ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2020, том 46, № 6, с. 569–576

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

УДК 533.9

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ПЛЕНОК ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ЭТАЛОННОЙ ЯЧЕЙКЕ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ГАЗОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ (GEC)

© 2020 г. K. Siari[a,*], S. Rebiai[a], H. Bahouh[a], F. Bouanaka[a]

[a] *Laboratoire de Microsystèmes et Instrumentation (LMI), Département d'Electronique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université Frères Mentouri Constantine 1, Constantine, Algérie*

**e-mail: khadidjasiari@yahoo.fr*

Поступила в редакцию 11.05.2019 г.
После доработки 22.09.2019 г.
Принята к публикации 19.12.2019 г.

Представлена самосогласованная гидродинамическая модель плазмохимического осаждения из газовой фазы с индуктивно-связанной плазмой в смеси силана, аргона и водорода. С помощью программного пакета COMSOLMultiphysics в модели решались уравнения непрерывности для заряженных частиц, диффузионно-дрейфовые уравнения для описания переноса этих частиц и уравнения баланса энергии электронов совместно с уравнениями Максвелла и Пуассона. Для лучшего понимания влияния разрядных параметров на процессы осаждения в качестве разрядной ячейки взята эталонная ячейка конференции по газовой электронике. Плазма создавалась при низком давлении (начиная с 20 мТорр) в смеси $SiH_4/Ar/H_2$ с помощью эталонного реактора с пятивитковыми катушками индуктивности, работающего на частоте 13.56 МГц. В результате моделирования получены профили электронной плотности и температуры, а также профили электрического потенциала в центральной области разрядной ячейки во время осаждения кремниевой пленки. Исследовано влияние изменения давления газа, ВЧ-мощности и доли водорода в смеси на скорость роста кремниевой пленки. Показано, что увеличение ВЧ-мощности с 1000 до 3000 Вт и давления газа от 10 до 40 мТорр приводит к значительному ускорению роста пленки, в то время как увеличение доли водорода в смеси – к замедлению.

Ключевые слова: индуктивно-связанная плазма, эталонная ячейка конференции по газовой электронике, кремниевые пленки, плазмохимическое осаждение из газовой фазы, плотная плазма, скорость осаждения

DOI: 10.31857/S0367292120060098

1. ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые пленки широко используются в различных приложениях: при изготовлении тонкопленочных транзисторов, фотодиодов, элементов солнечных батарей и датчиков изображения [1–4]. Значительная часть кремниевых пленок производится методом плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием емкостно- [5–7] или индуктивно-связанной [8–10] плазмы. Стоит отметить, что емкостно-связанная плазма обычно имеет меньшую плотность электронов по сравнению с индуктивно-связанной плазмой [11–13], а значит и меньшие скорости осаждения и травления. Разрядные ячейки с индуктивно-связанной плазмой широко используются для плазменного травления [14–16] и плазменного осаждения тонких пленок [17–19]. Устройство рассматриваемого в данной работе плазменного реактора – ячейки конференции по газовой электронике с индуктивно-связанной плазмой (далее ячейка GEC), описано в [20–23]. В данной разрядной ячейке используется плазма низкого давления ($P < 6.67$ Па) с высокой плотностью электронов ($n_e > 10^{17}$ м$^{-3}$) [24]. Низкое давление позволяет осуществить направленную бомбардировку ионами и улучшить однородность плазмы в объеме реактора [25], а высокая плотность электронов способствует высокой скорости осаждения и травления. Химическое осаждение тонких кремниевых пленок – сложный процесс с участием возбужденных молекул, присутствующих в газовой фазе. Скорость роста и качество осаждаемых пленок определяются такими параметрами как состав газовой смеси, ее давление, температура подложки и мощность разряда. Осаждение кремниевых пленок производится в газовых смесях, содержащих аргон, водород и силан. Использование аргона позволяет увеличить скорость осаждения пленки и улучшить степень ее кристалличности [26]. Водород в смеси отвечает

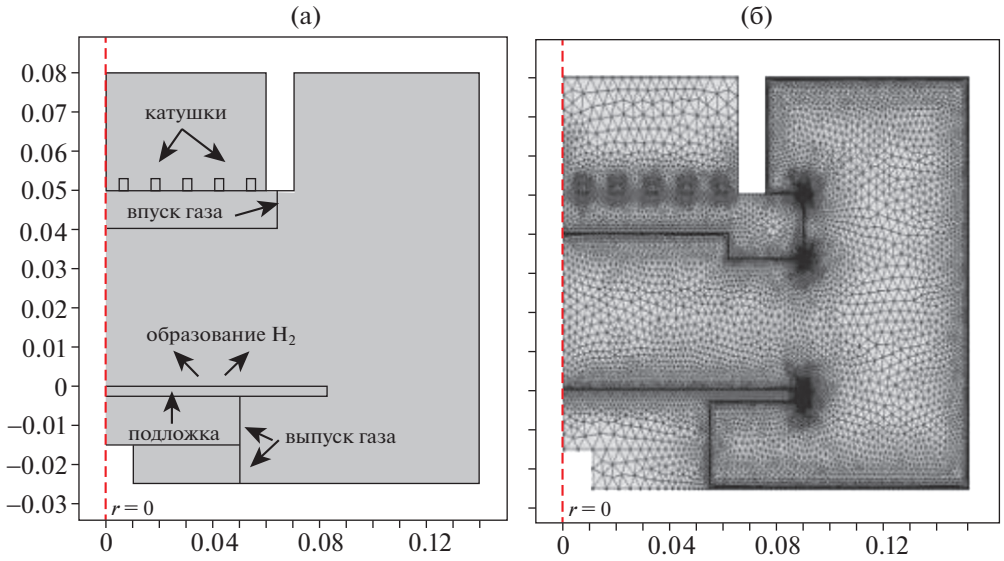

Рис. 1. Структура разрядной ячейки GEC, спроектированной в пакете COMSOL (а), расчетная сетка разрядной ячейки (б).

за насыщение свободных связей и уменьшение поверхностных дефектов пленки [27].

Предлагаемая модель описывает параметры разряда при нанесении кремния методом плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием индуктивно-связанной плазмы. В модели плазма создавалась внешним ВЧ-источником с частотой 13.56 МГц в смеси, содержащей 5% силана, 5% водорода и 90% аргона. Для моделирования плазмы использовался пакет программного обеспечения COMSOLMultiphysics, который позволяет решать дифференциальные уравнения в частных производных методом конечных элементов. В используемой модели совместно рассматривались уравнения Максвелла, уравнения переноса для заряженных частиц плазмы и уравнения гидродинамики [28].

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Описание модели

В данной работе использовалась двумерная осесимметричная модель индуктивно-связанной плазмы в разрядной ячейке GEC, реализованная с помощью пакета COMSOLMultiphysics. Геометрия разрядной ячейки приведена на рис. 1. Разрядная ячейка GEC содержала пять плоских катушек индуктивности диаметром 3 мм с водяным охлаждением. Катушки были отделены от плазмы кварцевым окном толщиной 1 см. Расстояние от окна до нижнего электрода составляло 3.8 см. Расчетная сетка разрядной ячейки приведена на рис. 1б. Количество треугольных ячеек сетки при мелком разбиении составляло 14460 элементов. Критерий сходимости достигался примерно за 35 мин при расчете на процессоре Intel, Xeon-CPUE5-268wq 3.1 ГГц.

2.2. Система уравнений

Для исследования индуктивно-связанной плазмы низкого давления бралась двумерная гидродинамическая модель с использованием диффузионно-дрейфового приближения для различных частиц, уравнение для средней энергии электронов и система уравнений Максвелла для электромагнитного поля. Дополнительно к плазменному модулю использовался модуль ламинарного течения совместно с уравнениями Навье–Стокса для учета эффектов течения буферного газа. Предполагалось, что функция распределения электронов по энергиям является максвелловской. Данное предположение основывается на экспериментальных результатах, полученных для молекулярных газов в индуктивно-связанной ВЧ-плазме в рассматриваемом диапазоне давлений [29–31].

Ниже описаны управляющие уравнения модели для рассматриваемой разрядной ячейки.

Уравнение непрерывности для электронов и ионов

$$\frac{\partial n_g}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_g = S, \qquad (1)$$

где n_g – плотность частиц g ($g = p$ для положительных ионов, n – для отрицательных и e – для электронов), второе слагаемое характеризует поток частиц, а S – источниковый член, зависящий от

физико-химических реакций: возбуждения, ионизации, рекомбинации и других столкновений. Для вычисления источникового члена использовались константы скоростей реакций, определенные с помощью функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и соответствующих сечений рассеяния [24].

Поток частиц определялся из диффузионно-дрейфового приближения

$$\mathbf{\Gamma}_g = Zn_g\mu_g\mathbf{E} - D_g\nabla n_g,$$
$$Z = \begin{cases} -1 & \text{для электронов и} \\ & \text{отрицательных ионов} \\ +1 & \text{для положительных ионов,} \end{cases} \quad (2)$$

где μ_g, D_g и E – подвижность, коэффициент диффузии и напряженность ВЧ-поля, соответственно.

Уравнение для энергии электронов имело вид

$$\frac{\partial(n_e\varepsilon)}{\partial t} + \nabla\cdot\mathbf{\Gamma}_\varepsilon + \mathbf{\Gamma}_e\cdot\mathbf{E} = S_\varepsilon, \quad (3)$$

где ε – средняя энергия электронов, $\mathbf{\Gamma}_\varepsilon$ – поток полной энергии электронов, третье слагаемое отвечает за джоулев нагрев, и S_ε – потери энергии электронов при неупругих соударениях.

Коэффициент диффузии электронов, "подвижность" энергии и "коэффициент диффузии" энергии вычислялись из подвижности электронов следующим образом:

$$D_e = T_e\mu_e, \quad \mu_\varepsilon = \frac{5}{3}\mu_e, \quad D_\varepsilon = T_e\mu_\varepsilon, \quad (4)$$

где T_e – температура электронов.

Уравнения электромагнитного поля записывались через векторный потенциал:

$$\nabla^2\mathbf{A} - i\omega\mu_0\sigma\mathbf{A} + \mu_0\mathbf{j}_{coil} = 0, \quad (5)$$

где $\mathbf{j}_{coil}$ – плотность тока в катушке, μ_0 – магнитная проницаемость, σ – проводимость плазмы, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитного поля с частотой f.

Электростатическое поле рассчитывалось с помощью уравнения Пуассона:

$$-\nabla\cdot\varepsilon_0\,\varepsilon_r\nabla V = \rho, \quad (6)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная (8.85×10^{-14} Ф/см), V – электрический потенциал, ρ – плотность заряда, ε_r – диэлектрическая проницаемость среды.

Ниже приведены уравнения Навье–Стокса для газа.

Уравнение сохранения массы

$$\nabla\cdot(\rho\mathbf{u}) = 0. \quad (7)$$

Уравнение сохранения импульса

$$\nabla\cdot(\rho\mathbf{uu}) = -\nabla p + \\ + \nabla\cdot\left[\mu\left(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T\right) - \frac{2}{3}\mu\nabla\cdot(\mathbf{uI})\right] + \mathbf{F}, \quad (8)$$

$$\mathbf{F} = \rho\mathbf{g} + \mathbf{J}\times\mathbf{B}, \quad (9)$$

где u – скорость, p – давление, μ – вязкость, T – температура, $\mathbf{I}$ – единичный тензор, произведение $\mathbf{J}\times\mathbf{B}$ – описывает силу Лоренца, а $\rho\mathbf{g}$ – гравитационную силу, $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции, $\mathbf{J}$ – плотность тока в плазме.

Высота поверхности осаждения частиц определяется следующим уравнением [28]:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{RM}{\rho_b}, \quad (10)$$

где h – полная толщина пленки (м), M – молярная масса (кг/моль), ρ_b – плотность объемной компоненты (кг/м^3) и R – скорость поверхностной реакции (моль/м^2).

Уравнения (1)–(10) решались с использованием метода конечных элементов программного пакета COMSOLMultiphysics с приведенными ниже граничными условиями.

Поток электронов на стенки реактора

$$-\mathbf{n}\cdot\mathbf{\Gamma}_e = \frac{1-r_e}{1+r_e}\left(\frac{1}{2}V_{th}n_e\right) - \sum_p\gamma_p(\mathbf{\Gamma}_p\cdot\mathbf{n}), \quad (11)$$

$$V_{th} = \sqrt{\frac{8k_BT_e}{\pi m_e}}, \quad (12)$$

где $\mathbf{n}$ – единичный вектор, перпендикулярный стенкам, V_{th} – тепловая скорость электронов, k_B – постоянная Больцмана, m_e – масса электрона. Второй член уравнения (11) описывает образование электронов во вторичных эмиссионных процессах.

Поток энергии от электронов к стенкам

$$-\mathbf{n}\cdot\mathbf{\Gamma}_\varepsilon = \frac{1-r_e}{1+r_e}\left(\frac{5}{6}V_{th}n_\varepsilon\right) - \sum_p\gamma_p\varepsilon_p(\mathbf{\Gamma}_p\cdot\mathbf{n}). \quad (13)$$

Второй член уравнения (13) описывает поток энергии от вторичных электронов, где ε_p – средняя энергия вторичных электронов. В данном расчете пренебрегалось вторичной эмиссией электронов γ_p, и коэффициент отражения r_e принимался равным нулю.

2.3. Химические реакции

В используемой модели рассматривается плазма в газовой смеси, состоящей из аргона, силана и водорода. При столкновении молекул с высокоэнергичными электронами и ионами происходит диссоциация или ионизация составляющих плазму молекул. Таким образом, в данном рас-

Таблица 1. Использованные в модели реакции с участием электронов

	Реакция	Тип	Δε (эВ)	Источник
1	e + Ar => e + Ar	Упругое столкновение	0	[33]
2	e + Ar => e + Ars	Возбуждение	11.5	[33]
3	e + Ars => e + Ar	Сверхупругое столкновение	−11.5	[33]
4	e + Ar => 2e + Ar^+	Ионизация	15.8	[22]
5	e + Ars => 2e + Ar^+	Ионизация	4.427	[22]
6	e + SiH_4 => e + SiH_4	Упругое столкновение	0	[33]
7	e + SiH_4 => e + SiH_4	Возбуждение	0.11	[32]
8	e + SiH_4 => e + SiH_4	Возбуждение	0.27	[32]
9	e + SiH_4 => e + SiH_4s	Возбуждение	8.01	[28]
10	e + SiH_4 => e + SiH_4s	Возбуждение	8.92	[28]
11	e + SiH_4 => 2e + SiH_4^+	Ионизация	12.9	[28]
12	e + SiH_4 => SiH_4^-	Прилипание	0	[28]
13	e + H_2 => e + H_2	Упругое столкновение	0	[28]
14	e + H_2 => e + H_2s	Возбуждение	15.	[34]
15	e + H_2 => e + H_2s	Возбуждение	16.6	[34]
16	e + H_2 => 2e + H_2^+	Диссоциативное прилипание	15.4	[33]

смотрении необходимо было учесть реакции ионизации, возбуждения и прилипания, которые могут происходить в рассматриваемой газоразрядной плазме.

Процессы электронных столкновений, которые учитывались в используемой модели, приведены в таблице 1 [22, 28, 32–34]. Плазмохимические реакции можно разделить на объемные и поверхностные. Поверхностные реакции протекают на подложке, которая сорбирует кремний и высвобождает водород. Основной реакцией осаждения кремния является реакция диссоциации силана, которая представлена в следующем виде [28]:

$$SiH_4(g) + e \rightarrow Si(s) + 2H_2(g) + e.$$

Согласно этой реакции атомы кремния осаждаются на поверхность подложки, а силан в реакторе заменяется водородом [28].

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе был рассмотрен плазмохимический метод осаждения из газовой фазы с использованием индуктивно-связанной плазмы в реакторе конференции по газовой электронике (GEC) для смеси силана, аргона и водорода. Частота разрядного ВЧ-источника составляла 13.56 МГц, а температура газовой смеси – 500 K [34]. Было исследовано влияние давления газа и подводимой ВЧ-мощности на процесс осаждения. Давление варьировалось от 10 до 40 мТорр, а разрядная мощность – от 1000 до 3000 Вт. В дополнение к этому, для сравнения результатов моделирования с экспериментальными результатами в смеси Si:H [8, 9, 18, 27, 35] доля водорода варьировалась от 5% до 25%.

3.1. Параметры плазмы

На рис. 2 представлено двумерное распределение плотности электронов, электронной температуры, электрического потенциала и потери мощности за счет столкновений в центральной области разрядной ячейки при мощности 3000 Вт, давлении 20 мТорр и составе газовой смеси: 5% SiH_4, 5% H_2 и 90% Ar. Наибольшее значение плотности электронов составляло 4.4×10^{18} м$^{-3}$ и достигалось в середине разрядного промежутка (рис. 2а).

На рис. 2б приведено распределение электронной температуры. Из приведенных данных видно, что максимальная температура электронов составляла примерно 3.3 эВ. Область максимального значения электронной температуры находилась возле стенок реактора под третьей и четвертой катушками на расстоянии 35 мм.

Распределение электрического потенциала приведено на рис. 2в. Его максимальное значение внутри области разряда составило примерно 16.7 В.

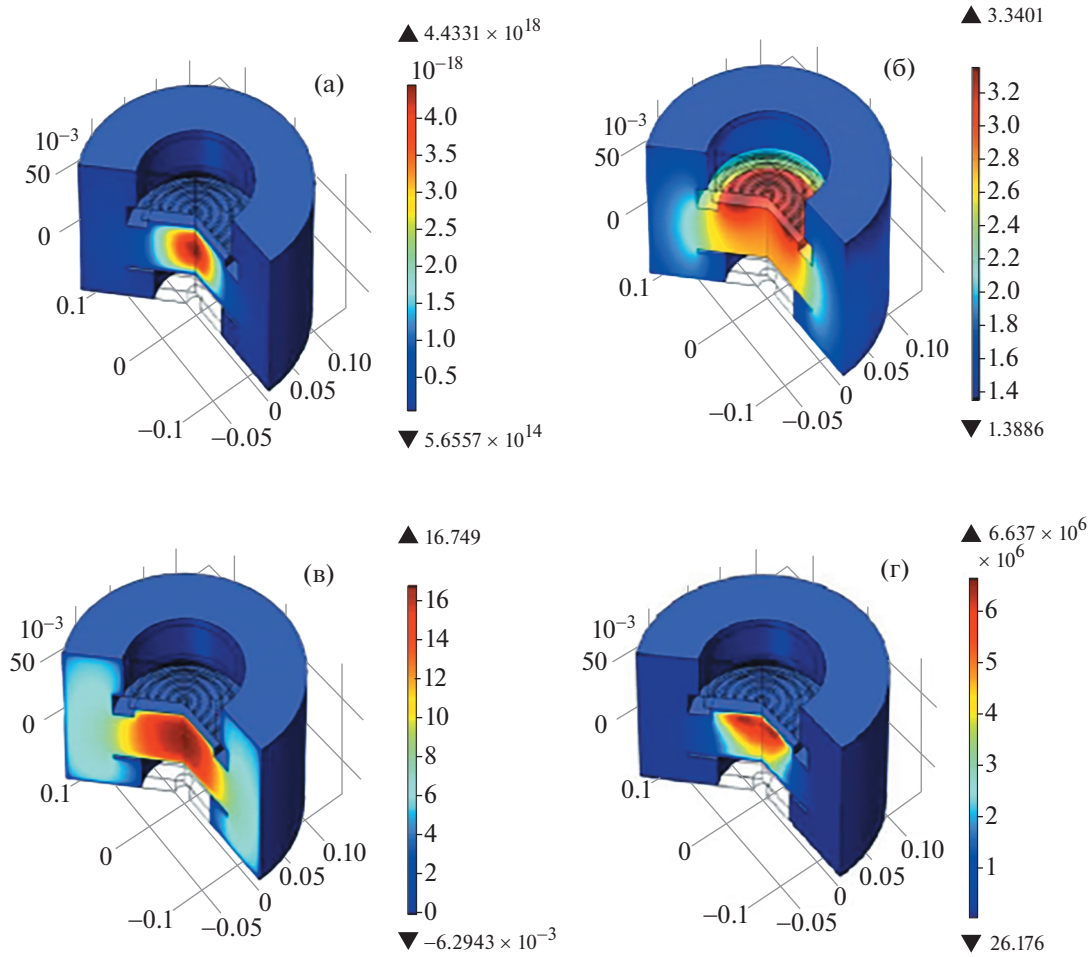

Рис. 2. Двумерное распределение плазменных параметров: плотность электронов ($м^{-3}$) (а); температура электронов (эВ) (б); электрический потенциал (В) (в) и потеря мощности при столкновениях ($Вт/м^3$) (г).

Область наибольшей рассеиваемой мощности (см. рис. 2г) также находилась в центре разрядного промежутка, т.е. в области максимальных значений электронной плотности и электронной температуры. Величина рассеиваемой мощности достигала 6.6×10^6 $Вт/м^3$.

Полученные параметры плазмы оказались достаточно близки к параметрам, представленным в работе [9], в которой использовалась гидродинамическая модель с самосогласованным распределением энергии для индуктивно-связанной плазмы. Для давления газа 10 мТорр и мощности 800 Вт авторами [9] была получена плотность электронов 6×10^{17} $м^{-3}$, температура электронов 3.8 эВ, а электрический потенциал 15 В.

3.2. Константы скорости реакций

На рис. 3 приведены константы скорости ионизации аргона, силана и водорода, а также плотности электронов и ионов SiH_4^+, SiH_4^-, H_2^+ и Ar^+ в зависимости от расстояния между окном и нижним электродом. Из рис. 3а следует, что наиболее важной реакцией являлась реакция ионизации аргона. Аргон добавлялся в газовую смесь для более стабильного протекания разряда и для увеличения частоты столкновений частиц в плазме.

Зависимость плотности электронов и ионов SiH_4^+, SiH_4^-, H_2^+ и Ar^+ от расстояния между окном и нижним электродом приведена на рис. 3б. Плотность частиц наиболее высока в центре реактора и составляет 1.7×10^{19} $м^{-3}$ для Ar^+, 1.3×10^{19} $м^{-3}$ для SiH_4^- и 4×10^{18} $м^{-3}$ для электронов. По направлению к стенкам плотность частиц падает из-за основных процессов гибели заряженных частиц: электрон-ионной рекомбинации и ухода заряженных частиц на стенки реактора посредством амбиполярной диффузии.

3.3. Влияние параметров разряда

На рис. 4 приведены зависимости плотности ионов силана и электронной температуры в цен-

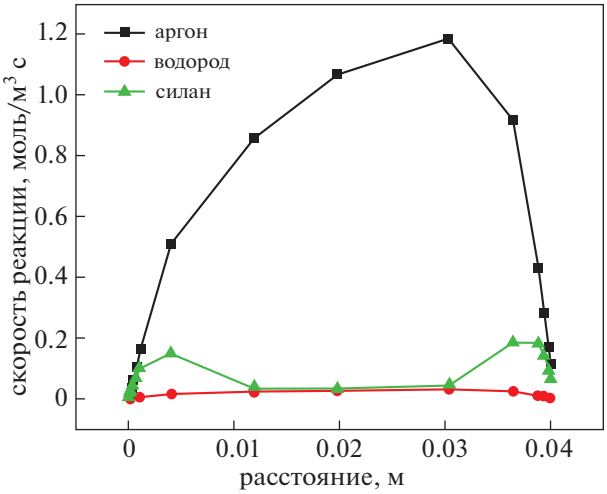

Рис. 3. Осевые профили скоростей ионизации аргона, силана и водорода (а); плотностей электронов и ионов (SiH_4^+, SiH_4^-, H_2^+, Ar^+) (б) для центральной области разряда при давлении 20 мТорр и ВЧ-мощности 3000 Вт.

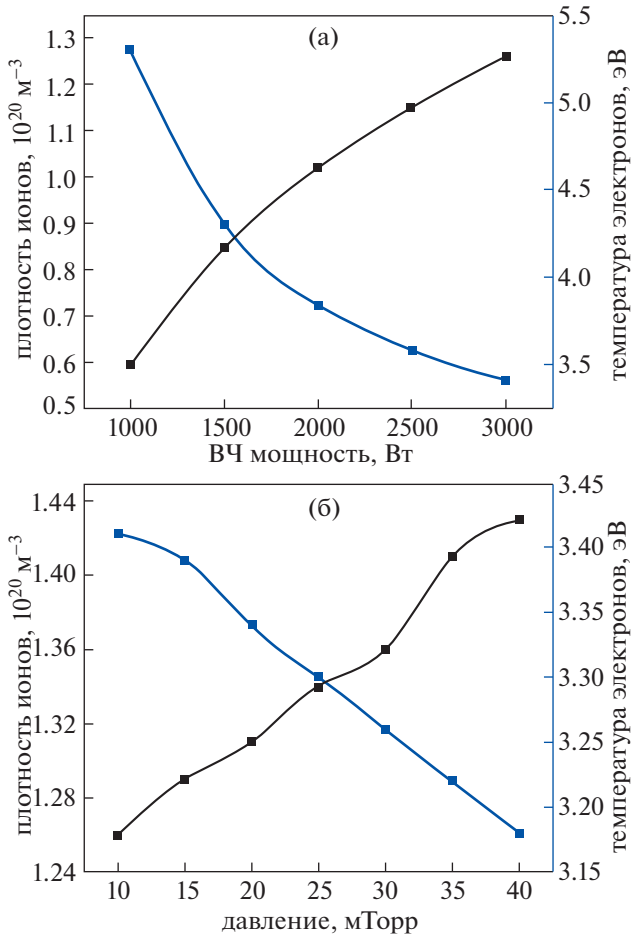

Рис. 4. Зависимость плотности ионов SiH_4 и температуры электронов: от подведенной мощности для давления 20 мТорр (а) и от давления газа при ВЧ-мощности 3000 Вт (б).

тральной части реактора от давления и подведенной ВЧ-мощности.

Влияние ВЧ-мощности на плотность ионов и электронную температуру при давлении 20 мТорр показано на рис. 4а. При увеличении мощности от 1000 до 3000 Вт плотность ионов силана увеличивалась от 6×10^{19} до 1.3×10^{20} м$^{-3}$, а температура электронов уменьшалась от 5.3 до 3.3 эВ. Причина такого поведения заключается в том, что обычно температура электронов пропорциональна энергии частиц при столкновениях с поверхностью, которые непосредственно вызывают дефекты на поверхности пленки, а плотность ионов напрямую связана со скоростью осаждения [27, 35]. Увеличение мощности разряда приводит к ускорению ионизации и, как следствие, увеличению плотности электронов. Что приводит к образованию новых частиц, а также к увеличению плотности ионов. Увеличение частоты столкновений приводит к уменьшению электронной температуры плазмы из-за потери энергии в столкновениях. Похожие результаты были экспериментально получены в работе [27] при получении Si : H пленок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием индуктивно-связанной плазмы при давлении 30 мТорр. При увеличении ВЧ-мощности от 1 до 2 кВт авторы [27] наблюдали небольшое уменьшение электронной температуры от 1.95 до 1.92 эВ при одновременном увеличении плотности ионов от 5×10^{17} до 8.2×10^{17} м$^{-3}$. В работе [35] при осаждении Si-H пленок из газовой смеси с парциальными расходами 30 стандартных см^3/мин для SiH_4 и 105 стандартных см^3/мин для H_2, при общем давлении 30 мТорр и увеличении ВЧ-мощности от 1.8 до 3 кВт наблюдалось уменьшение температуры электронов от 1.88 до 1.86 эВ и увеличение плотности ионов от 8.0×10^{17} до 9.2×10^{17} м$^{-3}$.

Из рис. 4б можно видеть, что при изменении давления от 10 до 40 мТорр плотность ионов силана увеличивалась от 1.2×10^{20} до 1.4×10^{20} м$^{-3}$, в то время как температура электронов уменьшалась от 3.6 до 2.7 эВ.

Увеличение плотности ионов в плазме происходит из-за увеличения давления. Другими словами увеличение давления приводит к увеличению количества частиц в единице объема и, как следствие, к увеличению частоты столкновений и образованию новых частиц. Уменьшение температуры электронов при увеличении давления от 10 до 40 мТорр вызвано пропорциональным увеличением частоты столкновений, которая растет

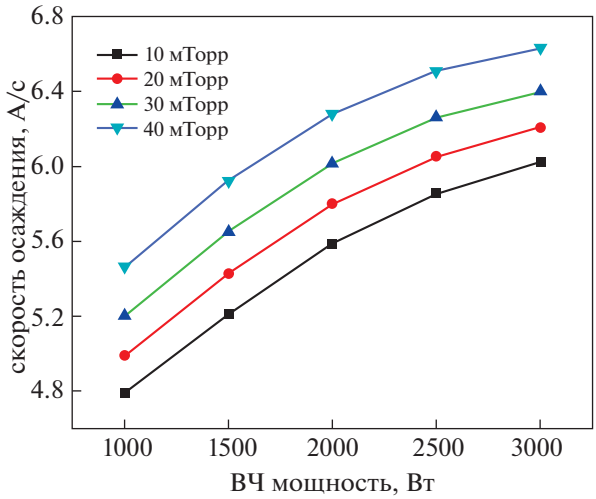

Рис. 5. Зависимость скорости осаждения пленки от подведенной мощности для смеси 5% SiH_4, 5% H_2 и 90% Ar при различных давлениях.

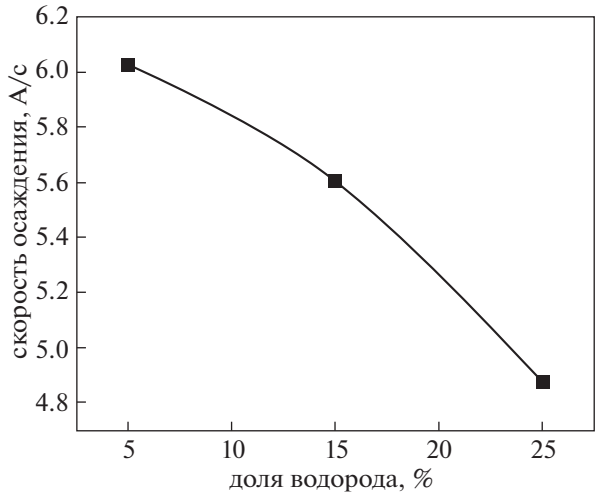

Рис. 6. Зависимость скорости осаждения пленки от доли водорода в смеси при давлении 20 мТорр и ВЧ-мощности 3000 Вт.

при увеличении давления и приводит к увеличению потерь энергии при столкновениях. Плотность ионов и электронная температура, измеренные в [27] при ВЧ-мощности 1700 Вт и увеличении давления от 20 до 40 мТорр, изменялись от 6.3×10^{17} до 8×10^{17} м$^{-3}$ и от 2.05 до 1.09 эВ, соответственно. Данные зависимости хорошо согласуются с результатами наших расчетов.

Скорость роста толщины пленки также зависит от параметров разряда. В данной работе было исследовано влияние ВЧ-мощности, давления газа и доли водорода в газовой смеси на скорость роста осаждаемой пленки.

Влияние ВЧ-мощности на скорость роста кремниевой пленки для различных давлений газа представлено на рис. 5. Приведенные зависимости показывают практически линейное увеличение скорости осаждения пленки при увеличении ВЧ-мощности и давления газа. Например, для давления 10 мТорр скорость осаждения увеличилась с 4.8 до 6.7 Å/с при увеличении ВЧ-мощности от 1000 до 3000 Вт. Аналогичный эффект наблюдался при фиксированной мощности и увеличении давления от 10 до 40 мТорр. Похожие результаты наблюдались при осаждении кремниевых пленок в работах [27, 35].

При низком давлении температура электронов становится выше, а плотность ионов SiH_4 ниже (см. рис. 4а). В этом случае важную роль играет частота столкновений.

Действительно, увеличение эффективной частоты столкновений между различными частицами приводит к увеличению скорости диссоциации молекул SiH_4 и H_2 и к образованию в плазме множества реакционноспособных частиц, в частности радикалов SiH_4, которые способствуют увеличению скорости осаждения [27, 35].

С ростом давления температура электронов уменьшается, а плотность плазмы увеличивается, что приводит к увеличению скорости осаждения, т.е. значительное количество кремния осаждается в виде пленки.

Рисунок 6 иллюстрирует влияние доли водорода в смеси на скорость осаждения. Результаты расчета показали, что скорость осаждения уменьшается с 6 до 4.8 Å/с при увеличении доли водорода от 5 до 25%. Похожее уменьшение скорости осаждения с 0.92 до 0.6 Å/с при увеличении расхода водорода от нуля до 12 стандартных см^3/мин было обнаружено авторами работы [8], в которой рассматривалось осаждение тонких аморфных кремниевых пленок плазмохимическим методом с ВЧ-мощностью 80 Вт в смеси силана и водорода (расход силана составлял 1 стандартных см^3/мин, расход водорода варьировался от нуля до 12 стандартных см^3/мин). Данный результат объяснялся тем, что увеличение доли водорода в смеси улучшает кристалличность пленки путем увеличения скорости образования центров кристаллизации вместо увеличения скорости роста пленки [8, 18].

4. ВЫВОДЫ

В данной работе была рассмотрена модель плазмохимического осаждения из газовой фазы с использованием индуктивно-связанной плазмы в смеси силан-аргон-водород при низком давлении. Система уравнений модели решалась методом конечных элементов с помощью пакета программ COMSOLMultiphysics. Представлено

пространственное распределение плотности электронов, электрического потенциала и температуры электронов в центральной области разряда при давлении 20 мТорр и частоте ВЧ источника 13.56 МГц. Исследовано влияние давления, подведенной ВЧ мощности и степени разбавления водородом на скорость осаждения кремниевой пленки. Показано, что увеличение давления и приложенной ВЧ-мощности приводит к значительному ускорению осаждения, в то время как увеличение доли водорода в смеси – к замедлению.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим директора лаборатории L.M.I, профессора С. Сахли, а также мы благодарны нашей коллеге Р. Абидат за ее помощь и поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jhantu K.S., Jia H., Ohse N., Shirai H.* // J. Thin Solid Films. 2007. V. 515. P. 4098.
2. *Bakr N.A., Funde A.M., Waman V.S., Kamble M.M., Hawaldar R.R., Amalnerkar D.P., Sathe V.G., Gosavi S.W., Jadkar S.R.* // J. Thin Solid Films. 2011. V. 519. P. 3501.
3. *Sung Ki Kim, Se Il Cho, Young Jin Choi, Kyu Sik Cho, Pietruszko S.M., Jin Jang* // J. Thin Solid Films. 1999. V. 337. P. 200.
4. *Wei D.Y., Xia S.Q., Huang S.Y., Chan C.S., Zhou H.P., Xu L.X., Guo Y.N., Chai J.W., Wang S.J., Xu S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. P. 215501.
5. *Rachid A., Pichot F., Chahed L., Cuminal Y.* Crystal Structure Theory and Appl. 2012. V. 1. P. 57.
6. *Juneja S., Sudhakar S., Gope J., Kumar S.* Materials Science in Semiconductor Processing. 2015. V. 40. P. 11.
7. *Kandoussi K., Simon C., Coulon N., Belarbiand K., Mohammed-Brahim T.* J. Non-Crystalline Solids. 2008. V. 354. P. 2513.
8. *Kim S.K., Choi Y.J., Cho K.S., Jang J.* // IEEE Trans. Electron Devices. 1999. V. 46. P. 1001.
9. *Li M., Wu H.-M., Chen Y.* // IEEE Trans. on plasma science. 1995. V. 23. P. 558.
10. *Zhou H.P., Wei D.Y., Xu S., Xiao S.Q., Xu L.X., Huang S.Y., Guo Y.N., Yan W.S., Xu M.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 023517.
11. *Raha D., Das D.* // Applied Surface Science. 2013. V. 276. P. 249.
12. *Lee S.H., Lee I., Yi J. J.* Surface and Coatings Technology. 2002. V. 153. P. 67.
13. *Jia C., Linhong J., Kesheng W., Chuankun H., Yixiang S.* // J. Semiconductors. 2013. V. 34. P. 066004.
14. *Oh Ch.S., Kim T.H., Lim K.Y., Yang J.W.* // Semicond. Sci. Technol. 2004. V. 19. P. 172.
15. *Mao M., Wang Y.N., Bogaerts A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 435202.
16. *Choi J.H., Latu-Romain L., Bano E., Dhalluin F., Chevolleau T., Baron T.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 235204.
17. *Keiterand E.R., Kushner M.J.* // IEEE Transac. on plasma science 1999. V. 27. P. 62.
18. *Cheng Q., Xu S., Chai J.W., Huang S.Y., Ren Y.P., Long J.D., Rutkevych P.P., Ostrikov K.* // Thin Solid Films. 2008. V. 516. P. 5991.
19. *da Silva Zambom L., Mansano R.D., Furlan R.* // Vacuum. 2002. V. 65. P. 213.
20. *Justine J., Bartel T., Hebner G.A., Woodwort J.* // J. Electrochem. Soc. 1997. V. 144. P. 2448.
21. *Brezmes A.O., Breitkopf C.* // Vacuum. 2015. V. 116. P. 65.
22. *Ramamurthiand B., Economou D.J.* Plasma Sources Sci. Technol. 2002. V. 11. P. 324.
23. *Wang Y., Van Brunt R.J., Olthoff J.K.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. P. 703.
24. *Lymberopoulosand D.P., Economou D.J.* // J. Res. National Institute of Standards and Technology. 1995. V. 100. P. 473.
25. *Chakraborty M., Banerjee A., Das D.* // Physica E. 2014. V. 61. P. 95.
26. *Li Ch., Hsieh J.H., Huang K.L., Shao Y.T., Chen Y.W.* // Thin Solid Films. 2013. V. 544. P. 37.
27. *Hsieh J.H., Liang H.C., Setsuhara Y., Li C.* // Surface Coatings Technology. 2013. V. 231. P. 550.
28. ComsolMultiphysics™ 4.3a, COMSOL Inc. http://www.comsol.com.
29. *Huang M., Yang P.Y., Hanselman D.S., Monnig C.A., Hieftje G.M.* // Spectrochimica Acta. 1990. V. 45B. P. 511.
30. *Singh H., Graves D.B.* // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. P. 3889.
31. *Lee H.-Ch., Bang J.-Y., Chung Ch.-W.* // Thin Solid Films. 2011. V. 519. P. 7009.
32. *De Bleecker K., Bogaerts A., Gijbels R.* // Phys. Rev. E. 2004. V. 69. P. 056409.
33. *Xifeng W., Yuanhong S., Shuxia Z., Zhongling D., Younian W. J.* // Plasma Science and Technology. 2016. V. 18. P. 394.
34. *Stephan D., Bluhm D., Bolsinger V., Dobrygin W., Schmidt O., Brinkmann R.P.* // J. Plasma Sources Sci. Technol. 2013. V. 22. P. 055009.
35. *Jiuxiang Ch., Weizhong W., Cherng J.Sh., Qiang Ch.* // J. Plasma Science Technology. 2014. V. 16. P. 502.