

## **Повышение инжекционной и радиационной стойкости наноразмерных диэлектрических пленок МДП-приборов**

**В. В. Андреев, Г. Г. Бондаренко, А. М. Михальков,  
А. А. Столяров, И. В. Соловьев**

---

Исследованы режимы инжекционно-термической обработки структур металл – диэлектрик – полупроводник (МДП). Показано, что инжекционно-термическая обработка (ИТО) позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции и зарядовыми дефектами, при этом практически не снижается ресурс работы приборов на основе МДП-структур. Установлено, что проведение ИТО позволяет повысить инжекционную и радиационную стойкость наноразмерных диэлектрических пленок МДП-приборов за счет их модификации.

**Ключевые слова:** МДП-структура, наноразмерная диэлектрическая плёнка, контроль, инжекционный ток, зарядовое состояние, радиационное излучение.

---

A research of conditions of injection-thermal treatment of MOS-structures is performed. It is shown that the injection-thermal treatment allows to detect and eliminate the structures with coarse defects of isolation and charge defects, thus, practically does not decrease resource of the devices based on MOS-structures. It is established, that carrying out of injection-thermal treatment allows to increase injection and radiating durability nano-thickness dielectric films of MOS-devices at the expense of their modification.

**Key words:** MOS-structure, nano-thickness dielectric film, test, injection current, charge state, radiating radiation.

---

### **Введение**

В настоящее время для выявления потенциально ненадежных интегральных схем и полупроводниковых приборов с МДП-структурой, как непосредственно на полупроводниковой пластине, так и в корпусах, 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 в работе либо при облучении, либо через некоторое время после облучения [1]. РТО позволяет определить образцы интегральных микросхем 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 сильно-полевой 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 инжекцию заряда в диэлектрик

применяли в основном для контроля качества технологических процессов и оценки влияния на МДП-структуры ионно-плазменных, радиационных и высоковольтных воздействий [4, 5]. Вместе с тем, полученные в [6 – 8] результаты указывают на возможность применения высоковольтной туннельной инжекции для выявления потенциально ненадежных МДП-структур, а также в качестве обработки для выявления и устранения дефектов зарядовой стабильности оксидов и, как следствие, повышения надежных характеристик МДП-структур.

Цель данной работы — исследование режимов ИТО МДП-структур, направленных на модификацию их зарядового состояния и повышение надежности и радиационной стойкости за счет снижения плотности зарядовых дефектов и повышения величины заряда, инжектированного до пробоя.

### Методика эксперимента и образцы

В качестве экспериментальных образцов использовали МДП-конденсаторы со структурой Si – SiO<sub>2</sub> – Al, изготовленных промышленным способом на пластинах монокристаллического кремния марки 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<sup>-4</sup> – 10<sup>-2</sup> см<sup>2</sup> напыляли магнетронным методом. После формирования алюминиевых электродов проводили отжиг пластин в среде азота при температуре 475 °С.

Инжекционная обработка МДП-структур заключается в высоковольтной по Фаулеру-Нордгейму инжекции из кремния в подзатворный диэлектрик МДП-структур заряда электронов 0,5 мКл/см<sup>2</sup> импульсом постоянного тока 0,1 мА/см<sup>2</sup>, при температуре пробоя от 20 до 100 °С.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: на полупроводниковой пластине делали представительную выборку МДП-структур, расположенных в непосредственной близости друг от друга. Данную выборку делили на две равные группы. К образцам первой группы прикладывали токовую нагрузку, и их выдерживали до пробоя образца. Вторая группа образцов сначала проходила инжекционную обработку, после чего их подвергали инжекционной нагрузке, подобно первой группе. На рис. 1а представлено изменение токовой нагрузки во время инжекционной обработки (сплошная линия) и во время инжекционных испытаний (пунктирная линия). На рис. 1б приведена временная зависимость изменения напряжения на МДП-структуре. Участок

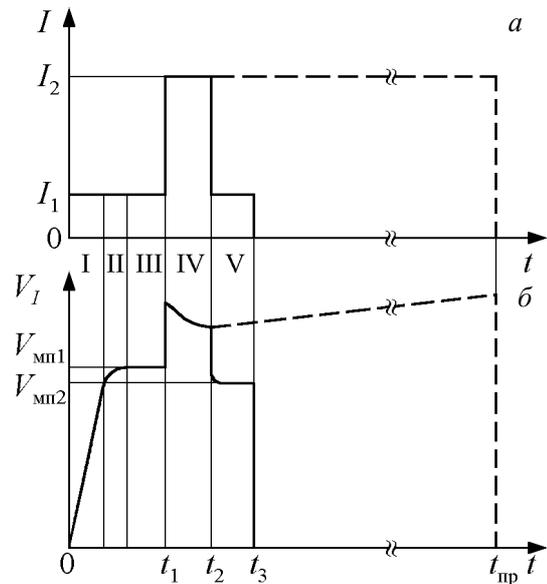


Рис. 1. Временные зависимости токовой нагрузки (а) и изменения напряжения на МДП-структуре (б). Сплошная линия — инжекционная обработка; пунктирная линия — инжекционные испытания

IV на зависимости  $V_I(t)$  соответствует заряду емкости МДП-структуры постоянным током  $I_1$ . 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  $I_2$ , 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. 1б) составляли  $j_1 = 0,1$  мкА/см<sup>2</sup> и  $j_2 = 0,1$  мА/см<sup>2</sup>, соответственно, а полярность токовой нагрузки обеспечивала высоковольтную туннельную по Фаулеру-Нордгейму инжекцию электронов из кремниевой подложки.

### Экспериментальные результаты и обсуждения

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 соответст-

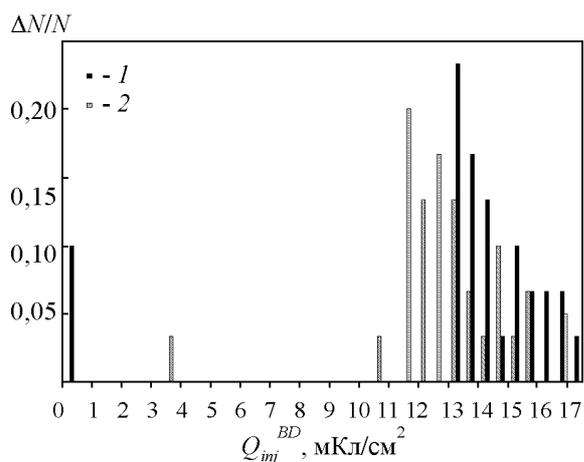


Рис. 2. Относительные гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному до пробоя образца плотностью постоянного тока 0,1 мА/см<sup>2</sup>: 1 – без обработки; 2 – после инжекционной обработки.

вует 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/см<sup>2</sup>), 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 инжекционно обработанных МДП-структур проводили при температуре 200°С в течение 1 часа. На рис. 3 показаны относительные гистограммы распределения МДП-структур по величине плотности заряда, инжектированного до пробоя образца, характеризующие проведение ИТО. Гистограмма 2 на рис. 3 соответствует группе МДП-структур, прошедших ИТО, гистограмма 1 — группе структур, не подвергавшихся обработке.

Из гистограммы (рис. 3) видно, что ИТО позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции. В результате, после обработки практически отсутствуют структуры с малым (менее 3 мКл/см<sup>2</sup>) зарядом, инжектированным до пробоя, и при этом не снижается инжекционный ресурс

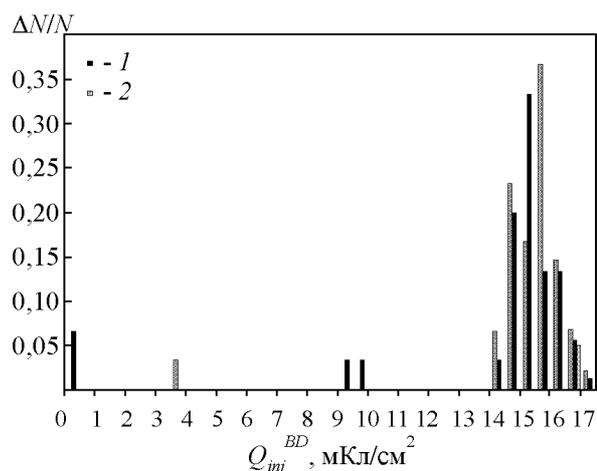


Рис. 3. Относительные гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному до пробоя образца плотностью постоянного тока 0,1 мА/см<sup>2</sup>: 1 – без обработки; 2 – после ИТО.

образцов, что является положительным фактом при проведении ИТО. Благодаря применению ИТО, происходит достаточно заметное повышение инжекционной 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 SiO<sub>2</sub> и на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub>, а последующий отжиг восстанавливает валентные связи, но уже без их деформации [4, 5].

Сравнение гистограмм распределения структур по заряду, инжектированному до пробоя, показывает, что в результате инжекционной обработки, выполненной при температуре 20°С, инжекционная стойкость МДП-структур возрастает по сравнению с исходными образцами. С повышением температуры инжекционной обработки данный эффект уменьшается и при 100 °С 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 ИТО, инжекцию заряда не следует проводить при повышенных температурах.

### Выводы

Показано, что ИТО 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<sup>2</sup>) зарядом, инжектированным до

пробоя, и при этом практически не снижается ресурс работы приборов на основе МДП-структур. Следовательно, проведение ИТО позволяет повысить инжекционную и радиационную стойкость наноразмерных диэлектрических пленок МДП-приборов.

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП “Развитие инфраструктуры nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008 – 2011 годы” (ГК №16.647.12.2002 от 11.10.2010 г., шифр 201–02-2.3-03) и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009 – 2013 годы ГК №П470 и №16.740.11.0151.*

### **Литература**

1. Катеринич И.И., Курин Ф.М., Попов В.Д. 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. Knoll M., Brauning D., Fahrner W.R. Comparative studies of tunnel injection and irradiation on metal oxide semiconductor structures. J. Appl. Phys., 1982, v. 53, no. 10, p. 6946 – 6952.
3. Андреев В.В., Бедняков А.А., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Столяров А.А., Лоскутов С.А. Сравнительное исследование зарядового состояния МДП-структур при облучении протонами и инъекции заряда в сильных электрических полях. ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2002, вып. 1 – 2, с. 61 – 66.
4. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide. Phys. Rev. B., 1994, v. 49, no. 15, p. 10278 – 10297.
5. Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides. J. Appl. Phys., 2005, v. 98, p. 121301 (1 – 36).
6. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E. Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures. Thin solid films, 2003, v. 427, p. 377 – 380.
7. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин Д.С., Михальков А.М. Исследование влияния режимов инжекционной модификации на зарядовое состояние подзатворного диэлектрика МДП-приборов. Перспективные материалы, 2009, № 2, с. 45 – 51.
8. Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин Д.С., Михальков А.М. Контроль качества диэлектрических слоев интегральных микросхем и изделий микросистемной техники. Научные технологии, 2010, т. 11, № 7, с. 44 – 52.

***Андреев Владимир Викторович** — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана, доктор технических наук, профессор. Специалист в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.*

***Бондаренко Геннадий Германович** — Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, заместитель директора, доктор физико-математических наук; профессор Московского государственного института электроники и математики (технического университета). Специалист в области физики конденсированного состояния, космического и радиационного материаловедения. E-mail: niipmt@cea.ru.*

***Михальков Андрей Михайлович** — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана, аспирант. Специалист в области материалов электронной техники. E-mail: p1kf@bmstu-kaluga.ru.*

***Столяров Александр Алексеевич** — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана, доктор технических наук, профессор. Специалист в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов. E-mail: p1kf@bmstu-kaluga.ru.*

***Соловьев Илья Викторович** — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана, студент. Специалист в области материалов электронной техники. E-mail: p1kf@bmstu-kaluga.ru.*