

Таким образом, снижается величина коэффициента μ_a^2 , т.е. эффективность компенсации помехи без коммутации каналов падает. Для оценки качества приема при действии помехи вводится энергетический параметр μ_3 , определяющий вероятность ошибок P_e различения двоичных символов:

$$\mu_3 = q_c / (1 + q_{\Pi} / \mu_a^2),$$

где $q_c = P_c / P_{\text{ш}}$ – отношение мощности сигнала к мощности шума; $q_{\Pi} = P_{\Pi} / P_{\text{ш}}$ – отношение мощности помехи к мощности шума, μ_a^2 – коэффициент амплитудного подавления помехи.

При отсутствии адаптивного компенсатора помех $\mu_3 = q_c / (1 + q_{\Pi})$, т.е. интенсивная помеха ($q_{\Pi} \gg 1$) приводит к существенному снижению энергетического параметра μ_3 по сравнению с q_c .

Включение адаптивного компенсатора помех позволяет снизить уровень действия помехи в $\mu_a^2 \approx (1 + q_{\Pi})$ раз, при этом обеспечивается $\mu_3 = q_c$.

Таким образом, если $q_{\Pi} > 20$ дБ, то энергетический выигрыш при приеме с адаптивным компенсатором помех составляет более 20 дБ, а за счет автокомпенсации узкополосных помех не происходит полного стирания информации в пораженных помехами частотных каналах приема.

Литература

1. Бокуть, Л. В. Исследование компенсационного метода подавления помех в радиоканалах охранно-пожарных систем сигнализации / Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Приборостроение–2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 240–242.
2. Хорошко, В. А., Чекатков, А. А. Методы и средства защиты информации. – М. : Юниор, 2010. – 501 с.
3. Борисов, В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук; под ред. В. И. Борисова. – М. : РадиоСофт, 2008. – 512 с.

УДК 621.382

ОСОБЕННОСТИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ P^+ , B^+ И Sb^+ В ПЛЕНКИ ПОЗИТИВНОГО ФОТОРЕЗИСТА ФП9120 НА КРЕМНИИ

Бринкевич Д.И.¹, Просолович В.С.¹, Черный В.В.²

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) исследованы пленки диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8–5,0 мкм, имплантированные ионами B^+ , P^+ и Sb^+ с энергией 60 кэВ в интервале доз $5 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{17}$ см⁻². Рассмотрены различные механизмы радиационно-индуцированной модификации структурных и оптических свойств пленок ДХН-резистов за областью пробега ионов, обусловленные электронным и ядерным механизмами торможения ионов.

Ключевые слова: диазохинонноволачный фоторезист; ионная имплантация; нарушенное полное внутреннее отражение; адгезия; кремний.

FEATURES OF IMPLANTATION OF P^+ , B^+ AND Sb^+ IONS INTO FILMS OF FP9120 POSITIVE PHOTORESIST ON SILICON

Brinkevich D.¹, Prosolovich V.¹, Chornyi V.²

¹Belarusian State University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Diazoquinone-novolac photoresist films with 1,8–5,0 μm thick, implanted with B^+ , P^+ , and Sb^+ ions with an energy of 60 keV in the dose range $5 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{17}$ cm⁻² were investigated. Various mechanisms of radiation-induced modification of the structural and optical properties of resist films beyond the ion path region, caused by the electronic and nuclear mechanisms of ion inhibition, were considered.

Key words: diazoquinone-novolac photoresist; ion implantation; attenuated total reflection; adhesion; silicon.

Адрес для переписки: Просолович В.С., пр. Независимости, 4, г. Минск 22030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Литография является одним из основных технологических процессов микроэлектроники. В качестве защитного светочувствительного материала (фоторезиста) в современной литографии

наибольшее распространение получили диазохинонноволачные (ДХН) резисты, представляющие собой композиты из фенолформальдегидных смол и нафтохинондиазида [1]. Модификация

структуры ДХН-резиста марки AZ-1350 J в области пробега R_p ионов с различной массой и, следовательно, с разным типом торможения, рассмотрена в работе [2]. Однако при применяемых в микроэлектронике энергиях пробег ионов существенно меньше толщины фоторезистивной пленки. Известно [3], что при ионной имплантации (ИИ) трансформация фоторезиста (ФР) может наблюдаться далеко за областью пробега ионов. Это может приводить к модификации физико-механических свойств по всей толщине пленки. Однако механизм трансформации при ИИ структуры ДХН-резистов за областью пробега ионов и, соответственно, изменения физико-механических свойств пленок ФР на Si, к настоящему времени окончательно не установлен.

Цель настоящей работы – изучение особенностей поведения структурных и оптических свойств пленок ДХН-резистов за областью пробега ионов при имплантации легкими и тяжелыми ионами.

Материалы и методы измерений. Пленки позитивного ДХН-резиста ФП9120 толщиной 1,8–5,0 мкм наносились методом центрифугирования на поверхность пластин кремния с ориентацией (100) и (111) [4]. Перед формированием пленки ФР кремниевые пластины подвергали стандартному циклу обработки поверхности в органических и неорганических растворителях. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась сушка в течение 50–55 мин при температуре 88 °С. Имплантация ионами B^+ , P^+ и Sb^+ с энергией 60 кэВ в интервале доз $5 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{17}$ см⁻² в режиме постоянного ионного тока проводилась при комнатной температуре на имплантаторе «Везувий-6». Используемые режимы ионной имплантации широко применяются при производстве интегральных микросхем. Спектры НПВО структур резист-кремний в диапазоне $\nu = 400$ –4000 см⁻¹ регистрировались при комнатной температуре ИК-Фурье спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH). Разрешение составляло 2 см⁻¹, количество сканов – 24.

Эксперимент. В процессе имплантации легкими ионами B^+ и P^+ происходит интенсивная трансформация спектра НПВО, выражающаяся в перераспределении интенсивности полос плоскостных деформационных колебаний О-Н связей и пульсационных колебаний углеродного скелета ароматических колец. Заметного разрушения или повреждения ароматических колец при ИИ за областью пробега ионов не наблюдается, однако изменяется состав их заместителей, что приводит к перераспределению интенсивности валентных колебаний. Наблюдалось также увеличение интенсивности и смещение в низкоэнергетичную полос колебаний С=О связей, обусловленное удалением водорода в процессе имплантации,

которое приводит к возникновению упругих напряжений в пленке ФР и, соответственно, к увеличению длины указанных связей [3].

В процессе ИИ наблюдается слабое смещение в низкоэнергетичную область максимумов валентных колебаний С-Н-связей и перераспределение интенсивностей между максимумами, обусловленными концевой метильной и метиленовой группами в пользу последней, что указывает на радиационное сшивание молекул новолачной смолы с участием радикалов, локализованных на концевых метильных группах. У полосы 1430–1455 см⁻¹, обусловленной валентными колебаниями ароматического кольца, связанными с СН₂-мостиком, в процессе имплантации наблюдается перераспределение интенсивности между максимумами 1451 и 1433 см⁻¹, обусловленное образованием водородных связей по СН₂-мостику. Образование сшивков способствует росту микротвердости пленки [4]. В результате радиационно-индуцированного деазотирования нафтохинондиазида и образования кетена в спектре ФР появлялись полосы с максимумами при 2151 и 2115 см⁻¹, обусловленные валентными колебаниями двойных кумулятивных связей [3].

Имплантация тяжелыми ионами Sb^+ приводила к более сильной, чем в случае легких ионов, радиационно-индуцированной модификации ФР за слоем внедрения. В спектре НПВО имплантированных Sb^+ пленок ФР появляется полоса при 2331 см⁻¹, обусловленная валентными колебаниями О=C=О. Наблюдалось интенсивное образование сшивков молекул обоих компонентов ФР, приводящее к сильному росту (почти на порядок) микротвердости пленки и резкому снижению ее адгезии к кремнию. Нарушение адгезии приводит к появлению в спектре НПВО полосы 610 см⁻¹, связанной с решеточным поглощением Si.

При ИИ действует несколько конкурирующих механизмов радиационно-индуцированных процессов в пленке ФР за областью пробега ионов, обусловленные разными механизмами торможения ионов – электронным, которое преобладает в случае легких ионов, и ядерным (в случае тяжелых ионов).

В случае электронного торможения (ионы B^+ и P^+) основная доля потерь энергии ионов (около 80–90 %) приходится на процессы ионизации и возбуждения макромолекул полимера [3]. Энергия возбуждения может передаваться по цепочкам макромолекул. Если энергия возбуждения не превышает величину энтальпии гомолитической диссоциации самой слабой связи в фенолформальдегидной смоле, то эта избыточная энергия будет мигрировать на большие расстояния в полимерном компаунде. В этих условиях такое низкоэнергетичное излучение может передаваться на нафтохинондиазид, привитый к фенолфор-

мальдегидной смоле, с последующим деазотированием (перестройка Вульфа) и образованием кетена [3].

При ядерном торможении (тяжелые ионы Sb^{+}) происходят столкновения с ядрами мишени с образованием ядер отдачи (C, H, O), которые способны вызвать деструкцию полимера за областью пробега имплантированных ионов. На большие расстояния энергия возбуждения способна в этом случае передаваться в виде упругих волн, которые отражаясь на различных неоднородностях/границах раздела будут вызывать модификацию структуры ФР и существенно влиять на его адгезию к кремнию. Следует учитывать наличие в пленке упругих напряжений, возникающих вследствие испарения растворителя при сушке. В процессе ИИ в зависимости от массы иона эти напряжения могут как компенсироваться, так и увеличиваться, приводя к накоплению деформации. При ИИ возникает также явление накопления электрического заряда в полимере, связанное с тем, что электроны, выбиваемые при ионизации полимера, стекают на границы раздела фаз. Они в основном накапливаются в припо-

верхностном слое кремния. При этом в полимере остаются имплантированные ионы и образовавшиеся в полимере катион-радикалы, что приводит к возникновению объемного заряда (разности потенциалов) на границе раздела фоторезист/кремний, который снижает адгезию ФР к кремнию.

Литература

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы : в 2-х ч. / У. Моро. – М.: Мир, 1990. – Ч. 2. – 632 с.
2. Garcia, I. T. S. The effects of nuclear and electronic stopping powers on ion irradiated novolac-diazoquinone films / I. T. S. Garcia, F. C. Zawislak, D. Samios // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 228. – P. 63–76.
3. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста за областью внедрения ионов B^{+} / С. Д. Бринкевич и [и др.] // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 377–386.
4. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний, γ -облученных и имплантированных ионами B^{+} и P^{+} / С. А. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого гос. университета, 2016. – № 12. – С. 30–36.

УДК 678.057.9

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЬНО-ДОЗИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Выдумчик С.В., Васильева В.С., Гавриленко О.О., Горохов С.Л., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлены основные характеристики лабораторного комплекса для проведения учебно-научных работ по изучению влияния наноразмерных и мелкодисперсных добавок различной природы на процессы дозации, смешения и отверждения высоко реакционноспособных мономерных и олигомерных композиций при формировании полимерных композитов. Оборудование имеет широкий набор базовых функций, которые позволяют полностью автоматизировать процессы дозирования и смешения многокомпонентных полимерных систем и получать для изучения лабораторные образцы и изделия высокого качества.

Ключевые слова: дозатор, смеситель, мультикомпонентные полимеры, реакционные системы.

THE CONCEPT OF CREATING A MULTIFUNCTIONAL MIXING AND DOSING DEVICE FOR OBTAINING LABORATORY SAMPLES FROM MULTICOMPONENT POLYMERS Vydumchik S., Vasilyeva V., Gavrilenko O., Gorokhov S., Pavlyukevich T., Ponaryadov V.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper presents the main characteristics of a laboratory complex for conducting educational and scientific work on the study of the effect of nanoscale and fine-dispersed additives of various nature on the processes of dosing, mixing and curing of highly reactive monomeric and oligomeric compositions during the molding of polymer composites. The equipment has a wide range of basic functions that will allow fully automating the processes of dosing and mixing of multicomponent polymer systems and obtaining laboratory samples and products of high quality for study.

Keywords: dispenser, mixer, multicomponent polymers, reaction systems.

*Адрес для переписки: Выдумчик С.В., лаборатория ФХПМ и ПОС НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: lab_dozator@mail.ru*