

ИНЖЕКЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТРУКТУР «МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК»

В.В. Андреев¹, Г.Г. Бондаренко², А.А. Столяров¹,
А.М. Михальков¹, С.И. Коротков¹

¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал;* ² *Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)*

E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru

Для повышения надежности и радиационной стойкости интегральных схем и полупроводниковых приборов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) как непосредственно на полупроводниковой пластине, так и в корпусах, в настоящее время применяются радиационно-термическая обработка (РТО), рентгеновское облучение, облучение ультрафиолетом и т.п. При облучении планарных изделий происходит накопление заряда на дефектах оксидной пленки, что приводит к отказу либо при облучении, либо через некоторое время после облучения [1]. РТО позволяет определить образцы ИМС с аномально низкой радиационной стойкостью, характеризующей аномально низкую надежность [1]. В работах [2-5] была показана идентичность большинства процессов деградации МДП-структур, протекающих при воздействии ионизирующей радиации и при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик. Замена радиационных обработок сильнополевой инжекцией существенно упрощает процесс испытаний, а также позволяет получить большой объем дополнительной информации за счет контроля изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика в процессе сильнополевого воздействия.

Процесс инжекционной обработки заключается в сильнополевой инжекции в подзатворный диэлектрик заряда электронов заданной плотности. Инжекция заряда в диэлектрик обычно осуществляется в режиме поддержания постоянного тока или напряжения при одновременном контроле изменения зарядового состояния диэлектрической пленки. До настоящего времени инжекция заряда в диэлектрик применялась в основном для контроля качества технологических процессов и оценки влияния на МДП-структуры ионно-плазменных, радиационных и сильнополевых воздействий [4, 5]. Вместе с тем, полученные в [6-8] результаты указывают на возможность применения сильнополевой туннельной инжекции для выявления потенциально ненадежных МДП-структур, а также в качестве обработки для выявления и устранения дефектов зарядовой нестабильности окислов и, как следствие, повышения надежности характеристик МДП-структур.

Данная работа посвящена исследованию режимов инжекционно-термической обработки (ИТО) МДП-структур, направленной на модификацию зарядового состояния диэлектрической пленки и повышение надежности и радиационной стойкости за счет снижения плотности зарядовых дефектов и повышения величины заряда, инжектированного до пробоя.

В качестве экспериментальных образцов использовались МДП-конденсаторы со структурой Si-SiO₂-Al₁, изготовленные промышленным способом на пластинах КЭФ-4,5. Подзатворный диэлектрик толщиной 30÷100 нм получали термическим окислением кремния при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl. Алюминиевые электроды площадью 10⁻⁴÷10⁻² см² напыляли магнетронным методом. После формирования алюминиевых электродов проводили отжиг пластин в среде азота при температуре 475 °С.

Инжекционная обработка МДП-структур заключалась в сильнополевой по Фаулеру-Нордгейму инжекции из кремния в подзатворный диэлектрик МДП-структур заряда электронов 0,1÷0,5 мКл/см² импульсом постоянного тока 0,01÷0,1 мА/см² при температуре образца от 20 до 100 °С. Методика проведения эксперимента состояла в следующем: на полупроводниковой пластине делалась представительная выборка МДП-структур, расположенных в непосредственной близости друг от друга. Данная выборка делилась на две равные группы. К образцам первой группы прикладывалась токовая нагрузка, и они выдерживались до пробоя образца. Вторая группа образцов сначала проходила инжекционную обработку, после чего подвергалась инжекционной нагрузке, подобно первой группе. На рис. 1(а) представлено изменение токовой нагрузки во время инжекционной обработки (сплошная линия) и во время инжекционных испытаний (пунктирная линия). На рис. 1(б) приведена временная зависимость изменения напряжения на МДП-структуре. Участок I на зависимости V₁(t) соответствует заряду емкости МДП-структуры постоянным током I₁. На этом участке весь ток, протекающий через диэлектрик, является емкостным. Инжекция заряда в диэлектрик начинается при переходе в высоковольтный диапазон (рис. 1, участок II). После окончания процесса заряда емкости МДП-структуры (рис. 1, участок III) весь ток, протекающий через образец, становится инжекционным.

На участке IV (рис. 1), при амплитуде токового воздействия I₂, осуществляется основная инжекция заряда в диэлектрик, продолжающаяся до его пробоя. Этот участок используется для оценки процессов зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях.

При проведении измерений плотности тока инжекции на участках III и IV (рис. 1, б) составляли j₁=0,1 мкА/см² и j₂=0,1 мА/см² соответственно, а

полярность токовой нагрузки обеспечивала сильнополевую туннельную по Фаулеру-Нордгейму инжекцию электронов из кремниевой подложки.

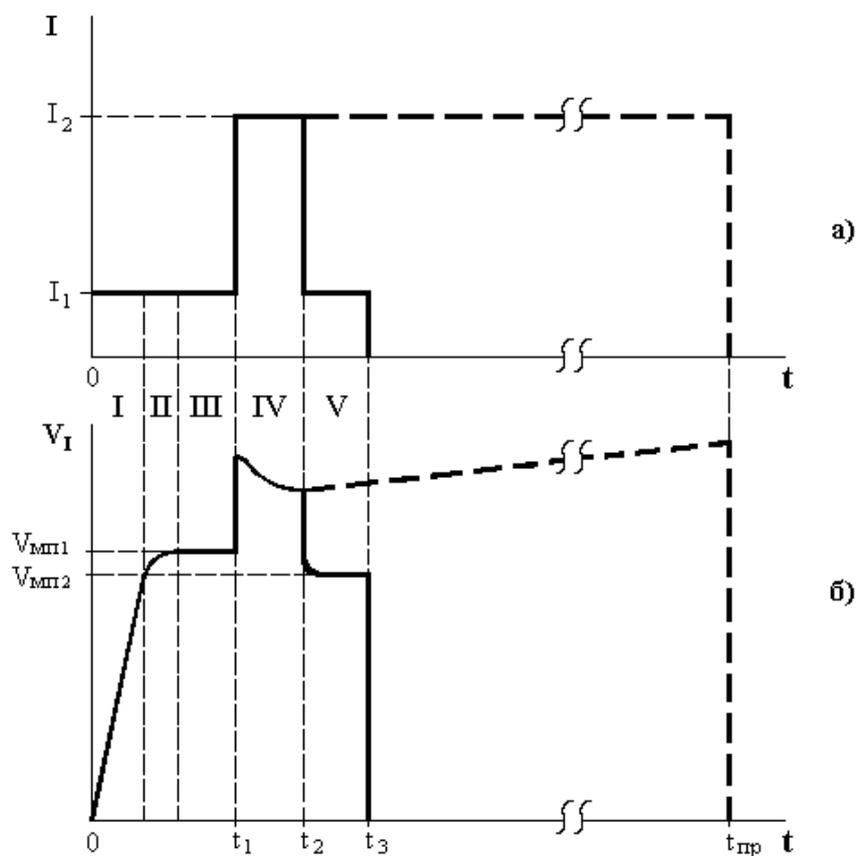


Рис.1. Временные зависимости токовой нагрузки (а) и изменения напряжения на МДП-структуре (б). Сплошная линия – инжекционная обработка; пунктирная линия – инжекционные испытания

На рис. 2 представлены относительные гистограммы распределения МДП-структур по величине плотности заряда, инжектированного до пробоя образца, характеризующие проведение инжекционной обработки. Гистограмма 2 на рис. 2 соответствует группе МДП-структур, прошедших инжекционную обработку при 20 °С, гистограмма 1 – группе структур, не подвергавшихся обработке.

Как видно из рис. 2, инжекционная обработка позволяет исключить структуры с грубыми зарядовыми дефектами (плотность заряда, инжектированного до пробоя, менее 3 мКл/см²), и, тем самым, значительно повысить надежность приборов и интегральных микросхем. Однако при такой обработке происходит незначительное снижение инжекционного ресурса структур и приборов на их основе. Снижение ресурса объясняется зарядовой деградацией как самой диэлектрической пленки, так и границы раздела кремний – двуокись кремния, протекающей при инжекции заряда [4, 5]. Аналогичные процессы возникают и при воздействии радиационного

облучения [2, 3]. Для их устранения обычно проводят отжиг образца после обработки. В нашем случае отжиг инъекционно обработанных МДП-структур проводился при температуре 200 °С в течении 1 часа. На рисунке 3 показаны относительные гистограммы распределения МДП-структур по величине плотности заряда, инжестированного до пробоя образца, характеризующие проведение инъекционно-термической обработки. Гистограмма 2 на рисунке 3 соответствует группе МДП-структур, прошедших инъекционно-термическую обработку, гистограмма 1 – группе структур, не подвергавшихся обработке.

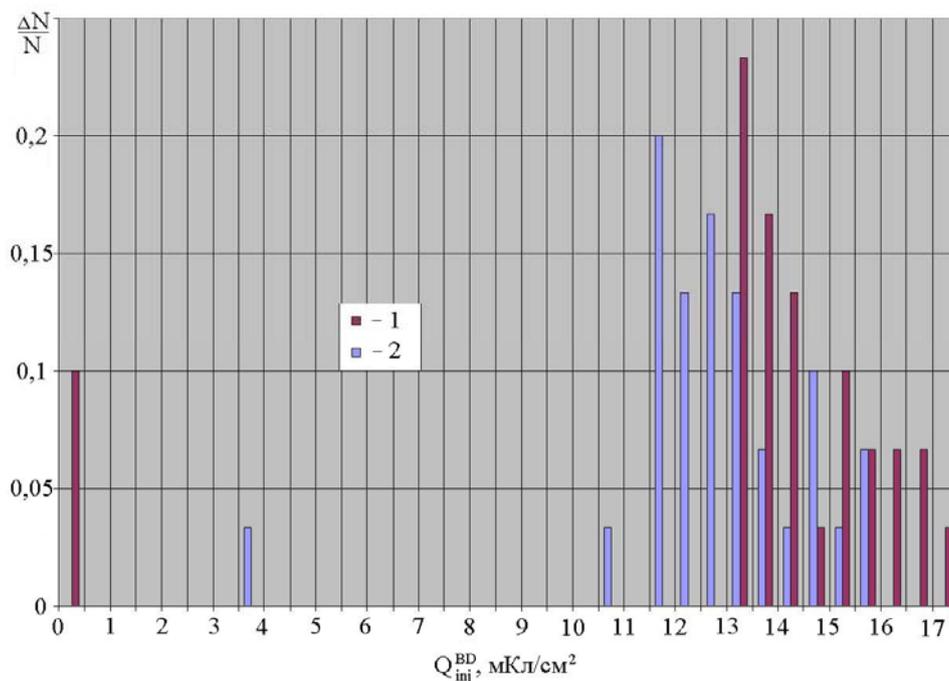


Рис.2. Относительные гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжестированному до пробоя образца плотностью постоянного тока 0,1 мА/см²: 1 – без обработки; 2 – после инъекционной обработки

Из гистограммы (рис. 3) видно, что инъекционно-термическая обработка позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции. В результате, после обработки практически отсутствуют структуры с малым (менее 3 мКл/см²) зарядом, инжестированным до пробоя, и при этом не снижается инъекционный ресурс образцов, что является положительным фактом при проведении ИТО. Благодаря применению инъекционно-термической обработки происходит достаточно заметное повышение инъекционной и радиационной стойкости МДП-структур (рис. 3), что может быть объяснено образованием более совершенной структуры приборов, поскольку сильнополевая инжекция электронов разрывает напряженные связи в пленке SiO₂ и на границе раздела Si-SiO₂, а последующий отжиг восстанавливает валентные связи, но уже без их деформации [4, 5].

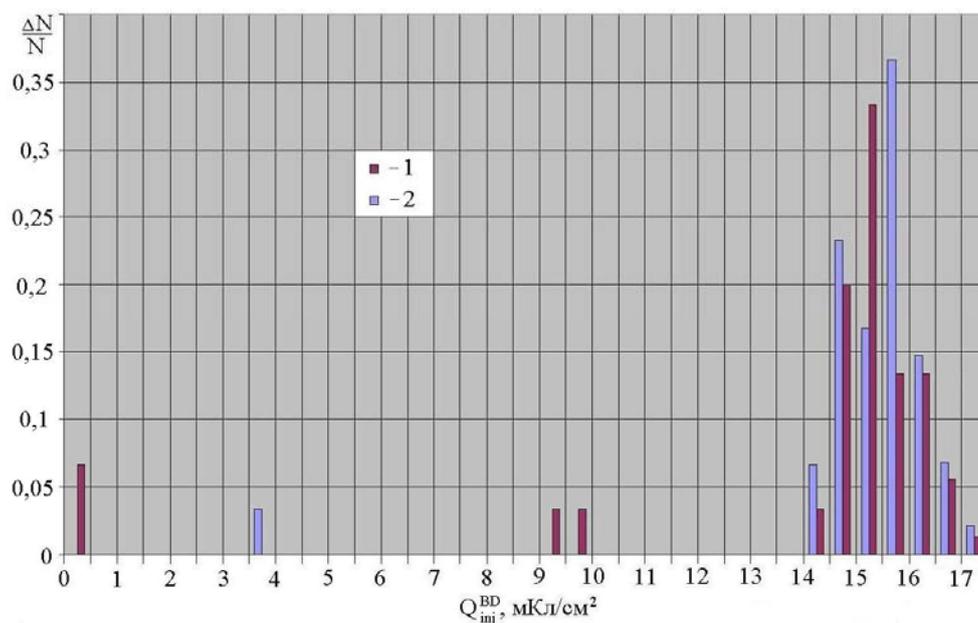


Рис.3. Относительные гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному до пробоя образца плотностью постоянного тока $0,1 \text{ мА/см}^2$: 1 – без обработки; 2 – после инъекционно-термической обработки

Сравнение гистограмм распределения структур по заряду, инжектированному до пробоя, показывает, что в результате инъекционной обработки, выполненной при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$, инъекционная стойкость МДП-структур возрастает по сравнению с исходными образцами. С повышением температуры, при которой проводится инъекционная обработка, данный эффект уменьшается и при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается обратный эффект, приводящий к уменьшению средней величины заряда, инжектированного до пробоя образца. Данное явление, по-видимому, связано с затруднением активации электронных и дырочных ловушек при повышенных температурах. Следовательно, для повышения эффективности инъекционно-термической обработки инъекцию заряда не следует проводить при повышенных температурах.

Показано, что инъекционно-термическая обработка позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции и зарядовыми дефектами. В результате, после обработки практически отсутствуют структуры с малым (менее 3 мКл/см^2) зарядом, инжектированным до пробоя, и при этом практически не снижается ресурс работы приборов на основе МДП-структур. Следовательно, проведение инъекционно-термической обработки позволяет повысить инъекционную и радиационную стойкость наноразмерных диэлектрических пленок МДП-приборов.

1. И.И. Катеринич, Ф.М. Курин, В.Д. Попов. Метод радиационно-термической обработки и повышения надёжности МОП интегральных схем // Вопросы атомной науки и

- техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 1996. Вып.3-4. С.127-132.
2. M. Knoll, D. Brauning, W.R. Fahrner Comparative studies of tunnel injection and irradiation on metal oxide semiconductor structures // J. Appl. Phys. 1982. Vol.53. No.10. P.6946-6952.
 3. В.В. Андреев, А.А. Бедняков, Л.С. Новиков, Г.Г. Соловьев, А.А. Столяров, С.А. Лоскутов. Сравнительное исследование зарядового состояния МДП-структур при облучении протонами и инжекции заряда в сильных электрических полях // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. Вып.1-2. С.61-66.
 4. D. Arnold, E. Cartier, D.J. DiMaria. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide// Phys. Rev. B. 1994. Vol.49. № 15. P.10278-10297.
 5. S. Lombardo, J.H. Stathis, P. Linder, K.L. Pey, F. Palumbo, C.H. Tung. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides // J. Appl. Phys. 2005. Vol.98. P.121301.
 6. G.G. Bondarenko, V.V. Andreev, V.M. Maslovsky, A.A. Stolyarov., V.E. Drach. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures// Thin solid films. 2003. V.427. P.377-380.
 7. В.В. Андреев, Г.Г. Бондаренко, А.А. Столяров, Д.С. Васютин, А.М. Михальков. Исследование влияния режимов инжекционной модификации на зарядовое состояние подзатворного диэлектрика МДП-приборов // Перспективные материалы. 2009. № 2. С.45-51.
 8. В.В. Андреев, А.А. Столяров, Д.С. Васютин, А.М. Михальков. Контроль качества диэлектрических слоев интегральных микросхем и изделий микросистемной техники // Научные технологии. 2010. Т.11. № 7. С.44-52.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК №П470 и №16.740.11.0151.