

2. Wang J., Chen Z.Q., Li Ch.M., Wang F., Zhongl Y. First-Principles Study on Mechanical Properties of IVB-Group Transition-Metal Nitrides TiN, ZrN, and HfN // *Advanced Materials Research*. 2012. V. 415–417. P. 1451–1456.
3. Беянин А.Ф., Багдасарян А.С. Слоистая структура на основе пленок поликластерного алмаза и AlN для устройств на поверхностных акустических волнах // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2017. № 3. С. 30–38.
4. Belyanin A.F., Luchnikov A.P., Nalimov S.A., Bagdasaryan A.S. Properties of planar structures based on policluster films of diamond and AlN // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 289 (2017) 012041 doi:10.1088/1757-899X/289/1/012041.

PECVD оборудование для нанесения Si₃N₄ – SiO₂

А.А. Ясунас, Е.А. Хохлов, А.С. Мысливец, В.Я. Ширипов
Минск, ООО «Изовак», ул. Селицкого, 7 – 202, yasunas@izovac.com

В работе представлено описание методов химического осаждения из газовой фазы с активацией плазмой емкостного разряда (в англоязычной литературе - Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD)) и химического осаждения из газовой фазы с активацией плазмой высокой плотности (в англоязычной литературе – High Density Plasma Chemical Vapor Deposition (HDPCVD)). Выполнено сравнение основных технологических характеристик, достоинств и недостатков таких систем, а также возможностей их технологического применения.

PECVD equipment for Si₃N₄ - SiO₂ deposition. A.A. Yasunas, E.A. Khokhlov, A.S.Myslivets, V.Ya. Shiripov. The description of Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) and High Density Plasma Chemical Vapor Deposition (HDPCVD) methods are provided. The comparison of the main technological characteristics, advantages and shortages of such systems, as well as the possibilities of their technological usage is carried out.

Введение

Эволюция методов химического осаждения из газовой фазы достигла значимой стадии, когда быстрое развитие технологий стало основной промышленной движущей силой для начала электронной революции в 1960-х годах [1, 2]. В начале 1970-х годов ХОГФ стал успешно применяться в полупроводниковой промышленности. Что позволило значительно уменьшить размер электронных компонентов.

В последние годы был достигнут большой успех, и методы ХОГФ были широко распространены и получили дальнейшее развитие благодаря ряду факторов [2]. Фундаментальные исследования в данной области способствовали значительному расширению перечня доступных прекурсоров и методов активации химических реакций, что стимулировало развитие методов химического осаждения из газовой фазы в различных областях и позволило осаждать различные материалы с высокой степенью чистоты [3].

Компания General Electric в 1962 году представила одну из первых работ о применении метода химического осаждения из газовой фазы активированного плазмой тлеющего разряда [4]. В 1964 году Даверн и др. сообщил об использовании того же процесса для изготовления пленок оксида кремния при комнатной температуре, но с использованием источника высокочастотного разряда для уменьшения нежелательного распыления, наблюдаемого в предыдущей работе.

В русскоязычной литературе для обозначения метода химического осаждения из газовой фазы активированного плазмой часто используют термин плазмохимическим осаждением (ПХО). В настоящее время из в ПХО выделились самостоятельные методы, технологические возможности, которых определяются рабочим давлением, концентрацией плазмы, температурой, а также воздействия других факторов.

Для ПХО диэлектрических материалов, в частности $\text{SiN}_x\text{-SiO}_x$, в современной технологии наибольшее развитие получили следующие подходы:

1) ПХО в плазме высокочастотного емкостного разряда при пониженном ($10\text{-}10^3\text{Па}$) и субатмосферном давлении $3\cdot 10^3 - 8\cdot 10^4\text{ Па}$;

2) ПХО в плазме высокой плотности при пониженном давлении $0,5 - 10\text{ Па}$.

Для инициации и поддержания ВЧЕ (высокочастотного ёмкостного) разряда переменное напряжение прикладывается к плоскопараллельным электродам. Между ними иницируется и поддерживается разряд. При проведении процессов плазмохимического осаждения температура образца чаще всего находится в диапазоне $200\text{-}400\text{ }^\circ\text{C}$, расстояние между электродами составляет $20 - 50\text{ мм}$, ВЧ-напряжение $0,1 - 5\text{ кВ}$, $f = 13,56 - 40,68\text{ МГц}$, плотность мощности $10\text{-}250\text{ мВт/см}^3$, плотность плазмы $10^7\text{-}10^9\text{ см}^{-3}$, скорость осаждения $0,1 - 5\text{ нм/с}$.

В системах на базе ВЧЕ разрядная плотность плазмы пропорциональна прикладываемому напряжению, а, следовательно, увеличение концентрации активных частиц, посредством увеличения прикладываемого напряжения, неизбежно ведет к увеличению энергии ионов, бомбардирующих поверхность образца. Поэтому, в таких системах скорость протекания химической реакции не может быть увеличена за счет роста рабочей мощности, так как обрабатываемая структура или растущее покрытие могут быть повреждены частицами с высокой энергией, из-за высокого рабочего давления, обычно в диапазоне $200\text{-}400\text{ Па}$, требуют повышенного расхода рабочих газов, коэффициент использования которых меньше чем в системах с генераторами плазмы высокой плотности разряда [5-8]. На рис. 1, в качестве примера, представлена установка плазмохимического осаждения пленок оксида и нитрида кремния в плазме ВЧЕ разряда производства «ООО Изовак».



Рис. 1. Установка плазмохимического осаждения пленок оксида и нитрида кремния производства «ООО Изовак».

При формировании покрытий методом ПХО в плазме высокой плотности для инициации и поддержания разряда используются: СВЧ системы на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР); ВЧ системы, использующие плазму «геликонового» разряда; ВЧ индукционные и трансформаторные разряды [9].

При проведении процессов методом ПХО в плазме высокой плотности, температура образца составляет $25\text{-}200\text{ }^\circ\text{C}$, плотность мощности находится в диапазоне $100\text{-}500\text{ мВт/см}^3$, плотность плазмы $10^{11}\text{-}10^{13}\text{ см}^{-3}$, скорость осаждения $0,1 - 10\text{ нм/с}$.

К числу преимуществ, обеспечиваемых процессом осаждения диэлектрических слоев в плазме высокой плотности, необходимо отнести высокое качество осаждаемого материала с точки зрения его стехиометрии, плотности пор, содержания посторонних примесей - водорода,

гидроксильных групп, атомов металлов, зарядовых характеристик и т.п., превосходящее качество слоев, получаемых при использовании других разновидностей процесса плазмохимического осаждения.

Метод ПХО в плазме высокой плотности обеспечивает получение различных типов диэлектрических слоев (включая SiO_2 , фосфоросиликатное стекло (ФСС), борофосфоросиликатное стекло (БФСС), Si_3N_4 , $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$, кремнийборонитридные, кремнийборооксинитридные, диэлектрики с низким значением диэлектрической постоянной k - $\text{SiO}_2:\text{F}$ (FSG), $\text{SiO}_2:\text{C}$, а-C:F с адгезионными слоями а-DLC (аморфный алмазоподобный углерод) или SiO_x ($x < 2$)); при этом зазоры в топологическом рельефе шириной $\sim 0,15$ мкм с высоким значением параметра AR ($\sim 3 - 5$) могут быть заполнены без образования полостей, с достижением локальной самопланаризации поверхности осажденного слоя в области узких зазоров и сглаживанием топологического рельефа на краях широких проводников («фасетирование») [10]. Следует отметить, что ПХО в плазме высокой плотности выступает современной альтернативой субатмосферному плазмохимическому осаждению при заполнении рельефа поверхности с высоким аспектным отношением. Профиль пленки, сформированной методом ПХО в плазме высокой плотности, является результатом одновременно протекающих процессов осаждения и распыления осаждаемого материала, приводящих к сглаживанию и частичной самопланаризации поверхности осаждаемого диэлектрического слоя, с образованием характерного рельефа поверхности «фасеток» и локальным уменьшением высоты рельефа над узкими близкорасположенными топологическими элементами.

Из представленного сравнения методов плазмохимического осаждения видно, что системы с активацией плазмой высокой плотностью имеют более широкие технологические возможности: позволяют проводить технологические процессы осаждения диэлектриков при меньшей температуре образца, обеспечивают более полную диссоциацию молекул рабочих газов и независимое управление энергией и концентрацией ионов плазмы. Однако такое расширение функциональности системы приводит к ее усложнению. Рассмотрим более подробно конструкции систем плазмохимического осаждения.

На рис. 2 представлена типовая конфигурация реактора плазмохимического осаждения с генератором плазмы высокой плотности и генератором плазмы ВЧЕ разряда. 1 – Генератор плазмы, 2 – технологический реактор, 3 – электромагниты, 4 – газораспределитель, 5 – согласующее устройство, 6 – образец, 7 – шлюзовая камера, 8 – дросселирующее устройство, 9 – область плазмообразования, 10 – откачка, 11 – держатель образцов.

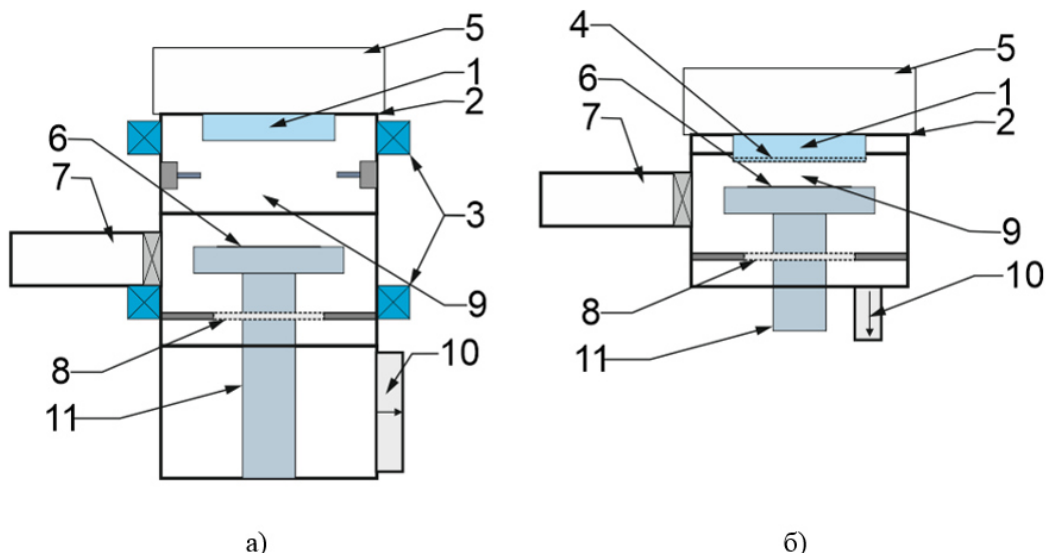


Рис. 2. типовая конфигурация реактора плазмохимического осаждения: а) с генератором плазмы высокой плотности и б) с генератором плазмы ВЧЕ разряда.

Генератор плазмы, обеспечивает инициацию и поддержание газового разряда над образцом. Образец размещается на специальном держателе, функциональность которого выбира-

ется исходя из требований технологического процесса. Для поддержания и стабилизации температуры образца в процессе осаждения может быть предусмотрен нагрев/охлаждение и термостатирование держателя, улучшение теплопередачи достигается путем подачи гелия в пространство между держателем и образцом, удержание образца в этом случае должно осуществляться механическим или электростатическим прижимом. При необходимости дополнительного ионного ассистирования к держателю образцов подводят напряжение средней или высокой частоты, которое обеспечивает формирование отрицательного автосмещения поверхности образца относительно плазмы и позволяет независимо управлять интенсивностью ионного воздействия.

Основным отличием представленных систем является рабочее давление, которое в системах с плазмой высокой плотности на несколько порядков ниже чем в системах с ВЧЕ разрядом. Поэтому в системах ПХО с плазмой высокой плотности необходимо использовать высоковакуумные откачные средства. Кроме этого в системах ПХО с ВЧЕ разрядом использование высокочастотного или среднечастотного смещения на держателе образцов обычно не требуется, так как энергия ионов зависит от вкладываемой в разряд мощности и может достигать несколько сотен электронвольт.

Выводы

Современное оборудование плазмохимического осаждения нитрида и оксида кремния может быть разделено на две основные группы: построенных на основе высокочастотного емкостного разряда или на основе генераторов плазмы высокой плотности. Оба типа этих систем имеют широкие возможности по управлению свойствами формируемых покрытий и могут использоваться для решения ряда технологических задач. Необходимая конфигурация системы должна выбираться индивидуально исходя из требований технологического процесса.

Литература

1. Vossen J L, Kern W (eds) Thin film processes. Academic, New York, 1978
2. Vossen J L, Kern W (eds) Thin film processes II. Academic, New York, 1991
3. Yongdong Xu, Xiu-Tian Yan, Chemical Vapour Deposition / Springer-Verlag London Limited, p. 10, 2010.
4. Christy RW. Conducting thin films formed by electron bombardment of substrate. Journal of Applied Physics. 1962;33(5):1884–8.
5. Wu, Y. and Lieberman, M.A. Plasma Sources Sci. Technol., 9, 210, 2000
6. Colpo, P., Meziani, T. and Rossi, F. J. Vac. Sci. Technol. A, 23, 270, 2005
7. Godyak, V.A. and Piejak, R.B. J. Vac. Sci. Technol. A, 8, P. 3833, 1990
8. Turner, M.M. and Lieberman, M.A. Plasma Sources Sci. Technol., 8, 313. 1999
9. Сысун В.И. Источники плазмы высокой плотности на основе индукционно-связанного разряда / Известия вузов. 2000. № 4-5. С. 101–131.
10. Громов, Д. Г. Металлизация в системах с наноразмерными элементами: учебно-методическое пособие / Д. Г. Громов. – М. : МИЭТ, 2011. – 59 с.