

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ ТЕТРАЭТОКСИСИЛАНА

© А. С. Биль, С. Е. Александров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ),
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29
E-mail: bil.as@edu.spbstu.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2022 г.

После доработки 27 мая 2022 г.

Принята к публикации 14 июня 2022 г.

Тонкие пленки были получены в системе тетраэтоксисилан–гелий на кремниевых пластинах в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления при низких температурах в интервале 50–210°C. Охарактеризованы покрытия, полученные при различных условиях процесса: температуре подложки и поглощенной в плазме мощности. Установлено, что повышение температуры подложки приводит к росту скорости осаждения пленок, уменьшению их пористости, увеличению плотности и уменьшению содержания в них связей SiH в группировках CH₂ и CH₃. Увеличение мощности, поглощаемой в плазме, приводит к формированию пленок с низкой плотностью и неудовлетворительными диэлектрическими свойствами.

Ключевые слова: плазмохимическое осаждение при атмосферном давлении; тетраэтоксисилан; пленки; диоксид кремния; диэлектрический барьерный разряд

DOI: 10.31857/S0044461822040090, EDN: DHHHOD

Тонкие пленки диоксида кремния находят широкое применение в микроэлектронике, оптике, для защиты металлов от коррозии и полимерных материалов от механических воздействий [1–3]. Во многих случаях такие пленки наносят на термически нестабильные материалы или изделия, именно поэтому широкое распространение получили процессы низкотемпературного плазмохимического осаждения, обеспечивающие возможность формирования достаточно качественных пленок при относительно низких температурах 100–300°C [4]. В таких процессах низкотемпературная плазма создается путем поддержания электрических разрядов в газах при пониженных давлениях (обычно в интервале 1–80 Па).

Незаменимым способом формирования диэлектрических пленок оксида кремния различного функционального назначения в микроэлектронике являются плазмохимические процессы, основанные на использовании высокочастотных разрядов, создаваемых в подходящей газовой среде при давлении

10–50 Па [4]. Однако очевидно, что если в микроэлектронике, базирующейся на использовании технологий, позволяющих одновременно обрабатывать достаточно большое количество подложек или приборов, применение таких плазмохимических процессов, реализуемых в дорогостоящей вакуумной технологической аппаратуре, оказывается допустимым с экономической точки зрения, то для решения разнообразных задач в области оптики, медицины и технологии современных полимерных материалов их применение нецелесообразно.

В связи с этим последние два десятилетия активно изучаются плазмохимические процессы осаждения тонких пленок различных материалов, основанные на применении низкотемпературной плазмы, создаваемой с помощью электрических разрядов в реакционной газовой среде при атмосферном давлении [5]. Среди разнообразных типов используемых для этих целей разрядов (микроволновый [6], высокочастотный [7], коронный [8], поверхностный [9] и др.)

привлекательным остается наиболее простой диэлектрический низкочастотный барьерный разряд, реализуемый в различных конструктивных вариантах исполнения электродов [10].

В литературе приводятся сведения о результатах успешного применения такого типа разряда для осаждения пленок, по составу близких к SiO_2 , в различных реакционных газовых средах и использовании разных кремнийсодержащих реагентов (гексаметилдисилоксана, тетраметилсилана, тетраэтоксисилана и др. [11–14]). К сожалению, в большинстве работ, посвященных плазмохимическому осаждению пленок SiO_2 в барьерном разряде, данные о характере влияния основных технологических параметров процесса осаждения на скорость, состав и строение формируемых слоев отсутствуют, что не позволяет сформировать представления о физико-химических закономерностях процесса.

Цель работы — установление характера влияния условий плазмохимического осаждения — температуры подложки и мощности, поглощаемой в разряде, — на скорость роста, состав и некоторые свойства слоев, формируемых в диэлектрическом барьерном разряде, создаваемом между двумя плоскими электродами с диэлектрическими барьерами, в системе $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4\text{-He}$.

Экспериментальная часть

Осаждение пленок SiO_2 осуществляли в вертикальном кварцевом реакторе с холодными стенками. В качестве реагента использовали тетраэтоксисилан $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ (ос.ч. 14-5, ЗАО «Экос-1»), помещенный в стеклянный испаритель барботажного типа, температуру которого поддерживали постоянной с точностью 1°C в интервале $20\text{--}50^\circ\text{C}$ с помощью термостата UTU-2/77 (Норьзон). Для предотвращения конденсации паров $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ в газовых магистралях, предназначенных для его доставки в реакционный объем, и на внутренних стенках реактора газораспределительную систему и реактор размещали в специальном шкафу, обогреваемом воздушным нагревателем до 55°C . Гелий (марка 6.0, ООО «ТД «КЛИМ») использовали в качестве газа-носителя паров $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$.

Схема расположения электродов в реакторе показана на рис. 1. Барьерный разряд создавали между пьедесталом 4 и металлическим электродом 1 диаметром 40 мм, выполненным из дюралюминия марки Д19Т, покрытым стеклянной пластиной 2 толщиной 2.8 мм в качестве второго диэлектрического барьера. Разрядный зазор между электродами составлял 3 мм.

Подложки размещали на пьедестале диаметром 72 мм из нержавеющей стали, обогреваемом встроенным внутренним нагревателем резистивного типа до 350°C и покрытым пластиной 3 из кварцевого стекла толщиной 2 мм, выполняющим функцию диэлектрического барьера. Измерение температуры осуществляли с помощью хромель-алюмелевой термопары, регулировку температуры нагревателя производили с использованием микропроцессорного измерителя-регулятора 2ТРМ1А (ПО «ОВЕН»). Точность поддержания температуры составляла 5°C .

В качестве источника высоковольтного напряжения (до 9 кВ) для создания диэлектрического барьерного разряда применяли низкочастотный (28 кГц) генератор. Измерение высоковольтного напряжения и тока, протекающего через разряд, а также определение их формы и фазового сдвига выполняли с помощью осциллографа DSO3062A (Agilent Technologies, Inc.), полученные значения использовали для расчета мощности, поглощаемой в разряде.

Перед началом процессов осаждения для удаления воздуха реактор продували гелием с расходом

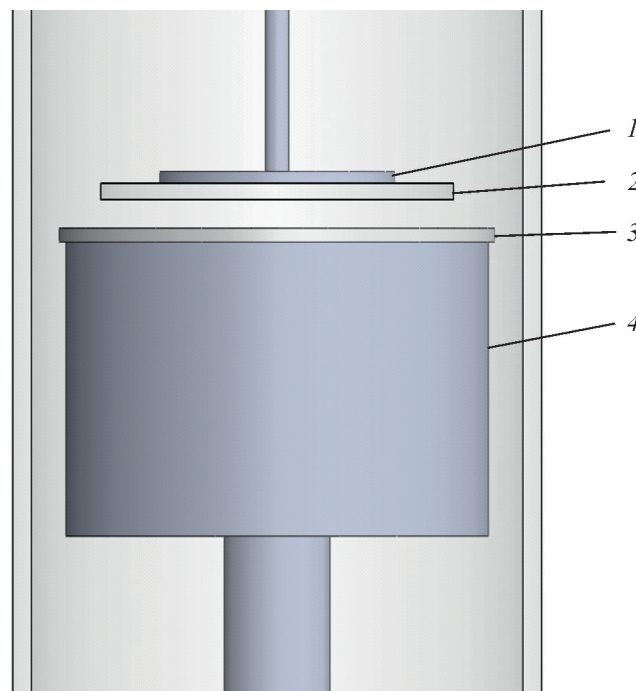


Рис. 1. Схема расположения электродов в реакторе для осаждения пленок SiO_2 в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления.

1 — верхний электрод; 2 — стеклянная пластина, выполняющая функцию верхнего диэлектрического барьера; 3 — кварцевая пластина, выполняющая функцию нижнего диэлектрического барьера; 4 — обогреваемый пьедестал, выполняющий также функцию нижнего электрода.

1.6 л·мин⁻¹ в течение 10 мин, одновременно нагревали пьедестал со скоростью 20 град·мин⁻¹. Расход газа-носителя паров Si(OC₂H₅)₄ составлял 0.15 л·мин⁻¹, его задавали и контролировали с помощью регулятора расхода газа РРГ-9М (ПКГ «Гранат»), обеспечивающего точность 0.5%. Осаждение пленок SiO₂ осуществляли в интервале температур 50–210°C. Парциальное давление Si(OC₂H₅)₄ в газовой смеси было определено с помощью ИК-Фурье-спектрометрии по полосе поглощения с максимумом при 1115 см⁻¹, обусловленной валентными колебаниями O—Si—O в жидком тетраэтоксисилане. Концентрацию Si(OC₂H₅)₄ в гелии рассчитывали с использованием значения коэффициента экстинкции, равного 0.0525 (Па·м)⁻¹, вычисленного для насыщенного пара Si(OC₂H₅)₄ при температуре 22.4°C по закону Бугера–Ламберта–Бера. Данные для вычисления давления насыщенного пара Si(OC₂H₅)₄ при заданной температуре были взяты из работы [15].

В качестве подложек использовали монокристаллические пластины кремния марки КЭФ-4.5 (ОАО «ПХМЗ») с ориентацией (100) размером 1.5 × 1.5 см. Перед осаждением поверхность подложек с целью дополнительной очистки обрабатывали ацетоном (оп-2 ос.ч. 9-5, АО «Экос-1»), этиловым спиртом (х.ч., Merck) и промывали в дистиллированной воде, после чего подложки осушали в потоке азота (в.ч., ООО «Мониторинг»).

Морфологию поверхности осажденных пленок изучали с помощью растрового электронного микроскопа (Supra 55 VP, Zeiss). Состав пленок исследовали методом ИК-Фурье-спектрометрии с помощью спектрометра ФСМ 1201 (ООО «Мониторинг»). Запись спектров осуществляли в диапазоне 4000–400 см⁻¹ в режиме просвечивания образцов с разрешением 1 см⁻¹, число сканов — 20. Оценку толщины и показателя преломления формируемых пленок оксида кремния проводили методом эллипсометрии (эллипсометр ЛЭМ-3М (АО «ФОЗ») с гелий-неоновым лазером 632.8 нм). Расчет толщины проводили, используя приближение об однородности оптических свойств слоя, нанесенного на кремниевую подложку. Пористость пленок определяли электрографическим методом, который основан на восстановлении серебра в увлажненной фотобумаге, прижатой эмульсионным слоем к исследуемой пленке, под действием электрического тока. Удельное пробивное напряжение измеряли зондовым методом (диаметр зонда 1 мм) и рассчитывали с использованием данных об оптической толщине покрытия, полученных при помощи эллипсометрии.

Обсуждение результатов

Результаты предварительных экспериментов по выращиванию пленок при различной продолжительности процесса осаждения (от 10 до 30 мин) свидетельствовали о стационарности скорости роста, что позволило не принимать во внимание продолжительность процесса осаждения при оценке ее значения.

Температура подложки является одним из важнейших технологических параметров процессов плазмохимического осаждения, определяющих состав и основные свойства формируемых пленок [16]. Повышение температуры подложки от 50 до 210°C приводит почти к двукратному снижению скорости осаждения (рис. 2). Расчет скорости осаждения проводили, используя значения оптической толщины пленок, измеренные с помощью эллипсометра, однако в этом случае без экспериментально полученных значений плотности пленок невозможно перейти к массе продукта, образующегося в единицу времени на единице площади подложки. В настоящее время отсутствуют методы измерения плотности таких тонких пленок с достаточной точностью. В связи с этим интерес представляло установление изменений относительного количества связей O—Si—O в осаждаемой пленке с температурой как наиболее точно отражающего скорость образования оксида с химической точки зрения. Для оценки количества таких связей использовали интегральную интенсивность полосы поглощения в ИК-области с максимумом при 1060 см⁻¹, соответствующей валентным колебаниям связей O—Si—O в SiO₂ [17], отношение которой к оптической толщине пленки отражает изменения относительного количества связей в формируемой пленке в зависимости от температуры осаждения (рис. 2).

Повышение температуры осаждения приводит к резкому увеличению количества связей O—Si—O в формируемой пленке. Большие значения величины скорости роста пленки, рассчитанные исходя из значений ее оптической толщины, при низких температурах, вероятнее всего, обусловлены меньшей плотностью слоев, формируемых при низких температурах из-за присутствия фрагментов не до конца прореагировавшего тетраэтоксисилана. Это предположение полностью подтверждается результатами просвечивающей ИК-спектрометрии пленок. На ИК-спектре пропускания пленок (рис. 3, а) присутствуют три полосы поглощения в области волновых чисел 3100–2800 см⁻¹, обусловленные симметричными и

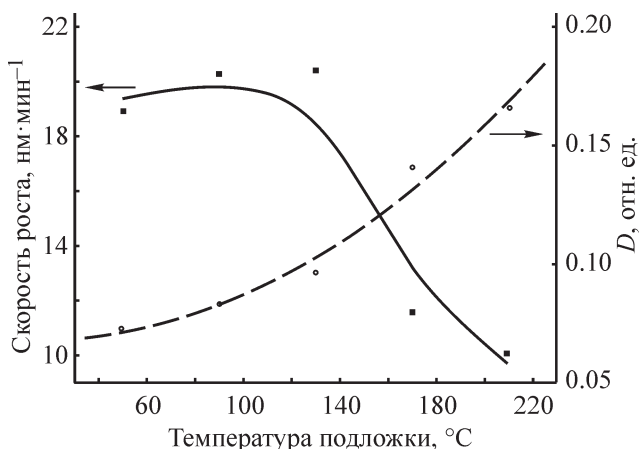
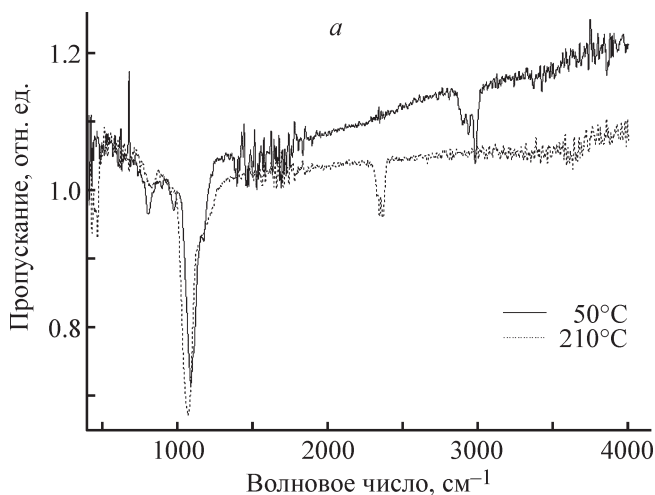


Рис. 2. Зависимости скорости роста покрытий, осаждаемых из тетраэтоксисилана в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления, и отношения интегральной интенсивности полосы поглощения при 1060 см^{-1} к оптической толщине образующейся пленки (D) от температуры подложки.

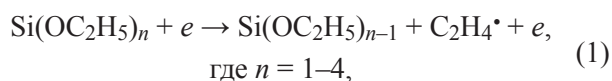
асимметричными валентными колебаниями связей C—H в CH_2 - и CH_3 -группировках этоксигрупп [17], причем относительное содержание этих связей резко падает с повышением температуры осаждения (рис. 3, б). На спектрах пленок, формируемых при температурах выше 200°C , такие полосы поглощения не обнаружены (рис. 3, а). О существенном уплотнении пленок с повышением температуры осаждения свидетельствуют результаты измерения пористости пленок и удельного пробивного напряжения (рис. 4).



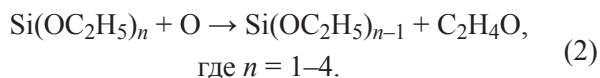
Результаты исследования поверхности осаждаемых пленок с помощью растровой электронной микроскопии свидетельствуют о кардинальном изменении их морфологии (рис. 5). Пленки, полученные при низких температурах, имеют гладкую поверхность, а слои, осаждаемые при температурах выше 170°C , характеризовались отчетливой зернистой структурой, часто обнаруживаемой у плотных плазмохимических пленок SiO_2 , состав которых близок к стехиометрическому [18].

Принимая во внимание, что именно наличие высокой энергии у частиц плазмы является условием, обеспечивающим протекание при таких низких температурах химических реакций, приводящих к образованию SiO_2 из $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, вполне резонно ожидать существенного влияния электрической мощности, поглощаемой в разряде, на скорость роста, состав и свойства формируемых слоев.

В соответствии с [19] основные процессы диссоциации в плазме тетраэтоксисилана можно представить следующими образом:



или



Тетраэтоксисилан и продукты его частичной диссоциации в результате неупругих столкновений с

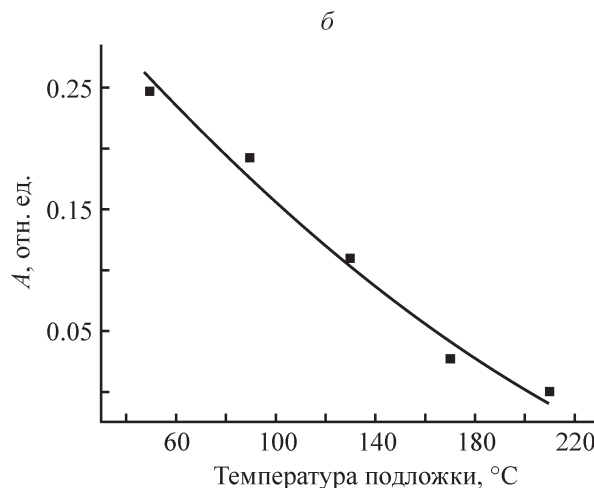


Рис. 3. Спектры пропускания пленок, осажденных из тетраэтоксисилана в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления, полученных при разных температурах в зоне осаждения (а), и зависимость отношения интегральной интенсивности полосы поглощения в области волновых чисел $3100-2800\text{ см}^{-1}$ к интегральной интенсивности полосы поглощения с максимумом при 1060 см^{-1} от температуры осаждения (б).

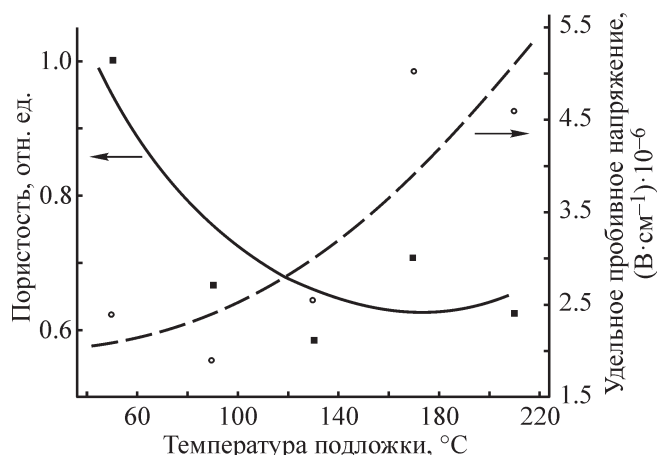


Рис. 4. Влияние температуры подложки на пористость и удельное пробивное напряжение покрытий, осажденных из тетраэтоксисилана в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления.

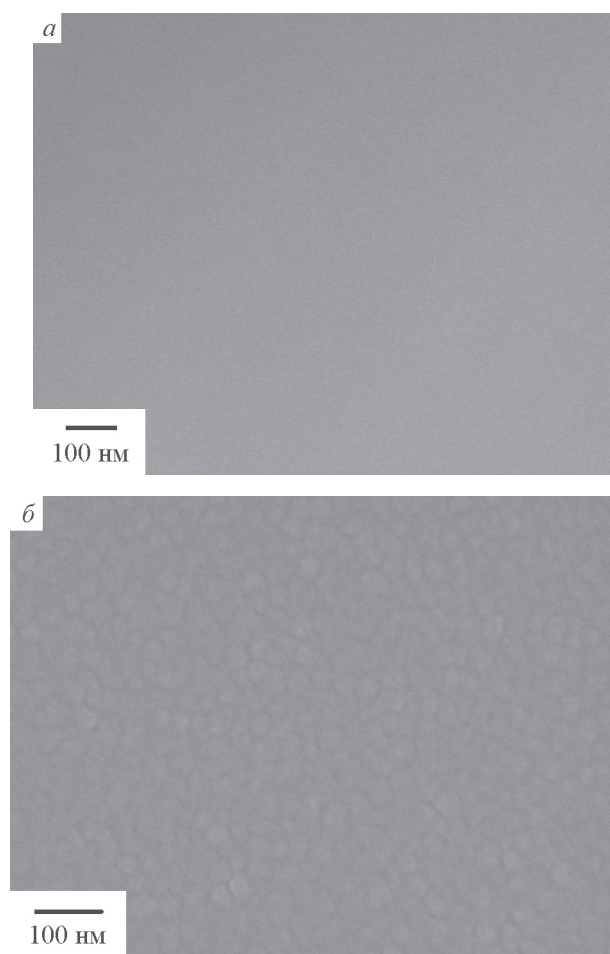


Рис. 5. Изображения поверхности покрытий, полученных из тетраэтоксисилана в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления при температуре 50 (а), 210°C (б).

электронами плазмы или атомарным кислородом высвобождают углеводородные радикалы $C_2H_4^*$ или ацетальдегид C_2H_4O .

Увеличение мощности, поглощаемой в разряде, приводит к росту скорости осаждения пленок (рис. 6). Однако отношение интегральной интенсивности полосы поглощения в ИК-области с максимумом при 1060 см^{-1} , соответствующей валентным колебаниям связей $O-Si-O$ в SiO_2 , к оптической толщине пленки изменяется всего лишь в пределах 5%. Вероятнее всего, увеличение мощности, поглощаемой в разряде, приводит к более интенсивному образованию реакционноспособных фрагментов из $Si(OC_2H_5)_4$, которые не успевают полностью превратиться в совершенную сетку $O-Si-O$ -связей. Образцы в этой серии экспериментов осаждали при температуре подложки 210°C , поэтому полосы поглощения в области волновых чисел $3100-2800\text{ см}^{-1}$, обусловленные симметричными и асимметричными валентными колебаниями связей $C-H$ в CH_2 - и CH_3 -группировках этоксигрупп, на ИК-спектрах не обнаруживались в пределах чувствительности метода. Показатель преломления пленок, осажденных при низких уровнях поглощаемой мощности, составлял $1.445-1.452$, что близко к значению показателя преломления, определенного для стехиометрического диоксида кремния, — 1.46 [20]. Вероятнее всего, CH_2 - и CH_3 -группировки присутствуют в пленках, но в относительно небольших количествах, и некоторое увеличение их количества в пленках с ростом мощности, поглощаемой в разряде, приводит к

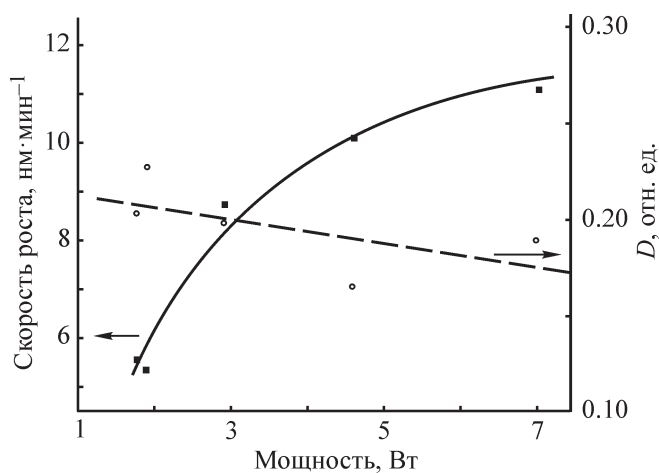


Рис. 6. Зависимости скорости роста пленок, осаждаемых из тетраэтоксисилана в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления, и отношения интегральной интенсивности полосы поглощения с максимумом при 1060 см^{-1} к оптической толщине пленки (D) от поглощенной в разряде мощности.

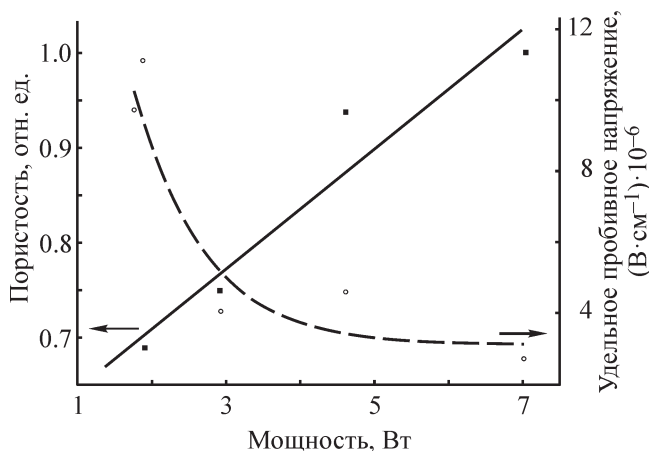


Рис. 7. Зависимости пористости и пробивного напряжения пленок, полученных из тетраэтоксисилана в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления, от поглощенной в разряде мощности.

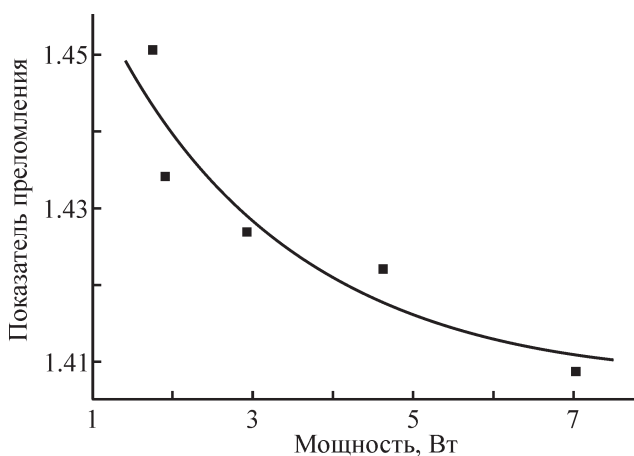


Рис. 8. Зависимость показателя преломления пленок, полученных из тетраэтоксисилана в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления, от поглощенной в разряде мощности.

формированию менее плотных пленок (рис. 7), что сопровождается небольшим падением показателя преломления и уменьшением удельного пробивного напряжения осаждаемых пленок (рис. 8).

Выводы

Показано, что параметры процесса, определяющие уровень поступления энергии в реакционную систему, — температура подложки и электрическая мощность, поглощаемая в разряде, существенно влияют как на скорость осаждения, так и на состав, строение и свойства формируемых слоев.

Роль температуры подложки, вероятнее всего, связана с влиянием на скорость и полноту протекания

гетерогенных реакций, протекающих на поверхности подложек с участием высокореакционных кремнийсодержащих частиц, образовавшихся в низкотемпературной плазме. Увеличение температуры подложки приводит к существенному уменьшению содержания С—Н-связей CH_2 - и CH_3 -группировок этоксигрупп в формируемых слоях.

Электрическая мощность, поглощаемая в разряде, определяет интенсивность образования высокореакционных кремнийсодержащих частиц в плазме и соответственно плотность потока таких частиц на поверхность подложки. В случае высокой плотности потока таких частиц могут создаваться условия, при которых скорость протекания поверхностных реакций будет недостаточной для их полного превращения в кремний-кислородный каркас, что обусловит формирование слоев с низкой плотностью и неудовлетворительными диэлектрическими свойствами и низкой химической устойчивостью. Повышение температуры может приводить к ускорению гетерогенных реакций на поверхности подложек.

Слои, полученные низкотемпературным плазмохимическим осаждением при атмосферном давлении из $Si(OC_2H_5)_4$ при температурах выше $200^\circ C$, по составу близки к SiO_2 , практически не содержат С—Н-связи CH_2 - и CH_3 -группировок этоксигрупп и характеризуются оптическими и электрофизическими свойствами, характерными для SiO_2 . Уровень электрической мощности, поглощаемой в разряде, следует выбирать с учетом температуры подложки таким образом, чтобы скорость поверхностных реакций обеспечивала наиболее полное превращение высокореакционных кремнийсодержащих частиц в кремний-кислородный каркас.

Полученные сведения имеют важное прикладное значение, так как на их основе можно подбирать температуру осаждения и уровень электрической мощности, поглощаемой в разряде, обеспечивающие формирование слоев с составом и свойствами, близкими к SiO_2 .

Конфликт интересов

Соавтор С. Е. Александров является членом редколлегии ЖПХ.

Информация о вкладе авторов

А. С. Биль выполнила эксперименты по плазмохимическому осаждению пленок из газовой фазы; С. Е. Александров провел анализ оптических свойств полученных слоев.

Информация об авторах

Биль Анастасия Сергеевна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7946-4136>

Александров Сергей Евгеньевич, д.х.н., проф.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0129-0479>

Список литературы

- [1] Baklanov M., Maex K., Green M. Dielectric films for advanced microelectronics. John Wiley & Sons, 2007. P. 341–343.
- [2] Janietz M., Arnold T. Surface figuring of glass substrates by local deposition of silicon oxide with atmospheric pressure plasma jet // Surf. Coat. Technol. 2011. V. 205. P. S351–S354. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.03.127>
- [3] Schäfer J., Foest R., Quade A., Ohl A., Weltmann K.-D. Chemical composition of SiO_x films deposited by an atmospheric pressure plasma jet (APPJ) // Plasma Process. Polym. 2009. V. 6. N S1. P. S519–S524. <https://doi.org/10.1002/ppap.200931103>
- [4] Alexandrov S. E., Hitchman M. L. Plasma enhanced chemical vapour deposition // Chemical vapour deposition: Precursors, processes and applications. RSC Publishing, Cambridge, 2009. Ch. 12. P. 510–526.
- [5] Alexandrov S. E., Hitchman M. L. Chemical vapor deposition enhanced by atmospheric pressure non-thermal non-equilibrium plasmas // Chem. Vap. Deposition. 2005. V. 11. N 11–12. P. 457–468. <https://doi.org/10.1002/cvde.200500026>
- [6] Hopfe V., Sheel D. W. Atmospheric-pressure plasmas for wide-area thin-film deposition and etching // Plasma Process. Polym. 2007. V. 4. N 3. P. 253–265. <https://doi.org/10.1002/ppap.200600202>
- [7] Schäfer J., Hnilica J., Šperka J., Quade A., Kudrle V., Foest R., Vodák J., Zajíčková L. Tetrakis(trimethylsilyloxy)silane for nanostructured SiO₂-like films deposited by PECVD at atmospheric pressure // Surf. Coat. Technol. 2016. V. 295. P. 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.047>
- [8] Kim K. N., Lee S. M., Mishra A., Yeom G. Y. Atmospheric pressure plasmas for surface modification of flexible and printed electronic devices: A review // Thin Solid Films. 2016. V. 598. P. 315–334. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.05.035>
- [9] Prat R., Koh Y. J., Babukutty Y., Kogoma M., Okazaki S., Kodama M. Polymer deposition using atmospheric pressure plasma glow (APG) discharge // Polymer. 2000. V. 41. N 20. P. 7355–7360. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00103-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00103-8)
- [10] Massines F., Sarra-Bournet C., Fanelli F., Naudé N., Gherardi N. Atmospheric pressure low temperature direct plasma technology: Status and challenges for thin film deposition // Plasma Process. Polym. 2012. V. 9. P. 1041–1073. <https://doi.org/10.1002/ppap.201200029>
- [11] Massines F., Gherardi N., Steve Martin A. Atmospheric pressure plasma deposition of thin films by Townsend dielectric barrier discharge // Surf. Coat. Technol. 2005. V. 200. N 5–6. P. 1855–1861. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.010>
- [12] Premkumar P. A., Starostin S. A., Vries H., Paffen R. M. J., Creatore M., Eijkemans T. J., Koenraad P. M., Sanden M. C. M. // High quality SiO₂-like layers by large area atmospheric pressure plasma enhanced CVD: Deposition process studies by surface analysis // Plasma Process. Polym. 2009. V. 6. N 10. P. 693–702. <https://doi.org/10.1002/ppap.200900033>
- [13] Trinh Q. H., Mokter Hossain Md., Kim S. H., Sun Mok Y. Tailoring the wettability of glass using a double-dielectric barrier discharge reactor // Heliyon. 2018. V. 4. N 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00522>
- [14] Kuo Y. L., Chang K.-H. Atmospheric pressure plasma enhanced chemical vapor deposition of SiO_x films for improved corrosion resistant properties of AZ31 magnesium // Surf. Coat. Technol. 2015. V. 283. P. 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.11.004>
- [15] Samaei A., Chaudhuri S. Understanding the dynamic growth environment of silicon dioxide in atmospheric pressure plasma using multiphysics modeling // Surf. Interfaces. 2020. V. 21. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100739>
- [16] Topka K. C., Chliavoras G. A., Vergnes H., Senocq F. Large temperature range model for the atmospheric pressure chemical vapor deposition of silicon dioxide films on thermosensitive substrates // Chem. Eng. Res. Des. 2020. V. 161. P. 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.07.007>
- [17] Topka K. C., Diallo B., Samelot D., Laloo R., Sadowski D., Genevois C., Sauvagec T., Senocq F., Vergnes H., Turq V., Pellerin N., Caussa B., Vahlas C. Tunable SiO₂ to SiO_xC_yH films by ozone assisted chemical vapor deposition from tetraethylorthosilicate and hexamethyldisilazane mixtures // Surf. Coat. Technol. 2021. V. 407. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126762>
- [18] Chemin J. B., Bulou S., Baba K., Fontaine C., Sindzingre T., Boscher N. D., Choquet P. Transparent anti-fogging and self-cleaning TiO₂/SiO₂ thin films on polymer substrates using atmospheric plasma // Sci. Rep. 2018. V. 8. N 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27526-7>
- [19] Takizawa K., Mori, Y., Miyatake N., Murata K. Characteristics of monopole antenna plasmas for TEOS PECVD // Thin Solid Films. 2008. V. 516. N 11. P. 3605–3609. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.08.029>
- [20] Peña-Rodríguez O., Manzano-Santamaría J., Olivares J., Rivera A., Agulló-López F. Refractive index changes in amorphous SiO₂ (silica) by swift ion irradiation // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2012. V. 277. P. 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.12.057>