

Е.Я. Швец<sup>(1)</sup>, первый проректор, к.т.н., профессор

В.М. Воскресенский<sup>(2)</sup>, ведущий инженер

Д.М. Гомольский<sup>(3)</sup>, аспирант

А.В. Кравчина<sup>(1)</sup>, аспирант

В.В. Кравчина<sup>(1)</sup>, доцент, к.т.н.

## ИЗОЛЯЦИЯ МЕЗА-ФАСОК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ЛЕГКОПЛАВКИМИ СТЕКЛАМИ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ СВИНЦА, АЛЮМИНИЯ И КРЕМНИЯ

<sup>(1)</sup>Запорожская государственная инженерная академия,

<sup>(2)</sup>ОАО «Завод «Элемент-Преобразователь», г. Запорожье,

<sup>(3)</sup>Классический частный университет, г.Запорожье

Проведена оптимізація процесів формування плівок ізоляції канавок кремнію легкоплавким склом під час виготовлення високовольтних напівпровідникових приладів, що дозволяє підвищити пробивні напруги та зменшити струми витoku.

Проведена оптимизация процессов формирования пленок изоляции канавок кремния легкоплавким стеклом при изготовлении высоковольтных полупроводниковых приборов, позволяющая повысить пробивные напряжения и уменьшить токи утечек.

*Введение.* Выход годных полупроводниковых приборов во многом определяется тем, насколько хорошо сформирована изоляция активных областей. Изоляция *p-n*-переходов определяет такие характеристики приборов как температурный диапазон использования, радиационная стойкость, величина токов утечек, пробивное напряжение и др. Важны также такие характеристики как технологическая сложность, воспроизводимость, управляемость, возможность применения групповой технологии, надежность, площадь и топология кристаллов и др.

*Состояние вопроса.* В технологии силовых полупроводниковых приборов можно выделить следующие методы изоляции:

- формирование фасок, их травление и защита кремний органическими компаундами;
- травление канавок и их окисление;
- травление канавок, осаждение в канавках оксидов металлов, оплавление осажденных пленок и получение защитных пассивационных стекол;
- формирование изоляционных  $p^+$ -областей кремния с помощью процессов термомиграции алюминия;
- защита с помощью охранных диффузионных колец и др [1-3].

Выбор стекла, как защитного материала, определяется конструктивными особенностями прибора и технологическими приемами, применяемыми при его изготовлении. Так как защитная пленка стекла лежит непосредственно на кремнии, закрывая *p-n* переход, а сам полупроводниковый элемент представляет собой тонкую пластину (300...350 мкм), которая после стеклопассивации проходит ряд химико-технологических и термических операций, то к самому стеклу, используемому в качестве защитного материала, предъявляются довольно жесткие требования по механическим, химическим и физическим свойствам.

Широкое применение для защиты маломощных *p-n* переходов дискретных по-

лупроводниковых приборов получили следующие типы стекол:

- боросиликатные стекла, состоящие из  $ZnO$ ,  $SiO_2$ ,  $B_2O_3$ , а также  $Al_2O_3$  и  $CdO$  (толщина защитной пленки – 1...20 мкм);
- алюмосиликатные стекла, состоящие из  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  с добавками  $BaO$ ,  $CaO$  и  $Na_2O$  (толщина пленки – 3...5 мкм);
- халькогенидные стекла, состоящие из тройных композиций «мышьяк-сера-галлий», «мышьяк-селен-галлий» (толщина пленки – 3...5 мкм);
- свинцово-силикатные стекла, состоящие из  $PbO$ ,  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  (толщина пленки – 3...30 мкм).

Свойства защитных стекол зависят от их состава и могут быть изменены в широком диапазоне введением различных модифицирующих добавок. Добавка  $Al_2O_3$  приводит к снижению коэффициента теплового расширения (КТР), введение  $B_2O_3$  вызывает снижение подвижности ионов и придает стеклу легкоплавкость.

В большинстве работ по пассивации полупроводниковых элементов стеклом рекомендуется толщина покрытия порядка 5 мкм. Это объясняется сложностью получения бесщелочного стекла с КТР близким к КТР кремния и имеющего низкую температуру размягчения. Такую толщину защитной пленки применяют для приборов, работающих при низких напряжениях (порядка 100...200 В). Для элементов приборов, работающих при напряжениях свыше 1000 В, толщина защитной пленки стекла должна быть более 10 мкм и здесь вступают в противоречие КТР кремния и стекла. Избежать температурных напряжений в месте контакта стекла и кремния можно только в случае идеального совпадения их КТР во всем интервале рабочих температур: от - 50 до 110 °С. На практике значительно сократить различия в КТР стекла и кремния удастся введением различных модификаторов, а также правильным подбором режимов оплавления и отжига. Выбор стекла, полностью отвечающего всем требованиям по механическим свойствам, химической стойкости, температуре размягчения и оплавления, является весьма сложной задачей.

*Постановка задачи.* Задачей настоящей работы является оптимизация процессов формирования изоляции с помощью пассивационных стекол.

*Методика эксперимента.*

Меза-фаски изготавливали при помощи прецизионного глубинного травления с применением методов фотолитографии. Исходя из требований к глубине вытравливания меза-фаски и чистоты обработки поверхности пластин, получаемой при шлифовании микропорошком М 14, использовали травители, состоящие из плавиковой, азотной и уксусной кислот в соотношениях 2 : 8 : 1 (скорость травления 14 мкм/мин) и 2: 9: 4 (скорость травления 11 мкм/мин). В качестве защитного покрытия поверхности пластины при травлении использовали пленку  $SiO_2$  толщиной 0,4 мкм, маскированную фоторезистом ФП-383. Для определения влияния температуры травителя опробовали травление меза-фаски при различных температурах. Глубину полученных фасок измеряли многооборотным индикатором с ценой деления 1 мкм. Полупроводниковые структуры после формирования меза-фаски перед стеклопассивацией подвергали обработке в пероксидно-аммиачных смесях с целью удаления ряда химических реагентов – лака ХВ-784 и фоторезиста.

Для определения оптимальной глубины меза-фаски предварительно были проведены расчеты глубины слоев объемного заряда, распространяющихся в *n*- и *p*-областях. Глубину слоев объемного заряда рассчитывали с использованием формулы:

$$W_{об}^p = W_{об}^n \cdot \frac{N_d}{N_a}, \quad (1)$$

где  $W_{об}^p$  – слой объемного заряда в  $p$ -области эмиттера,  $W_{об}^p \sim 5 \dots 6$  мкм;  $W_{об}^n$  – слой объемного заряда в  $n$ -области базы при напряжении  $U = 1600 \dots 1800$  В,  $W_{об}^n \sim 150$  мкм;

$W_{об}^n = \left( \frac{2\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varphi_k + U)}{q \cdot N_d \cdot (1 + N_d / N_a)} \right)^{0.5}$ ,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость кремния,  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $\varphi_k$  – контактная разность потенциалов;  $U$  – приложенное обратное напряжение;  $q$  – заряд электрона;  $N_d$  – концентрация донорной примеси,  $N_d = 10^{14}$  ат·см<sup>-3</sup>;  $N_a$  – концентрация акцепторной примеси,  $N_a = 3,0 \cdot 10^{15}$  ат·см<sup>-3</sup>.

Для защиты активных и пассивных областей структур полупроводниковых приборов в настоящей работе опробовали бесщелочное стекло марки С48-7 и стекла типов 5, 12 лабораторного приготовления (Институт электровакуумного стекла, г.Москва, Россия), а также стекла IP745, IP760, IP830 производства США (табл. 1).

**Таблица 1** - Стекла для стеклопассивации полупроводниковых элементов

Марка стекла	Температура оплавления, °С	Время оплавления, мин	КТР, 1/°С·10 <sup>-7</sup> (20...300 °С)	Применение
С48-7	740	10	48,0	мощные транзисторы, диоды
СПИ-ВТ	900	10	34,5	диоды, тиристоры, симисторы
5	800	15	39,4	тиристоры
12	800	15	36,5	тиристоры
IP745	690	10	45,0	диоды
IP760	710	10	48,0	тиристоры, диоды
IP830	815	10	45,0	мощные транзисторы, диоды

Традиционный способ получения стекла из смеси оксидов путем расплавления требует применения специального термического оборудования. Расплав свинцовосиликатного стекла очень агрессивен поэтому его варят в высокоглиноземистых тиглях (температура варки – 1400...1500 °С, продолжительность – 2...3 ч, окислительная атмосфера). Получение полуфабриката стекла можно осуществлять либо прокаткой его в тонкие листы, либо фитованием, то есть отливкой стекла в воду. Стекло СПИ-ВТ получали из растворов нитридов свинца и алюминия, тетраэтилового эфира кремниевой кислоты в спирте и 25%-го раствора аммиака. При сливании растворов образуется гель гидроксидов свинца, алюминия и кремния, который выпадает в осадок. Осадок высушивали, а затем прокачивали в окислительной среде, препятствующей восстановлению металлов. Химические реакции, проходящие при приготовлении стекловещества указанным способом, можно представить следующим образом:

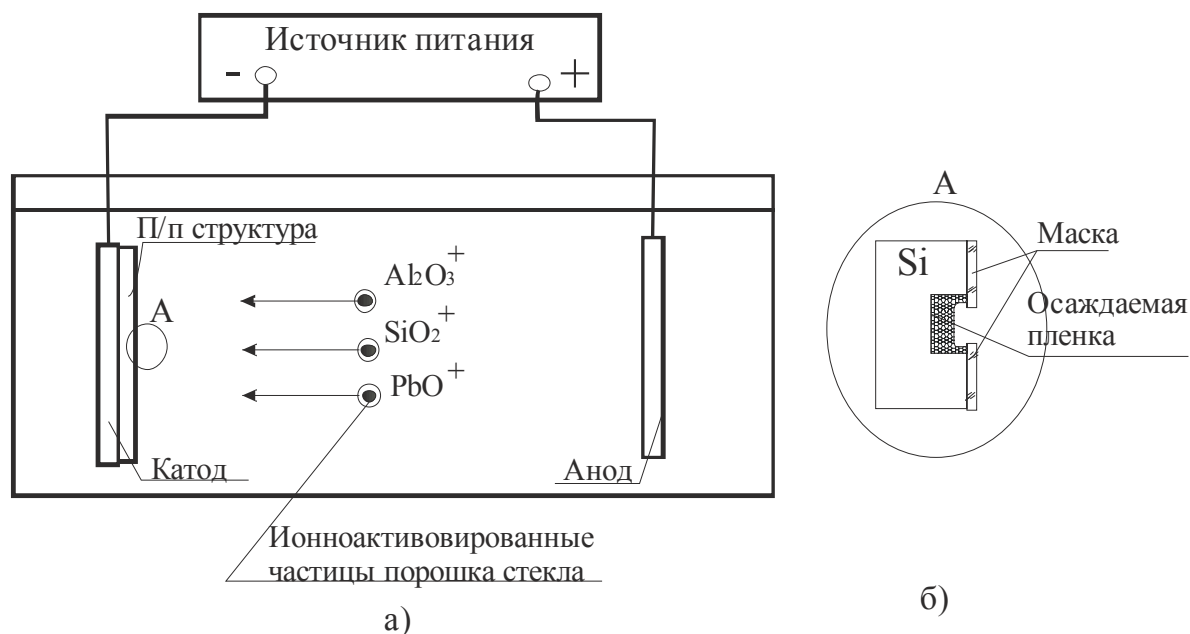




Реакция щелочного гидролиза ортоэтилсиликата состоит из ряда стадий, в результате которых образуется гель кремниевой кислоты. Равновесие между ортоэтилсиликатом и кремниевой кислотой нарушено, поэтому в результате реакций образуется гель из смеси гидрооксидов солей свинца, алюминия и кремниевой кислоты. Термическим нагревом смесь гидрооксидов переводят в смесь оксидов. Прокаливание проводят по двум режимам: при температуре  $740 \pm 10^\circ C$ , длительность 30...60 мин, расход кислорода 50 л/ч; при температуре  $650 \pm 10^\circ C$ , длительность 30...60 мин, расход кислорода 100 л/ч.

Спекшуюся стекломассу измельчают в течение 6...8 ч. Аналогичным способом измельчали в порошок стекло марки С48-7, остальные марки стекол, указанных в табл. 1, получали измельченными. При электрофорезе, помимо электродных химических реакций, протекает ряд сопряженных процессов: движение частиц, сопровождаемое коагуляцией или дальнейшей агрегацией; взаимодействие частиц с покрываемой поверхностью; последующее осаждение частиц на фиксированные первые слои покрытия. При этом прочные однородные слои получаются только из устойчивых суспензий. Электрофорез чувствителен к таким свойствам среды, как диэлектрическая проницаемость, вязкость и электропроводность. Поэтому приготовление суспензии порошкообразного стекла в жидкости с более высокой диэлектрической постоянной приводит к тому, что агрегаты распадаются в растворе и переходят во взвешенное состояние, тем самым улучшая качество осаждаемой пленки. Кроме того, частицы стекла в жидкости с более высокой диэлектрической постоянной приобретают больший электрический заряд и сильнее отталкиваются друг от друга, что позволяет увеличить скорость осаждения пленок.

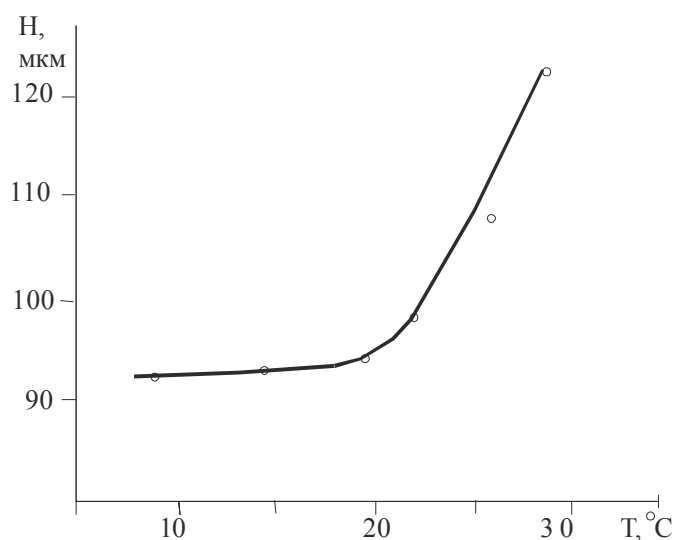
Приготовление суспензии порошкообразного стекла в жидкости с более высокой диэлектрической постоянной приводит к образованию более равновесной суспензии. Величина напряженности поля составляла от 15 до 100 В/см. Схема процесса электрофоретического осаждения стекла показана на рис. 1.



**Рисунок 1** - Схема процесса электрофоретического осаждения стекла (а), структура с осаждаемой пленкой в меза-канавке кремния (б)

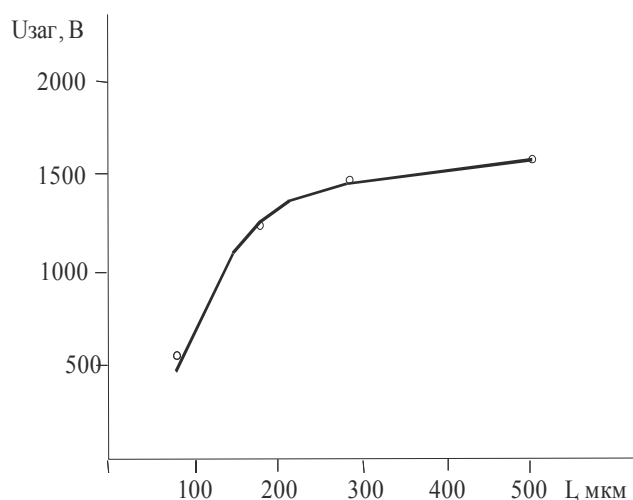
В качестве дисперсионной среды для приготовления суспензии стекол использовали этанол ( $C_2H_5OH$ ). Для ионизации частиц стекла, с целью придания им подвижности в электролите в процессе осаждения, стеклопорошок с небольшим количества спирта перетирали в халцедоновой ступке с добавкой азотной кислоты в течение 2...4 мин. Суспензию размешивали в полном объеме спирта, а для лучшего смачивания зерен стекла ее подвергали обработке в ультразвуковой ванне. После чего суспензию использовали для проведения процесса электрофоретического осаждения пленки стекла изоляции. В качестве источника питания использовали прибор УИП-1. Катодом является профилированная полупроводниковая пластина, а анодом - пластина из электропроводного материала (графита, никеля, платины).

*Результаты эксперимента.* Зависимость глубины вытравливания меза-фаски от температуры травителя представлена на рис. 2, из которого видно, что скорость травления меза-фасок слабо зависит от температуры в интервале 10...20 °С. В дальнейшем травление меза-фасок проводили при температуре травителя 14...18 °С, обеспечивающей равномерное травление и предотвращение деградации маски фоторезиста. Травитель 2:8:1 обладает длительным временем реакционной способности, скорость травления практически остается постоянной при выдержке травителя в течение 40 ч, в то время как выдержка травителя 2:9:4 приводит к уменьшению скорости травления. Исследование зависимости пробивных напряжений от глубины травления показало, что максимальными значениями величин обратного напряжения загиба  $U_{заг}$  вольт-амперных характеристик (ВАХ) обладают структуры с глубиной канавок 110...120 мкм. Поэтому при глубине  $p-n$ -перехода равной 80...90 мкм необходимо дополнительное травление слоя базы на глубину 20...30 мкм. Требования сохранения величины пробивного напряжения, механической прочности полупроводниковых структур делают необходимым соответствующее увеличение толщины базы. Можно предположить, что удаление области с остаточной концентрацией алюминия  $10^{12}...10^{13}$  ат/см<sup>3</sup> [4] в области базы совпадает с получением максимальных пробивных напряжений.



**Рисунок 2** - Зависимость глубины травления канавок кремния от температуры травителя  $HF : HNO_3 : CH_3COOH$  в соотношении 2 : 8 : 1

На рис. 3 представлены средние значения напряжения загиба ВАХ, получаемые при различных значениях ширины меза-фаски.



**Рисунок 3** - Зависимость величины обратного напряжения загиба ВАХ ТС106 от ширины  $L$  канавки кремния Б-40 под изоляцию легкоплавными стеклами

Из данных рис. 3 следует, что при ширине меза-фаски 300 мкм выход годных структур высокий, а при ширине меза-фаски менее 300 мкм выход годных структур резко уменьшается.

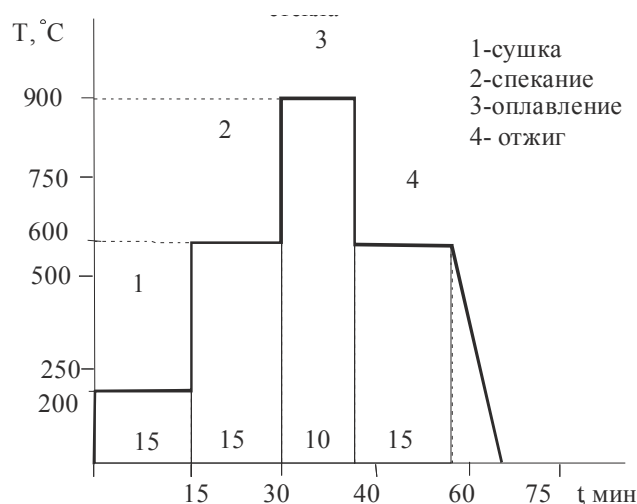
В табл. 2 приведены данные по режиму электрофоретического осаждения стекла из суспензии электролита на основе этанола – в качестве среды, азотной кислоты – при ионизации и кремниевой пластины – в качестве анода.

**Таблица 2** - Режимы электрофоретического осаждения частичек стекла

Марка стекла	Дисперсионная среда	Напряженность поля, В/см	Материал анода	Ток, мА	Время осаждения, мин	Осаждаемость	Сушка, мин
С 48-7	этанол	15...35	кремний	30...80	0,5...3,0	плохая	60
№5	- « -	15...35	кремний	30...80	0,5...3,0	хорошая	60
№12	- « -	15...35	кремний	30...80	0,5...3,0	плохая	60
СП-ВТ	- « -	15...35	кремний	30...80	0,5...3,0	хоршая	30
IP-745	- « -	15...35	кремний	30...80	1...3	плохая	30
IP-760	- « -	15...35	кремний	30...80	1...3	хорошая	30
IP-830	- « -	15...35	кремний	15...75	1...3	плохая	60
СП-ВТ	- « -	100	кремний	100...180	0,5...1,5	хорошая	30

Лучшие результаты по электрофоретическому осаждению стекол были получены при осаждении стекла СП-ВТ.

Для удаления органической составляющей из осажденного слоя стекла его просушили. Оплавление стеклопорошка в меза-канавке с плохо удаленной органической составляющей ухудшает защитные свойства стекла из-за возникающей при этом большой пористости. Сушку проводили путем выдержки на воздухе не менее 30 мин после осаждения и 30 мин в термостате при температуре 180...200 °С.



**Рисунок 4** - Режим температурной обработки полупроводниковых пластин со стеклопорошком СИИ-ВТ, осажденным в канавках

Оплавление стекла проводили по режиму, показанному на рис. 4, в потоке кислорода с расходом  $100 \pm 10$  л/ч в четыре этапа: сушка, спекание, плавление и обжиг. Первый этап – сушка. Во время второго этапа производят выжигание связывающего вещества и спекание стеклопорошка при температуре  $600^\circ\text{C}$ . Удаление связывающего вещества и остатков жидкой фазы суспензии осуществляли для предотвращения больших утечек токов при рабочих температурах, которые могут привести к выходу прибора из строя. Третий этап при температуре  $900^\circ\text{C}$  предусматривает расплавление стекломассы и получение равномерного сплошного слоя стекла на защищаемой поверхности полупроводникового элемента. Четвертый, заключительный цикл – отжиг при температуре  $600^\circ\text{C}$  – необходим для стабилизации слоя оплавленного стекла, то есть снятия механических напряжений. Нарушение режима отжига вызывает излишнюю хрупкость пластин кремния и приводит к образованию микротрещин на границе раздела «кремний-стекло» во время последующих обработок.

При последующих процессах формирования и отжигах пленок металлизации оплавленное стекло показало хорошую электрофизическую стабильность. Необходимо особое внимание уделять химической стабильности стекла, защищая его от воздействия агрессивных сред, травителей и электролитов. Оптимальная толщина стекла составляет  $30\ \mu\text{м}$ . Стекло СИИ-ВТ хорошо себя зарекомендовало при проведении испытаний силовых полупроводниковых приборов термоциклированием от  $-60$  до  $+150 \dots +190^\circ\text{C}$ . Величина токов утечки чипа диодной структуры  $20 \times 20\ \text{мм}$  при обратном напряжении  $U_R = 1600\ \text{В}$  и температуре  $20 \dots 25^\circ\text{C}$  -  $I_R \leq 0,5\ \text{мА}$ , а при температуре  $100^\circ\text{C}$  -  $I_R \leq 5\ \text{мА}$ .

*Выводы.* Оптимизация процессов электрофоретического осаждения термообработки и оплавления стекла СИИ-ВТ позволила получить изоляцию с хорошими электрофизическими свойствами и механической прочностью, необходимыми для формирования изоляции высоковольтных полупроводниковых приборов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабанова Л. К. Бескорпусная герметизация полупроводниковых приборов стеклянными пленками сложного состава / Л. К. Кабанова. – М: Электроника, 1983. – 155 с.
2. Дейнега Ю. Ф. Электрофоретическое осаждение металлополимеров / Ю. Ф. Дейнега, З. Р. Ульберг. – Киев: Наука, 1982. – 255 с.
3. Горбань О. М. Процеси травлення, окислювання і дифузії в монокристалічному кремнію

під плівками нітриду і окису кремнію / О. М. Горбань, В. В. Кравчина // Вісник ЗДУ. – 1999. – № 2. – С. 181-187.

4. Особенности формирования быстровосстанавливающихся диодов / А. Н. Горбань, В. В. Кравчина, Д. М. Гомольский, А. И. Солодовник // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – № 3 (75). – 2008. – С. 36-40.

Стаття надійшла до редакції 30.06.2009 р.

Рецензент – проф. І.Ф. Червоний