

УДК 537.22

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ГИДРОФОБИЗИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Н.С.ПЩЕЛКО

Военная академия связи им. С.М.Буденного, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены физико-технологические основы формирования электрета на основе диоксида кремния (SiO_2) для использования его в устройствах микросистемной техники. Исследования показали, что лучшими электретными свойствами обладает SiO_2 , полученный в атмосфере «влажного» кислорода, по сравнению с образцами, полученными другими методами окисления. Вероятно, это связано с большим количеством групп Si-OH на поверхности оксида во «влажном» SiO_2 , что повышает эффективность действия гидрофобизирующих покрытий при модификации поверхности SiO_2 . Выявлено, что другие способы получения оксида, например, электрохимический или плазмохимический, не позволяют получить SiO_2 с хорошими электретными свойствами. Уменьшение инжектированного в электрет заряда может происходить вследствие наличия объемной или поверхностной проводимости, а также экранировки этого заряда зарядами противоположного знака из атмосферы, приводящих при высокой окружающей влажности к катастрофическому падению поверхностного потенциала электрета. С целью увеличения стабильности электретного эффекта необходима гидрофобизация поверхности SiO_2 – нанесение на его поверхность тонких (наноразмерных) водоотталкивающих покрытий. Приведены экспериментальные результаты по стабильности электретного поверхностного потенциала при использовании различных гидрофобизаторов. Наиболее перспективными для использования в качестве гидрофобизаторов являются высокотемпературный фоторезист ФПТ-1-40 и полиимидные нанослоевые композиции – пленки Ленгмюра – Блуджетт.

Ключевые слова: электрическое поле, электрет, диоксид кремния, гидрофобизация

Как цитировать эту статью: Пщелко Н.С. Использование наноразмерных гидрофобизирующих покрытий для получения электретов на основе диоксида кремния // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 146-152. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.146

Введение. Стабильный электретный эффект, сравнительно недавно обнаруженный в диоксиде кремния (SiO_2) [2, 13], открывает возможность применения электретов на основе этого материала в качестве источников постоянных полей миниатюрных электроакустических преобразователей, так как технология изготовления микроэлектретного преобразователя может быть совмещена со стандартной кремниевой технологией изготовления микросхем [5, 6, 8]. Очевидно, в этом случае удобно в качестве электрета использовать SiO_2 . Создание стабильного электрета на основе этого материала является актуальной задачей, использование электретов из SiO_2 позволит широко внедрить их в современную стандартную планарную кремниевую технологию изготовления микросхем. Это, в частности, позволило бы создать миниатюрные электретные микрофоны и другие датчики, встроенные непосредственно в микросхему и изготавливаемые одновременно с самой микросхемой в едином технологическом цикле. Хотя на сегодняшний день имеется значительный задел по контролю параметров, расчету и оптимизации таких конструкций [10-13], эта задача окончательно не решена из-за отсутствия стабильного во времени электрета на основе SiO_2 . Задача получения большого по величине стабильного и устойчивого к внешним воздействиям электрического заряда (ЭЗ) в SiO_2 представляет интерес с точки зрения возможности повышения адгезии различных покрытий, наносимых непосредственно на SiO_2 или на другие объекты с использованием создаваемого электретом электрического поля. Сильное влияние электрического поля на адгезию доказано как теоретически, так и экспериментально [9, 14, 15, 17].

Значительный интерес представляет использование электретов на основе SiO_2 в различных технологиях, которые используются или могут быть применены в металлургии и обогащении. Рассмотрим простой пример. Для использования крупных кусков добытой руды ее подвергают дроблению. Различают крупное дробление, среднее, а также мелкое измельчение и тонкое измельчение. Крупное, среднее и мелкое дробление осуществляют в дробилках, а измельчение – в мельницах. Дробление можно выполнять раздавливанием, истиранием, раскалыванием, ударом и сочетанием перечисленных способов. В этих процессах размеры частиц уменьшаются примерно от 1000 до 1 мм. Очевидно, рассмотренные процессы сопровождаются вибрациями и большим числом других физических эффектов, в частности, акустических. Получение этой информации с помощью электретных преобразователей (акселерометров, микрофонов, пороговых датчиков дозы радиации, запыленности и др.) представляет очевидный интерес. Следует отметить, что электрет

тризванный диоксид кремния, как неорганический материал, значительно выигрывает в плане возможностей его использования по сравнению с традиционными электретами на основе полимерных материалов. Кроме того, возможность миниатюризации датчиков на основе SiO_2 открывает дополнительные возможности. Другим аспектом, связанным с перспективностью использования электретов в металлургии и обогащении, является внешнее электрическое поле электрета. Это поле аналогично традиционно используемому электростатическому полю, создаваемому внешним источником высокого напряжения, которое нашло применение в различных фильтрах, сепараторах, пылеулавливателях и др. Использование электретов открывает перспективы для значительного уменьшения применяемых электрических напряжений или даже отказа от них. Высокая по сравнению с полимерами твердость SiO_2 в этом отношении выгодно отличает данный материал от традиционно используемых электретов.

Наконец, электрическое поле электрета на основе SiO_2 может оказаться востребованным для самых разнообразных применений. В частности, известно о его влиянии на биологические объекты, на процессы горения и др. [7].

В первых конструкциях полупроводниковых преобразователей в качестве электрета использовалась полимерная пленка, которая закреплялась на поверхности SiO_2 . Существенные недостатки таких структур выявились в процессе сборки. Операции, связанные с закреплением пленки на диоксиде кремния, плохо согласуются со стандартной интегральной технологией. Кроме того, закрепление пленки происходит при высокой температуре с использованием плазменного разряда, что ухудшает электретные свойства фторопласта и препятствует серийному выпуску таких преобразователей. Использование SiO_2 как электретного материала позволяет избавиться от указанных недостатков, сохраняя перечисленные преимущества.

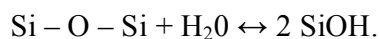
Методология исследования. Несмотря на то, что SiO_2 находит широкое применение в технологии изготовления полупроводниковых приборов, многие физические процессы и явления, определяющие эксплуатационные характеристики диоксида кремния, такие как способность сохранять внедренный ЭЗ, локализация этого заряда, влияние поверхностных явлений на спад поверхностного потенциала, не совсем ясны. В этой связи проводятся интенсивные исследования, направленные на изучение механизмов появления и локализации ЭЗ в SiO_2 в зависимости от технологии его формирования, а также возможностей использования неразрушающего контроля соответствующих МДП-структур.

В настоящее время на основе данных термоактивационной токовой спектроскопии [1, 2] считается, что в диоксиде кремния существует четыре вида ловушек и соответствующих ЭЗ:

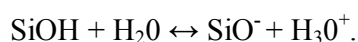
1. ЭЗ, захваченный в окисле Q_{it} , представляющий собой заряд электронных состояний, которые локализованы на границе раздела Si-SiO_2 .
2. Фиксированный ЭЗ окисла Q_f , расположенный на границе раздела или в непосредственной близости от нее.
3. ЭЗ, захваченный в окисле Q_{ot} . Этот заряд возникает, например, при рентгеновском облучении структур или инъекции горячих электронов в диэлектрик. Соответствующие ловушки более или менее равномерно распределены по толщине слоя окисла.
4. ЭЗ подвижных ионов Q_m обусловлен присутствием в термическом оксиде кремния положительно заряженных ионов щелочных металлов $\text{Li}^+ \text{Na}^+ \text{K}^+$, а также ионов H^+ , распределенных по объему оксида.

Из всех этих видов заряда три вида Q_{it} , Q_f , Q_m , по-видимому, не могут вызвать стабильный электретный эффект в силу своей подвижности, либо местоположения. Можно предположить, что заряд, влияющий на устойчивость электретного эффекта, создается носителями типа Q_{ot} , которые в процессе инъекции заменяют нейтральные центры захвата. Вероятно, образование заряда Q_{ot} связано с диссоциацией воды в SiO_2 .

Механизм захвата может быть представлен в виде химической реакции. Первый этап – образование гидроксильных групп:

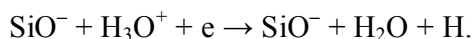


Второй этап – гидролиз молекул воды на поверхности SiO_2 :





Далее предполагается, что входящий электрон захватывается протонодонорным центром:



Эта электрохимическая реакция приводит к образованию стабильного отрицательного заряда с малой вероятностью появления в этом месте нейтральной ловушки, что подтверждается экспериментально [2].

Уменьшение инжектированного в электрет заряда может происходить вследствие наличия объемной или поверхностной проводимости, а также экранировки этого заряда зарядами противоположного знака из атмосферы, приводящих при высокой окружающей влажности к катастрофическому падению поверхностного потенциала электрета [3, 16]. Поэтому с целью увеличения стабильности электретного эффекта необходима гидрофобизация поверхности SiO_2 – нанесение на его поверхность тонких (наноразмерных) водоотталкивающих покрытий.

Для электретов типична сильная зависимость стабильности как от способа получения, так и от способа модификации их поверхности. Как показали проведенные исследования, в полной мере это наблюдение можно отнести к электретам на основе SiO_2 . В настоящее время достигнут значительный прогресс в решении проблемы получения стабильного электрета на основе SiO_2 . Вероятно, наиболее перспективными гидрофобизирующими покрытиями для SiO_2 являются полиимидные нанослоевые композиции – пленки Ленгмюра – Блоджетт [2, 6, 8]. Использование данных покрытий позволяет получить не только стабильный электрет, но и совместить его получение со стандартным кремниевым процессом, в частности, с использованием высоких температур. Мы производили в ряде этих экспериментов измерения поверхностного потенциала электрета и участвовали в разработке конструкций субминиатюрных преобразователей на основе SiO_2 . Однако наиболее подробные результаты были нами получены при проведении работ по получению стабильного электрета из SiO_2 . В отличие от пленок Ленгмюр – Блоджетт, получение которых требует специального оборудования, изучалась возможность применения более доступных материалов и технологий.

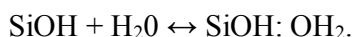
Результаты и обсуждение. Исследовались три группы различных образцов: негидрофобизированного, гидрофобизированного винилтриэтоксисилом (ВТЭС) и гидрофобизированного гексаметилсилазаном (ГМДС). В результате экспериментов было получено, что отоженный образец обладает большим удельным поверхностным сопротивлением по сравнению с модифицированными образцами [11]. Таким образом, характерное свойство поверхности SiO_2 – значительная зависимость удельного сопротивления от исходного состояния гидратного покрова образца, а не только от влажности среды.

На рис.1 показано возможное состояния поверхности SiO_2 с учетом происходящих на поверхности процессов адсорбции: физической адсорбции и хемосорбции влаги, которые могут снижать стабильность электретного потенциала.

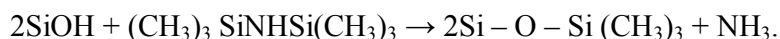
При взаимодействии паров воды с поверхностью SiO_2 происходит реакция



В дальнейшем полярные гидроксильные группы притягивают молекулы воды:



При обработке гидрофобизатором затрудняется протонная проводимость вследствие движения протонов в гидроксильных группах и образования проводящего монослоя воды на поверхности SiO_2 . Например, при обработке гидрофобизатором ГМДС происходит следующая реакция (рис.2):

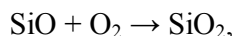


Такая обработка уменьшает количество гидроксильных групп на поверхности, но не уменьшает число внутренних гидроксильных групп.

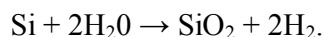
Высокотемпературное окисление кремния является одним из распространенных методов получения SiO_2 . Этот метод применяется и для формирования пленок диоксида кремния для электретов. Условия окисления (температура, давление окислителя, среда окисления и т.д.) определяют скорость роста и количество дефектов в оксиде.

Окисление может происходить в среде «сухого» кислорода, также возможен процесс с участием воды: влажное окисление, окисление «в парах воды», или окисление во «влажном» кислороде.

При окислении в «сухом» кислороде происходит реакция:



а при участии воды в процессе окисления:



Исследования показали, что лучшими электретными свойствами обладает диоксид кремния, полученный в атмосфере «влажного» кислорода. Вероятно, это связано с большим количеством групп Si-OH на поверхности оксида во «влажном» SiO₂, что повышает эффективность действия гидрофобизирующих покрытий при модификации поверхности SiO₂.

Выявлено, что другие способы получения оксида, например, электрохимический или плазмохимический, не позволяют получить диоксид кремния с хорошими электретными свойствами.

В результате исследований были определены партии образцов, обнаруживших достаточно хорошую стабильность электретного поверхностного потенциала U_s при комнатных условиях хранения. Как видно из приведенных в табл.1 данных, наилучшие результаты по стабильности показали партии А и К (термический окисел), D и E (плазмохимический окисел) и L (двухслойная структура SiO₂-Si₃N₄). Были сделаны выводы о целесообразности использования в дальнейших исследованиях именно этих образцов, а также о выборе соответствующих технологий.

Таблица 1

Зависимость спада U_s от времени хранения заряженного образца в комнатных условиях после электризации

Партия	Номер образца	$U_{\text{сетки}}$, В	$U_{\text{эо}}$, В	U_s , В (после хранения образца в комнатных условиях)													
				2 ч	1 сут	2 сут	3 сут	5 сут	6 сут	8 сут	9 сут	12 сут	13 сут	15 сут	19 сут	27 сут	29 сут
А	А-1	-280	-270	-216	-222	-230	-214	-207	-209	-229	-220	-220	-	-221	-215	-	-220
	А-2	-280	-260	-220	-214	-208	-234	-234	-228	-211	-215	-215	-	-220	-221	-	-218
В	В-1	-255	-166	-141	-135	-136	-128	-120	-123	-119	-119	-115	-	-113	-110	-	-109
	В-2	-255	-166	-140	-126	-126	-125	-123	-121	-116	-116	-114	-	-114	-112	-	-110
С	С-1	-255	-251	-176	-157	-162	-163	-155	-148	-140	-131	-136	-	-135	-135	-	-132
	С-2	-255	-250	-207	-170	-180	-176	-166	-164	-163	-170	-169	-	-158	-151	-	-149
D	D-1	-255	-257	-200	-204	-201	-203	-195	-187	-187	-187	-186	-	-175	-173	-	-173
	D-2	-255	-257	-228	-227	-223	-221	-215	-202	-203	-206	-205	-	-202	-192	-	-189
E	E-1	-255	-256	-252	-252	-252	-250	-250	-253	-249	-245	-247	-	-247	-232	-	-232
	E-2	-255	-256	-232	-208	-195	-197	-185	-185	-181	-174	-173	-	-173	-160	-	-153
F	F-1	-185	-81	-40	-24	-16	-16	-13	-15	-	-	-	-	-	-	-	-
	F-2	-185	-105	-70	-28	-23	-17	-17	-17	-	-	-	-	-	-	-	-
Н	Н-1	-160	-69	-	-10	-	-4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
К	К-1	-280	-280	-282	-282	-280	-280	-282	-280	-279	-273	-271	-	-271	-275	-	-280
	К-2	-280	-280	-279	-283	-280	-279	-283	-285	-278	-274	-182	-	-278	-276	-	-276
L	L-1	-300	-298	-	-286	-	-279	-278	-276	-274	-274	-	-268	-	-	-	-263
	L-2	-300	-296	-	-292	-	-290	-285	-285	-278	-278	-	-279	-	-	-	-266
M	M-1	-160	-93	-	-7	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	M-2	-160	-115	-	-18	-	-13	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	N-1	-160	-123	-	-29	-	-14	-19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	N-2	-160	-122	-	-28	-	-19	-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-

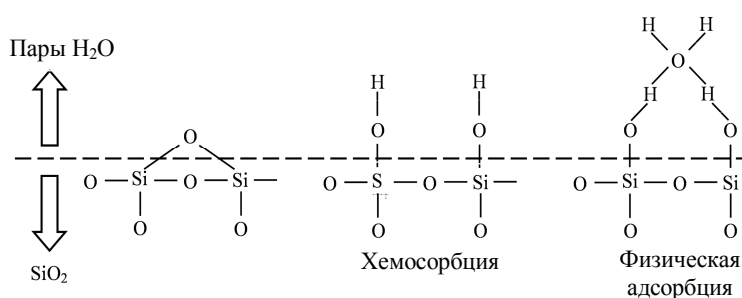


Рис.1. Адсорбция паров воды на поверхности SiO₂

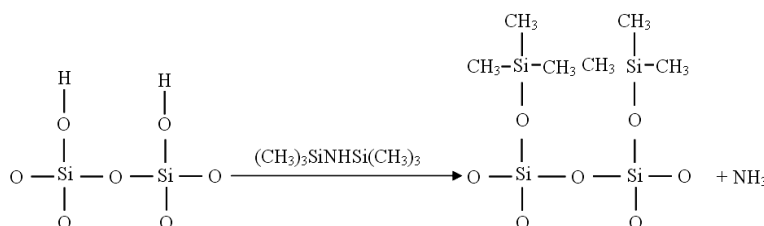


Рис.2. Реакция образования гидрофобизирующего покрытия модификации ГМДС на поверхности SiO₂



В рамках проделанной работы отработывалась процедура нанесения различных видов гидрофобизаторов, препятствующих накоплению пленки влаги на гидрофильной поверхности SiO_2 и приводящей к катастрофическому уменьшению поверхностного потенциала: ГМДС (гексаметилдисилазан): ДМДХС (диметилдихлорсилан).

Гидрофобизаторы наносились на образцы партии К и D. Образцы партии D отличаются друг от друга режимом нанесения ГМДС, что выражается различием в величине угла смачивания. После нанесения гидрофобизирующего покрытия были произведены испытания наиболее перспективных образцов во влажной среде.

Образцы были помещены в камеру с относительной влажностью 95-98 % при $T = 20$ °С. Основные результаты испытаний представлены в табл.2.

Таблица 2

Зависимость спада U , от времени хранения после электризации заряженного образца при условиях повышенной влажности, после обработки гидрофобизирующим составом

Партия	Образец	Номер образца	$U_{\text{сетки}}$, В	Угол смачивания, град	$U_{\text{зо}}$, В	U_3 , В								
						Время хранения образца в условиях повышенной влажности								
						1 сут	3 сут	4 сут	6 сут	10 сут	13 сут	17 сут	27 сут	
1	К-ДМДХС	К-1	-300	95	-303	-297	-292	-289	-287	-276	-283	-274	-270	
2		К-2		95		-299	-297	-296	-297	-291	-294	-297	-280	-280
3	К-ГМДС	К-3		73	-300	-300	-287	-285	-282	-278	-258	-252	-237	
4		К-4		70		-298	-300	-295	-294	-290	-294	-293	-278	-270
5	D-ГМДС	D-1		75	-298	-225	-147	-111	-74	-35	-26	0	0	
6		D-2		80		-298	-290	-264	-260	-239	-207	-182	-150	-73
7		D-3		80		-298	-269	-260	-248	-220	-172	-137	-106	-34
8		D-4		77		-300	-192	-77	-61	-34	-21	-18	0	0
9		D-5		85		-295	-275	-268	-263	-257	-263	-267	-249	-205

Следует отметить, что для образцов одной партии (в частности, D), гидрофобизированных одним и тем же материалом, наблюдается корреляция между увеличением значения угла смачивания и увеличением стабильности электретного потенциала при выдержке образцов в условиях повышенной влажности, но для образцов из различных партий и для разных гидрофобизирующих материалов этой корреляции нет.

Была также опробована идея использования позитивного высокотемпературного фоторезиста ФПТ-1-40 в качестве гидрофобизатора для электретных элементов из SiO_2 [4].

Гидрофобизатор Ф-П, являясь позитивным фоторезистом, легко встраивается в стандартный планарный процесс и совместим со всеми стандартными процедурами травления, очистки и т.д. Этот тип гидрофобизатора наносился на образцы партии А (толщина слоя диоксида кремния 0,5 мкм). Фоторезист наносился центрифугированием. Толщина нанесенного слоя составляла примерно 0,4 мкм. Затем была выполнена засветка фоторезиста и сформированы образцы размером 10×12 мм². Электризация проводилась в стандартном режиме через фторопластовую маску с окном 7×7 мм². Потенциал сетки составлял 250 В. Затем уже электризованные образцы были подвергнуты термообработке при 200 °С в течение 1 ч. В ходе этой термообработки электретный потенциал образцов снизился вследствие дрейфа ЭЗ через слой гидрофобизатора к границе раздела гидрофобизатора с диоксидом кремния. Далее три образца испытывались в нормальных условиях и еще три – в условиях повышенной влажности. Результаты испытаний образцов в комнатных условиях и при повышенной влажности представлены в табл.3, 4.

Таблица 3

Зависимость спада U , от времени хранения в комнатных условиях для образцов, обработанных высокотемпературным гидрофобизатором ФПТ-1-40

Образец	$U_{\text{сетки}}$, В	$U_{\text{зо}}$, В	U_3 , после т/о, В	U_3 , В					
				1 сут	3 сут	5 сут	6 сут	10 сут	15 сут
Ф-4	-250	-240	-169	-171	-170	-171	-171	-166	-166
Ф-5		-237	-161	-164	-164	-160	-162	-157	-159
Ф-6		-237	-171	-171	-168	-172	-170	-172	-171

Таблица 4

Зависимость спада U_s от времени хранения в условиях повышенной влажности для образцов, обработанных высокотемпературным гидрофобизатором ФПТ-1-40

Образец	$U_{сетки}$, В	U_{30} , В	U_s , после т/о, В	U_s , В (влажность 95-98 %, $T = 20$ °С)					
				1 сут	3 сут	5 сут	6 сут	10 сут	15 сут
Ф-1	-250	-253	-143	-143	-133	-119	-118	-107	-95
Ф-2		-240	-142	-142	-135	-124	-120	-102	-76
Ф-3		-240	-144	-144	-140	-130	-125	-113	-89

Первый эксперимент по использованию этого материала в качестве гидрофобизатора дал следующие результаты:

- термообработка при 200 °С в течение 1 ч для стабилизации электретного потенциала привела к примерно 30-40 %-ному спаду потенциала, что объясняется, на наш взгляд, дрейфом ЭЗ сквозь слой гидрофобизатора с последующим закреплением заряда на поверхности диоксида кремния;

- при хранении в комнатных условиях в течение двух недель электретный потенциал практически не изменился;

- выдержка в условиях повышенной относительной влажности (95 %) при комнатной температуре в течение 10 суток привела к 28 % – ному спаду электретного потенциала, что значительно хуже, чем в случае ГМДС. Однако, есть реальная перспектива существенно улучшить этот результат при продолжении экспериментов по отработке режимов нанесения и использования гидрофобизатора.

На основе проведенных исследований можно сформулировать предлагаемые варианты технологического процесса для получения стабильного электрета из SiO₂:

Первый вариант:

1. Термическое окисление исходной пластины в стандартном режиме по технологии ТЦ (кислород сухой – влажный – сухой).

2. Термообработка в вакууме при $T = 550$ °С, 1 ч.

3. Нанесение ГМДС из паровой фазы. Пластина предварительно должна быть отмыта и высушена при $T = 100$ °С. Затем выдержка в замкнутом объеме в течение 10 мин в парах ГМДС, нагретого до $T = 60$ °С. Краевой угол смачивания гидрофобизированных образцов должен быть не меньше 80 град.

4. Электризация электретных элементов в коронном разряде с использованием трехэлектродной схемы. Требуемое значение потенциала электретного элемента задается потенциалом сеточного электрода и может варьироваться от -50 до -300 В. Рекомендуемое время электризации 3 мин.

5. Термостабилизация электретного потенциала при $T = 130$ °С в течение 1 ч.

Второй вариант:

1. Термическое окисление исходной пластины по технологии ТЦ (кислород сухой – влажный – сухой).

2. Термообработка в вакууме при $T = 550$ °С в течение 1 ч.

3. Нанесение в качестве гидрофобизатора на всю пластину слоя позитивного фоторезиста марки Ф-П толщиной 0,1-0,4 мкм методом центрифугирования.

4. Засветка с целью формирования электретных элементов заданной геометрии.

5. Травление фоторезиста.

6. Задубливание (температура задубливания должна на 20 °С превышать максимальную температуру, используемую в последующих технологических операциях). Максимальная рабочая температура гидрофобизатора Ф-П 450 °С.

7. Электризация электретных элементов в коронном разряде с использованием трехэлектродной схемы. Требуемое значение потенциала электретного элемента задается потенциалом сеточного электрода и может варьироваться от -50 до -300 В. Рекомендуемое время электризации 3 мин.



8. Термостабилизация электретного потенциала путем нагрева со средней скоростью 10 град/мин до $T = 300$ °С с последующим охлаждением примерно с той же скоростью.

Заключение. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для получения стабильного электрета на основе диоксида кремния окисный слой необходимо получать в режиме окисления в атмосфере «влажного» кислорода

2. Все исследованные гидрофобизаторы позволили существенно повысить стабильность заряда SiO_2 до уровней, позволяющих использовать такой электрет в некоторых устройствах электроники.

3. Наиболее перспективными для использования в качестве гидрофобизаторов являются высокотемпературный фоторезист ФПТ-1-40 и полиимидные нанослоевые композиции – пленки Ленгмюра – Блуджетт.

4. Многолетней стабильности электретов на основе диоксида кремния, требуемой в устройствах электроники в ряде случаев, достигнуто не было. Необходимы и перспективны дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гороховатский Ю.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков / Ю.А.Гороховатский, Г.А.Бордовский. М.: Наука, 1991. 248 с.
2. Козодаев Д.А. Электретный эффект в структурах Si-SiO_2 и $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$: Автореф. дис...канд. техн. наук / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет. СПб, 2002. 16 с.
3. Кузьмин Ю.И. Перколяционная модель релаксации электрета / Ю.И.Кузьмин, В.Н.Таиров // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 5. С. 964-965.
4. Модификация термостойких фотолаков для новых областей применения / Н.В.Климова, Г.К.Лебедева, Н.С.Щелко, Л.В.Рудая, И.М.Соколова, Т.А.Юрре // Петербургский журнал электроники. 2002. № 3. С. 33-37.
5. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. В.В.Лучинина, Ю.М.Таирова. М.: Физматлит. 2006. 552 с.
6. От молекулярного наслаивания к эпитаксии органических веществ методом Ленгмюра – Блуджетт / С.И.Голоудина, П.П.Карагеоргиев, В.В.Лучинин, В.М.Пасюта // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 12. С. 34-38.
7. Патент РФ № 2562505. Способ повышения эффективности сгорания углеводородного топлива / В.С.Нагорный, Д.Ю.Колодяжный, Е.Ю.Марчуков, С.А.Федоров, Н.С.Щелко. Опубл. 27.06.2015. Бюл. № 25.
8. Полиимидные нанослоевые композиции, как стабилизирующие покрытия микроэлектронных структур / С.И.Голоудина, В.М.Пасюта, Д.А.Козодаев, В.В.Кудрявцев, В.В.Лучинин, В.П.Склизкова, В.И.Закржевский, Д.Э.Темнов // Петербургский журнал электроники. 2001. № 4. С. 79-86.
9. Щелко Н.С. Анализ влияния пространственного распределения заряда на электроадгезионные силы // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 296-305.
10. Щелко Н.С. Методика определения параметров капсюлей конденсаторных структур с подвижными обкладками // Записки Горного института. 2010. Т. 187. С. 117-124.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661225. Программа для определения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления высокоомных материалов / Т.Р.Акчурин, Н.С.Щелко, Е.Г.Водкайло. Опубл.20.11.2015.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610272. Программа для контроля параметров емкостных структур методом вольт-фарадных характеристик / Т.Р.Акчурин, Е.Г.Водкайло, Н.С.Щелко. Опубл. 20.02.2016.
13. Kozodaev D.A. Analysis of Electret Sub-Miniature Microphones / D.A.Kozodaev, N.S.Pshchelko, V.I.Zakrzhevskiy // Proc. ISE – 10. Athens. 1999. P. 973-978.
14. Low temperature wafer anodic bonding / J.Wei, H.Xie, M.L.Nai, C.K.Wong, L.C.Lee // J.Micromech. Microeng. 2003. Vol. 13. P. 217-222.
15. Pshchelko N.S. Modeling of physical and chemical processes of anodic bonding technology / N.S.Pshchelko, M.P.Sevryugina // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. P. 513-518.
16. The Percolation Behavior of Electret at Presence of Water Condensation / U.I.Kuzmin, N.S.Pshchelko, I.M.Sokolova, V.I.Zakrzhevskiy // Proc. ISE –8. Paris. 1994. P. 124-129.
17. Tomaev V.V. Polarization of Surface Layers of Ionic Dielectrics at the Interface Between the Electroadhesive Contact and a Dielectric / V.V.Tomaev, N.S.Pshchelko // Glass Physics and Chemistry. 2016. Vol. 42. № 1. P. 105-109.

Автор Н.С.Щелко, д-р техн. наук, профессор, nikolsp@mail.ru (Военная академия связи им. С.М.Буденного, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 11.05.2017.