

Н. А. Дюжев, канд. физ.-мат. наук, директор, e-mail: djuzhev@unicm.ru

М. А. Махиборода, канд. физ.-мат. наук, зам. директора, e-mail: .makhiboroda@gmail.com

Е. Э. Гусев, аспирант, инженер, e-mail: bubbledouble@mail.ru

М. В. Катеев, аспирант, инженер, e-mail: kateev@unicm.ru

Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНАРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ КОНТАКТНОЙ ЛИТОГРАФИИ И БОНДИНГА

Поступила в редакцию 12.08.2016

Апробирована методика измерения механических напряжений по изгибу пластины. Измерены механические напряжения в неравномерной по толщине пленке плазмохимического SiO_2 на кремниевой пластине в локальной области. Предложены способы подготовки поверхности пластин, позволяющие уменьшить прогиб образца для последующих технологических операций.

Ключевые слова: механические напряжения, кривизна поверхности, прогиб пластины, профилометр, эллипсометр

Введение

В настоящее время технологии микромеханики или микроэлектромеханических систем (МЭМС) и интегральных схем (ИС) быстро развиваются [1]. Механические напряжения, возникающие при изготовлении ИС и МЭМС-устройств на Si-пластинах, оказывают сильное влияние на их надежность и динамические характеристики [2].

Существующие методики определения механических напряжений основаны на деформации пластины (профилометрия [2]) или связаны с измерением параметров решетки (рентгеновская дифрактометрия, просвечивающая электронная микроскопия).

Ранее авторами была разработана методика измерения механических напряжений по изгибу пластины, которая подробно описана в работе [3]. Методика включает в себя программу, реализующую алгоритм анализа рельефа для вычисления радиуса кривизны поверхности в локальной области [4]. Значения радиусов кривизны поверхности подставляются в формулу Стони для вычисления механических напряжений. В данной работе авторы апробируют разработанный способ.

Эксперимент

Исследовалась пластина монокристаллического кремния диаметром 150 мм толщиной 600 мкм с диэлектрической пленкой PECVD SiO_2 , неравномерной по толщине. Область измерения была разделена на 15 интервалов по 10 мм каждый. Как известно, значение постоянной двухосного модуля варьируется в зависимости от кристаллографической ориентации. Поэтому определение рельефа образца проводилось в направлении, параллельном

базовому срезу по лицевой стороне, что позволило использовать в последующих расчетах одно фиксированное значение двухосного модуля.

Далее была проведена операция реактивно-ионного травления (РИТ) оксида кремния в открытую поверхность на 2,5 мкм. В результате измерений с помощью эллипсометра после травления было получено 15 значений толщины оксида кремния. Предполагается, что в процессе проведения операции РИТ оксид удаляется равномерно на всех интервалах на 2,5 мкм, следовательно, характер распределения толщины оксида кремния на образце до травления аналогичен результату после травления (рис. 1).

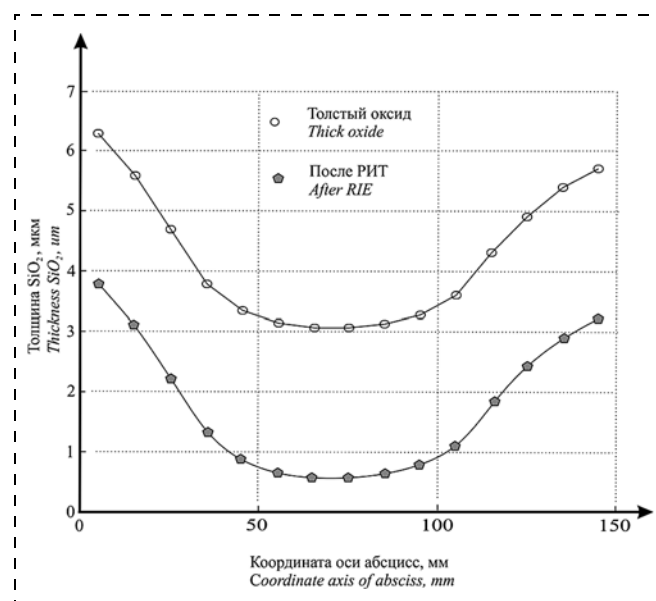


Рис. 1. Распределение толщины оксида кремния на образце
Fig. 1. Distribution of thickness of silicon oxide on the sample

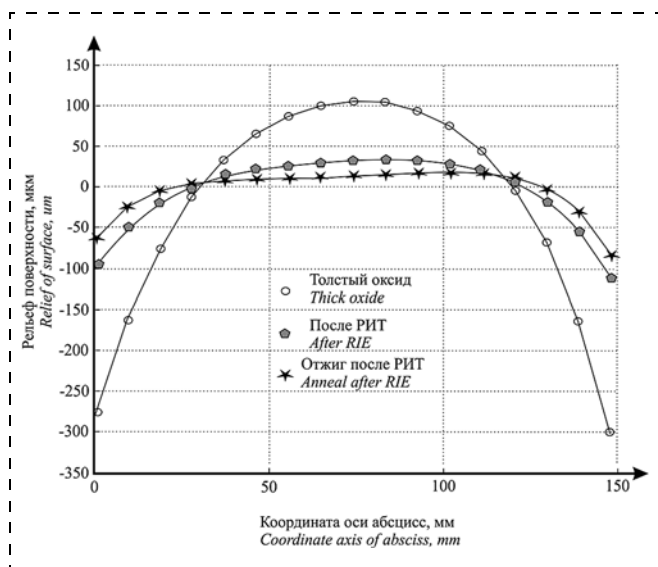


Рис. 2. Результаты измерения рельефа поверхности
Fig. 2. Measurement of the relief of the surface

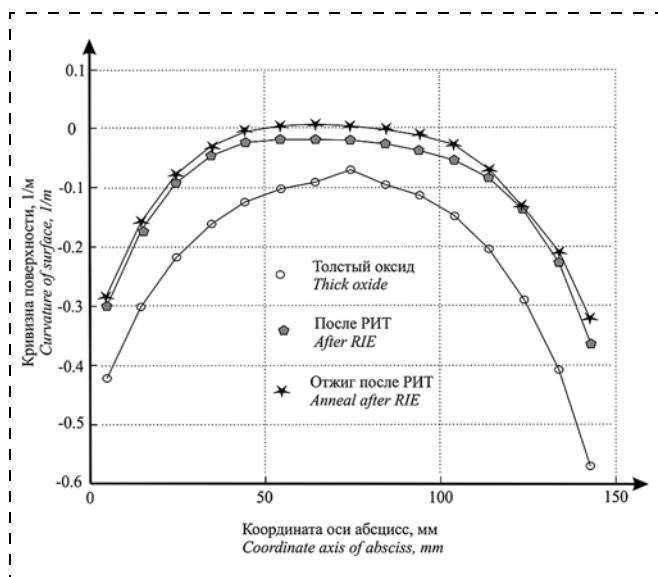


Рис. 3. Распределение кривизны поверхности
Fig. 3. Distribution of a surface curvature

Из рис. 1 можно заключить, что имеется большой разброс толщины пленки на исследуемом образце. Посредством бесконтактного оптического профилометра проведено измерение изгиба пластины по оси, параллельной базовому срезу на лицевой стороне. Затем проведена термообработка пластины в течение 30 мин при температуре 400 °С в атмосфере азота и сделаны повторные измерения рельефа. На рис. 2 представлены результаты измерений.

Из графика рис. 2 видно, что после проведения операции РИТ оксида кремния стрела прогиба уменьшилась на 260 мкм. Также можно заметить,

что операция термообработки уменьшает прогиб образца. Таким образом, после проведения технологических операций прогиб образца уменьшился в 4 раза и составляет 103 мкм.

На рис. 3 показан результат вычисления кривизны поверхности.

Из рис. 3 видно, что поверхность стала более ровной после проведения технологических операций РИТ и отжига.

Расчет механических напряжений в зависимости от толщины диэлектрической пленки на каждом из 15 интервалов представлен на рис. 4. Вычисление механических напряжений в исследуемом образце выполнялись по методу Стони (формула (1)):

$$\sigma_f = \frac{E d_s^2}{6(1-\mu) d_{film}} \cdot \frac{1}{R_{film}}, \quad (1)$$

где σ_f — механические напряжения; E — модуль Юнга материала подложки; d_s — толщина пластины; μ — коэффициент Пуассона подложки; d_{film} — толщина пленки на подложке; R_{film} — радиус кривизны поверхности.

На рис. 4 представлены результаты расчета механических напряжений, где постоянная двухосного модуля ($E/(1-\mu)$) в кристаллографической плоскости образца (100) составляет 180,5 ГПа [5].

Из рис. 4 можно заключить, что распределение механических напряжений изменилось незначительно после операции РИТ и уменьшилась по модулю после проведения термообработки. Среднее значение напряжений по всей измеряемой области изменилось с -518 на -356 МПа.

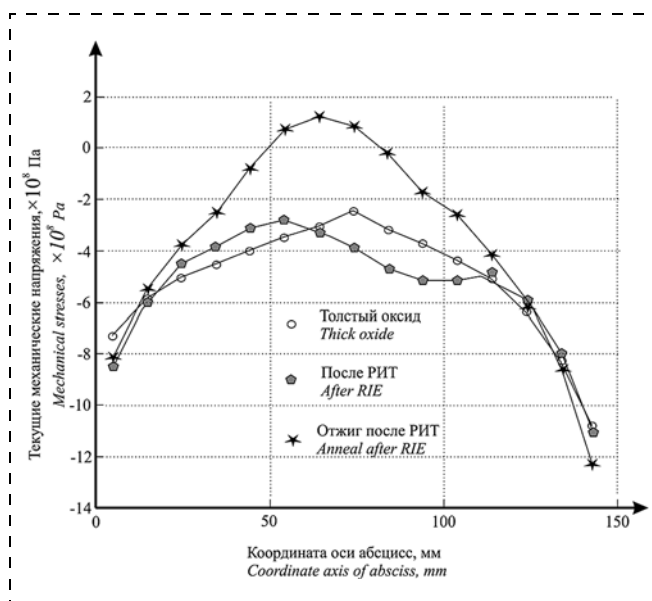


Рис. 4. Результат расчета механических напряжений
Fig. 4. Calculation of the mechanical stresses

Заключение

Проведение технологических операций РИТ и термообработки позволяет изменить поверхность пластины, сделав ее более ровной. Следовательно, увеличивается площадь контактирования между пластинами, что повышает вероятность их успешного срачивания при операции бондинга. В процессе проведения контактной литографии увеличивается площадь соприкосновения между маской и поверхностью пластины, а значит, повышается вероятность формирования элементов с минимальными топологическими размерами. Уменьшение механических напряжений в оксиде кремния уменьшает вероятность растрескивания диэлектрической пленки, что позволяет формировать толстые слои SiO₂ для МЭМС-устройств.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП "МСТ и ЭКБ" при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 14.578.21.0001 (RFMEFI57814X0001).

Список литературы

1. Дюжев Н. А., Королев М. А., Катеев М. В., Гусев Е. Э. Моделирование зависимости выходных характеристик первичного преобразователя датчика потока мембранного типа от его конструктивных параметров // Известия вузов. Электроника. 2015, № 6. С. 644—647.
2. Lindroos V., Tilli M., Lehto A., Motooka T. // Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies, Burlington: Elsevier, 2010. 636 p.
3. 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.
4. 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.
5. Sinha A. K., Levinstein H. J., Smith T. E. Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates // Journal of Applied Physics. 1978, vol. 49, p. 2423—2426.

N. A. Djuzhev, Ph. D., Director, djuzhev@unicm.ru,
M. A. Makhaboroda, Ph. D., Deputy Director, makhaboroda@gmail.com,
E. E. Gusev, Postgraduate Student, Engineer, bubbledouble@mail.ru,
M. V. Kateev, Postgraduate Student, Engineer, kateev@unicm.ru.
National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow 124498

Corresponding autor:

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

Formation of the Plates' Planar Surfaces for Carrying out of the Technological Operations of Contact Lithography and Bonding

Received on July 08, 2016

Accepted on July 28, 2016

The method of measurement of the mechanical stresses by the bending of a plate was approved. The mechanical stresses in PECVD SiO₂ film with a non-uniform thickness on a silicon wafer in a local area were measured. In this work the authors changed the wafer surface, making it planar, for conducting of RIE processes and thermal treatment operations. In this case, the deflection was decreased 4 times. Consequently, for operation of bonding it increased the area of contact between the plates, and, hence, the probability of a successful matching. The process of contact lithography increases the contact area between a mask and a plate and thus the probability of formation of the topological elements with minimal dimensions is also increased. Reduction of the mechanical stresses in the silicon oxide (518 MPa — before the operations, and 356 MPa — after the operations) reduces the likelihood of cracking of a dielectric film, which makes it possible to create thick layers of SiO₂ for MEMS devices.

Keywords: mechanical stresses, surface curvature, deflection, profilometer, ellipsometer, thick films

For citation:

N. A. Djuzhev, M. A. Makhaboroda, E. E. Gusev, M. V. Kateev. 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

Introduction

Technologies of micromechanics or microelectromechanical systems (MEMS) and integrated circuits (IC) develop quickly [1]. The mechanical stresses arise

during manufacturing of IC and MEMS devices on Si plates have a strong impact on their reliability and dynamic characteristics [2].

The existing techniques for determination of the mechanical stresses are based on plate deformation

(profilometry [2]) or connected with measurement of the lattice parameters (x-ray diffractometry, transmission electron microscopy).

The authors developed a technique for measurement of the mechanical stresses by bending of a plate, which is described in detail in [3]. It includes a program realizing the algorithm for the relief analysis for calculation of the curvature radius of the surface in a local area [4]. They are used in Stoney formula for calculation of the mechanical stresses. In the given work the authors test the developed method.

Experiment

The authors investigated a plate of single-crystal silicon (diameter of 150 mm and thickness of 600 μm) with PECVD SiO_2 dielectric film, nonuniform by thickness. The area of measurement was divided into 15 intervals, 10 mm each. As is known, the constant of the biaxial module varies, depending on the crystallographic orientation. Therefore, determination of the relief of the sample was done in the direction, parallel to the base cut on the face side, which made it possible to use in calculations one fixed value of the biaxial module.

Operation of the reactive ion etching (RIE) of silicon oxide was done on the open surface of 2.5 μm . As a result of measurements by means of ellipsometer after etching 15 values of thickness of silicon oxide were received. It was expected, that due to RIE the oxide is removed evenly in all the intervals by 2.5 μm , hence, the character of distribution of thickness of silicon oxide on a sample before the etching was similar to the result after the etching (fig. 1).

From fig. 1 it is possible to conclude, that there is a wide spread of the film thickness on the sample. By means of a contactless optical profilometer a measurement was done of the plate's bend along the axis, parallel to the base cut on the face side. Then the plate was subjected to a heat treatment during 30 min. at 400 $^{\circ}\text{C}$ in the atmosphere of nitrogen, and the repeated measurements were done of the relief. Fig. 2 presents the results of the measurements.

It is visible that after carrying out of operation RIE of silicon oxide the deflection arrow decreased by 260 μm . Also it is possible to see, that heat treatment reduces the size of the arrow of deflection. Thus, after the technological operations, the deflection of the sample decreased 4 times and was equal to 103 μm .

Fig. 3 presents the result of calculation of the surface curvature. It is visible that after the technological operations of RIE and annealing the surface became more even.

Calculation of the mechanical stresses, depending on the thickness of the dielectric film, on each of 15 intervals is presented in fig. 4. The calculation of the me-

chanical stresses in the investigated sample was done by the method of Stoney (formula (1)):

$$\sigma_f = \frac{Ed_s^2}{6(1-\mu)d_{film}} \cdot \frac{1}{R_{film}}, \quad (1)$$

where σ_f — mechanical stresses; E — Young modulus of the substrate material; d_s — thickness of the plate; μ — Poisson's ratio of the substrate; d_{film} — thickness of the film on the substrate; R_{film} — curvature radius of the surface.

Fig. 4 presents the results of calculation of the mechanical stresses, where the constant of the biaxial module ($E/(1-\mu)$) in the crystallographic plane of the sample (100) equals to 180,5 GPa [5].

From fig. 4 it is possible to conclude that, the distribution of the mechanical stresses changed slightly after RIE and decreased by the modulus after the heat treatment. The average value of the stresses in all the measured area changed from -518 to -356 MPa.

Conclusion

RIE technological operations and heat treatment make it possible to change the plate's surface, making it more even. Hence, the contact area between the plates is increased, which raises the probability of their successful merging during bonding. The contact lithography increases the contact area between a mask and the surface of a plate, and that raises the probability of formation of the elements with the minimal topological sizes. Reduction of the mechanical stresses in silicon oxide diminishes the probability of alligating of the dielectric film, which makes it possible to form thick layers of SiO_2 for MEMS devices.

The work was done on the equipment from MST & EKB with support of the Ministry of Education and Science of Russia, agreement № 14.578.21.0001 (RFMEFI57814X0001).

References

1. Djuzhev N. A., Koroljov M. A., Kateev M. V., Gusev E. Je. Modelirovanie zavisimosti vyhodnykh harakteristik pervichnogo preobrazovatelya datchika potoka membrannogo tipa ot ego konstruktivnykh parametrov, *Izvestija Vuzov. Elektronika*, 2015, no. 6, pp. 644—647 (in Russian).
2. Lindroos V., Tilli M., Lehto A., Motooka T. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*. Burlington: Elsevier, 2010, 636 p.
3. Djuzhev N. A., Dedkova A. A., Gusev E. Je., Novak A. V. Metodika izmerenija mehanicheskikh naprjazhenij v tonkih pljontkah na plastine s pomoshh'ju opticheskogo profilometra, *Izvestija Vuzov. Elektronika*, 2016, no. 4, pp. 367—372 (in Russian).
4. Djuzhev N. A., Gusev E. Je., Dedkova A. A., Chinenkov M. Ju. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2016611518. *Programma analiza rel'efa s cel'ju rasscheta velichiny krivizny poverhnosti v vybrannom napravlenii na kremnievoj plastine*, Dejstvuet s 04.02.2016 (in Russian).
5. Sinha A. K., Levinstein H. J., Smith T. E. Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films (SiN , Si_3N_4 , and SiO_2) on Si substrates, *Journal of Applied Physics*, 1978, vol. 49, pp. 2423—2426.