

## Секция 2. «Взаимодействие плазмы с поверхностью»

# ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ НА МОДИФИКАЦИЮ МОП СТРУКТУР

В.В.Андреев<sup>1)</sup>, Г.Г.Бондаренко<sup>2)</sup>, В.М.Масловский<sup>3)</sup>, А.А.Столяров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>МГТУ им. Н.Э.Баумана, Калужский филиал 248600 г.Калуга, ул. Баженова 4

<sup>2)</sup>МГИЭМ(ТУ) 109028, г. Москва, Б.Трехсвятительский пер., 3/12, E-mail: niipmt@cea.ru.

<sup>3)</sup>Гос. НИИ физических проблем 103460, Москва

Установлено, что плазмоструйная обработка приводит к образованию в объёме плёнки SiO<sub>2</sub> электронных ловушек с сечениями захвата от  $2 \cdot 10^{-17}$  см<sup>2</sup> до  $10^{-16}$  см<sup>2</sup>. Величина отрицательного заряда, накапливаемого на созданные ПСО ловушки при сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния, возрастает с увеличением электрического поля. Показано, что ПСО может значительно снижать плотность и скорость генерации новых электронных ловушек в двуокиси кремния, возникающих при туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов в диэлектрик.

### Введение

Плазменная обработка широко используется в технологии производства современных интегральных схем. Однако до недавнего времени она применялась в основном для травления различных топологических элементов при проведении фотолитографических процессов, а также при формировании металлических и диэлектрических покрытий [1]. В последнее время были получены новые данные, позволившие использовать плазменную обработку для изменения параметров обрабатываемых материалов и структур [2]. Прогресс в этом направлении стал возможен в результате углубления понимания физики процессов, протекающих при взаимодействии плазмы с материалами, и разработки новых видов плазменной обработки, одним из которых является плазмоструйная [3]. Плазмоструйная обработка (ПСО), проводимая при атмосферном давлении, характеризуется большой плотностью потока активных частиц к поверхности, что обеспечивает высокие скорости обработки, позволяя более чем в 100 раз повысить скорость травления кремния и снятия фоторезиста по сравнению с доминирующей в настоящее время высокочастотной плазмохимической обработкой (ПХО).

Настоящая работа посвящена исследованию параметров электронных ловушек, создаваемых ПСО в подзатворном диэлектрике МОП-структур Si-SiO<sub>2</sub>-поликремний, и влиянию этих ловушек на изменение зарядового состояния структуры при инжекции заряда в диэлектрик в сильных электрических полях.

### I. Образцы и методика измерений

В качестве экспериментальных образцов использовались МОП конденсаторы, находящиеся в составе тестовых модулей, впечатанных в рабочие пластины КМОП-ИС. Интегральные схемы формировались на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентации <100> и диаметром 100 мм. Двуокись кремния толщиной 65 нм получали термическим окислением кремния в сухом кислороде при температуре 1000°C с добавлением 3% HCl. В качестве затвора использовалась плёнка поликремния (Si\*) толщиной 0,6 мкм, легированная фосфором до 20 Ом/□. Контакт к затвору и подложке обеспечивался алюминиевой разводкой. Исследования выполнялись на полупроводниковых пластинах, содержащих полно-

стью сформированные ИС, покрытые защитным слоем фоторезиста ФП-383 толщиной 1,2 мкм. Измерения параметров проводились на МОП конденсаторах, находящихся в 3-х тестовых модулях, расположенных по краям и в центре пластины.

При проведении эксперимента на лицевую поверхность пластин, покрытую фоторезистом, воздействовали струей плазмы аргона (10 "импульсов") при мощности 8 кВт. Плотность потока энергии при воздействии ПСО на поверхность составляет порядка  $(1 \div 5) \cdot 10^2$  Вт/см<sup>2</sup>, время воздействия плазмы на поверхность - доли секунд. Интенсивность воздействия регулировалась временем контакта плазмы с поверхностью. Температура импульсного нагрева, плавно нарастая в ходе обработки, изменялась от 180 до 350 °C (см. табл.1). Режимы обработки пластин и параметры, характеризующие изменение зарядового состояния МОП-структуры после обработки приведены в таблице 1. Время воздействия соответствует суммарной длительности десяти импульсов.

Изменение зарядового состояния МОП-структур контролировалось с использованием высокочастотного C-V метода и метода сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния импульсом постоянного тока [4-6]. В течение сильнополевой инжекции измерялось приращение напряжения на МОП-структуре  $\Delta V_i$ , характеризовавшее изменение зарядового состояния МОП-структуры [5].

### II. Экспериментальные результаты и обсуждение

Установлено, что режимы ПСО оказывают существенное влияние на изменение зарядового состояния МОП структур. Так, при температурах нагрева полупроводниковых пластин до 240 °C (табл.1, пластины № 1,2,3) наблюдается значительная деградация зарядовых характеристик МОП-структур, заключающаяся как в накоплении объемного положительного заряда у границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> ( $Q_p$ ), так и увеличении плотности поверхностных состояний ( $N_{ss}$ ) (табл. 1). При температуре 300 °C и выше (пластины № 4,5) зарядовой деградации практически не происходит и значения  $Q_p$  и  $N_{ss}$  остаются близкими к необработанным образцам. Это явление вероятно связано с отжигом полупроводниковых пластин 4

и 5 в процессе ПСО, поскольку отжиг структур с пластин 1,2,3 (табл.1) также приводил к уменьшению значений  $Q_p$  и  $N_{ss}$ .

Таблица 1

| № пл-ны | Время воздействия, с | Температура нагрева Пластины, °C | $Q_p$ , Кл/см <sup>2</sup> | $N_{ss}$ , эВ <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup> |
|---------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|
| 1       | 0,4                  | 180                              | $7,4 \times 10^{-8}$       | $10^{11}$                                    |
| 2       | 0,5                  | 200                              | $9,5 \times 10^{-8}$       | $1,5 \times 10^{11}$                         |
| 3       | 0,6                  | 240                              | $5,8 \times 10^{-8}$       | $10^{11}$                                    |
| 4       | 0,9                  | 300                              | $2 \times 10^{-9}$         | $2 \times 10^{10}$                           |
| 5       | 1,2                  | 350                              | $2 \times 10^{-9}$         | $2 \times 10^{10}$                           |

ПСО приводит к значительному изменению характера зарядовых явлений, протекающих в МОП-структуре в сильных электрических полях. На рис.1 приведены приращения напряжений на необработанной и обработанных ПСО МОП структурах в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния импульсом постоянного тока от величины инжектированного заряда. Изменение  $\Delta V_i$  для необработанной в ПСО структуры (рис.1, кривая 0) хорошо согласуется с литературными данными [6,7] и имеет два характерных участка. При величине инжектированного заряда до 1 мКл/см<sup>2</sup>, доминирующим является накопление положительного заряда в пленке диэлектрика у границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>, чему соответствуют отрицательные приращения  $\Delta V_i$  [7]. При инжекции заряда больше 1 мКл/см<sup>2</sup> накопление положительного заряда близко к насыщению и начинает оказывать существенное влияние захват электронов на исходные и вновь созданные электронные ловушки [7], в результате  $\Delta V_i$  на этом участке имеет положительные приращения. Изменение  $\Delta V_i$  на обработанных ПСО МОП структурах (рис.1, кривые 1,2,3,4,5) имеет ряд принципиальных отличий. При инжекции заряда до 1 мКл/см<sup>2</sup> на всех пяти образцах, обработанных ПСО, основным процессом, характеризующим изменение зарядового состояния является захват электронов на электронные ловушки, созданные ПСО и  $\Delta V_i$  имеет положительные приращения. Образование электронных ловушек при ПСО хорошо согласуется с предыдущими исследованиями [3]. Плотность электронных ловушек на этом участке незначительно убывала с ростом температуры ПСО, что могло быть связано с отжигом части ловушек при обработке. При инжекции заряда больше 1 мКл/см<sup>2</sup> вид  $\Delta V_i$  зависимость сильно зависел от режима ПСО. На пластинах 1-4, так же как и на необработанном образце, наблюдалась генерация вновь создаваемых электронных ловушек, в то время как на пластине 5 она практически отсутствовала. Из рис.1 видно, что плотность и скорость генерации новых электронных ловушек сильно зависела от температуры нагрева пластины при ПСО, уменьшаясь по мере её увеличения. Плотность и скорость генерации новых электронных ловушек, характерная для необработанных образцов (рис.1, кривая 0),

приблизительно соответствовала пластине № 3 (рис.1, кривая 3).

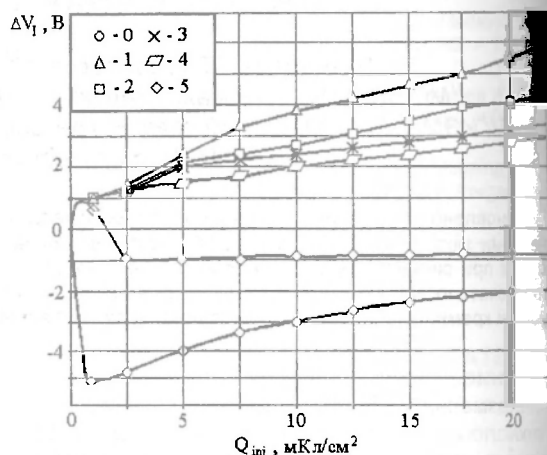


Рис.1. Изменение напряжения на необработанной (0) и обработанных ПСО (1,2,3,4,5) МОП-структурах в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов из Si импульсом постоянного тока  $j = 6,25 \cdot 10^{-5}$  Кл/см<sup>2</sup> от величины инжектированного заряда. Номер кривой (1,2,3,4,5) соответствует номеру исследуемой пластины (табл.1).

Сечение захвата электронных ловушек, обработанных ПСО, рассчитанные из зависимостей, изображенных на рис.1, лежали в диапазоне  $2 \cdot 10^{-11} \div 10^{-10}$  см<sup>2</sup>. В соответствии с литературными данными [6,7] электронные ловушки с такими сечениями захвата связываются с присутствием водорода в пленке SiO<sub>2</sub>. По-видимому, электроны, инжектируемые из кремния, в сильных электрических полях индуцируют реакцию, в результате которой дефекты, представляющие из себя водородные комплексы, изменяют свое зарядовое состояние. Увеличение концентрации водородных комплексов в результате ПСО представляется вполне вероятным, причем источником водорода может служить не только атмосфера плазменного разряда, но и слои, окружающие подзатворный диэлектрик и насыщенные водородом. Насыщение водородом подзатворного диэлектрика МОП-структур при ПХО отмечалось в работе [2], однако концентрации гидроксильных групп в этом случае были значительно ниже, чем при ПСО. Более высокая плотность электронных ловушек при ПСО, вероятно, связана с большим наводораживанием диэлектрической пленки, вследствие высокой плотности потока активных частиц характерных для этой обработки.

Приращение напряжения на обработанных ПСО МОП структурах в процессе туннельной инжекции электронов из Si имело сильную полевую зависимость, увеличиваясь с возрастанием электрического поля. Полевая зависимость величины отрицательного заряда, накапливаемого в структурах, обработанных ПСО, при сильнополевой инжекции электронов может быть связана с возрастанием при увеличении электрического поля концентрации электронов, разогретых выше пороговой энергии, необходимой для разрыва водородных комплексов.

Таким образом, после ПСО основным механизмом изменения зарядового состояния МОП-структуры в сильных электрических полях становится захват электронов на созданные ПСО ловушки, а не генерация положительного заряда, как для необработанных образцов. В результате удаётся повысить напряжение электрического пробоя МОП-структуры при одновременном значительном снижении вероятности пробоя. Поскольку положительный заряд при развитии процесса пробоя всегда обуславливает возникновение положительной обратной связи [6,7], то его нейтрализация позволяет значительно снизить вероятность пробоя структур. Другим важным аспектом в применении ПСО является возможность при определённых режимах обработки уменьшить плотность и скорость генерации новых электронных ловушек в плёнке  $\text{SiO}_2$ , образующихся при инжекции электронов в сильных электрических полях. Это позволяет значительно повысить зарядовую стабильность структуры и увеличить такой важный параметр, как величина заряда, которую можно инжектировать в диэлектрик до пробоя образца [6,7].

#### Выводы

Установлено, что ПСО приводит к образованию в объеме  $\text{SiO}_2$  электронных ловушек, плотность которых незначительно убывает с ростом температуры обработки. Образующиеся при ПСО ловушки имели сечение захвата от  $2 \cdot 10^{-17}$  до  $10^{-16}$  см<sup>2</sup>. В обработанных МОП-структурах доминирующим процессом изменения зарядового состояния при туннельной инжекции электронов из кремния в сильных электрических полях является захват электронов на созданные ПСО ловушки. Величина отрицательного заряда накапливаемого на созданные ПСО электронные ловушки имеет по-

левую зависимость, возрастающая с увеличением электрического поля. Показано, что при определенных режимах ПСО может значительно снижаться плотность и скорость генерации новых электронных ловушек в двуокиси кремния, возникающих при инжекции электронов в диэлектрик в сильных электрических полях.

#### Список литературы

1. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н.Айнспрука, Д.Брауна. - М.: Мир, 1987. 469 с.
2. Назаров А.Н., Лысенко В.С. ВЧ плазменная обработка как метод радиационно-термического наводораживания микронизированных кремниевых структур // Микроэлектроника. 1994. Т.23. № 4. С.45-65.
3. Maslovsky V.M., Pavlov G.Ya. Effect of electronic arc plasma jet treatment on MOS-structure reliability // Proceedings of MRS Symp. 1995. V.391. P.139-143.
4. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции // Микроэлектроника. -1997. - № 6. - С.640-646.
5. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Loskutov S.A., Stolyarov A.A. The method of the MIS structure interface analysis // Surface and Interface Analysis. 1999. V. 28. P.142-145.
6. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки // Микроэлектроника. 2000. Т.29. № 2. С.105-112.
7. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide // Phys. Rev. B. 1994. Vol.49. № 15. P.10278-10297.

## THE EFFECT OF ARC PLASMA JET TREATMENT UPON MOS STRUCTURE MODIFICATION

V.V.Andreev<sup>1)</sup>, G.G.Bondarenko<sup>2)</sup>, V.M.Maslovsky<sup>3)</sup>, A.A.Stolyarov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Bazhenov St. 4, Kaluga, 248600, Russia

<sup>2)</sup>Moscow Institute of Electronics and Mathematics, B. Trekhsvyatitsky St. 3/12, Moscow, 109028, Russia, E-mail:niipmt@cea.ru

<sup>3)</sup>Zelenograd Research Institute of Physical Problems. Moscow, 103460, Russia, FAX (095) 531-4654.

In this work the effect of arc plasma jet treatment (APJT) upon the electric parameters of Si-SiO<sub>2</sub>-polysilicon MOS structure has been investigated. The Ar-air plasma flow was formed by multiple jet electric arc generator at atmospheric pressure. Besides this there was also provided the investigation of radiation spectra in 350-1100 nm range in radial direction of Ar plasma flow near the wafer surface. The investigation of electric parameter modification of MOS structure by APJT has been carried out by the controlled current stress technique. The technique is based on a controlled current stress application to sample and time-dependant voltage measurements on the structure. Energy flow density under stressing the APJT on a surface was in order of (1...5) 10<sup>2</sup> W/nm<sup>2</sup> at a fraction of seconds of the stress time and 8 kW of argon plasma jet power. The stress intensity and the wafer pulse heating temperature were adjusted by the plasma-surface contact time. It is shown that under the Fowler-Nordheim electron injection from silicon the amount of accumulating negative charge has got the field-effect dependence, growing with the increase of electric field. The electron traps created by plasma jet treatment have got the capture cross-section from 2·10<sup>-17</sup> cm<sup>2</sup> to 10<sup>-16</sup> cm<sup>2</sup> which let to identify them as hydroxyl groups in the SiO<sub>2</sub> film. It is found that with the wafer pulse heating temperature ramp under plasma jet treatment, the decrease of the density of electron traps created in SiO<sub>2</sub> occurs. This phenomenon seems to be connected with the annealing of some of electron traps and can be used to control their density. These results were attributed to a structural modification of SiO<sub>2</sub> and its interfaces as a result of APJT.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 01-02-96012) и проекта программы Минобразования РФ 202.01.