

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ MNST SCIENCE OF MATERIALS AND TECHNOLOGICAL BASICS OF MNST

УДК 53.08

DOI: 10.17587/nmst.19.331-337

Е. Э. Гусев, аспирант, инженер, e-mail: bubbledouble@mail.ru, **А. А. Дедкова**, инженер, e-mail: my_name9999@mail.ru, **Н. А. Дюжев**, канд. физ.-мат. наук, директор, e-mail: djuzhev@unicm.ru, Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва, **А. С. Ковалёв**, канд. тех. наук, нач. лаб., АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург, **А. П. Онуфриенко**, начальник участка диффузии и осаждения слоев, e-mail: onufrienko@unicm.ru, АО "Зеленоградский нанотехнологический центр", Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА PECVD НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Поступила в редакцию 06.02.2017

Исследованы ключевые параметры пленки оксида кремния: скорость роста, механические напряжения и показатель преломления. Влияние операционных параметров на скорость роста пленки оценивалось по толщине пленки, которая определялась с помощью эллисометра. Механические напряжения рассчитывали по разработанной авторами ранее методике на основании изгиба пластины. Определены оптимальные операционные параметры для формирования пленок плазмохимического оксида кремния, позволяющие изготавливать малонапряженные структуры материала.

Ключевые слова: механические напряжения, плазмохимическое осаждение из газовой фазы, оксид кремния

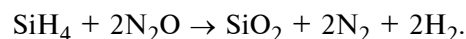
Введение

Для электрической изоляции уровней металлизации используется слой оксида кремния. Эта пленка обеспечивает такие свойства, как хорошая адгезия и конформность, поэтому ее можно использовать как межслойный диэлектрик [1]. Механические напряжения в SiO_2 влияют на планарность поверхности. Проведение технологических операций реактивно-ионного травления и термообработки позволяет изменить поверхность пластины, сделав ее более ровной [2]. Однако, управляя механическими напряжениями в процессе формирования пленки, можно сократить число операций для подготовки поверхности с требуемым рельефом. Для достижения результирующего значения механических напряжений, стремящихся к нулю, можно провести операцию осаждения пленки с напряжениями сжатия на образец с растягивающими напряжениями (с лицевой стороны). В некоторых случаях операция пассивации поверхности на лицевой стороне пластины связана с технологическими сложностями либо отсутствует материал с необходимым знаком напряжений. Один из способов решения проблемы — осаждение слоя на обратную сторону образца.

Для получения пленок SiO_2 используются разные методы:

- термическое окисление кремния в атмосфере кислорода при атмосферном давлении;
- термическое окисление кремния в парах деионизованной воды при атмосферном и повышенном давлении;
- химическое осаждение из газовой фазы при пониженном давлении (LPCVD);
- плазмохимическое осаждение из газовой фазы (PECVD).

Для осаждения диоксида кремния обычно используется реакция силана с закисью азота в плазме [1, 3, 4]:



При осаждении необходимо очень тщательно контролировать многие параметры процесса: частоту и мощность разряда, общее давление газовой смеси и парциальное давление реагентов, температуру подложки и скорость откачки, а также оптимизировать геометрию реактора и внимательно подбирать материал электродов. Следует отметить, что от конструкции реактора сильно зависят параметры процесса, так что режим осаждения должен подбираться для каждого реактора индивидуально, что затрудняет сравнение свойств пленок, полу-

ченных на различных реакторах [3]. Однако тенденция зависимостей должна быть идентичной, что и будет представлено в данной работе.

Целью работы было оптимизировать операционные параметры технологического процесса для PECVD оксида кремния, получаемого на установке Novellus, для формирования малонапряженной пленки материала.

Эксперимент

Пленки плазмохимического оксида кремния SiO_2 получали методом стимулированного плазмой химического осаждения из газовой фазы (PECVD), из газовой смеси закиси азота N_2O , азота N_2 и моносилана SiH_4 на установке Novellus. Закись азота препятствует зародышеобразованию в газовой фазе, что повышает чистоту осаждаемой пленки. Во всех экспериментах температура осаждения составляла 350 °С. В работе использовался ВЧ генератор частотой 13,57 МГц с максимальной мощностью 5 кВт.

При проведении процессов варьировались мощность разряда в плазме (400...1450 Вт), давление в реакционной камере (1000...3000 мТорр), расход силана SiH_4 (100...400 $\text{см}^3/\text{мин}$), расход закиси азота N_2O (3000...12 000 $\text{см}^3/\text{мин}$), расход азота N_2 (0...3000 $\text{см}^3/\text{мин}$), общий расход газов (5650...13 560 $\text{см}^3/\text{мин}$), время осаждения (50...300 с).

Осаждение проводили на лицевую сторону кремниевых пластин КДБ12(100), диаметром 150 мм и толщиной 670 мкм. Толщины осажденных пленок и показатель преломления определяли с помощью эллипсометра Horiba Auto SE. Ранее авторами были разработаны методики измерения механических напряжений σ с помощью профилометра [5] и с использованием растрового электронного микроскопа [6]. В данной работе использовался метод контроля по изгибу пластины посредством оптического профилометра Veeco Wyko NT9300. Методика включает в себя программу, реализующую алгоритм анализа рельефа для вычисления радиуса кривизны поверхности в локальной области [7]. Значения радиусов кривизны поверхности подставляются в формулу Стони для вычисления величины σ . В графиках для каждого случая использовалось среднее арифметическое значение σ по всей пластине.

Авторами проводилось исследование скорости осаждения пленки, показателя преломления, механических напряжений σ осаждаемой пленки путем изменения операционных параметров процесса.

Исследование влияния мощности разряда в плазме

Вначале было исследовано влияние мощности разряда в плазме на параметры осаждаемой пленки. Мощность изменяли от 400 до 1450 Вт при давлении в реакционной камере 2400 мТорр, расходах силана SiH_4 300 $\text{см}^3/\text{мин}$, закиси азота N_2O 9500 $\text{см}^3/\text{мин}$, азота N_2 1500 $\text{см}^3/\text{мин}$, времени осаждения 100 с и температуре подложки 350 °С.

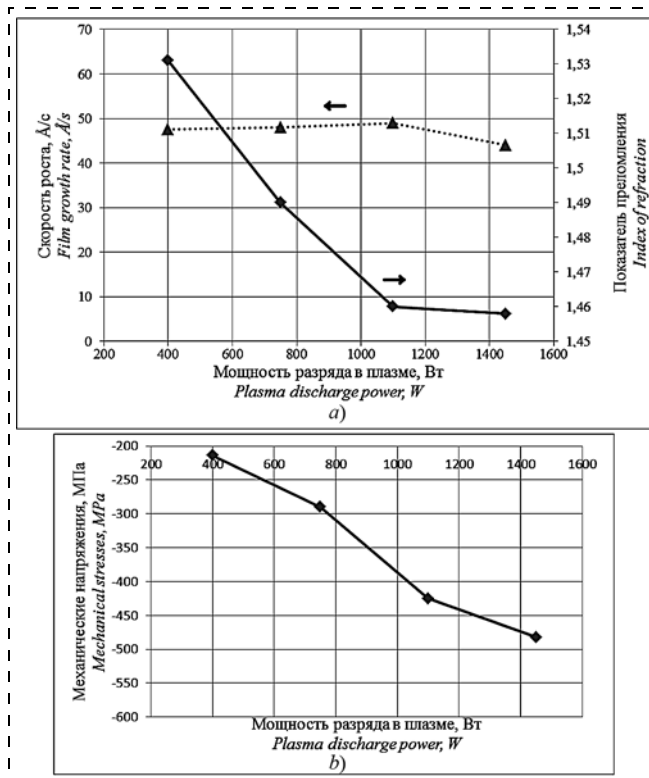


Рис. 1. Зависимость характеристик пленки от мощности плазмы: а — скорость роста пленки (пунктирная кривая) и показатель преломления; б — механические напряжения

Fig. 1. Dependence of characteristics of film from plasma power: a — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; b — mechanical stresses

Из рис. 1, а видно, что изменение мощности разряда в плазме не оказывает существенного влияния на скорость роста пленки (пунктирная кривая). Показатель преломления уменьшается при увеличении мощности плазмы и достигает значения 1,46 при мощности плазмы 1100 Вт. Это свидетельствует о том, что при значениях мощности менее 1100 Вт пленка получается нестехиометрической из-за неполного окисления силана SiH_4 и ее насыщения связями Si—H. Из рис. 1, б можно сделать вывод, что с увеличением мощности плазмы механическое напряжение сжатия пленки σ по модулю возрастает. Эта зависимость имеет линейный характер.

Исследование влияния давления в реакционной камере

Далее было проведено исследование влияния давления в реакционной камере на параметры пленки. Давление изменяли от 1000 до 3000 мТорр, мощность плазмы — 1100 Вт. Остальные параметры процесса остались прежними.

Из рис. 2 видно, что изменение давления оказывает большое влияние на скорость осаждения, показатель преломления и механические напряжения осаждаемой пленки. С ростом давления увеличивается скорость роста пленки (пунктирная кривая), достигая максимума при давлении 2400 мТорр. Зависимость показателя преломления от давления

аналогична зависимости показателя преломления от мощности плазмы: при повышении давления показатель преломления плавно уменьшается с 1,55 до 1,46. Следовательно, при значениях давления менее 2400 мТорр происходит неполное окисление силана SiH_4 и насыщение осаждаемой пленки связями $\text{Si}-\text{H}$, что аналогично при осаждении при низкой мощности разряда в плазме.

Значение механических напряжений (по модулю) возрастает с увеличением давления в камере. Можно предположить, что повышение давления в камере приводит к увеличению вероятности столкновения реагентов в камере с подложкой с некоторой энергией. Причем величина энергии будет достаточна для проведения химической реакции, следовательно, на выходе пленка формируется за меньшее время (возрастает скорость осаждения), но более напряженная.

Исследование влияния скорости расхода силана SiH_4

Было проведено исследование влияния скорости расхода силана SiH_4 (рис. 3). Скорость расхода менялась от 100 до 400 $\text{см}^3/\text{мин}$, давление в реакционной камере было постоянным 2400 мТорр, мощность плазмы — 1100 Вт. Остальные параметры процесса остались прежними.

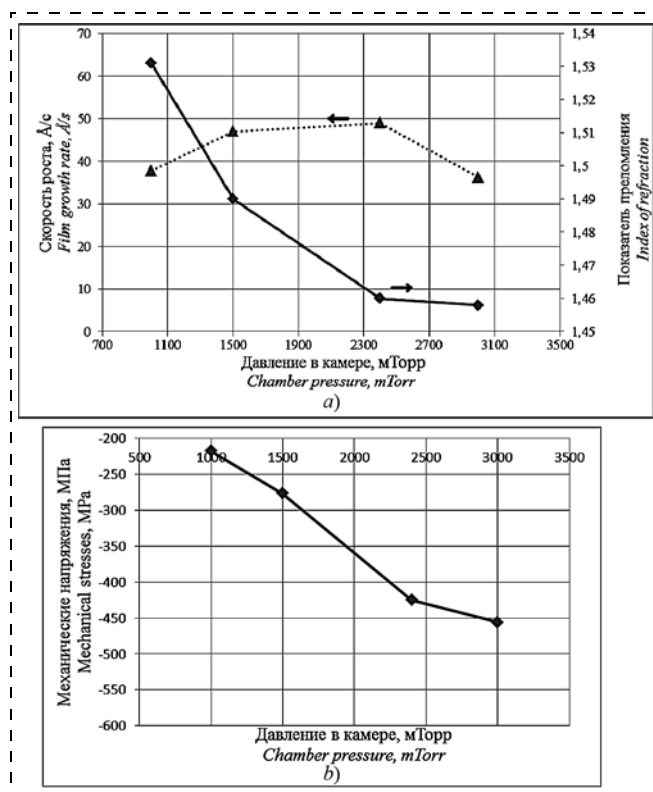


Рис. 2. Зависимость характеристик пленки от давления в камере: а — скорость роста (пунктирная кривая) и показатель преломления; б — зависимость механических напряжений

Fig. 2. Dependence of film characteristics from pressure in chamber: а — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; б — mechanical stresses

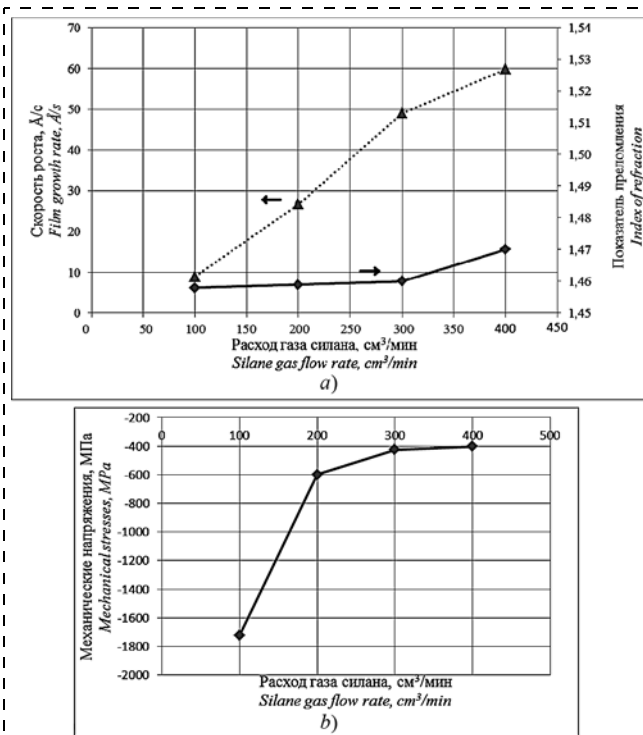


Рис. 3. Зависимость характеристик пленки от скорости расхода силана SiH_4 : а — зависимости скорости роста пленки (пунктирная кривая) и показателя преломления; б — зависимость механических напряжений

Fig. 3. Dependence of characteristics of film from silane flow rate: а — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; б — mechanical stresses

Из рис. 3, а можно заключить, что скорость роста пленки (пунктирная линия) прямо пропорциональна скорости расхода силана. Однако при расходах силана более 300 $\text{см}^3/\text{мин}$ начинает увеличиваться показатель преломления (сплошная линия). Это свидетельствует о неполном окислении силана в осаждаемой пленке. На рис. 3, б заметно, что при уменьшении расхода силана осаждаемая пленка становится более сжатой, причем значение напряжений резко увеличивается при расходах силана менее 200 $\text{см}^3/\text{мин}$.

Исследование влияния соотношения расходов газов $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$

Следующим шагом было проведено исследование влияния соотношения расходов газов R азота и силана ($\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$). Соотношение R менялось от 10 до 40, расход N_2O менялся от 3000 до 12 000 $\text{см}^3/\text{мин}$ при постоянном расходе SiH_4 300 $\text{см}^3/\text{мин}$.

На рис. 4, а продемонстрировано, что на скорость осаждения и показатель преломления соотношение расходов газов R влияет незначительно. При значениях R менее 25 наблюдается повышение показателя преломления, что свидетельствует о формировании пленки, обогащенной кремнием. В работе [8] Hussein и др. зафиксировали аналогичную зависимость показателя преломления от соотношения расхода газов. Результаты, представ-

ленные на рис. 4, *b*, хорошо согласуются с данными в работах [9, 10], где величина механических напряжений по модулю возрастает с увеличением R . На рис. 4, *c* заметно, что соотношение расходов газов R оказывает влияние на равномерность распределения толщины пленки по пластине. При значениях R менее 25 среднее квадратичное отклонение толщины пленки оказывается больше 3 % и резко увеличивается до 11 % при значении $R = 10$.

Исследование влияния скорости расхода азота N_2

Было проведено исследование зависимости параметров осаждаемой пленки от скорости расхода азота N_2 . Расход азота меняли от 0 до 3000 $см^3/мин$.

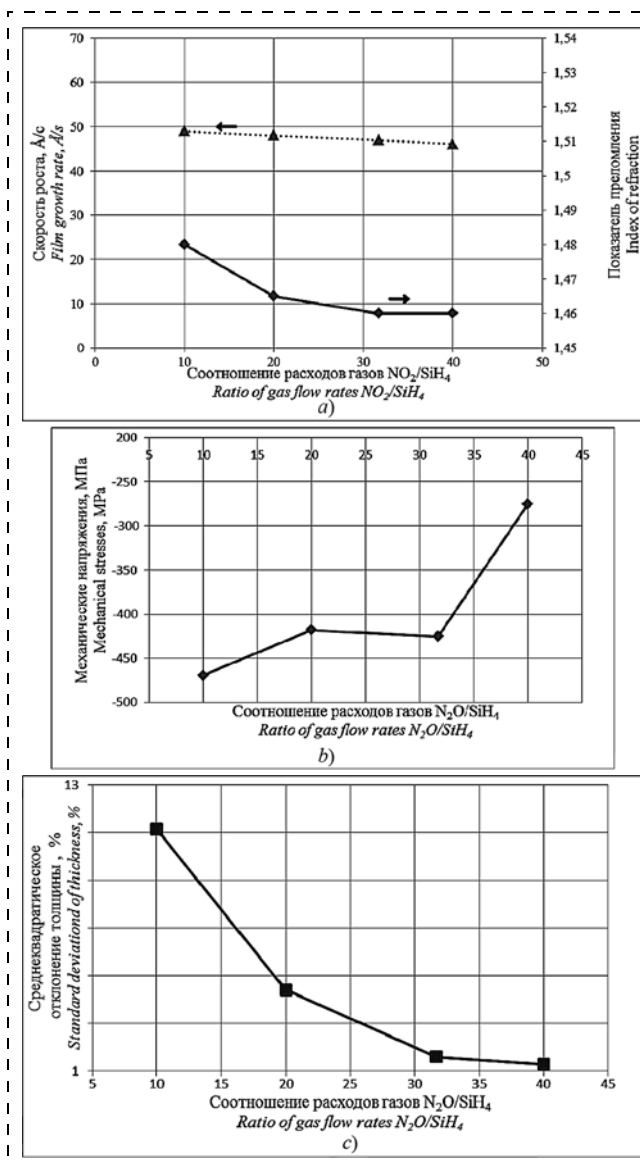


Рис. 4. Зависимость характеристик пленки от соотношения расходов газов N_2O/SiH_4 : *a* — зависимости скорости роста пленки (пунктирная линия) и показателя преломления; *b* — зависимость механических напряжений; *c* — зависимость среднее квадратичного отклонения толщины пленки

Fig. 4. Dependence of characteristics of film from ratio of gas flow rates N_2O/SiH_4 : *a* — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; *b* — mechanical stresses; *c* — standard deviation of film thickness

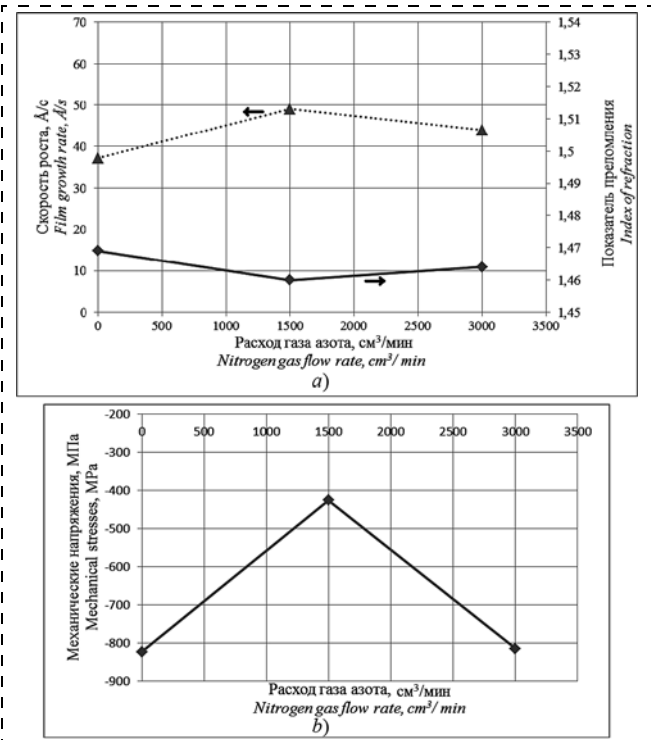


Рис. 5. Зависимость характеристик пленки от расхода азота: *a* — зависимости скорости роста пленки (пунктирная линия) и показателя преломления; *b* — зависимость механических напряжений

Fig. 5. Dependence of characteristics of film from nitrogen gas flow rate: *a* — film growth rate (dotted curve) and index of refraction; *b* — mechanical stresses

Все остальные параметры процесса оставались без изменений.

На рис. 5, *a* видно, что расход азота N_2 оказывает незначительное влияние на такие параметры осаждаемой пленки, как скорость осаждения, показатель преломления. Из рис. 5, *b* можно заключить, что оптимальное значение расхода азота составляет 1500 $см^3/мин$.

Заключение

В процессе формирования мембран по групповой кремниевой технологии используются несколько слоев диэлектрических материалов. Контролируя механические напряжения в каждой пленке мембраны, можно повысить вероятность выхода годных кристаллов. В данной работе экспериментально показано влияние операционных параметров осаждения на скорость роста пленки SiO_2 , показатель преломления и механические напряжения. Определены оптимальные параметры для формирования пленки PECVD SiO_2 на установке Novellus, позволяющие создать малонапряженную структуру материала: мощность разряда в плазме 400 Вт, давление в камере 1500 мТорр, соотношение расхода газов закиси азота и силана 40, расход газа азота 1500 $см^3/мин$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по договору № 02.G25.31.0200 от 27 апреля 2016 года, шифр договора 2015-218-07-052.

Список литературы

1. Рубцевич И. И., Соловьев Я. А., Высоцкий В. Б. и др. Исследование свойств пленок нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения на кремниевую подложку // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2011. № 4. С. 29–32.

2. Дюжев Н. А., Махиборода М. А., Гусев Е. Э., Катеев М. В. Формирование планарной поверхности пластин для проведения технологических операций контактной литографии и бондинга // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19, № 1. С. 30–33. DOI: 10.17587/nmst.19.30-33

3. Королёв М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. М.: БИНОМ, 2007. Часть 1. 397 с.

4. Pi C.-H. and Turner K. T. Design, analysis and characterization stress-engineered 3D microstructures comprised of PECVD silicon oxide and nitride // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2016. Vol. 26, N. 6. DOI:10.1088/0960-1317/26/6/065010

5. Дюжев Н. А., Дедкова А. А., Гусев Е. Э., Новак А. В. Методика измерения механических напряжений в тонких пленках на пластине с помощью оптического профилометра // Известия вузов. Электроника. 2016. № 4. С. 367–372.

6. Djuzhev N. A., Gusev E. E., Dedkova A. A., Patiukov N. Determination of mechanical stress in the silicon nitride films with a scanning electron microscope // Proceedings SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016. DOI: 10.1117/12.2250118.

7. Дюжев Н. А., Гусев Е. Э., Дедкова А. А., Чиненков М. Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611518. Программа анализа рельефа с целью расчета величины кривизны поверхности в выбранном направлении на кремниевой пластине. Действует с 04.02.2016.

8. Hussein M. G., Worhoff K., Sengo G., Driessen A. Optimization of plasma-enhanced chemical vapor deposition silicon oxynitride layers for integrated optics applications // Thin Solid Films. 2007. Vol. 515. P. 3779–3786.

9. Mackenzie K. D., Johnson D. J., DeVre M. W. et. al. Stress control of Si-based PECVD dielectrics // Proc. Symp. Silicon Nitride and Silicon Dioxide Thin Insulating Films & Other Emerging Dielectrics VIII. 2005. P. 148–159, Electrochemical Society, Pennington, NJ (2005).

10. Ануфриев Л., Ковальчук Н., Ланин В. Совершенствование технологии мембранных МЭМС // Компоненты и технологии, 2013. Вып. 6 (143).

E. E. Gusev, Postgraduate Student, Engineer, bubbledouble@mail.ru, **A. A. Dedkova**, Engineer, my_name9999@mail.ru, **N. A. Djuzhev**, Ph. D., Director, djuzhev@unicm.ru, National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, **A. S. Kovalev**, Ph. D., Head of Laboratory, JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, **A. P. Onufrienko**, Section chief of diffusion and deposition of layers, onufrienko@unicm.ru, JSC "Zelenograd Nanotechnology Center", Moscow

Corresponding author:

Gusev Evgeniy E., Postgraduate Student, Engineer, National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, 124498, Russian Federation, e-mail: bubbledouble@mail.ru

Research of the Influence of the Operational Parameters of PECVD Process on Characteristics of Silicon Dioxide Films

Received on February 6, 2017

Accepted on February 20, 2017

The authors investigated the key parameters of the silicon oxide films: growth rate, mechanical stresses and refraction index. The influence of the operational parameters on the growth rate of a film was estimated by the thickness of the film, which was determined with help of an ellipsometer. The mechanical stresses were calculated by the method developed earlier by the authors and based on a plate bend. The optimal operational parameters were determined for formation of the films of plasma-chemical silicon oxide, allowing one to manufacture the understressed material structures.

Keywords: mechanical stresses, plasma enhanced chemical vapor deposition, silicon oxide

For citation:

Gusev E. E., Dedkova A. A., Djuzhev N. A. Research of the Influence of the Operational Parameters of PECVD Process on the Characteristics of Silicon Dioxide Films, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2017, vol. 19, no. 6, pp. 331–337.

DOI: 10.17587/nmst.19.331-337

Introduction

For electric insulation of the metallization levels a layer of silicon oxide is used. It ensures good adhesion and conformity, therefore, it can be used as an interlaminar dielectric [1]. Mechanical stresses in SiO₂ influence the planar character of a surface. Technological operations of reactive-ionic etching and heat treatment allow us to change a plate surface and make it more even [2]. However, control of the mechanical stresses during a film formation makes it possible to reduce the

number of operations for preparation of a surface with the demanded relief. For achievement of the mechanical stresses aspiring to zero, it is possible to implement a deposition of a film with a compression stress on a sample with the stretching stresses (on the face side). In some cases a surface passivation on a plate's face is connected with technological difficulties or absence of a material with the necessary sign of stresses. One of the ways to solve the problem is to deposit a layer on the reverse side of a sample.

For obtaining of SiO₂ films different methods are used:

- thermal oxidation of the silicon in the oxygen atmosphere at the atmospheric pressure;
- thermal oxidation of the silicon in the vapors of deionized water at the atmospheric or higher pressure;
- chemical deposition from a gas phase at a lower pressure (LPCVD);
- plasma-chemical deposition from a gas phase (PECVD).

Usually for deposition of the silicon dioxide a reaction of silane with nitrogen monoxide in plasma [1, 3, 4] is used:



It is necessary to control carefully many parameters of the process: frequency and power of a discharge, total pressure of a gas mix and partial pressure of the reagents, temperature of a substrate and speed of pumping out, and also to optimize the geometry of a reactor and select carefully a material for the electrodes. It is necessary to point out that the process parameters depend on a reactor design, so, the deposition mode should be selected for each reactor individually, which complicates comparison of the films received in various reactors [3]. However, the trend of the dependences should be identical, as it is presented in the given work.

The aim of the work was to optimize the operational parameters of the technological process for PECVD of silicon oxide received on Novellus installation, for formation of an understressed film of a material.

Experiment

The films of the plasma-chemical silicon oxide were received by the method of the plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD), from a mix of nitrogen monoxide N₂O, nitrogen N₂ and monosilane SiH₄ on Novellus installation. N₂O prevents nucleation in the gas phase, which improves cleanliness of a deposited film. In the experiments the deposition temperature was 350 °C. In the work a high frequency generator was used with frequency of 13.57 MHz and maximal power of 5 kW.

The power of the discharge in plasma varied (400...1450 W), just like the pressure in the reactionary chamber (1000...3000 mTorr), the consumption of SiH₄ (100...400 cm³/min), N₂O (3000...12 000), N₂ (0...3000 cm³/min), total consumption of gases (5650...13 560 cm³/min), and deposition time (50...300 s).

The deposition was done on the face side of SHB12(100) silicon plates with diameter of 150 mm and thickness of 670 μm. The thickness of the deposited films and the refraction index were determined with the help of Horiba Auto SE ellipsometer. Earlier the authors developed techniques for measurement of the mechanical stresses σ with the help of a profilometer [5] and use of a scanning electron microscope [6]. In their work the authors used a method of a plate bend control by means of optical Veeco Wyko NT9300 profilometer. The method included a program realizing an algorithm for analysis of a relief and calculation of the radius of curvature of the

surface in a local area [7]. The values of the surface curvature radiuses were used in the Stoney formula for calculation of σ. In the diagrams for each case the arithmetic mean value of σ was used for the whole of the plate.

The authors carried out a research of speed of a film deposition (film growth rate), refraction index and mechanical stresses σ of the deposited film by changing the operational parameters of the process.

Research of the influence of the power of a discharge in plasma

First, the influence of the power of discharge in plasma on the parameters of a deposited film was investigated. The power was varied from 400 up to 1450 W in a reactionary chamber: pressure — 2400 mTorr, consumption of SiH₄ — 300 cm³/min, of N₂O — 9500 cm³/min, of N₂ — 1500 cm³/min, time of deposition — 100 s and substrate temperature of 350 °C.

In fig. 1, *a* it is visible, that a change of power of discharge in plasma does not render an essential influence on the growth rate of a film (dotted curve). The refraction index decreases with an increase of the power of plasma and reaches 1.46 at the level of plasma power of 1100 W.

This testifies to the fact that at a power less than 1100 W a film turns out to be nonstoichiometric because of an incomplete oxidation of the silane and its saturation by Si—H bonds. From fig. 1, *b* it is possible to draw a conclusion, that with an increase of the power of plasma the mechanical stresses of a film compression σ by modulus increases. This dependence has a linear character.

Research of the influence of pressure in the reactionary chamber

Then a research was done in the reactionary chamber of the influence of pressure on the film parameters. The pressure was varied from 1000 up to 3000 mTorr, the power of plasma was 1100 W. The other parameters of the process remained unchanged.

In fig. 2 it is visible, that a change of pressure has the biggest impact on the speed of deposition, the refraction index and the mechanical stresses of the deposited film. With increasing of pressure the film's growth rate also increases (dotted curve), reaching the maximal level at 2400 mTorr. Dependence of the refraction index on pressure is similar to the dependence of the refraction index on the power of plasma: with an increase of pressure the refraction index smoothly decreases from 1.55 down to 1.46. Hence, at the values of pressure less than 2400 mTorr we have an incomplete oxidation of SiH₄ and saturation of the deposited film by Si—H bonds, similar to those of deposition at a low power of discharge in plasma.

The values of the mechanical stresses (by modulus) increases with a pressure increase in the chamber. It is possible to assume, that a pressure increase leads to a higher probability of collision of the reagents in the chamber with a substrate with certain energy. At that, the energy would be sufficient for a chemical reaction,

hence, as a result, a film is formed during a shorter period of time (the speed of deposition increases), but it comes out more intense.

Research of the influence of the speed of consumption of the silane

A research of the influence of the speed of consumption of silane (fig. 3) was carried out. The speed of consumption varied from 100 up to 400 cm³/min, the pressure in the reactionary chamber was constant (2400 mTorr), the power of plasma — 1100 W. The other parameters of the process remained the same.

From fig. 3, *a* it is possible to conclude, that films' speed of growth (dotted line) is directly proportional to the speed of consumption of the silane. However, when consumption of the silane exceeds 300 cm³/min, the refraction index (continuous line) begins to increase. This testifies to an incomplete oxidation of the silane in the deposited film. In fig. 3, *b* it is visible, that, when the consumption of the silane is smaller, the deposited film becomes more compressed, at that, the value of the stresses increases sharply, when consumption of the silane is below 200 cm³/min.

Research of the influence of correlation of consumption of N₂O/SiH₄ gases

The next step is the research of the influence of correlation of consumption of gases *R* of nitrogen monoxide and silane (N₂O/SiH₄). The correlation *R* varied from 10 up to 40, the consumption of N₂O varied from 3000 up to 12 000 cm³/min at the constant consumption of SiH₄ of 300 cm³/min.

Fig. 4, *a* demonstrates that the influence of the consumption of gases *R* on the speed of deposition and the refraction index is negligible. At *R* less than 25 we witness higher refraction index, which testifies to formation of a film, enriched by silicon. In [8] a similar dependence of the refraction index on the correlation of the consumption of gases is recorded. Results of fig. 4, *b* agree well with the data of [9, 10], where the value of the mechanical stresses by modulus increase alongside with the increase of *R*. In fig. 4, *c* one can see, that the correlation of the consumption of gases *R* influences the uniformity of distribution of the film's thickness on a plate. At *R* less than 25 the standard deviation of the film's thickness is more than 3 % and it increases sharply up to 11 % at *R* = 10.

Research of the influence of the speed of consumption of nitrogen

A research of the dependence of the parameters of a deposited film on the speed of the consumption of nitrogen was carried out. The consumption of nitrogen was changed from 0 up to 3000 cm³/min. All the other parameters remained without changes.

In fig. 5, *a* it is visible, that the consumption of nitrogen has an insignificant impact on such parameters of a deposited film, as the speed of deposition and the refraction index. From fig. 5, *b* it is possible to con-

clude, that the optimal value of the consumption of nitrogen is 1500 cm³/min.

Conclusion

In the process of formation of the membranes by a group silicon technology several layers of the dielectric materials are used. By controlling the mechanical stresses in each film of a membrane it is possible to improve likelihood yield crystals. This work demonstrated experimentally the influence of deposition parameters on the growth rate of SiO₂ film, refraction index and mechanical stresses. The optimal parameters were determined for formation of PECVD of SiO₂ film on Novellus installation, allowing us to create an understressed structure of a material: the power of a discharge in plasma — 400 W, the pressure in the chamber — 1500 mTorr, the correlation of the consumption of nitrogen monoxide and silane — 40, the consumption of nitrogen — 1500 cm³/min.

The work was done with support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the contract № 02.G25.31.0200 of April, 27th, 2016, the code number of the contract: 2015-218-07-052.

References

1. Rubcevich I. I., Solov'ev Ja. A., Vysockij V. B. i dr. Issledovanie svojstv plenok nitrida i oksida kremniya, poluchennyh metodom plazmohimicheskogo osazhdeniya na kremnievuyu podlozhku, *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2011, no. 4, pp. 29—32 (in Russian).
2. Djuzhev N. A., Makhiborda M. A., Gusev E. E., Kakteev M. V. Formation of Plates' Planar Surfaces for Carrying out of the Technological Operations of Contact Lithography and Bonding, *Nano- i Mikrosistemnaya Tehnika*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 30—33, DOI: 10.17587/nmst.19.30-33 (in Russian).
3. Koroljov M. A., Krupkina T. Ju., Reveleva M. A. *Tehnologiya, konstrukcii i metody modelirovaniya kremnievyyh intergal'nyh mikroshem*. Moscow, BINOM, 2007, chast; 1, 397 p. (in Russian).
4. Pi C.-H. and Turner K. T. Design, analysis and characterization stress-engineered 3D microstructures comprised of PECVD silicon oxide and nitride, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, vol. 26, no. 6, DOI:10.1088/0960-1317/26/6/065010
5. Djuzhev N. A., Dedkova A. A., Gusev E. E., Novak A. V. Metodika izmereniya mekhanicheskikh napryazhenij v tonkikh pljolkah na plastine s pomoshh'ju opticheskogo profilometra, *Izvestiya Vuzov. Elektronika*, 2016, no. 4, pp. 367—372 (in Russian).
6. Djuzhev N. A., Gusev E. E., Dedkova A. A., Patiukov N. Determination of mechanical stress in the silicon nitride films with a scanning electron microscope, *Proceedings SPIE 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016*, DOI:10.1117/12.2250118.
7. Djuzhev N. A., Gusev E. E., Dedkova A. A., Chinenkov M. Ju. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2016611518. Programma analiza rel'efa s cel'ju rascheta velichiny krivizny poverhnosti v vybrannom napravlenii na kremnievoj plastine. Dejstvuet s 04.02.2016 (in Russian).
8. Hussein M. G., Worhoff K., Sengo G., Driessen A. Optimization of plasma-enhanced chemical vapor deposition silicon oxynitride layers for integrated optics applications, *Thin Solid Films*, 2007, vol. 515, pp. 3779—3786.
9. Mackenzie K. D., Johnson D. J., DeVre M. W. et. al. Stress control of Si-based PECVD dielectrics, *Proc. Symp. Silicon Nitride and Silicon Dioxide Thin Insulating Films & Other Emerging Dielectrics VIII*, 2005, pp. 148—159, Electrochemical Society, Pennington, NJ (2005).
10. Anufriev L., Koval'chuk N., Lanin V. Sovershenstvovanie tehnologii membrannyh MJeMS, *Komponenty i tehnologii*, 2013, is. 6 (143) (in Russian).