

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БОРОФОСФОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Thermal processing of borophosphosilicate glasses has been studied in the relief-planarization process of integrated circuits and the optimum parameters of this process have been determined.

Развитие технологии производства СВИС связано с переходом от двухмерного расположения интегральных схем (ИС) к многослойным структурам. Поэтому проблема планаризации топологического рельефа становится все более важной и особенно остро стоит при производстве МОП-СВИС, отличающихся развитым топологическим рельефом на стадии формирования межуровневой изоляции.

Одна из первых попыток применения борфосфосиликатного стекла (БФСС) в качестве планаризирующего межуровневого диэлектрика была предпринята Керном [1]. В настоящее время БФСС приобрело промышленное значение как материал межуровневой изоляции МОП-СВИС.

Существует несколько способов решения данной проблемы, однако, как отмечалось в [2], наиболее распространенным и дешевым является оплавление силикатных стекол. Данный метод включает два этапа: формирование на поверхности структуры ИМС слоя легированного стекла и термическую обработку осажденного слоя. Процесс осаждения БФСС при атмосферном и пониженном давлениях рассматривался нами в [3, 4]. При термической обработке происходит размягчение стекла и планаризация рельефа поверхности. Основными параметрами процесса термической обработки (оплавления) стекла являются температура и время проведения процесса. Поэтому более детальное исследование данного процесса представляет как научный, так и практический интерес.

Экспериментальная часть

Слои БФСС осаждались в реакторе атмосферного давления вертикального типа с холодной стенкой и с резистивным нагревом по режимам, указанным в [3]. В качестве подложки использованы пластины монокристаллического кремния диаметром 100 мм со сформированным топологическим рельефом из поликристаллического кремния. Высота ступенек поликристаллического кремния составляла 0,33—0,37 мкм, что наиболее часто наблюдается в реальных структурах ИМС.

Зависимость тангенциального угла оплавления α
БФСС от концентрации бора (C_B)
и фосфора (C_P) (температура отжига 850° С,
время термообработки 45 мин)

C_B	C_P	$C_B + C_P$	α (град.)
5,91	3,4	9,31	13
6,58	2,31	8,89	14
6,75	2,12	8,87	18
6,24	2,6	8,84	20
5,57	2,8	8,55	20
6,01	2,77	8,78	30
6,17	2,12	8,29	31
5,47	2,77	8,24	26
5,29	2,72	8,01	22
5,08	2,66	7,74	43
5,60	1,75	7,35	44
5,52	1,95	7,47	45
8,2	—	8,2	57
5,72	—	5,72	60
5,65	—	5,65	64
3,4	—	3,4	80

Оценка качества планаризации проводилась по микрофотографиям поперечных слоев структур, полученным на растровом электронном

микроскопе (РЭМ). На микрофотографиях замерялся тангенциальный угол оплавления α [5], угол между горизонталью и касательной к профилю диэлектрика в поперечном сечении. Концентрация бора, фосфора и коэффициент преломления определялись по методике, изложенной в [3]. Механические напряжения в пленках и их плотность определялись рентгенодифракционными методами. Термическая обработка проводилась в промышленной диффузионной печи при атмосферном давлении. Толщина пленок составляла 0,8 мкм.

В таблице приводятся зависимости значения тангенциального угла α от состава стекла после оплавления в атмосфере сухого кислорода в течение 45 мин при стандартной температуре оплавления для силикатных стекол 850° С. Из анализа таблицы следует, что содержание бора и фосфора оказывает влияние на текучесть стекла. Чем выше суммарное содержание данных компонентов в стекле, тем меньше угол планаризации α . Отдельные отклонения от этой зависимости можно объяснить отклонением локальной концентрации легирующей примеси.

В процессе проведения эксперимента установлено, что свежесоздаваемые пленки БСС и БФСС с содержанием бора свыше 5,8 % вес. обладают низкой химической стойкостью и интенсивно адсорбируют влагу из атмосферы, что приводит к высокой дефектности данных пленок. Поэтому оптимальным составом для БФСС является концентрация бора в пределах 5,3—5,7 % вес., а фосфора 2,8—3,0 % вес. Данный состав гарантирует низкую дефектность БФСС и удовлетворительную планаризацию поверхности, так как известно, что металл наносится на поверхность прибора в ИС без разрывов, если величина α не превышает 35°. Отметим, что свежесоздаваемые пленки БФСС, полученные при температуре 325° С при атмосферном давлении без последующего оплавления, имеют α порядка 95° С. При проведении термической обработки происходит уменьшение α с увеличением времени термообработки. Скорость уменьшения α зависит от температуры отжига и спустя некоторое время выходит на стационарное значение.

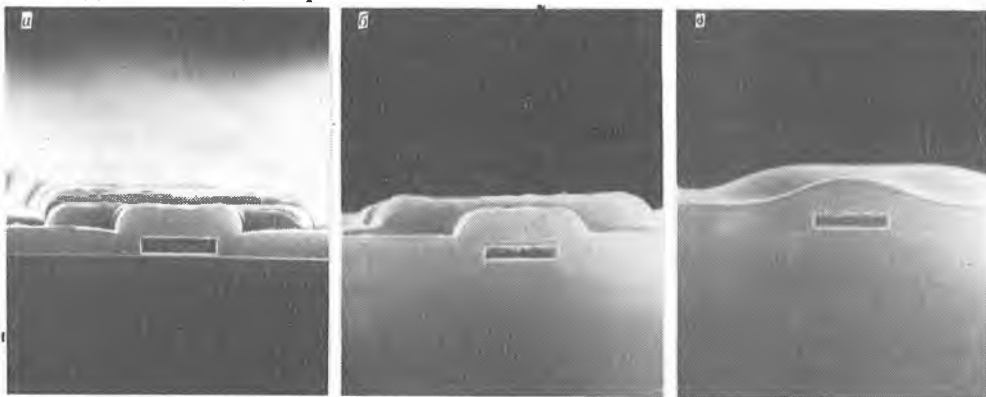


Рис. 1. Микрофотографии поперечных сколов структур с различным временем оплавления:

а — без оплавления; б — t оплавления 5 мин; в — t оплавления 40 мин

На рис. 1 приведены микрофотографии поперечных сколов структур с различным временем оплавления: 0, 5, 40 мин соответственно в атмосфере сухого кислорода при температуре 850° С. Содержание бора в стекле составляло 5,7 % вес., фосфора 2,9 % вес.

На рис. 2 представлена зависимость α для стекол различного состава от времени термообработки для температур оплавления 850° С и 1100° С в атмосфере сухого кислорода. Очевидно, что в процессе оплавления БФСС происходит уменьшение угла α с течением времени. При этом скорость оплавления и выход значения α на стационарное значение, а также окончательная величина α зависят как от концентрации легирующих примесей бора и фосфора, что подтверждается данными таблицы, так и от температуры обработки. Увеличение температуры оплавления с 850°С до 1100°С при неизменных концентрациях бора и фосфора

приводит к сокращению времени оплавления с 40±45 мин до 10±15 мин. Дальнейшее увеличение времени оплавления существенного влияния на значение α не оказывает.

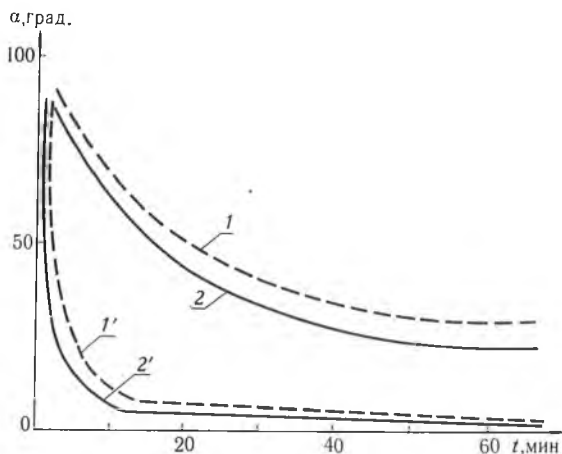


Рис. 2. Зависимость угла планаризации α от времени отжига БФСС в атмосфере сухого кислорода при различных температурах и концентрациях бора (C_B) и фосфора (C_P):

1	-	$C_B = 5,0 \%$	$C_P = 1,73 \%$	$t^* = 850^\circ\text{C}$
1'	-	"	"	$t^* = 1100^\circ\text{C}$
2	-	$C_B = 6,75 \%$	$C_P = 2,12 \%$	$t^* = 850^\circ\text{C}$
2'	-	"	"	$t^* = 1100^\circ\text{C}$

Исходя из рис. 2 можно сделать вывод, что для любой температуры термической обработки БФСС существует оптимальное время оплавления, при превышении которого тангенциальный угол α практически не изменяется. Это можно объяснить тем, что в процессе оплавления происходит размягчение БФА и силы поверхностного натяжения стремятся минимизировать свободную энергию поверхности, которая пропорциональна ее площади. При достижении своего минимального значения (полное оплавление и максимальная планаризация) «растекание» стекла прекращается и при продолжении отжига α остается без изменения. Оптимальное время оплавления при температуре отжига 850°C составляет 40—45 мин.

В процессе термообработки наблюдалось изменение некоторых параметров пленок БФСС. Так, при температуре отжига 850°C , по сравнению со свежесажденными пленками, наблюдалось уменьшение толщины пленки до 4 %, обеднение бором до 30 %, незначительное возрастание коэффициента преломления до 1,46—1,48 и плотности до 2,50—2,70 г/см³, в 13—20 раз снижалась скорость растворения пленок в буферном стравителе на основе плавиковой кислоты. Скорость травления становилась порядка 0,9—1,3 нм/с, что сравнимо со скоростью травления термического окисла. Изменение перечисленных параметров в процессе термообработки свидетельствует о внутреннем изменении структуры стекла.

Методом электронной дифракции «на просвет» было установлено, что при рассмотренных концентрациях легирующих примесей в БФСС и температурах отжига 850 — 1100°C пленки стекла оставались аморфными и в отожженных образцах раздела фаз не наблюдалось.

Выводы:

1. Время оплавления пленок БФСС, осажденных в оптимальном режиме, зависит как от содержания легирующих примесей бора и фосфора, так и от температуры отжига: при неизменных концентрациях бора

и фосфора время оплавления сокращается с ростом температуры. Оптимальное время оплавления при температуре 850°C составляет 40—45 мин.

2. Угол планаризации α уменьшается с ростом суммарной концентрации бора и фосфора.

3. В процессе термообработки БФСС происходит усадка пленки, обеднение бором, возрастание плотности и коэффициента преломления, повышается кислотостойкость: скорость травления в буферных травителях на основе HF сравнивается со скоростью травления термического окисла.

4. Оптимальный состав БФСС, используемого в качестве планаризирующего диэлектрика, составляет $C_B - 5,3 \div 5,7 \%$ вес., $C_P - 2,8 \div 3,0 \%$ вес.

1. Kern W., Schable L. // RCA Rev. 1982. V. 43. № 3. P.425.

2. Лабуда А. А., Сидерко А. А. // Актуальные проблемы социально-гуманитарных и естественных наук. Мн., 1991. С. 124.

3. Лабуда А. А., Сидерко А. А. // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. 1993. № 3. С. 25.

4. Лабуда А. А., Сидерко А. А. // Вакуумная техника и технология. 1993.

5. Васильев В. Ю., Духанова Т. Г. и др. // Электр. промышленность. 1988. Вып. 5 173. С. 40.

Поступила в редакцию 02.05.94.