

Исследование методов анизотропного плазмохимического травления low- k слоев с защитой пористой структуры материала*

А.В. Мяконьких, Р.А. Гайдукасов, В.О. Кузьменко

В статье обобщаются результаты исследования процессов криогенного плазменного травления диэлектриков с ультранизкой диэлектрической проницаемостью для применения в системах металлизации интегральных схем с проектной нормой менее 10 нм. Рассмотрены механизмы деградации пленок в процессе плазменного травления и исследуется подход, основанный на адсорбции в порах сконденсированного плазмообразующего газа. Приведены экспериментальные результаты, касающиеся разработки и применения методов контроля заполнения пор пленки *in situ*. Приведены результаты исследования параметров плазмы бромсодержащих газов (CF_3Br и $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$) и характера деградации химического состава пленок после травления. Для сравнения эти же характеристики приведены для применявшейся ранее плазмы CF_4 .

Ключевые слова: диэлектрики с ультранизкой диэлектрической проницаемостью, повреждения при плазменном травлении, конденсация, адсорбция в нанопорах, диагностика плазмы.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-29-27025).

Введение

Постоянное уменьшение критических размеров элементов интегральных схем в течение последних десятилетий приводит к ряду технологических трудностей. Увеличение быстродействия транзисторов и увеличение длины проводников, их соединяющих, с одновременным уменьшением как поперечных размеров проводников, так и зазоров между ними, накладывает ограничение на быстродействие, которое определяется величиной RC , где R – характерное сопротивление проводников, а C – электрическая емкость между ними.

Один из подходов к разрешению этого противоречия, уже устоявшийся в промышленности, – применение диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью и в последнее десятилетие – пористых диэлектриков [1, 2]. Низкая диэлектрическая проницаемость достигается в результате получения высокой концентрации неполярных химических связей в диэлектрике. Микроструктурирование таких диэлектриков (создание системы канавок и отверстий) происходит в химически активной плазме, как правило, фторсодержащей. Радикалы фтора, проникая в поры, приводят к разрыву неполярных связей и образованию полярных, что ведет к деградации диэлектрика.

Один из подходов, позволяющих избежать деградации диэлектрика при плазменном травлении, – за-

щита пористой структуры материала при травлении. Среди подходов к решению этой задачи можно отметить криогенное травление, основанное на том, что при низких температурах газообразные соединения с высокой массой могут конденсироваться в наноразмерных порах даже при малых давлениях. Было показано [3], что деградация диэлектриков в плазме CF_3Br неожиданно оказывается более значительной, чем в модельном случае (CF_4). Этот результат входит в противоречие с известным из более ранних исследований, что в плазме CF_3Br доминируют радикалы брома и влияние атомарного фтора исключено. Выполненное нами актинометрическое исследование концентраций фтора и брома в ICP разряде CF_3Br показало, что доля фтора в используемом диапазоне давлений достаточно велика.

Несмотря на то, что разработаны различные подходы к реализации защиты пористой структуры от воздействия плазмы при травлении [4], задача снижения уровня деградации



МЯКОНЫХ
Андрей Валерьевич
Физико-технологический
институт им. К.А. Валиева РАН



ГАЙДУКАСОВ
Рафаэль Алексеевич
Физико-технологический
институт им. К.А. Валиева РАН



КУЗЬМЕНКО
Виталий Олегович
Физико-технологический
институт им. К.А. Валиева РАН

диэлектриков с ультранизкой диэлектрической проницаемостью остается актуальной. Подходы к такой задаче строятся как на оптимизации характеристик самих диэлектриков, позволяющей сделать их более стойкими к деградации [5], так и на реализации защиты пор непосредственно в плазме, например при криогенном травлении.

Одной из задач решаемой в данной статье было создание метода измерения степени заполнения пор адсорбатом в условиях, приближенных к условиям криогенного травления по температуре и давлению. Это было реализовано при помощи спектральной рефлектометрии непосредственно в камере установки плазменного травления.

В работе было исследовано криогенное травление диэлектрика с ультранизкой диэлектрической проницаемостью при использовании в качестве газа для плазмохимического травления $C_2F_4Br_2$. Для защиты материала применяется метод предварительного заполнения пор газом, в котором будет проводиться травление при криогенных температурах. Данный газ в своем составе имеет два атома брома, которые легко отрываются от молекулы, способствуя ионизации, и низкую, по сравнению с другими обычно используемыми соединениями, температуру конденсации (она составляет порядка $-92^\circ C$ при давлении 20 мТорр по сравнению с, например, $-110^\circ C$ для C_4F_8). Наблюдаемая степень деградации (по убыли концентрации связей $Si-CH_3$) в диапазоне $-20 \div -120^\circ C$ составила 0.14–0.01 и монотонно снижается при снижении температуры. Таким образом были получены анизотропные структуры в органосиликатном пористом диэлектрике с низкой диэлектрической проницаемостью, применимые для проектных норм до 28 нм и ниже.

Кроме того, представлены результаты сравнительного исследования индуктивно-связанной низкотемпературной плазмы CF_4 , $CBrF_3$ и C_2BrF_4 в типичных условиях реактивно-ионного травления для диэлектриков. Схема исследования включала диагностику

плазмы зондами Ленгмюра, оптическую эмиссионную спектроскопию и моделирование [6]. Последнее должно было проверить экспериментальные данные на предмет их релевантности. Основное внимание уделялось характеристикам плазмы, связанным с электронами и ионами, а также плотности атомов F и Br, которые действуют как активные частицы при травлении органосиликатных стекол и других материалов с ультранизкой диэлектрической проницаемостью на основе кремнийорганических соединений.

Возможности *in situ* исследования конденсации плазмообразующего газа в пленках пористых диэлектриков

Пористость образца, средний радиус пор и распределение пор по размерам являются одними из важнейших параметров, с помощью которых можно анализировать как созданные образцы, так и подвергнутые различным физическим процессам. Методы, основанные на заполнении пор адсорбатом, такие как эллипсометрическая порометрия [7] и кварцевые микровесы в сочетании с адсорбцией [8], не чувствительны к закрытым порам, хотя широко применяются и являются общедоступными. Измерение полной пористости возможно методами рентгеновской дифракции [9] и лучевой позитронной аннигиляционной спектроскопии (PALS) [10]. Первый метод основан на анализе рассеянных лучей при прохождении их через образец. Для анализа данных необходимо строить модель для определения электронной плотности, поэтому в результате есть вероятность упустить особенности в распределении пор по размерам. В свою очередь, PALS является мощным методом, способным исследовать нанопоры или дефекты в широком диапазоне размеров от 0.3 нм до 30 нм. Кроме того, PALS с использованием пучка позволяет изучать образцы послойно (толщиной от нескольких нанометров до нескольких микрон). Недостатком этого метода является сложность экспериментальной реализации метода.

В настоящей работе был разработан метод для определения *in situ* изменения коэффициента преломления пленки пористого low- k -диэлектрика и его толщины с использованием спектральной рефлектометрии. Метод схож с методом лазерной интерферометрии, но коэффициент отражения измеряется не для одной длины волны, а в большом диапазоне (200–900 нм), что позволит получать необходимые данные для успешного решения устойчивого решения обратной задачи. Метод был применен для исследования процесса адсорбции газа $C_2F_4Br_2$ в пористом диэлектрике при криогенных температурах и пониженном давлении, характерном для ICP источников плазмы, используемых при травлении. Исследован интервал температур от $0^\circ C$ до $-120^\circ C$,

представляющий интерес в рабочем диапазоне давлений. Измеренная зависимость показателя преломления от температуры приведена на рис. 1. В качестве образца использовали low- k -пленки пористых диэлектриков (30% открытой пористости, значение диэлектрической проницаемости $k=2,3$) толщиной 200 мкм на кремниевой подложке. По данным спектральной эллипсометрии, начальный показатель преломления пленки составил 1.28.

Из рисунка видно, что использование газа $C_2F_4Br_2$ позволяет частично пассивировать поверхность пор при температурах ниже $-40^\circ C$.

Результаты исследования деградации пленок с ультранизкой диэлектрической проницаемостью при плазменном травлении

Проведенное предварительное исследование [3] низкотемпературного травления органосиликатных диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью в CF_3Br - и CF_4 -плазме показало значительно большую степень деградации диэлектрика после травления в бромсодержащей плазме, вопреки ожиданиям. Были основания предполагать, что в CF_3Br будут доминировать радикалы брома, обладающие меньшей химической активностью.

Для исследования криогенного травления low- k -диэлектрика в качестве исследуемого образца был взят осажденный на кремниевую пластину spin-on методом p-OSG low- k -диэлектрик толщиной около 200 нм. Метод измерения пористости и размера пор low- k -диэлектрика основан на анализе изменения оптических свойств материала при проникновении и конденсации органических паров в порах (спектральная эллипсометрия). Измерения показали, что в исследуемом материале средний радиус пор составляет 1.1 нм, а открытая

пористость – порядка 30 %. Измерения диэлектрической проницаемости методом ртутного зонда при 100 кГц показали значение около 2.8 [11].

Криогенный процесс травления был проведен в установке PlasmaLab 100 Dual (Oxford Instruments). Столик охлаждался жидким азотом, причем для хорошего термического контакта пластины со столиком использовались кварцевые зажимы и поток гелия под пластиной (доля гелия в камере не превышала 2%). Разряд в плазме возбуждался на частоте 2 МГц, ВЧ-смещение осуществлялось на частоте 13.56 МГц. При травлении использовались образцы с геометрическими размерами 2×2 см². Плазмохимическое травление проводилось в диапазоне температур от $0^\circ C$ до $-120^\circ C$ с шагом в двадцать градусов по 60–120 секунд.

Химический состав исходной пленки и подвергнутых травлению пленок были измерены с помощью ИК-Фурье-спектроскопии. Снижение плазменно-индуцированного повреждения (PID) при низкой температуре процесса наблюдается в обоих случаях. Показано, что уменьшение деградации связано с защитными эффектами осажденных на поверхности продуктов реакции (CH_xF_yBr -, $SiBr_x$ - и CF_x -полимеров). Продукты реакции затем могут быть удалены путем термического отжига. Толщина CF_x -полимера возрастает с понижением температуры. Этот слой полимера приводит к сильному уменьшению скорости диффузии атомов фтора и, как следствие, к уменьшению деградации. Бромсодержащие продукты травления являются менее эффективными для защиты поверхности с низкой диэлектрической проницаемостью от деградации.

В дальнейших исследованиях [11] было решено использовать бромсодержащий газ с большей молекулярной массой для стимулирования его конденсации в порах. В качестве плазмообразующего газа был выбран $C_2F_4Br_2$ -конденсация которого ожидалась при умеренных пониженных температурах.

Было установлено, что скорость травления и показатель преломления

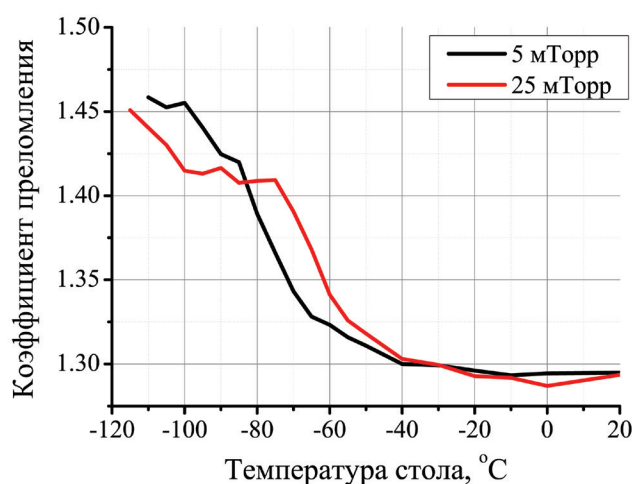


Рис. 1. Изменение показателя преломления пленки вследствие адсорбции газа $C_2F_4Br_2$ в порах исследуемого диэлектрика при давлениях 5 и 25 мТорр.

обработанных образцов немонотонно уменьшаются с уменьшением температуры. Причем скорость травления при приближении к криогенным температурам достаточно низкая (менее 5–10 нм/мин), что можно объяснить конденсацией плазмообразующего газа в порах диэлектрика и эффективным осаждением фторуглеродной пленки на поверхности диэлектрика. Дополнительно при низких температурах снижается реакционная способность радикалов фтора.

По результатам проведения измерений методом ИК-Фурье-спектроскопии для пленок, подвергавшихся травлению в плазме $C_2F_4Br_2$, было установлено, что при приближении к криогенным температурам обеднение Si–CH₃-пика (служащего для оценки величины концентрации сохранившихся неполярных связей) существенно уменьшается (например, при температуре –100 °C составляет порядка 3%). Отметим также, что при высоких температурах радикалы кислорода (образующиеся при травлении матрицы SiO₂) уменьшают толщину фторуглеродной пленки, но из-за конденсации газа в порах всё равно наблюдается низкая деструкция материала.

Исследование параметров плазмы фторбромсодержащих газов

Полученные результаты позволили сформулировать еще одну задачу данной работы – сравнительное исследование индуктивно-связанной плазмы CF_4 , $CBrF_3$ и $C_2Br_2F_4$ в типичных условиях реактивно-ионного травления. Интерес к малоизученным газам $CBrF_3$ и $C_2Br_2F_4$ обусловлен их улучшенными характеристиками травления кремния, обнаруженными в ранних работах [12–14], а также возможным применением для малоповреждающего травления пористых материалов с низким k -диэлектриком [15]. Последнее очень важно для создания многоуровневых структур межсоединений в схемах сверхбольшой интеграции (ULSI). Таким образом, эта технология сухого травления, связанная с ULSI, требует

обязательного понимания как механизмов травления, так и механизмов повреждения, которые обеспечиваются одними и теми же активными частицами, такими как атомы галогенов и энергичные ионы. Хотя в работе [16] пытались определить плотности атомов F и Br в плазме $CBrF_3$ с использованием оптического актинометрического подхода, соответствующие результаты не могут быть применены здесь из-за различных условий плазмы и типов разряда. Кроме того, в обеих работах не сообщалось о принципиально важных параметрах плазмы, связанных с электронами и ионами, таких как температура электронов, плотность плазмы и поток ионов. Поэтому нельзя даже предположить особенности кинетики атомов F и Br, а также оценить баланс между физическим и химическим путями травления. Присутствие CF_4 в приведенном выше ряду плазмообразующих газов мотивировано двумя причинами. Во-первых, плазма CF_4 является удобной модельной системой с хорошо известными свойствами. Поэтому совпадение данных моделирования и диагностики для плазмы CF_4 , безусловно, означает как адекватность применяемых методов диагностики, так и приемлемость соответствующих результатов для других плазменных систем. А во-вторых, экспериментальное сравнение традиционной CF_4 -плазмы с менее известными фторуглеродными плазмами при идентичных условиях работы позволяет проанализировать возможные различия, влияющие на процессы ионно-стимулированного травления.

Эксперименты проводились в условиях индукционного ВЧ (2.0 МГц) разряда, в реакторе PlasmaLab 100 (OIPT, UK). В качестве постоянных внешних параметров плазмы выступали скорость потока газа ($q=50$ ст. см³/мин) и вкладываемая мощность ($W=2\,500$ Вт), что соответствовало плотности мощности 0.05 Вт/см³. Варьируемым параметром служило давление газа, которое изменялось в диапазоне 5–20 мТорр.

Данные по электрофизическим параметрам плазмы получали с помощью одиночного зонда Ленгмюра (Espion, Hiden Analytical, UK). Для минимизации искажений результатов измерений из-за полимеробразования на зондах, перед и после каждого измерения проводилась очистка зондов в плазме 50% Ar + 50% O₂ в течение около 2 мин. Эффективность данной процедуры подтверждается удовлетворительной воспроизводимостью результатов в серии последовательных измерений при неизменных условиях возбуждения плазмы. Обработка зондовых вольт-амперных характеристик (BAX) с использованием известных положений зондовой теории для разрядов низкого давления обеспечивала данные по температуре электронов, суммарной концентрации положительных ионов и концентрации электронов.

Стационарные концентрации атомов фтора определяли методом оптической актинометрии с использо-

ванием аналитической пары F 703.8 нм / Ar 750.4 нм [21, 22]. Для обеих спектральных линий характерны возбуждение прямым электронным ударом и низкое время жизни возбужденного состояния, что позволяет пренебречь процессами неизлучательной релаксации.

Сечения возбуждения и параметры оптических переходов для атомов фтора и аргона хорошо известны по литературным данным. Ранее было показано, что данная методика обеспечивает удовлетворительное согласие измеренных концентраций атомов в плазме CF_4 с величинами, получаемыми при моделировании плазмы. Принимая во внимание хорошую изученность плазмы тетрафторметана в теоретическом плане, данный факт может рассматриваться как свидетельство адекватности результатов измерений.

Было обнаружено, что все три плазменные системы демонстрируют схожие изменения указанных параметров в зависимости от давления газа.

Основными особенностями плазмы $CBrF_3$ и $C_2Br_2F_4$ по отношению к CF_4 являются: а) более низкие температуры электронов; б) более высокие плотности плазмы и электроотрицательность; в) более высокие плотности атомов F с условием $[F] > [Br]$. Последнее явление, вероятно, связано с механизмом реакции $Br_2 + F \rightarrow BrF + Br$, поддерживаемым быстрой рекомбинацией $2Br \rightarrow Br_2$ на стенках камеры. Сочетание более высокой плотности ионов и более низкой плотности атомов F в бромсодержащих газах обеспечивает их преимущество в отношении нейтральных/заряженных частиц и в анизотропии травления.

В экспериментах с травлением кремниевых структур было показано, что принципиальными отличиями плазмы $C_2F_4Br_2$ от двух других исследованных составов плазмообразующего газа являются сочетание более высокой полимеризационной способности и скорости травления. Формальной причиной последней особенности является аномально высокая эффективная вероятность гетерогенной реакции $Si + xF \rightarrow SiF_x$, обусловленная дополнительной генерацией атомов фтора в слое полимера под действием ионной бомбардировки. Показано, что отсутствие корреляции в поведении скорости травления и плотности потока атомов фтора с ростом давления газа в обоих случаях обусловлено снижением эффективной вероятности взаимодействия. Наиболее реалистичными причинами этого являются снижение толщины полимерной пленки (в плазме $C_2F_4Br_2$) и конкурентная адсорбция нереагирующих частиц, приводящая к снижению доли свободных центров адсорбции для атомов фтора (в плазме CF_4).

Полученные результаты объясняют более сильную деградацию пленок диэлектриков с ультранизкой диэлектрической проницаемостью, наблюдаемую в плаз-

ме CF_3Br по сравнению с плазмой CF_4 . В то же время наблюдаемая пониженная деградация диэлектрика при травлении в плазме $C_2Br_2F_4$, по-видимому, объясняется адсорбцией плазмообразующего газа и продуктов травления в порах пленки. При этом снижается и скорость травления.

Заключение

Исследованный подход основан на проведении процесса плазменного травления при криогенных температурах образца, что приводит к конденсации в несоразмерных порах как плазмообразующего газа, так и продуктов травления, предохраняя материал стенок пор от воздействия химически активных радикалов плазмы.

В статье исследованы методы контроля и даны результаты исследования степени заполнения пор конденсатом плазмообразующего газа в условиях криогенного травления в зависимости от давления и показано, что использование газа $C_2F_4Br_2$ позволяет частично пассивировать поверхность пор при температурах ниже $-40^\circ C$.

Проведено детальное исследование плазмы бромсодержащих газов CF_3Br и $C_2F_4Br_2$ и (для сравнения результатов) CF_4 , применяемых для травления диэлектриков с ультранизкой диэлектрической проницаемостью. Основное внимание уделялось характеристикам плазмы, связанным с электронами и ионами, а также концентрации атомов F и Br, которые действуют как активные частицы при травлении материалов с ультранизкой диэлектрической проницаемостью на основе кремнийорганических соединений.

Работа поддержана РФФИ в рамках научно-исследовательского проекта №18-29-27025, а после завершения гранта исследования продолжены в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки Российской Федерации по теме № FFNN-2022-0020.

Литература

1. W. Volksen, R.D. Miller, G. Dubois
Chem. Rev., 2010, **110**(1), 56. DOI: 10.1021/cr9002819.
2. D. Shamiryan, M.R. Baklanov, S. Vanhaelemeersch, K. Maex
J. Vac. Sci. Technol. B, 2002, **20**(5), 1923. DOI: 10.1116/1.1502699.
3. A. Rezvanov, A.V. Miakonkikh, A.S. Vishnevskiy, K.V. Rudenko, M.R. Baklanov
J. Vac. Sci. Technol. B, 2017, **35**(2), 021204. DOI: 10.1116/1.4975646.
4. A. Zotovich, A. Rezvanov, R. Chanson, L. Zhang, N. Hacker, K. Kurchikov, S. Klimin, S.M. Zyryanov, D. Lopaev, E. Gornev, I. Clemente, A. Miakonkikh, K. Maslakov
J. Phys. D, 2018, **51**(32), 325202. DOI: 10.1088/1361-6463/aad06d.
5. A.A. Rezvanov, A.V. Miakonkikh, D.S. Seregin, A.S. Vishnevskiy, K.A. Vorotilov, K.V. Rudenko, M.R. Baklanov
J. Vac. Sci. Technol. A, 2020, **38**(3), 033005. DOI: 10.1116/1.5143417.
6. A. Miakonkikh, V. Kuzmenko, A. Efremov, K. Rudenko
Vacuum, 2022, **200**(5), 110991. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.110991.
7. H.G. Tompkins
A User's Guide to Ellipsometry, USA, NY, New York, Academic Press, 1993, 260 pp. DOI: 10.1016/C2009-0-22336-1.
8. V. Rouessac, A. Lee, F. Bosc, J. Durand, A. Ayrat
Micropor. Mesopor. Mater., 2008, **111**(1–3), 417. DOI: 10.1016/j.micromeso.2007.08.033.
9. T. Li, A.J. Senesi, B. Lee
Chem. Rev., 2016, **116**(18), 11128. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00690.
10. D.W. Gidley, H.-G. Peng, R.S. Vallery
Annu. Rev. Mater. Res., 2006, **36**(1), 49. DOI: 10.1146/annurev.matsci.36.111904.135144.
11. А.А. Орлов, А.А. Резванов, А.В. Мьяконьких
Наноиндустрия, 2020, **96**(3s), 684. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.684.687.
12. S. Matsuo
Appl. Phys. Lett., 1980, **36**(9), 768. DOI: 10.1063/1.91651.
13. M. Engelhardt, S. Schwarz
J. Electrochem. Soc., 1987, **134**, 1985. DOI: 10.1149/1.2100803.
14. D.L. Flamm, P.L. Cowan, J.A. Golovchenko
J. Vac. Sci. Tech., 1980, **17**, 1341. DOI: 10.1116/1.570667.
15. D.V. Lopaev, Yu.A. Mankelevich, T.V. Rakhimova, A.I. Zotovich, S.M. Zyryanov, M.R. Baklanov
J. Phys. D: Appl. Phys., 2017, **50**, 485202. DOI: 10.1088/1361-6463/aa92a7.
16. S.V. Avtaeva, D.K. Otorbaev
J. Phys. D: Appl. Phys., 1993, **26**, 2148. DOI: 10.1088/0022-3727/26/12/009.

English

Study of Methods for Anisotropic Plasma-Chemical Etching of Low-*k* Layers with Protection of the Porous Structure of the Material*

Andrey V. Miakonkikh
Valiev Institute of Physics and
Technology, RAS
34 Nakhimovsky Ave., Moscow,
117218, Russia
miakonkikh@ftian.ru

Rafael A. Gaidukasov
Valiev Institute of Physics and
Technology, RAS
34 Nakhimovsky Ave., Moscow,
117218, Russia
gaidukasov.r@gmail.com

Vitaly O. Kuzmenko
Valiev Institute of Physics and
Technology, RAS
34 Nakhimovsky Ave., Moscow, 117218,
Russia
kuzmenko@ftian.ru

Abstract

The article summarizes the results of studying the processes of cryogenic plasma etching of low-*k* dielectrics for use in integrated circuit metallization systems with a node less than 10 nm. The mechanisms of film degradation during plasma etching are considered, and an approach based on the adsorption of condensed plasma-forming gas in pores is studied. Experimental results are presented concerning the development and application of methods for controlling the filling of film pores *in situ*. The results of studying the parameters of the plasma of bromine-containing gases (CF₃Br and C₂F₄Br₂) and the nature of the degradation of the chemical composition of films after etching are presented. For comparison, the same characteristics are given for the previously used CF₄ plasma.

Keywords: dielectrics with ultralow permittivity, plasma etching damage, condensation, adsorption in nanopores, plasma diagnostics.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-29-27025).

Images & Tables

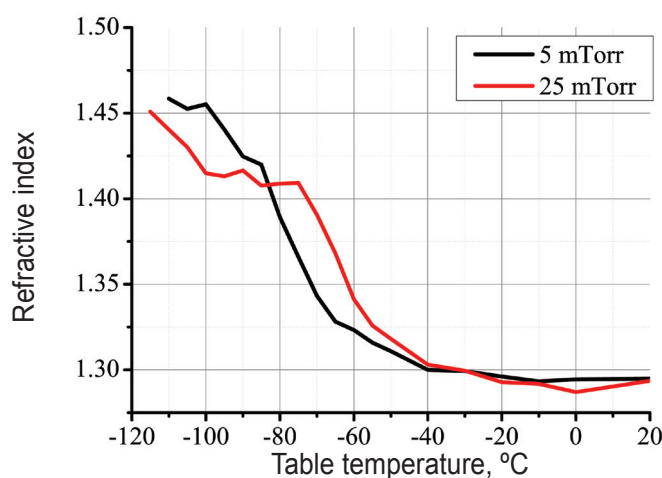


Fig. 1. Change in the refractive index of the film due to the adsorption of $C_2F_4Br_2$ gas in the pores of the studied dielectric at pressures of 5 and 25 mTorr.

References

1. W. Volksen, R.D. Miller, G. Dubois
Chem. Rev., 2010, **110**(1), 56. DOI: 10.1021/cr9002819.
2. D. Shamiryan, M.R. Baklanov, S. Vanhaelemeersch, K. Maex
J. Vac. Sci. Technol. B, 2002, **20**(5), 1923. DOI: 10.1116/1.1502699.
3. A. Rezvanov, A.V. Miakonkikh, A.S. Vishnevskiy, K.V. Rudenko, M.R. Baklanov
J. Vac. Sci. Technol. B, 2017, **35**(2), 021204. DOI: 10.1116/1.4975646.
4. A. Zotovich, A. Rezvanov, R. Chanson, L. Zhang, N. Hacker, K. Kurchikov, S. Klimin, S.M. Zyryanov, D. Lopaev, E. Gornev, I. Clemente, A. Miakonkikh, K. Maslakov
J. Phys. D, 2018, **51**(32), 325202. DOI: 10.1088/1361-6463/aad06d.
5. A.A. Rezvanov, A.V. Miakonkikh, D.S. Seregin, A.S. Vishnevskiy, K.A. Vorotilov, K.V. Rudenko, M.R. Baklanov
J. Vac. Sci. Technol. A, 2020, **38**(3), 033005. DOI: 10.1116/1.5143417.
6. A. Miakonkikh, V. Kuzmenko, A. Efremov, K. Rudenko
Vacuum, 2022, **200**(5), 110991. DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.110991.
7. H.G. Tompkins
A User's Guide to Ellipsometry, USA, NY, New York, Academic Press, 1993, 260 pp. DOI: 10.1016/C2009-0-22336-1.
8. V. Rouessac, A. Lee, F. Bosc, J. Durand, A. Ayral
Micropor. Mesopor. Mater., 2008, **111**(1–3), 417. DOI: 10.1016/j.micromeso.2007.08.033.
9. T. Li, A.J. Senesi, B. Lee
Chem. Rev., 2016, **116**(18), 11128. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00690.
10. D.W. Gidley, H.-G. Peng, R.S. Vallery
Annu. Rev. Mater. Res., 2006, **36**(1), 49. DOI: 10.1146/annurev.matsci.36.111904.135144.
11. A.A. Orlov, A.A. Rezvanov, A.V. Miakonkikh
Nanoindustry Russ., 2020, **96**(3s), 684. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.684.687.
12. S. Matsuo
Appl. Phys. Lett., 1980, **36**(9), 768. DOI: 10.1063/1.91651.
13. M. Engelhardt, S. Schwarz
J. Electrochem. Soc., 1987, **134**, 1985. DOI: 10.1149/1.2100803.
14. D.L. Flamm, P.L. Cowan, J.A. Golovchenko
J. Vac. Sci. Tech., 1980, **17**, 1341. DOI: 10.1116/1.570667.
15. D.V. Lopaev, Yu.A. Mankelevich, T.V. Rakhimova, A.I. Zotovich, S.M. Zyryanov, M.R. Baklanov
J. Phys. D: Appl. Phys., 2017, **50**, 485202. DOI: 10.1088/1361-6463/aa92a7.
16. S.V. Avtaeva, D.K. Otorbaev
J. Phys. D: Appl. Phys., 1993, **26**, 2148. DOI: 10.1088/0022-3727/26/12/009.