ее по аргументу k раз и результат возвести в n-ю степень, получится функция, сингулярная часть которой является правой частью равенства (22).

Все полученные здесь свойства сингулярных обобщенных функций соответствуют обычным и довольно очевидным свойствам кругового интеграла Коши. Кажущиеся на первый взгляд многие необычные их свойства на самом деле почти дословно повторяют свойства порождающих их обычных функций. Например, функция x^{-1} порождает $\delta(x)$ (является ее сингулярной частью). Поэтому результатам многих математических операций над одной из них соответствуют адекватные результаты тех же операций над другой. В качестве примера приведем следующий ряд аналогий с обычными и порождающимися из них сингулярными функциями

$$\begin{array}{ccccc} \dfrac{1}{x} & \rightarrow & \dfrac{1}{x^m} & \rightarrow \dfrac{d^{m-1}}{dx^{m-1}}\dfrac{1}{x} & \rightarrow \dfrac{1}{x^{m-k}}\dfrac{d^{k-1}}{dx^{k-1}}\dfrac{1}{x} \\ \downarrow & & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \delta(x) \rightarrow & & \left[\delta(x)\right]^m \rightarrow & \delta^{(m-1)}(x) & \rightarrow \left[\delta(x)\right]^{m-k}\delta^{(k-1)}(x) \end{array}$$

С точностью до несущественных здесь коэффициентов в первом ряду выписаны результаты простых математичеких операций с обычной функцией x^{-1}, во втором ряду – результаты тех же операций с сингулярной функцией $\delta(x)$. Функции нижнего ряда являются сингулярными частями функций верхнего ряда.

Необычные правила дифференцирования функции $\delta^{(m)}(x)$ связаны с не очень удачным ее обозначением. На самом деле она дифференцируется по обычным правилам дифференцирования порождающей ее степенной функции x^{-m-1} и предпочтительнее было бы ее обозначить $\delta^{(-m-1)}(x)$ вместо $\delta^{(m)}(x)$.

1. Schwartz L. Theorie des distributions. Paris, 1950. V.I; 1951, V.II.
2. Гельфанд И.М., Шилов Г.Е. Обобщенные функции и действия над ними. М., 1958. Вып.1–3.
3. Бремерман Г. Распределения, комплексные переменные и преобразования Фурье. М., 1968.
4. Антосик П., Микусинский Я., Сикорский Р. Теория обобщенных функций: Секвенционный подход. М., 1976.
5. Lighthill M.J. Introduction to Fourier analysis and generalized functions. London, 1958.
6. Владимиров В.С. Обобщенные функции в математической физике. М., 1979.

Поступила в редакцию 27.12.96.

УДК 621. 396. 181

А.А. ЛАБУДА, А.А. СИДЕРКО, И.В. ПРОСТОВ

ЗАРЯДОВАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ БОРО- И БОРОФОСФОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

Charge stability of doped silicate glasses used as planarization isolation in the production of integrated circuits has been studied experimentally.

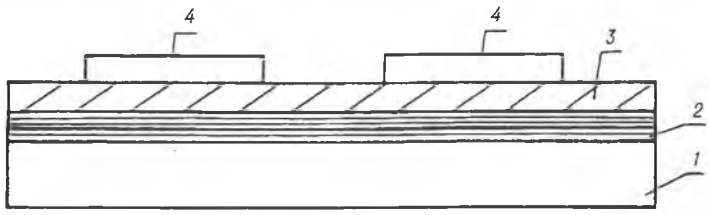
The multifactor dependence of this parameter has been established, and possible methods for stabilizing the charge states have been proposed.

Важной электрической характеристикой силикатных стекол, легированных в процессе химического газофазного осаждения (ХГФО), является их зарядовая стабильность, так как неконтролируемое перераспределение зарядов вызывает непредсказуемые возмущения в готовых изделиях микроэлектроники.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования зарядовой стабильности боро- и борофосфоросиликатных стекол (БСС и БФСС) и ее изменение при проведении типовых температурных обработок.

Исследуемые пленки осаждались при атмосферном давлении из газовых смесей SiH_4-Ar-O_2-B_2H_6 и SiH_4-Ar-O_2-B_2H_6-PH_3 при температуре 325°С[1]. Последующий отжиг проводился в атмосфере сухого кислорода при температуре 850°С [2] и затем в азоте при температуре 450°С.

Оценки встроенного заряда (Q_{SS}/q) и зарядовой стабильности ($\Delta Q_{SS}/q$) проводились стандартным методом высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВЧ-ВФХ) [3,4] на тестовых МОП-структурах, поперечное сечение которых представлено на рисунке.



Поперечное сечение тестовой структуры:

1 – подложка монокристаллического кремния; 2 – термический пирогенный диоксид кремния; 3 – исследуемый диэлектрик 4 – металлический верхний электрод

Величина подвижного заряда оценивалась по изменению напряжения плоских зон на ВФХ ($\Delta U_{ПЗ}$) после проведения термополевых испытаний с использованием типовой методики.

В качестве подложки применялись кремниевые полированные с двух сторон пластины марки КДБ–12 диаметром 100 мм с кристалло-графической ориентацией (100). Термический диоксид кремния толщиной 44 нм сформирован методом пирогенного окисления при температуре 850°С в присутствии хлористого водорода. Заряд поверхностных состояний в нем снимался путем отжига. На диоксид кремния наносились исследуемые пленки БСС и БФСС, которые подвергались термическим обработкам. Металлизация наносилась методом магнетронного распыления алюминиевой мишени с массовым содержанием кремния 1,1%. Необходимый рисунок металлизации формировался методом жидкостного химического травления. Таким образом, в процессе подготовки тестовых структур воспроизводились базовые технологические процессы широко используемого маршрута изготовления МОП–ИМС.

С точки зрения эксплуатационных характеристик полупроводникового прибора наибольший интерес представляет не столько величина встроенного заряда Q_{SS}/q в диэлектрике, сколько его изменение в процессе температурного воздействия. Поэтому, наряду с абсолютными величинами изменения плоских зон ВФХ и зарядов, важно рассматривать величину относительного дрейфа напряжения плоских зон, который рассчитывается по формуле

$$\Delta_{OTH} = \frac{\Delta U_{ПЗ}}{U_{ПЗ}} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где: $\Delta U_{ПЗ}$ – изменение напряжения плоских зон (В), $U_{ПЗ}$ – начальное напряжение плоских зон (В).

Результаты исследования зарядовых свойств пленок БСС и БФСС и их динамика в процессе термообработки представлены в табл.1,2. В табл.1 представлены данные о величинах начального напряжения плоских зон и неподвижного заряда Q_{SS}/q, а также абсолютное и относительное изменения этих величин $\Delta U_{ПЗ}$, $\Delta Q_{SS}/q$ и относительный дрейф напряжения плоских зон $\Delta U_{ПЗ}/U_{ПЗ} \cdot 100\%$ в пленках БСС после одно- и двухкратной термообработки при T=850°С и 450°С в зависимости от массового содержания бора. В табл.2 – те же величины для пленок БФСС.

Данные табл.1 свидетельствуют о крайней нестабильности зарядовых состояний в БСС. Плавной зависимости этой величины от массового содержания

бора не наблюдается, что свидетельствует о наличии других причин. Однако первый термоотжиг (б) в атмосфере сухого кислорода при Т=850°С, предусмотренный технологией, снижает величину первоначального встроенного заряда в несколько раз, а иногда и на порядок. Повторный отжиг в атмосфере азота при Т=450°С еще более стабилизирует заряд в данных пленках. Снижение величины неподвижного заряда и его уменьшение при первой термообработке при Т=850°С наблюдается и в пленках БФСС. Однако дополнительный термоотжиг в атмосфере азота при Т=450°С практически не влияет на встроенный заряд, но повышает зарядовую стабильность, уменьшая величину подвижного заряда.

Таблица 1

Зарядовая стабильность БСС

№ обработки	$C_в$,%	Термообработка	Зарядовое состояние		Напряжение плоских зон		
			Q_{SS}/q	$\Delta Q_{SS}/q$	$U_{пз}$, В	$\Delta U_{пз}$, В	Δ отн., %
1	3,9	а	$+2{,}7\cdot10^{11}$	$>7{,}5\cdot10^{11}$	-8,29	-162	1954
		б	$+5{,}0\cdot10^{10}$	$+5{,}4\cdot10^{11}$	-0,8	-26,45	3306
		в	$+5{,}5\cdot10^{10}$	$+1{,}3\cdot10^{11}$	-2,0	-4,53	227
2	4,25	а	$+2{,}1\cdot10^{11}$	$>8\cdot10^{11}$	-5,35	-34,65	648
		б	$+5{,}4\cdot10^{10}$	$+4{,}9\cdot10^{11}$	-1,85	-17,5	946
		в	$+3{,}6\cdot10^{10}$	$5{,}9\cdot10^{10}$	-1,2	-3,12	260
3	5,15	а	$+2{,}8\cdot10^{11}$	$>7{,}0\cdot10^{11}$	-8,33	-162	1945
		б	$+5{,}0\cdot10^{10}$	$8{,}0\cdot10^{11}$	-1,0	-22,5	225
		в	$+3{,}1\cdot10^{11}$	$1{,}4\cdot10^{11}$	-9,4	-3,8	40
4	5,75	а	$+1{,}9\cdot10^{11}$	$>8{,}0\cdot10^{11}$	-5,38	-170	3160
		б	$+5{,}0\cdot10^{10}$	$>9{,}5\cdot10^{11}$	-1,1	-42	3818
		в	$+4{,}0\cdot10^{10}$	$+1{,}3\cdot10^{11}$	-1,52	-5,18	341

Примечание: а – свежеосажденный БСС; б – после термообработки в сухом O_2 (Т=850°С, t=40 мин.); в – после дополнительной термообработки в азоте, (Т=450°С, t=20 мин) и нанесения металлизации

Таблица 2

Зарядовая стабильность БФСС

№ обработки	$C_в$,%	$C_р$,%	Термообработка	Зарядовое состояние, $см^{-2}$		Напряжение плоских зон		
				Q_{SS}/q	$\Delta Q_{SS}/q$	$U_{пз}$, В	$\Delta U_{пз}$, В	Δотн, %
1	5,6	3,0	а	$+1{,}3\cdot10^{11}$	$>9{,}0\cdot10^{11}$	-4,05	>-173	>4272
			б	$+1{,}0\cdot10^{11}$	$>9{,}0\cdot10^{11}$	-3,7	-146	3946
2	4,38	3,5	а	$+2{,}7\cdot10^{11}$	$>1{,}0\cdot10^{12}$	-7,25	>-28	>386
			б	$+8{,}5\cdot10^{10}$	$+7{,}0\cdot10^{11}$	-2,58	-15,2	589
			в	$+7{,}2\cdot10^{10}$	$>1{,}0\cdot10^{12}$	-2,13	>-35	>1643
			г	$+1{,}3\cdot10^{11}$	$+7{,}1\cdot10^{11}$	-3,88	-13,42	346
3	3,9	4,4	а	$+2{,}8\cdot10^{11}$	$>7{,}0\cdot10^{11}$	-6,0	>-29	>483
			в	$+9{,}3\cdot10^{10}$	$+4{,}7\cdot10^{11}$	-2,47	-9,37	379
			в	$+1{,}1\cdot10^{11}$	$1{,}0\cdot10^{12}$	-2,05	-23	1122
			г	$+7{,}9\cdot10^{10}$	$+1{,}1\cdot10^{11}$	-2,0	-2,5	125

Примечание: а – свежеосажденный БФСС; б – после термообработки в сухом O_2 (Т=850°С, t=40 мин.); в – после дополнительной термообработки в азоте (Т=450°С, t=20 мин) и нанесения металлизации; г – после следующей за отжигом (Т=850°С) термообработки в азоте (Т=450°С, t=20 мин) и нанесения металлизации

Явной зависимости величины встроенного заряда для пленок БФСС, а также его изменения в зависимости от массового содержания легирующих примесей, как следует из проведенных измерений, не наблюдается.

Следует отметить, что встроенный заряд как в пленках БСС, так и в БФСС положителен. Согласно [5] для появления положительного заряда в пленках диоксида кремния необходимо наличие избыточных атомов кремния и кислородных вакансий. Отжиг при T=850°C упорядочивает строение стекла [6], уменьшая количество кислородных вакансий и оборванных связей Si-O, что приводит к снижению встроенного заряда в пленках БСС и БФСС. Поскольку увеличение массового содержания легирующих примесей не оказывает существенного влияния на величину неподвижного заряда, можно предположить, что фиксированный заряд в указанных пленках определяется в основном количеством кислородных вакансий. Одной из причин появления подвижного заряда, а следовательно, и зарядовой нестабильности пленок БСС и БФСС может быть наличие в пленках диэлектриков $Si{-}OH^{+}$–комплексов и разнообразных дефектов, которые могут являться ловушками зарядов [5,6]. Этим может объясняться и низкая зарядовая стабильность свежеосажденных пленок. Кроме того, по данным [6,8,9] величина подвижного заряда зависит от состояния атмосферы, температуры и длительности термических обработок. Отжиг при T=850°C снижает количество $Si{-}OH^{+}$–комплексов [6], что и наблюдается на практике и подтверждается экспериментальными данными табл.1 и 2. При повторном отжиге в атмосфере азота при T=450°C отжигаются ловушки зарядов, что и снижает величину подвижного заряда. Механизм отжига данных ловушек при низкотемпературных термических обработках сложен и до конца не исследован [6].

Следует учитывать тот факт, что наличие бора в диэлектрических пленках стимулирует кристаллизацию стекла при термообработках, что также может быть причиной наличия значительного подвижного заряда [10,11].

Кроме того, причиной появления подвижного заряда могут являться неконтролируемые загрязнения пленок ионами щелочных металлов при ручной перегрузке подложек, если это предусмотрено технологическим процессом.

Таким образом, имеется большое количество потенциальных причин, порождающих зарядовую нестабильность примесных стекол, используемых в качестве межуровневой изоляции. Рассмотренные термические отжиги значительно улучшают этот параметр, однако не устраняют отрицательное воздействие названных факторов. Улучшить зарядовую стабильность можно путем замены атмосферы низкотемпературного отжига с азотной на другую, нейтральную, например гелий-водородную [12], а также вариацией температуры (±20°C) и длительности обработки. Необходимо также исключить по возможности контакт оператора с обрабатываемыми подложками. Но следует учитывать, что если в пленках диэлектриков преобладают сжимающие механические напряжения, то снизить в них заряд путем отжига трудно [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке НПО “Интеграл”.

1. Лабуда А.А., Сидерко А.А. // Вестн.Белорус. ун-та Сер.1. 1993. №1. С.25.
2. Они же // Там же. 1994. №3. С.36.
3. Павлов Л.А. Методы измерения параметров полупроводников материалов. М., 1987. С.240.
4. Технология СБИС. М., 1986. Кн.1. С.404.
5. Sigmon T.W., Epi W.K., Zugujjo E., Mayer W. // Appl. Phys. Lett. 1974. V.24. №3. P.105.
6. Румак Н.В. Компоненты МОП-интегральных микросхем. Мн., 1991.
7. Hofstein S.R. // IEE, Trans. on Electron. Dev. 1966. V. ED-13. №2. P.222.
8. Румак Н.В. // Система кремний-двуокись кремния в МОП-структурах / Под ред. В.М. Колешко. Мн., 1996.
9. Deal B.E., Sklar M., Grove A.S. // J. Electrochem. Soc. 1967. V.114. P.266.
10. Sugat T., Hon K., Nishinama N. // Jap. J. Phys. 1968. V.7. P.715.
11. Литовченко В.Г., Федорович Ю.В. Диэлектрические покрытия в планарной технологии. М., 1972.
12. Shin, Hynngcheol, Chevning H. // IEE Trans. Semiconel. Manuf. 1993. V.6. №2. P.92.

Поступила в редакцию 15.01.96.