



УДК 53.087.92

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.502.505

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМОГО СРАЩИВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВАКУУМПЛОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЫВОДОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС

APPLYING SILICON WAFER DIRECT BONDING FOR CREATING SEALED CONNECTOR OF MEMS SENSING DEVICES

СУЗДАЛЬЦЕВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

suzdaltsevsky@rambler.ru

SUZDALTSEV SERGEY YU.

suzdaltsevsky@rambler.ru

ОБИЖАЕВ ДЕНИС ЮРЬЕВИЧ

OBIZHAEV DENIS YU.

ИВАНОВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

IVANOV SERGEY YU.

ЖУКОВА СВЕТЛАНА АЛЕКСАНДРОВНА

ZHUKOVA SVETLANA A.

ТУРКОВ ВЛАДИМИР ЕВГЕНЬЕВИЧ

TURKOV VLADIMIR E.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

FSUE "CNIИХМ"

16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487

В настоящем докладе рассмотрены особенности термического отжига поверхностей Si и PECVD SiO₂, позволяющего добиться качественного сращивания пластин кремния. Показано, что после применения подготовительного отжига при 1000 °С и основного отжига при 800 °С пластин со слоями PECVD SiO₂ качество сращивания сравнимо с пластинами после термического окисления.

Ключевые слова: МЭМС; прямое сращивание; PECVD; чувствительный элемент; химико-механическая прецизионная полировка; энергия связи.

The paper considers the features of thermal annealing of Si and PECVD SiO₂ surfaces which allows achieving high-quality direct bonding. Tentative annealing at 1000 °C and basic annealing at 800 °C of plates with PECVD SiO₂ layers lead to high-quality bonding as plates after thermal oxidation.

Keywords: MEMS; direct bonding; PECVD; sensing device; high-precision chemical-mechanical treatment; bond energy.

Современные чувствительные элементы МЭМС, как правило, состоят из нескольких пластин кремния, которые могут соединяться между собой различными способами [1]. Особое место среди способов соединения пластин занимает прямое сращивание. Суть метода состоит в том, что приведенные в плотный контакт пластины кремния (и некоторые его соединения) при нагревании способны срастаться между собой с образованием неразборного соединения [2]. Этот метод не нуждается в каком-либо клеящем агенте и позволяет добиться предельно высокой точности сборки МЭМС. Поскольку кремний обладает низкой пластичностью, то для получения плотного и качественного контакта необходимо, чтобы соединяемые поверхности идеально совпадали по форме и обладали крайне малой шероховатостью ($R_a \leq 0,5$ нм), а это возможно только после прецизионной полировки обеих поверхностей. Пластины кремния успешно и герметично соединяются между собой и через слои SiO₂. Использование такого промежуточного слоя позволяет электрически разделить конструктивные элементы в чувствительных элементах (ЧЭ) МЭМС. Если использовать не один, а два или более слоев диэлектрика, то между этими слоями можно расположить независимые токопроводящие каналы, через которые ЧЭ будет соединяться с внешней электронной системой обработки сигнала. Наиболее простым и технологичным способом

нанесения тонких слоев SiO₂ поверх слоя металла является плазменно-стимулированное осаждение из газовой фазы (PECVD). Целью настоящей работы является разработка технологии формирования плоских герметичных металлических токопроводящих каналов, изолированных слоями PECVD SiO₂, пригодных для качественного сращивания пластин монокристаллического кремния.

Работа выполнялась в два этапа. На первом этапе были отработаны процессы химико-механической прецизионной полировки (ХМП) и термического отжига поверхностей Si и PECVD SiO₂, позволяющие добиться качественного сращивания пластин кремния.

Для достижения цели на первом этапе работы были изготовлены тестовые структуры, состоящие из пары кремниевых пластин. В каждой из пар на одной из пластин нанесены слои SiO₂, а на второй изготовлен рельеф в виде шевронов (рис. 1). Первые слои SiO₂, толщиной $500 \pm 3\%$ нм, были получены методом термического окисления во влажном кислороде на пластинах монокристаллического кремния 100КЭМ 0,1–0,3, 385 нм. Вторые слои SiO₂, толщиной $1000 \pm 3\%$ нм, — методом PECVD в ВЧ-плазме при температуре подложки 280 °С. Относительно простой и технологичный способ PECVD-нанесения тонких слоев SiO₂ приводит к получению пленок диэлектрика, менее совершенных по сравнению с пленками,

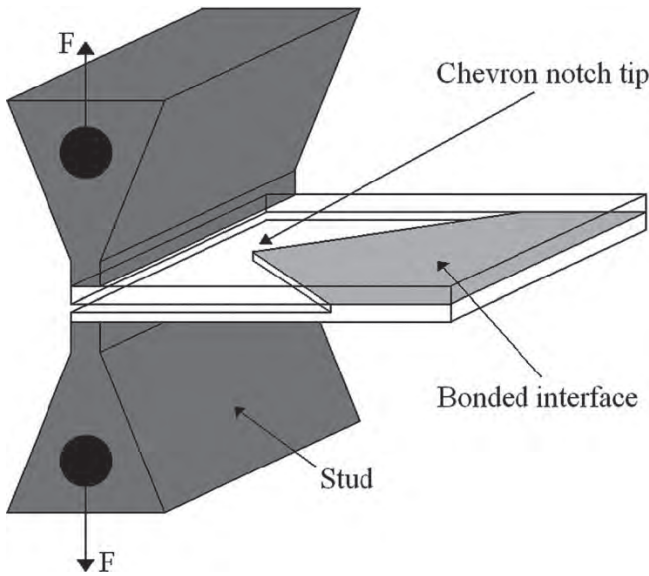


Рис. 1. Схема испытательного устройства, состоящего из сращенных пластин с рельефом «шеvron» и кронштейнов для приложения разрывной нагрузки, приклеенных к пластинам [2]

Fig. 1. The scheme of the test device consisting of the bonded plates with a "chevron" relief and the arms pasted to plates to apply the breaking load [2]

полученными при термическом окислении кремния; такой материал нестехиометричен по составу и обладает избытком групп $-H$ и $-OH$. Поэтому после осаждения слоев PECVD SiO_2 для удаления связанного водорода был проведен отжиг в атмосфере азота при $1000\text{ }^\circ C$ в течение 1 часа. Далее слои SiO_2 подвергались химико-механической прецизионной полировке. Контроль поверхности проводили с помощью AFM JSPM 5400. Попытки сращивания пластин со слоем PECVD SiO_2 без проведения показанного выше подготовительного отжига оказались неудачными. На вторые пластины из каждой пары дополнительные слои не наносили, но проводили ХМП до достижения шероховатости $R_a \leq 0,5\text{ нм}$. Затем с помощью фотолитографии и плазмохимического травления формировался рельеф (рис. 1).

Все подготовленные пластины со слоями SiO_2 и с рельефом тщательно отмывались, а непосредственно перед сращиванием

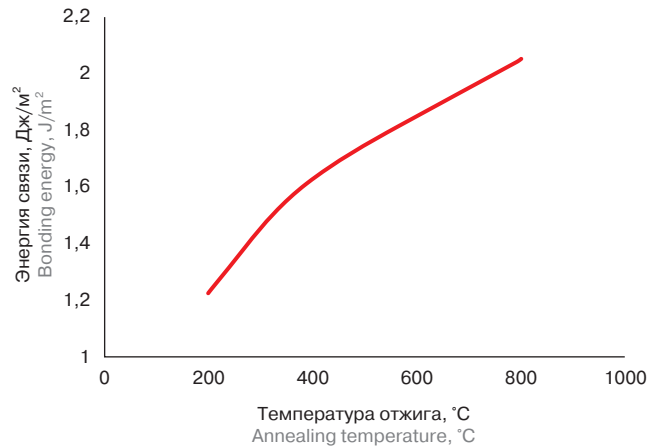


Рис. 2. Влияние температуры отжига пластин кремния со слоями PECVD SiO_2 на значения энергии связи сращенных пластин, рассчитанных по величине разрывных усилий

Fig. 2. Influence of annealing temperature of silicon plates with PECVD SiO_2 layers on values of the bonded plates binding energy

проводилась гидрофильная активация поверхности в кислородной ВЧ-плазме и парах воды [3]. Пластины с рельефом и пластины со слоями SiO_2 попарно соединялись между собой и подвергались предварительному сращиванию. При сращивании на пластины прикладывалась нагрузка 2000 Н в вакууме при остаточном давлении в камере 10^{-2} Па . По окончании процесса проводился контроль площади сращивания с помощью ИК-видеокамеры (рис. 3). Полученные пары пластин подвергались основному отжигу в азоте при атмосферном давлении в течение двух часов при температурах от 200 до $800\text{ }^\circ C$. Форма сращенной области в виде шеврона была выбрана для использования методики [2] расчета энергии связи между пластинами по значениям разрывного усилия склеенных пластин. После разделения пластин на кристаллы были проведены измерения разрывных усилий. Обнаружено, что температура основного отжига двухслойных пластин с PECVD SiO_2 сильно влияет на значения энергии связи. Так, с ростом температуры от 200 до $800\text{ }^\circ C$ энергия связи PECVD SiO_2 возрастает от $1,25$ до $2,05\text{ Дж/м}^2$ (рис. 2) и становится сопоставима с эталонными

The MEMS modern sensitive elements, as a rule, consist of several silicon plates which can be connected in various ways [1]. A specific place among ways of plate's connection is held by direct bonding. The essence of the method consists in that the silicon plates on tight contact and heating are capable to grow together forming non-dismountable dry joint [2]. This method doesn't need any gluing agent and allows achieving precision assembly of MEMS. Silicon has a low plasticity, therefore for tight and high-quality contact it is necessary for connected surfaces to ideally coincide in form and to have extremely small roughness ($R_a \leq 0.5\text{ nm}$), but it is possible only after precision polishing of both surfaces.

Silicon plates successfully and hermetically connect through SiO_2 layers. Using that intermediate layer allows separating electrically structural elements in the sensitive elements (SE) of MEMS. If to use not one, but two or more layers of dielectric films, it is possible to arrange between these layers independent conducting channels via which SE will be connected to the external electronic system of processing a signal. The easiest and technological way of putting thin layers of SiO_2 over a layer of metal is plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD). The purpose of this work is development of technology of the flat sealed metal conducting channels isolated by layers of PECVD SiO_2 suitable for high-quality bonding of silicon wafers.

The work was performed in two stages. At the first stage the processes of chemical and mechanical precision polishing (CMP) and thermal annealing of surfaces of Si and PECVD SiO_2 allowing one to achieve high-quality bonding of silicon wafers have been fulfilled.

For the purpose at the first stage of the work the test structures consisting of couple of silicon wafers have been made. In each of couples onto one of wafers SiO_2 layers are deposited, and on the other the relief in the form of chevrons (Fig. 1) is made. The first layers of SiO_2 , $500 \pm 3\% \text{ nm}$ thick, have been deposited by method of thermal oxidation in damp oxygen of monocrystal silicon wafers 100КЭМ $0.1-0.3, 385\text{ nm}$. The second layers

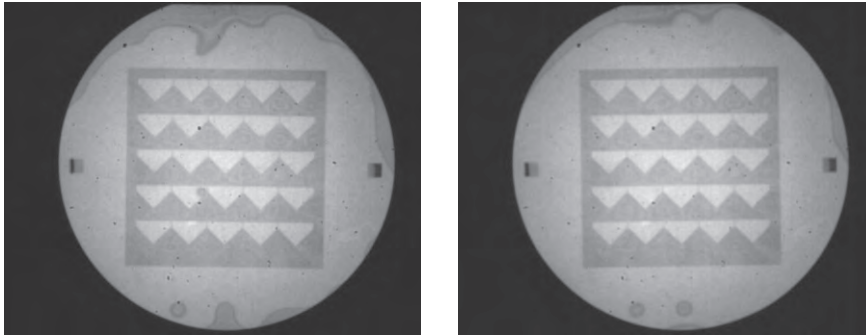


Рис. 3. Пара пластин кремния с PECVD SiO₂ и с рельефом «шеврон» после предварительного срачивания (слева) и после отжига при 800 °С (справа)

Fig. 3. Couple of silicon plates with PECVD SiO₂ and relief “chevron” after preliminary bonding (at the left) and after annealing at 800 °C (on the right)

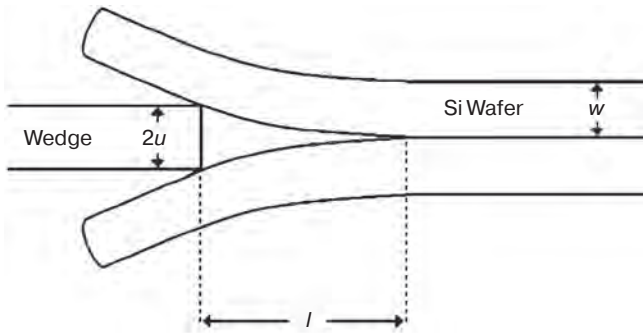


Рис. 4. Схема оценки энергии связи пластин методом клина [3]

Fig. 4. Scheme of assessment of binding plate's energy by the wedge method [3]

пластинами с одним слоем SiO₂, полученным в результате термического окисления, — 2,2 Дж/м².

Причем в результате отжига для всех исследованных пар пластин площадь срачивания увеличивалась (рис. 3).

После этапа предварительного срачивания энергии связи слишком малы для успешного разрезания пары пластин на кристаллы без их расклеивания. Поэтому для оценки энергий связи был использован метод клина (рис. 4) [3]. В качестве клина между предварительно сращенных пластин кремния со слоями SiO₂ вводилось лезвие толщиной 90 мкм. По длине открывшейся щели была оценена энергия связи.

of SiO₂, 1000 ± 3% nm, have been deposited by PECVD in HF plasma at a temperature of substrate 280 °C. PECVD is an easy and technological way of depositing thin layers of SiO₂, but it leads to receiving dielectric films that are less perfect than films received at thermal oxidation of silicon, such material has nonstoichiometry structure and has surplus of groups –H and –OH. Therefore, after deposition of PECVD SiO₂ layers, for removal of the connected hydrogen, annealing in the atmosphere of nitrogen at 1000 °C within 1 hour has been performed. Further layers of SiO₂ were exposed to chemical and

mechanical precision polishing. Control of the surface was made by AFM JSPM 5400. Attempts at wafers bonding with PECVD SiO₂ layer without preparatory annealing were unsuccessful. On the second plates from each couple, additional layers were not put, but CMP was performed to achieve roughness R_a ≤ 0.5 nm. Then, by means of photolithography and plasm photochemical etching, the relief (Fig. 1) was formed.

Just before bonding, all prepared wafers with layers of SiO₂ and with “chevron” relief were carefully washed, and hydrophilic activation of the surface in oxygen HF plasma

Полученные оценочные значения для пластин до их основного отжига находились в диапазоне 0,05–0,1 Дж/м². Причем для термически окисленных пластин энергия предварительной связи была наибольшей, а для PECVD SiO₂ без проведения подготовительного отжига — наименьшей (0,05 Дж/м²). Полученные значения хорошо коррелирует с данными, приведенными на рис. 2, что позволяет рекомендовать метод клина в качестве неразрушающего экспресс-метода оценки качества срачивания слоев SiO₂.

Авторы считают, что в результате выполнения первого этапа данной работе новыми являются следующие результаты:

показана возможность успешного срачивания пластин кремния 100КЭМ 0,1–0,3, 385 нм со слоями PECVD SiO₂, осаждаемых при низких температурах подложки; обнаружено, что после применения подготовительного отжига при 1000 °С и основного отжига при 800 °С пластин со слоями PECVD SiO₂ качество срачивания сравнимо с пластинами после термического окисления; показано, что SiO₂, полученный методом плазменно-стимулированного осаждения из газовой фазы на низкотемпературную подложку, способен заменить SiO₂, который нанесен термическим методом, непригодным при осаждении поверх металлических слоев.

На втором этапе будут совмещены процессы изготовления металлических токопроводящих каналов с процессами ХМП и термического отжига, будет проведена оценка герметичности и электропроводности токопроводящих каналов на тестовой МЭМС-структуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Torunbalci M. M., Alper S. E., Akin T. *Advanced MEMS process for wafer level hermetic encapsulation of MEMS devices using SOI cap wafers with vertical feedthroughs* // J. Microelectromechanical systems. 24 (2015). P. 1–9.
2. Masteika V., Kowal J., Braithwaite N. St. J., Rogers T. *A review of hydrophilic silicon wafer bonding* // ECS Journal of Solid State Science and Technology, 3 (4) (2014). P. Q42–Q54.
3. Ventosa C., Rieutord F., Libralesso L., Morales C., Fournel F., Moriceau H. *Hydrophilic low-temperature direct wafer bonding* // Journal of Applied Physics, 123524 (2008). P. 104.

and vapors of water was carried out [3]. Wafers with a relief and plates with SiO₂ layers were connected pairwise and were exposed to preliminary bonding. On plates the load is 2000 N and residual pressure in the camera is 10⁻² Pa. At the end of the process control of the bonding area by IR video camera (Fig. 3) was carried out. The couples of plates were exposed to the main annealing in nitrogen with an atmospheric pressure within two hours at temperatures from 200 to 800 °C. Bonded area in the form of a chevron has been chosen to be used in the technique [2] calculations of binding energy between plates

by values of breaking load of bonded plates. After dicing plates into crystals, measurements of breaking load have been taken. It has been revealed that temperature of the main annealing of two-layer plates with PECVD SiO₂ strongly influences values of binding energy. So, with growth of temperature from 200 to 800 °C PECVD SiO₂ binding energy increases from 1.25 to 2.05 J/m² (Fig. 2) and becomes comparable to reference plates with one layer of SiO₂ deposited by thermal oxidation — 2.2 J/m².

And, as a result of annealing, for all studied couples of plates, the bonded area has increased (Fig. 3).

After a stage of preliminary bonding, binding energy is too small for successful cutting of the plate's couple on crystals without their breaking. Therefore, to evaluate binding energy, the method of a wedge (Fig. 4) has been used [3]. As a wedge between previously bonded silicon plates with SiO₂ layers the 90 nm blade was entered. Binding energy has been estimated by the length of the opened crack.

The received estimated values, for plates before their main annealing, were in the

range from 0.05 to 0.1 J/m². For thermally oxidized plates the energy of preliminary bonding was greater than for PECVD SiO₂, without carrying out preparatory annealing, the smallest being 0.05 J/m². The received values well correlate with the data provided in Fig. 2 that allows recommending the wedge method as an express nondestructive method of assessing the bonding quality of SiO₂ layers.

The authors consider that as a result of performing the first stage of this work they have got the following novel results:

- the possibility of successful bonding of silicon plates 100КЭМ 0.1–0.3, 385 nm with layers of PECVD SiO₂ deposited at low temperatures of a substrate has been shown;
- after preparatory annealing at 1000 °C and the main annealing at 800 °C of plates with PECVD SiO₂ layers, the quality of bonding is comparable with plates after thermal oxidation;
- it has been shown that SiO₂ received by method of plasma enhanced chemical vapor deposition on a low-temperature substrate is capable to replace SiO₂ which

is put by the thermal method unsuitable for deposition over metal layers.

At the second stage processes of production of metal conducting channels will be combined with processes of CMP and thermal annealing, as well as assessment of tightness and conductivity of conducting channels on test MEMS will be carried out.

REFERENCES

1. Torunbalci M. M., Alper S. E., Akin T. *Advanced MEMS process for wafer level hermetic encapsulation of MEMS devices using SOI cap wafers with vertical feedthroughs* // J. Microelectromechanic systems. 24 (2015). P. 1–9.
2. Masteika V., Kowal J., Braithwaite N. St. J., Rogers T. *A review of hydrophilic silicon wafer bonding*. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 3 (4) (2014), P. Q42–Q54.
3. Ventosa C., Rieutord F., Libralesso L., Morales C., Fournel F., Moriceau H. *Hydrophilic low-temperature direct wafer bonding*. *Journal of Applied Physics*, 123524 (2008), P. 104.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 840 руб.

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

под ред. Д. Эрентраута, Э. Мейсснер, М. Боковски

при поддержке ЗАО «Светлана-Рост»

перевод с англ. под ред. В. П. Чалого, Д. М. Красовицкого

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. — 384 с.
ISBN 978-5-94836-293-9

Полупроводниковые материалы интенсивно изучаются с момента рождения кремниевой технологии более 50 лет назад. Возможность настройки с заданной точностью их физических или химических свойств является ключевым фактором электронной революции, длящейся в нашем обществе уже в течение нескольких десятилетий.

Книга написана командой из 45 специалистов, признанных лидеров науки и промышленности, и подготовлена опытными редакторами. Издание является незаменимым ресурсом для инженеров, исследователей и студентов, работающих в области выращивания кристаллов GaN и занимающихся обработкой и изготовлением приборов на их основе как в сугубо научных, так и в промышленных целях.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru