

УДК 47.13.11

ПЛАЗМА ВОДОРОДА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОН-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2023 г. Е. А. Полушкин^{1, 2, *}, С. В. Нефедьев¹,
А. В. Ковальчук², О. А. Солтанович², С. Ю. Шаповал²

¹АО “Научно-исследовательский институт молекулярной электроники”,
ул. Академика Валиева, 6/1, Москва, Зеленоград, 124460 Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем
технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук,
ул. Академика Осипяна, 6, Черноголовка, Московская область, 142432 Россия

*E-mail: epolushkin@niime.ru

Поступила в редакцию 13.12.2022 г.

После доработки 02.02.2023 г.

Принята к публикации 02.02.2023 г.

В работе представлены результаты применения водородной ЭЦР плазмы в технологии микроэлектроники. Продемонстрировано ее влияние на радиационную стойкость ИС и на качество омического контакта при формировании UBM металлизации. Проведен анализ устройств, полученных с применением ЭЦР плазмы и без нее.

Ключевые слова: ЭЦР, радиационная стойкость, водород, водородная обработка материалов

DOI: 10.31857/S0544126923700321, **EDN:** UECTWT

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование водородной обработки для модификации свойств и характеристик различных полупроводниковых устройств и элементов их конструкции может осуществляться на различных этапах изготовления широкого спектра полупроводниковых изделий. Как показано в ряде работ, водород способен влиять на свойства пассивирующих и изолирующих диэлектрических покрытий, на интерфейс между технологическими слоями, на металлические структуры и на свойства самих полупроводниковых материалов [1]. Использование водородной обработки в кремниевой технологии позволяет значительно увеличить радиационную стойкость как МДП приборов, так и биполярных приборов [2].

Применение водородной обработки материалов позволяет получать новые технологические приемы модификации их свойств. Водородное воздействие на материалы включает физическую, химическую, физико-химическую и механическую компоненты [3], каждая из которых может приводить к определенным эффектам. Например, физическая компонента водородного воздействия проявляется в изменении электронного строения материала, в возможных изменениях фонного спектра кристаллической решетки и водородной подсистемы, в увеличении равновесной концентрации вакансий и, соответственно,

диффузионной подвижности атомов замещения и внедрения, во взаимодействии водорода с кристаллическими дефектами и изменении их стабильности и подвижности, тем самым способствует процессам “очистки” активных областей кремниевых приборов от различных радиационных дефектов и сторонних примесей. Химическая компонента водородного воздействия (особенно при использовании атомарного и ионизированного водорода) является очень сильным восстановителем и позволяет модифицировать поверхностные и, как показывают эксперименты, скрытые слои.

Для эффективного внедрения водорода была использована плазма электрон – циклотронного резонанса (ЭЦР) [4]. Для нее характерны низкие рабочие давления от 10^{-3} – 10^{-5} торр, высокая степень ионизации плазмообразующего газа, возможность подачи смещающего напряжения на подложкодержатель – все это делает ЭЦР плазму хорошим инструментом для внедрения атомарного водорода в различные структуры.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ H₂ ЭЦР ПЛАЗМЫ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ПОЛЕВЫХ И БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

В данном разделе будет продемонстрировано качественное влияние водородной обработки на

свойства кремния и оксида кремния — основных конструкционных материалов микроэлектроники.

На качество работы полевых и биполярных кремниевых транзисторов, и интегральных схем, изготовленных по соответствующим технологиям, большое влияние оказывают дефекты, возникающие при радиационном воздействии, которые могут накапливаться на протяжении длительного времени при эксплуатации прибора [5]. На работу МОП-структур в большей степени влияет заряд, вносимый в подзатворный диэлектрик, и деградация границы раздела диэлектрика с кремнием, а на работу биполярных транзисторов большое влияние оказывают радиационные дефекты в области $p-n$ переходов.

Для исследования влияния водородной обработки на радиационную стойкость $p-n$ перехода было использовано серийно выпускаемое изделие. Часть партии была подвергнута водородной обработки в ЭЦР плазме и формированию геттерного слоя. Изготовленные изделия подвергались радиационному воздействию по изменению их функциональных параметров определялось влияние водородных обработок на радиационную стойкость. На рис. 1 показана зависимость коэффициента β (усиления транзистора по току), определяемого как отношение тока коллектора к току базы и являющегося одним из важнейших параметров биполярного транзистора.

Как видно из рис. 1, обработка в ЭЦР плазме водорода повышает радиационную стойкость биполярных транзисторов, а при комбинированном применении геттерирования и водородной обработки эффект становится еще более выраженным. Повышение радиационной стойкости биполярных транзисторов обуславливается увеличением скорости релаксации радиационных дефектов, катализатором чего является внедренный водород.

Для исследования влияния водородной обработки на радиационную стойкость полевых транзисторов исследовались вольт-фарадные характеристики МДП-структур. Опробованы различные режимы обработки в ЭЦР плазме. Исследовано влияние на свойства МДП структур различных режимов плазменной обработки и радиационного воздействия.

Известно, что при радиационном воздействии в диэлектриках образуются заряды, влияющие на работу полевых транзисторов, особенно если этот диэлектрический слой является подзатворным. Для оценки влияния воздействия водородной ЭЦР плазмы и гамма излучения на диэлектрик были изготовлены МОП-структуры. Исходные пластины представляли собой пластины кремния КДБ-10 с эпитаксиальным слоем n -типа проводимости (концентрация электронов $n \sim 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина слоя $\sim 10 \text{ мкм}$) с нанесенными слоями оксида кремния толщиной $500 \text{ \AA}$.

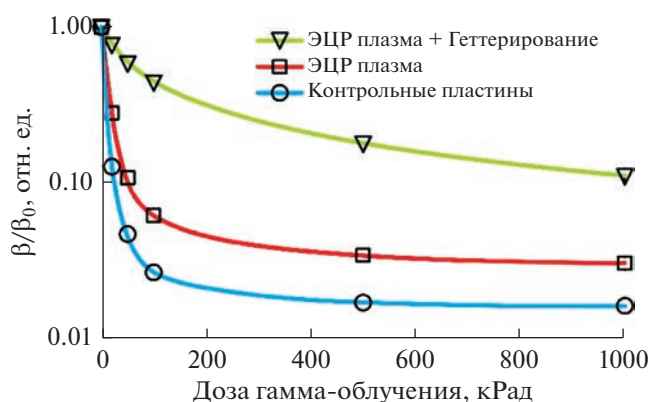


Рис. 1. Дозовые зависимости нормированного коэффициента усиления тока транзистора. Все зависимости нормированы на значение β_0 до облучения. Для контрольных пластин (кривая, помеченная символом $\circ$), для гидрогенизированных пластин (кривая, помеченная символом $\square$) и для гидрогенизированных пластин с опцией геттерирования (кривая, помеченная символом $\blacktriangledown$). Зависимости представлены для $p-n-p$ транзисторов.

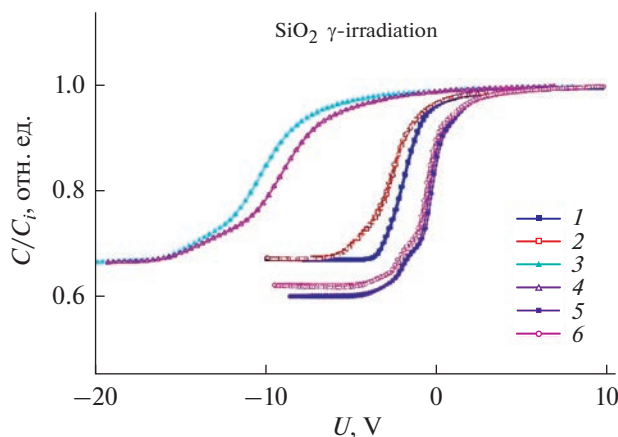


Рис. 2. Нормализованные вольт-фарадные характеристики МОП-структур исходных (1, 2), обработанных в водородной плазме без смещения (3, 4) и со смещением -120 В (6, 5). До облучения (1, 3, 5) и после (2, 4, 6).

Свойства диэлектрика и его границы раздела с поверхностью кремния исследовались методом вольт-фарадных характеристик (ВФХ) с помощью емкостного моста EG&G PAR-410 с тестовой частотой 1 МГц . По значению напряжения плоских зон U_{FB} можно охарактеризовать заряд в диэлектрике, а по наклону ВФХ — качество границы раздела с кремнием. На рис. 2 представлены вольт-фарадные характеристики МДП структур до и после радиационного воздействия. Величина смещения ВФХ относительно исходного значения при радиационном воздействии будет определять, насколько сильно изменятся характеристики полевого прибора.

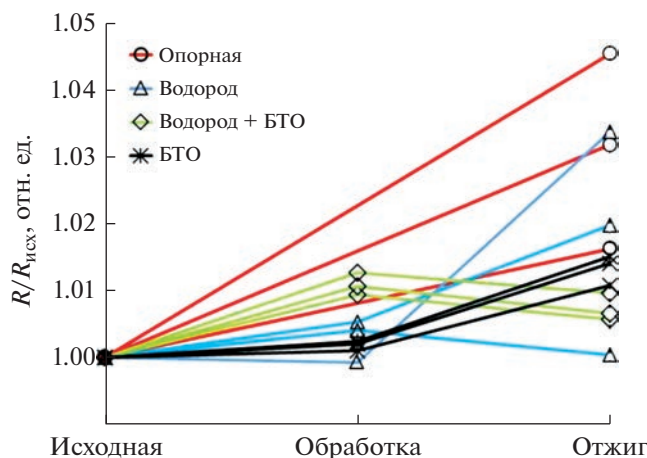


Рис. 3. Относительные изменения сопротивления однотипных контактных пар на образцах, подвергавшихся различным обработкам. Красные кривые — опорные образцы, не проходившие обработку, синие кривые — образцы, обработанные в ЭЦР водородной плазме, черные кривые — образцы, прошедшие через БТО (быстрый термический отжиг), зеленые кривые — образцы, обработанные в плазме, а затем прошедшие БТО.

Как видно, различные режимы обработки в водородной ЭЦР плазме по-разному влияют на ВФХ — увеличивая и уменьшая значение U_{FB} , они также по-разному могут влиять на угол наклона характеристик, что свидетельствует об изменении плотности поверхностных состояний на границе диэлектрик/полупроводник. Однако очевидно, что расхождение кривых 6 и 5 на рис. 2 минимально, что свидетельствует о невосприимчивости структур, обработанных в ЭЦР водородной плазме при высоких значениях напряжений, к радиационному воздействию.

3. ПРИМЕНЕНИЕ H_2 ЭЦР ПЛАЗМЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГРАНИЦЫ UBM- КОНТАКТНАЯ ПЛОЩАДКА

UBM (under bump metallization) — контакт на ИС, предназначенный для дальнейшего монтажа оловянных припойных контактов (бампов) с целью организации флип-чип монтажа [5]. По сути UBM это химически или гальванически осажденный на контактную площадку металлический слой толщиной несколько микрометров, обеспечивающий хорошую смачиваемость оловом при монтаже припойных контактов. UBM формируется на контактных площадках на пластине перед процессом ее скрайбирования. Зачастую загрязнения, окислы, остающиеся на поверхности алюминия, могут приводить к дальнейшей деградации омических контактов. Особенно такая деградация заметна в силовых цепях ИС, где высокая плотность тока провоцирует выделение тепла на участ-

ках цепи с повышенным электрическим сопротивлением. Разогрев активирует процессы, ухудшающие качество контакта, в результате это приводит к выводу из строя прибора.

В данной работе было экспериментально продемонстрировано влияние водородной обработки на деградацию качества интерфейса UBM — контактная площадка. Пластины со сформированными UBM контактами подвергались следующим обработкам: выдерживании во водородной ЭЦР плазме, быстрому термическому отжигу (БТО) и комбинации водородной плазмы с БТО. Длительный температурный нагрев пластины эмитировал возможные условия работы схемы. На пластине контролировались однотипные контактные пары, в цепи которых отсутствуют $p-n$ переходы, путем измерения их сопротивления четырехзондовым методом. Контрольное измерение проводилось после каждого вышеописанного воздействия. Также были промерены опорные образцы, не подвергавшиеся никаким обработкам. На рис. 3 продемонстрировано, как изменялось сопротивление однотипной контактной пары на образцах, подвергавшихся различным обработкам. Для наглядности продемонстрировано нормализованное значение сопротивления.

Как видно на рисунке, образцы, которые подвергались обработке в водородной плазме и БТО, показали самое минимальное изменение сопротивления после процедуры длительного отжига, также стоит отметить минимизацию разброса финальных значений относительно других экспериментальных групп.

Таким образом, диффузия атомизированого водорода в область контактов между металлическими слоями способствовала восстановлению окислов металлов, благодаря чему существенно увеличилось качество омического контакта и его стабильность при длительных термических нагрузках. Непременная такая обработка способствует улучшению качества продукции. Стоит отметить тот факт, что все вышеописанные операции проводились после формирования UBM толщиной 4 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение водородной обработки в технологии микроэлектроники позволяет изменять и получать новые свойства материалов, увеличивать радиационную стойкость приборов, повышать коэффициент выхода годных приборов, а, следовательно, уменьшать себестоимость продукции и улучшать ее потребительские качества.

Стоит отметить, что применение водородной обработки в технологическом процессе не требует каких-либо модификаций топологии и конструктива обрабатываемых изделий.

Применяемое плазмохимическое оборудование для водородной обработки идеально согласуется с гигиеной микроэлектронного производства и не требует каких-либо особых условий для размещения на технологической линии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИПТМ РАН № 075-01304-23-00.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Herring C.* Energy levels of isolated interstitial hydrogen in silicon / C. Herring, N.M. Johnson, C.G. Van De Walle // *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*. 2001. V. 64. № 12. P. 1252091–12520927. EDN XOOMMJ <https://doi.org/10.1103/physrevb.64.125209>
2. Influence of diffusion hydrogen on the radiation hardness of silicon devices / E.A. Polushkin, A.V. Kovalchuk, O.A. Soltanovich [et al.] // *Proceedings of SPIE V. 12157, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2021, 1215711 (2022)*. EDN MBGAEW <https://doi.org/10.1117/12.2624184>
3. *Гольцов В.А.* Фундаментальные основы водородной обработки материалов / В.А. Гольцов // Письма в международный научный журнал “Альтернативная энергетика и экология”. 2014. № 2(2). С. 31–33. EDN RYPZWV.
4. *Popov O.A.* 2.45 GHz microwave plasmas at magnetic fields below ECR / O.A. Popov, S.Y. Shapoval, M.D. Yoder // *Plasma Sources Science and Technology*. 1992. V. 1. № 1. P. 7–12. EDN VECNSX <https://doi.org/10.1088/0963-0252/1/1/002>
5. *Темирбулатов М.С.* Космическая программа и радиационная стойкость современных интегральных микросхем / М.С. Темирбулатов, В.И. Эннс // *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2015. № 2(158). С. 76–88..
6. *Змеев С.В.* Коммутация кристаллов припойными шариками в микросистемах 2,5D- и 3D-сборок / С.В. Змеев // *Наноиндустрия*. 2020. № S96-2. С. 434–437. EDN UKVTNK <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.434.437>