., Ferry D.K. Remote plasma enhanced chemical vapor deposition SiO₂ in silicon based nanostructures // J. Vac. Sci. and Technol. B. 1999. Vol. 17. N 5. P. 2204–2208.
44. Farber David G., Bae Sanghoon, Okandan Murat, Reber Douglas M., Kuzma Terena, Fonash Stephen J. Pathway to depositing device-quality 50⁰ C silicon nitride in a high-density plasma system // J. Electrochem. Soc. 1999. Vol. 146. N 6. P. 2254–2257.
45. Pelaunay M., Touchais E. Electron cyclotron resonance plasma ion source for material depositions // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N 6. P. 2320–2324.
46. Ono Toshiro, Amazawa Takao, Nishimura Hiroshi, Matsuo Seitaro. Tantalum and tantalum nitride films deposited by electron cyclotron resonance sputtering as barriers to copper diffusion // J. Vac. Sci. and Technol. B. 1999. Vol. 17. N 5. P. 2385–2389.
47. Amazawa Takao, Ono Toshiro, Shimada Masaru, Matsuo Seitaro, Oikawa Hideo. Ultrathin oxide films deposited using electron cyclotron resonance sputter // J. Vac.Sci. and Technol. B. 1999. Vol. 17. N 5. P. 2222–2225.
48. Sekiguchi M., Matsushita H., Jonoshita I., Kobasawa M. Development of a 2.45 GHz electron cyclotron resonance ion source for ion implanter application // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N 2. Pt 2. P. 873–839.
49. Le Coeur F., Gagarde T., Pelletier J. Distributed electron cyclotron resonance plasma immersion for large area ion implantation (invited) // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. N2. Pt2. P. 831–836.
50. Tukan T., Ito T., Ishikawa H. Microwave annealing for temperature VLSI processing // Int. Electron. Device Meet., Washington, Dec. 1–4, 1985. New-York, 1985. P. 224–227.
51. Заявка 59-22384 Япония, МКИ³ HOI S3/18. Метод изготовления полупроводниковых приборов.
52. Патент 4593168 США, МКИ³ HO5B 6/78. Устройство для термообработки полупроводниковых пластин.
53. Maslehi M.M., Tu C.Y., Sigmon T.W., Saraswat K.C. Low temperature direct nitridation of silicon in nitrogen plasma generated by microwave discharge // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 6. P. 2416–2419.
54. Bera L.K., Banerjee H.D., Ray S.K. Microwave plasma nitridation of silicon dioxide on strained Si // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 73. N 11. P. 1559–1561.

55. Заявка 4265730 США, МКИ³ С23С 15/00. Устройство для обработки поверхности при использовании плазмы, генерируемой в СВЧ-разряде.

56. Петров Г.В., Иванцова Н.Д., Сысоев Б.И. Технологические основы получения и электрические характеристики тонких нитрированных слоев в элементах интегральных схем // Обзоры по электронной технике. Сер.3. Микроэлектроника. Вып. 6(1315). М., ЦНИИ “Электроника”, 1987.

Поступила 16.08.2000

Summary

Microwave plasma discharge applications in manufacturing of microelectronic products are reviewed. Some characteristics and material treatment conditions with microwave discharge technologies are considered.

В.Ф. Соколов, Ю.А. Соколова, Д.В. Мартынов, М.А. Александров

РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ АКТИВИРОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭМИТТЕРОВ

*Ивановский государственный химико-технологический университет,
пр. Ф. Энгельса, 7, г. Иваново, 153460, Россия*

Важнейшим условием стабильной работы вторичных электронных умножителей со сплавными динодами из магниевой и бериллиевой бронзы является оптимизация процесса активирования динодов, который состоит в прогреве исходного сплава в окислительной среде. Параметрами такого процесса являются температурный режим, время прогрева, состав и давление остаточных газов. В ходе термической обработки динодов возможно протекание целого ряда процессов: диффузия легкой компоненты сплава на поверхность; встречная диффузия окислителя в сплаве, реакции окисления магния и бериллия на поверхности образующегося оксида, в его толще и в объеме сплава; испарение легкой компоненты с поверхности слоя оксида. При этом испаряющийся металл может попадать на изоляцию между динодами и вызывать утечки тока, что снижает коэффициент усиления ВЭУ. Такое явление наблюдалось нами ранее в работе [1]. С целью предотвращения этого эффекта необходимо проводить процесс активирования таким образом, чтобы весь металл, появившийся на поверхности динода в результате диффузии из глубины сплава был полностью окислен, а для определения условий, позволяющих достичь этого результата, необходимо иметь сведения о скоростях диффузии и окисления магния и бериллия в процессе активирования. Настоящая работа посвящена получению таких данных.

Число атомов металла, продиффундировавших через единицу поверхности сплава за время τ , рассчитывалось из выражения

$$S = 2C_0 \sqrt{\frac{D\tau}{\pi}}, \quad (1)$$

где C_0 – начальная концентрация атомов металла в объеме; D – коэффициент диффузии.

Выражение (1) представляет собой решение уравнения Фика

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial \tau} \quad (2)$$

При граничных условиях

$$C|_{x \leq 0} = 0 \quad C|_{x=0} = const$$

и начальных условиях

$$C|_{\tau=\tau_0} = C_0 \quad (3)$$

© Соколов В.Ф., Соколова Ю.А., Мартынов Д.В., Александров М.А., Электронная обработка материалов, 2001, № 3, 78–83.