

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ФОСФОРА И ДАВЛЕНИЯ ПАРА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА СТЕПЕНЬ ОПЛАВЛЕНИЯ ФОСФОРСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

<sup>1</sup>Черкесова Н.В.\*, <sup>1</sup>Мустафаев Г.А., <sup>2</sup>Мустафаев А.Г.

<sup>1</sup>*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*

<sup>2</sup>*Дагестанский государственный университет народного хозяйства*

\*natasha07\_2002@mail.ru

*Проведена оценка влияния концентрации фосфора, температуры и давления пара на степень оплавления фосфоросиликатного стекла. Показано, что скорость оплавления растет с повышением температуры и увеличением концентрации фосфора, а длительность и скорость оплавления зависят от газовой среды, в которой проводится оплавление. Показано, что эффективность оплавления уменьшается в ряду: пирогенный пар, влажный O<sub>2</sub>, сухой O<sub>2</sub>, сухой N<sub>2</sub>. Показано, что одним из путей решения проблем понижения температуры технологических процессов является проведение процесса оплавления при повышенном давлении газовой среды.*

**Ключевые слова:** планаризация, межслойная изоляция, скорость оплавления, концентрации, адсорбция, поликремний, стекло, диффузия, нитрид кремния, давления газовой среды.

## THE EFFECT OF PHOSPHORUS CONCENTRATION AND GAS MEDIUM VAPOR PRESSURE ON THE MELTING DEGREE OF PHOSPHOROSILICATE GLASS

<sup>1</sup>Cherkesova N.V., <sup>1</sup>Mustafaev G.A., <sup>2</sup>Mustafaev A.G.

<sup>1</sup>*Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov*

<sup>2</sup>*Dagestan State University of National Economy*

*The effect of phosphorus content, temperature, and vapor pressure on the melting temperature of phosphorosilicate glass was investigated. It is demonstrated that the melting rate increases with increasing temperature and phosphorus concentration, and that the length and speed of melting are affected by the gas medium in which the melting occurs. The reflow efficiency declines in the following order: pyrogenic steam, wet O<sub>2</sub>, dry O<sub>2</sub>, dry N<sub>2</sub>. It is demonstrated that one method for addressing the problem of lowering the temperature of technological processes is to conduct the melting process at elevated gas medium pressure.*

**Keywords:** planarization, interlayer insulation, melting rate, concentrations, adsorption, polysilicon, glass, diffusion, silicon nitride, gas medium pressure.

### Введение

Тенденция увеличения степени интеграции ИС в направлении создания ультрабольших ИС (УБИС) характеризуется топологической нормой 6–25 нм, таких как динамические и статические ОЗУ и связана с разработкой новых технологических методов их изготовления и соответствующих материалов [1–4]. Достигнута однородность пленок по толщине  $\pm 1,5$  % на пластине диаметром 150 мм и ее воспроизводимость  $\pm 1,1$  % в партии пластин. Уровень легирования полученных пленок позволяет проводить их повторное расплавление, в результате которого осуществляется планаризация конформным диэлектрическим слоем.

### Результаты и обсуждение

Фосфоросиликатные стекла (ФСС) широко применяются для межслойной изоляции, пассивации полупроводниковых приборов, геттерирования щелочных ионов, улучшения механической прочности пленок. Для планаризации слоя ФСС, повышающей надежность межслойной изоляции, проводят оплавление ФСС при высокой температуре. Как известно [5, 6], длительность и скорость оплавления зависят от газовой среды, в которой проводится оплавление. Повышение концентрации фосфора в ФСС

приводит к нежелательным последствиям: разрушению металлизации из-за образования фосфорной кислоты при реакции  $P_2O_5 \cdot H_2O$ , сильному смещению порогового напряжения МДП-приборов. Типичная температура оплавления составляет  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  и ее повышение приводит к нежелательной диффузии легирующей примеси. Повышение степени интеграции ИС требует понижения температуры технологических процессов [1, 2]. Одним из путей решения проблем является проведение процесса оплавления при повышенном давлении газовой среды.

Степень оплавления ФСС оценивалась на структурах, состоящих из островков поликремния толщиной  $0,18\text{ }\mu\text{m}$  и шириной  $1\text{ }\mu\text{m}$  с расстоянием между островками  $1\text{ }\mu\text{m}$ . Слой поликремния осаждался на кремниевые пластины со слоем термического окисла толщиной  $35\text{ nm}$ . Островки с вертикальными боковыми стенками формировались с помощью реактивного ионного травления. Затем наносился слой нитрида кремния толщиной  $100\text{ nm}$ , защищающий островки поликремния и кремниевую пластину от газовой среды при оплавлении.

Слои ФСС толщиной  $1,0\text{ }\mu\text{m}$  наносились методом ПФХО из газовой смеси  $SiH_4$ ,  $PH_3$ ,  $O_2$  и  $N_2$  при температуре  $430\text{ }^\circ\text{C}$ . Изменяя отношение  $SiH_4/PH_3$ , формировали ФСС - слои с разной концентрацией фосфора. Концентрацию фосфора определяли абсорбциометрическим методом по глубокой линии молибдена. Оплавление проводили при высоком давлении. Оплавление ФСС проводилось в пирогенном паре, во влажном  $O_2$ , сухом  $O_2$  или сухом  $N_2$  при давлении  $1 \times 10^5 - 1 \times 10^6\text{ Pa}$  и температурах  $800-1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Степень планаризации оплавления определялась измерением угла между плоской и скошенной частями поверхности слоя ФСС на поликремниевых областях с применением растрового электронного микроскопа. После осаждения ФСС угол был равен  $80^\circ$ . В процессе оплавления угол уменьшался и становился равным  $0^\circ$  при достижении полной планарности слоя ФСС. Характеристики ФСС-слоя после воздействия отжига определялись методом ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье.

Для изучения влияния газовой среды оплавление ФСС-слоев, содержащих фосфор с концентрацией  $8,0\text{ вес. \%}$ , проводили при температуре  $900\text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $90\text{ min}$ , атмосферном давлении в средах сухого  $N_2$ , сухого  $O_2$ , влажного  $O_2$ , пирогенного пара (при мольном отношении  $H_2/O_2$ , равном  $1,9$ ). Наибольшее оплавление наблюдалось в среде пирогенного пара или увлажненного  $O_2$ .

Зависимости скорости оплавления от температуры в диапазоне температур  $800-1000\text{ }^\circ\text{C}$  приведены на рис. 1. Из этого рисунка видно, что скорость оплавления растет с увеличением температуры. Эффективность оплавления уменьшается в ряду: пирогенный пар, влажный  $O_2$ , сухой  $O_2$ , сухой  $N_2$ . Различия в скоростях оплавления в пирогенном паре и во влажном  $O_2$  может быть вызвано разными парциальными давлениями кислорода (соответственно  $1 \times 10^5\text{ Pa}$  и  $6 \times 10^5\text{ Pa}$ ). Таким образом пирогенная газовая среда более всего подходит для уменьшения температуры и времени оплавления ФСС.

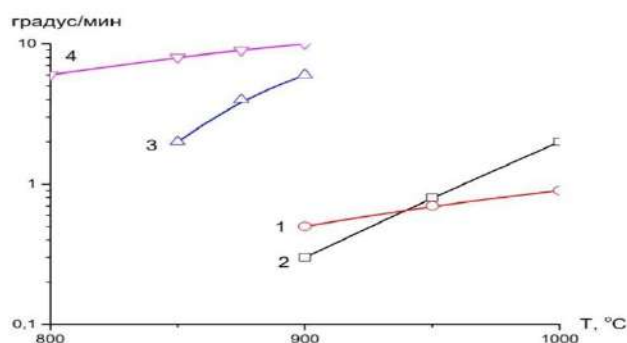


Рис. 1. Зависимость скорости оплавления от температуры в диапазоне температур  $800-1000\text{ }^\circ\text{C}$ :  
1 – отжиг в сухом  $N_2$ , 2 – отжиг в сухом  $O_2$ , 3 – отжиг во влажном  $O_2$ , 4 – отжиг в пирогенном паре.

Результаты исследования зависимости угла оплавления от давления для ФСС-слоев с концентрацией фосфора  $8,0\text{ вес. \%}$ , отожженных при температуре  $900\text{ }^\circ\text{C}$  в пирогенном паре, приведены на рис. 2. Время отжига составляло  $90\text{ min}$ , при этом время выдержки при максимальном давлении равнялось  $30\text{ min}$ . Величина угла оплавления от давления для ФСС-слоев с концентрацией фосфора  $8,0\text{ вес. \%}$ , отожженных при  $900\text{ }^\circ\text{C}$  практически не зависела от давления сухого  $N_2$  и сухого  $O_2$ . При отжиге в пирогенном паре, угол значительно уменьшался с ростом давления. Ускорение оплавления ФСС в пирогенном паре с повышением давления связано с диффузией  $H_2O$  в слой ФСС и реакцией между  $H_2O$  (или  $OH$ -) и  $SiO_2$  с разрушением связи  $Si-O$  и уменьшением вязкости стекла, с ростом давления газовой среды становится более интенсивной диффузия в слое ФСС.

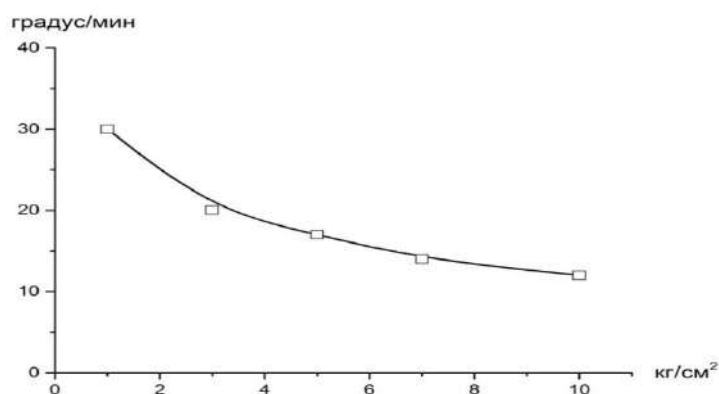


Рис. 2. Зависимость угла оплавления  $\theta$  от давления для ФСС-слоев с концентрацией фосфора 8,0 вес. %, отожженных при 900 °С в пирогенном паре

На рис. 3 приведены результаты измерения зависимости угла от давления пара при разной концентрации фосфора в ФСС. Видно, что при одной и той же степени оплавления ФСС, можно понизить температуру процесса на 90 °С при увеличении парциального давления с  $1 \times 10^5$  Па до  $1 \times 10^6$  Па. Степень увеличения планарности слоя ФСС с ростом концентрации фосфора не зависит от давления пара. При парциальном давлении  $1 \times 10^6$  Па концентрацию фосфора в ФСС можно уменьшить до 2 вес. % без ухудшения планарности слоя ФСС.

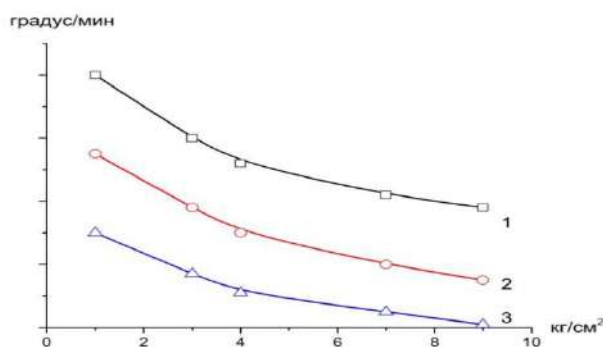


Рис. 3. Зависимости угла оплавления от давления пара при разной концентрации фосфора в ФСС: 1 – 8,0 вес. %, 2 – 8,5 вес. %, 3 – 10,0 вес. %

Структура ФСС-слоев, после осаждения и отжига при высоком давлении пара и отжига при атмосферном и повышенном давлениях сухого  $O_2$  анализировались методом ИК- спектроскопии. Спектр ФСС-слоев, отожженных при высоком давлении  $O_2$  почти не отличается от спектра слоев – отожженных при атмосферном давлении  $O_2$ . Линия  $1095\text{ см}^{-1}$ , соответствующая связи Si-O, сдвигается в сторону уменьшения, а линия  $805\text{ см}^{-1}$  также соответствующая Si-O-связи в сторону увеличения волновых чисел, если оплавление проводится при высоком давлении пара. Это свидетельствует о том, что структура ФСС-слоя, отожженного при высоком давлении пара, отличается от исходной структуры и структуры слоя ФСС, оплавленного в сухом  $O_2$ .

Известно, что влага диффундирует в слое ФСС в виде ионов  $OH^-$  в связи с этим изменяется структура слоя и снижается содержание фосфора. Если отжиг проводится при атмосферном давлении пара, стекло становится менее вязким, а образующиеся в структуре поры облегчают испарение  $P_2O_5$ . Поэтому, с увеличением давления пара увеличивается количество  $H_2O$  в слое ФСС, ускоряется оплавление стекла и уменьшается концентрация фосфора. Появление пинии  $3400\text{ см}^{-1}$ , соответствующее связи Si-O в спектре ФСС-слоев, отожженных в сухом  $O_2$  вызвано абсорбцией (или адсорбцией)  $H_2O$  слоем ФСС во время осаждения, отжига или в процессе измерений. Все образцы перед анализом выдерживались при температуре 25 °С и в среде, с влажностью 60 % в течение 24 часа. Линия  $3400\text{ см}^{-1}$  не обнаруживалась в слое ФСС, отожженном при высоком давлении пара (возможно, из-за испарения  $P_2O_5$  из слоя ФСС в процессе отжига). Меньшая абсорбция  $H_2O$  снижает коррозию алюминиевой металлизации, что делает процесс оплавления ФСС при повышенном давлении пара подходящим для изготовления полупроводниковых приборов.

Процесс оплавления ФСС слоя при давлении пара  $1 \times 10^6$  Па в течение 30 мин был успешно применен в работе при изготовлении СБИС, содержащей МОП-приборы. Слой ФСС толщиной 1 мкм нанесен методом ПФХО при атмосферном давлении и содержал 8 вес. % фосфора. Слой металлизации осаждался на планаризованную в результате оплавления поверхность ФСС [7].

### **Выводы**

Показано, что одним из путей решения проблем понижения температуры технологических процессов является проведение процесса оплавления при повышенном давлении газовой среды. Эффективность оплавления уменьшается в ряду: пироженный пар, влажный  $O_2$ , сухой  $O_2$ , сухой  $N_2$ . Различия в скоростях оплавления в пироженном паре и во влажном  $O_2$  может быть вызвано разными парциальными давлениями кислорода. Ускорение оплавления ФСС в пироженном паре, с повышением давления, связано с диффузией  $H_2O$  в слой ФСС и реакцией между  $H_2O$  (или  $-OH$ ) и  $SiO_2$  с разрушением связи  $Si-O$  и уменьшением вязкости стекла, т.к. с ростом давления газовой среды становится более интенсивной диффузия в слое ФСС. С увеличением давления пара увеличивается количество  $H_2O$  в слое ФСС, ускоряется оплавление стекла и уменьшается концентрация фосфора, что делает процесс оплавления ФСС при повышенном давлении пара подходящим для изготовления полупроводниковых приборов.

### **Библиография**

1. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В. Трехмерные интегральные схемы: учебное пособие. Нальчик: КБГУ, 2016. 89 с.
2. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 799 с.
3. Зятков И.И., Кривошеева А.Н. Базовые процессы планарной технологии: электрон. учеб. пособие. СПб.: «ЛЭТИ», 2018. 1 эл.-опт. диск (CD-ROM).
4. Громов Д.В., Краснюк А.А. Материаловедение для микро- и нанoeлектроники: учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. 156 с.
5. Пирс К. Технология СБИС: в 2 кн. / пер. с англ. В.М. Звероловлева. М.: Мир, 1986. 404 с.
6. Могэб К. Технология СБИС: в 2 кн. / пер. с англ. В.Н. Лейкина. М.: Мир, 1986. 453 с.
7. Mustafaev G.A., Mustafaev A.G., Cherkesova. N.V. Thin Layers of Oxide Coating in Very-Large-Scale Integration // AER-Advances in Engineering Research. 2018. V. 177. P. 377–379.