

## **Инжекционная модификация многослойных диэлектрических слоев структур металл – диэлектрик – полупроводник при различных температурах**

**В. В. Андреев, Г. Г. Бондаренко, А. А. Столяров, С. И. Коротков**

---

Исследованы процессы изменения зарядового состояния структур металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) с многослойными диэлектрическими плёнками SiO<sub>2</sub> – фосфорно-силикатное стекло (ФСС) при сильнополевой инжекционной модификации, проводимой при различных температурах. Изучено влияние температуры на термостабильную компоненту отрицательного заряда, используемую для коррекции порогового напряжения МДП-транзисторов. Установлено, что выполнение сильнополевой инжекционной модификации МДП-структур в режиме поддержания постоянного тока при повышенных температурах увеличивает не только плотность захватываемого отрицательного заряда, но и его термостабильную компоненту.

**Ключевые слова:** МДП-структура, тонкие пленки, сильные электрические поля, модификация подзатворного диэлектрика, диоксид кремния, фосфорно-силикатное стекло (ФСС).

---

In this article the charge state change of MOS structures with multilayer dielectric films SiO<sub>2</sub>-PSG under high-field injection modification at different temperatures is studied. The effect of temperature on the thermal stability of the negative charge component used to adjust the threshold voltage of MOS transistors is investigated. It is found that the performance of the injection modification high-field MOS structures in the mode of constant current at elevated temperatures increases not only the density of the trapped negative charge, but its thermal stability component.

**Key words:** MOS-structure, thin film, high-field, modification of the gate dielectric, silicon dioxide, phosphor-silicate glass

---

### **Введение**

К основным достоинствам метода сильнополевой инжекции электронов в диэлектрическую пленку следует отнести возможности проведения индивидуальной коррекции порогового напряжения МДП-транзисторов, а также контроля изменения зарядового состояния диэлектрика непосредственно в процессе инжекции [1 – 3]. В [1 – 4] показана возможность корректировки пороговых напряжений в МДП-транзисторов, сформированных на основе термической пленки SiO<sub>2</sub> легированной фосфором. Наличие пленки ФСС обеспечивает создание в подзатворном диэлектрике электронных ловушек, способных накапливать отрицательный заряд, имеющий высокую временную и температурную

стабильность [1, 2, 4]. Однако при инжекционной модификации с использованием сильнополевой туннельной инжекции по Фаулеру – Нордгейму в МДП-структурах наряду с накоплением отрицательного заряда на электронных ловушках в пленке ФСС может происходить генерация положительного заряда в диоксиде кремния, рост плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик, увеличение плотности электронных ловушек в SiO<sub>2</sub>, поляризация ФСС и т.д. [1, 4–7]. При напряженностях электрических полей и плотностях инжектированного заряда, используемых для инжекционной модификации, наиболее заметными деградационными процессами, протекающими в МДП-структуре, являются накопление положительного заряда и увеличение плотности поверхностных

состояний. Для устранения деградиционных процессов и повышения стабильности зарядового состояния после инжекционной модификации диэлектрической пленки обычно проводят термический отжиг прибора [1, 4]. Важная задача — определение оптимальных режимов инжекционной модификации и в связи с этим большой интерес представляет исследование влияния температуры, при которой осуществляется инжекция, на изменение зарядового состояния подзатворного диэлектрика.

Цель данной работы — исследование процессов изменения зарядового состояния МДП-структур с многослойными диэлектрическими плёнками  $\text{SiO}_2$  – ФСС наноразмерной толщины при сильнополевой инжекционной модификации, проводимой при разных температурах, и изучение влияния температуры на термостабильную компоненту отрицательного заряда, используемую для коррекции порогового напряжения МДП-транзисторов.

### Методика эксперимента и образцы

В качестве экспериментальных образцов в данной работе использовались тестовые МДП-конденсаторы, изготовленные в заводских условиях на пластинах монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5. Двуокись кремния толщиной 100 нм получали термическим окислением кремния в сухом кислороде при температуре 1000 °С с добавлением 3%  $\text{HCl}$ . Пленку ФСС толщиной 10 – 20 нм формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси  $\text{POCl}_3$  –  $\text{O}_2$  при температуре 900 °С. Затем пластины отжигали в атмосфере азота при температуре 1000 °С. Алюминиевую пленку толщиной 1,2 мкм напыляли магнетронным методом, после чего, используя фотолитографию, формировали Al электроды площадью  $10^{-2}$  см<sup>2</sup> и удаляли оксид с обратной стороны пластины. Последующий отжиг проводили при температуре 475 °С в среде азота.

Модификацию зарядового состояния подзатворного диэлектрика МДП-структур проводили с помощью сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремниевой подложки [1 – 3] в диапазоне температур образца от 20 до 100 °С в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью от 0,1 до 10 мкА/см<sup>2</sup>. В процессе инжекции осуществляли контроль напряжения на МДП-структуре. Это позволило получить данные об изменении зарядового состояния диэлектрической пленки. Для определения величины термостабильной компоненты накопленного в диэлектрике электрического заряда после инжекционных воздействий

МДП-структуры подвергали отжигу при температуре 200 °С в течение времени от 200 с до 20 мин.

Для оценки изменения зарядового состояния МДП-структур также использовали высокочастотный C – V-метод и метод управляемой токовой нагрузки [8]. Метод управляемой токовой нагрузки заключается в приложении к исследуемому образцу импульса тока специальной формы, который обеспечивает заряд ёмкости МДП-структуры и вызывает последующую сильнополевую туннельную инжекцию электронов в диэлектрик в режиме постоянного тока. Во время модификации процесс инжекции прерывали с целью измерения вольт-фарадной характеристики для контроля изменения зарядового состояния исследуемой МДП-структуры.

### Экспериментальные результаты и обсуждения

В результате проведенных исследований было установлено, что при сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремниевой подложки в диапазонах плотностей токов  $10^{-7}$  –  $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> и температур 20 – 100 °С основным механизмом изменения зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой  $\text{SiO}_2$ , легированной фосфором, является накопление отрицательного заряда на электронных ловушках, локализованных в пленке ФСС. Эти данные хорошо согласуются с ранее полученными результатами [1 – 3] и работами других авторов [7]. На рис. 1 приведены типичные зависимости сдвига напряжения плоских зон, полученные из высокочастотных C – V-характеристик, в зависимости от величины инжектированного в диэлектрик заряда для трех температур образца, при которых проводили сильнополевую туннельную инжекцию. Для получения зависимостей, приведенных на рис. 1, в подзатворный диэлектрик различных МДП-структур, находящихся на одной полупроводниковой пластине, инжектировали заряд определенной плотности. В процессе инжекции изменение зарядового состояния диэлектрика контролировали по изменению напряжения на структуре. После инжекции измеряли сдвиг C – V-характеристик (рис. 1, кривые 1 – 3) и затем проводили отжиг структуры при температуре 200 °С в течение 20 мин и снова измеряли сдвиг C – V-характеристик (рис. 1, кривые 1' – 3'). Разброс изменений напряжений на исследуемых МДП-структурах в процессе инжекции и напряжений сдвигов C – V-характеристик для различных образцов не превышал 5%, что позволило объединить полученные результаты на одном рисунке.

Как видно из рис. 1 (кривые 1 – 3), повышение температуры приводит к возрастанию сдвига напряжения плоских зон в сторону положительных напряжений. Аналогичный характер имеют и зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе модификации от плотности инжектированного заряда, полученные для разных температур образца (рис. 2). Анализируя зависимости, приведенные на рис. 1 (кривые 1 – 3) и 2 можно сделать вывод, что с повышением температуры, при которой проводится инъекция электронов, увеличивается плотность захватываемого в

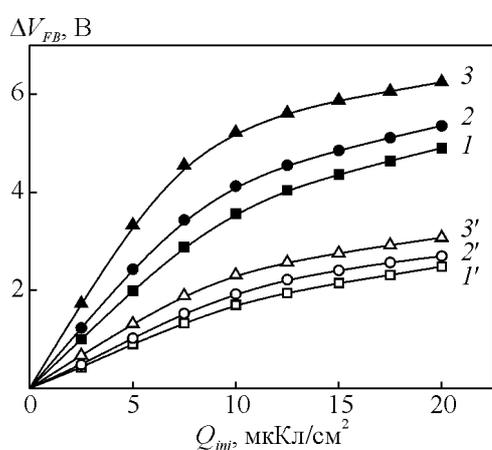


Рис. 1. Зависимости сдвига напряжения плоских зон на МДП-структуре в процессе модификации (1 – 3) и после отжига при 200 °С (1' – 3') от плотности инжектированного заряда для разных температур образца при модификации, °С: 1 – 20; 2 – 50; 3 – 100.

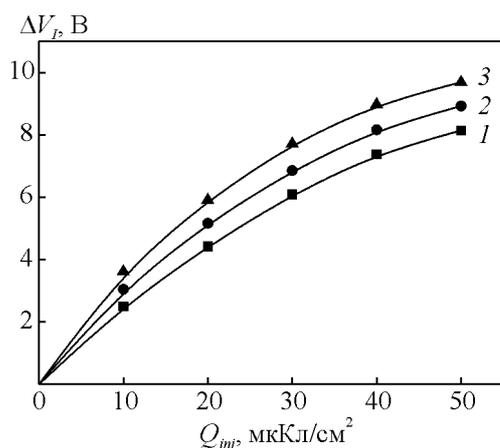


Рис. 2. Зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе модификации при разных температурах образца от плотности инжектированного заряда, °С: 1 – 20; 2 – 50; 3 – 100.

пленке ФСС отрицательного заряда, а так же уменьшается плотность дырок, накапливаемых в диоксиде кремния у границы раздела Si – SiO<sub>2</sub> [6].

Для получения термостабильной компоненты накопленного в процессе инжекционной модификации отрицательного заряда в подзатворном диэлектрике, МДП-структуры отжигали при температуре 200 °С. Для определения параметров релаксации отрицательного заряда, накопленного в диэлектрике, процесс отжига прерывали, после чего выполняли измерение вольт-фарадных характеристик. На рис. 3 приведены зависимости изменения сдвига напряжения плоских зон для МДП-структур, модифицированных зарядом плотностью 20 мкКл/см<sup>2</sup> при трех различных температурах, от времени последующего отжига образца при температуре 200 °С. Как видно из рис. 3, при длительности отжига более 1000 с изменения зарядового состояния МДП-структуры практически не происходит и в диэлектрике остается только термостабильная компонента отрицательного заряда. Эти результаты подтверждают наши более ранние исследования, когда для оценки характеристик отрицательного заряда использовали метод токов термостимулированной деполяризации [9]. Следовательно, для получения термостабильной компоненты отрицательного заряда после сильнополевой инжекционной модификации достаточно проводить отжиг МДП-прибора при температуре 200 °С в течение 20 мин.

На рис. 1 (кривые 1' – 3') приведены зависимости сдвига напряжения плоских зон от плотности инжектированного заряда после отжига инжек-

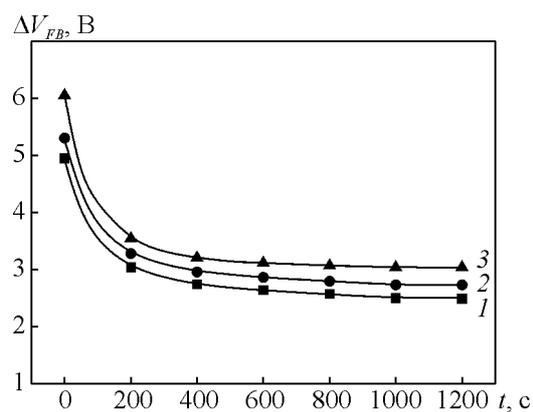


Рис. 3. Зависимости изменения сдвига напряжения плоских зон для МДП-структур, модифицированных зарядом плотностью 20 мкКл/см<sup>2</sup> при разной температуре образца, °С: 1 – 20; 2 – 50; 3 – 100, от времени последующего отжига образца при температуре 200°С.

ционно-модифицированных МДП-структур при 200 °С в течение 20 мин. Как видно из рис. 1, при повышенных температурах инжекционной модификации происходит не только возрастание плотности отрицательного заряда, накапливаемого в диэлектрической плёнке (кривые 1 – 3), но и увеличение термостабильной компоненты этого заряда (кривые 1' – 3'). Проведенный анализ вольт-фарадных характеристик, полученных непосредственно после инжекционного воздействия и после отжига при 200 °С, позволяет говорить об отсутствии заметного изменения плотности заряда поверхностных состояний на границе раздела полупроводника и диэлектрика у исследованных МДП-структур.

В результате проведенных исследований установлено, что выполнение сильнополевой инжекционной модификации МДП-структур в режиме поддержания постоянного тока при повышенных температурах увеличивает не только плотность захватываемого отрицательного заряда, но и его термостабильную компоненту. Наблюдаемое увеличение плотности термостабильной компоненты отрицательного заряда при повышенных температурах происходит на фоне действия конкурирующих процессов накопления и стекания зарядов дырок и электронов в условиях изменения внутренних электрических полей и изменения характеристик электронных и дырочных ловушек. Это значительно затрудняет определение физической природы данного явления и предполагает проведение дополнительных исследований и более подробного учета влияния как основных, так и побочных процессов, протекающих в подзатворных диэлектриках в условиях сильных электрических полей и инжекции носителей при повышенных температурах.

Проведение инжекционной модификации при повышенной температуре существенно снижает плотность накапливаемого положительного заряда. Как известно [10 – 14], накопление положительного заряда сопровождается увеличением плотности поверхностных состояний и является одним из основных деградиационных процессов, приводящих со временем к пробую подзатворного диэлектрика. Следовательно, проведение инжекционной модификации при повышенных температурах снижает негативное влияние сильнополевой инжекции носителей в диэлектрик на состояние границы раздела диэлектрик – полупроводник при инжекции электронов из кремния. Однако с повышением температуры образца, при которой проводится инжекция заряда, существенно возрастает вероятность пробоя диэлектрической пленки, а для получения термостабильной компоненты отрицательного

заряда все равно необходимо проводить послеинжекционный отжиг. Помимо этого проведение сильнополевой инжекционной модификации при повышенной температуре требует наличия более сложного оборудования и приводит к лишним энергетическим затратам. Следовательно, более технологичным является проведение сильнополевой инжекционной модификации МДП-приборов при комнатной температуре, а повышение температуры целесообразно проводить в тех случаях, когда необходимо расширить диапазон коррекции порогового напряжения.

Как видно из зависимостей, приведенных на рис. 1 и 2, наиболее эффективным режимом с точки зрения скорости изменения зарядового состояния диэлектрика является инжекция электронов плотностью тока  $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> при температуре 100°С. При этих условиях инжекции также наблюдается наибольшая плотность термостабильной компоненты отрицательного заряда в диэлектрике после отжига. Однако при воздействии туннельного тока большой плотности повышается интенсивность деградиационных процессов в диэлектрической плёнке, что может привести к быстрому выходу структуры из строя. Кроме того, воздействие токов большой плотности затрудняет точную установку порогового напряжения, так как при этом происходит достаточно быстрое накопление заряда в диэлектрике. Поэтому наиболее оптимальным представляется выполнение сильнополевой инжекционной модификации при плотности тока  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>.

В [4] для заполнения электронных ловушек в пленке диоксида кремния, легированного фосфором, и, как следствие, корректировки порогового напряжения МДП-транзисторов, использовали ультрафиолетовое (УФ) облучение. Поскольку затворы серийных МДП-структур не прозрачны для УФ-квантов, то наблюдавшееся заполнение электронных ловушек под действием излучения было обусловлено тем, что слои оксида в МДП-структурах служили “световодами” для УФ. При таком воздействии сложно обеспечить равномерное проникновение УФ-излучения под затвор транзистора и, как следствие, может наблюдаться неравномерное накопление отрицательного заряда. Кроме того, УФ-облучение не позволяет контролировать изменение зарядового состояния диэлектрика в процессе обработки и проводить индивидуальную коррекцию МДП-приборов. Применение сильнополевой инжекционной модификации дает возможность устранить указанные недостатки и проводить прецизионную корректировку пороговых напряжений, в том числе и на корпусированных МДП-приборах. Режимы

сильнополевой инжекционной модификации МДП-приборов необходимо выбирать исходя из конкретной технологии формирования подзатворного диэлектрика на основе характеристик накопления термостабильной компоненты отрицательного заряда и исходя из изменений зарядового состояния образца во время инжекции.

### **Заключение**

Установлено, что выполнение сильнополевой инжекционной модификации МДП-структур в режиме поддержания постоянного тока при повышенных температурах в диапазоне 20 – 100 °С увеличивает не только плотность захватываемого отрицательного заряда, но и его термостабильную компоненту. Однако с повышением температуры образца, при которой проводится инжекция заряда, существенно возрастает вероятность пробоя диэлектрической пленки и усложняется процесс модификации. Следовательно, более технологичным является проведение сильнополевой инжекционной модификации МДП-приборов при комнатной температуре, а повышение температуры целесообразно проводить в тех случаях, когда необходимо расширить диапазон коррекции порогового напряжения.

*Работа выполнена в рамках реализации проекта министерства образования и науки РФ, а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 12-02-97533).*

### **Литература**

1. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин М.С., Коротков С.И. Влияние температуры на инжекционную модификацию диэлектрических пленок МДП-структур. Перспективные материалы, 2008, № 5, с. 26 – 30.
2. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин М.С., Михальков А.М. Исследование влияния режимов инжекционной модификации на зарядовое состояние подзатворного диэлектрика МДП-приборов. Перспективные материалы, 2009, № 2, с. 19 – 24.
3. 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.
4. Левин М.Н., Гитлин В.Р., Татаринцев А.В., Остроухов С.С., Кадменский С.Г. Рентгеновская корректировка пороговых напряжений в производстве МДП интегральных схем. Микроэлектроника, 2002, т. 31, № 6, с. 408 – 413.
5. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции. Микроэлектроника. 1997, № 6, с. 640 – 646.
6. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields. Thin solid films. 2006, v. 515, p. 670 – 673.
7. Солдатов В.С., Соболев Н.В., Варлашов И.Б. и др. Электронный захват в МДП-структурах с термическим оксидом кремния при туннельной инжекции. Известия вузов. Физика. 1989, № 12, с. 82 – 84.
8. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2012, v. 41, p. 012017 (1 – 9).
9. Барышев В.Г., Столяров А.А., Андреев В.В. Исследование особенностей накопления и растекания отрицательного заряда в тонкопленочном диэлектрике. Электронная техника. Сер. 6, Материалы, 1986, вып. 4, с. 45 – 48.
10. 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.
11. 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).
12. Гриценко В.А., Тыщенко И.Е., Попов В.П., Перевалов Т.В. Диэлектрики в нанозлектронике. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010, 258 с.
13. Булушева М.А., Попов В.Д., Протопопов Г.А., Скородумова А.В. Физическая модель процесса старения МОП-структуры. Физика и техника полупроводников, 2010, т. 44, вып. 4, с. 527 – 532.
14. Afanas'ev V.V., Stesmans A. Internal photoemission at interfaces of high-k insulators with semiconductors and metals. J. Appl. Phys., 2007, v. 102, p. 081301 (1 – 28).

*Статья поступила в редакцию 27.03.2013 г.*

**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](mailto:andreev@bmstu-kaluga.ru).

**Бондаренко Геннадий Германович** — Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики”, доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области физики конденсированного состояния, космического и радиационного материаловедения. E-mail: [bondarenko\\_gg@rambler.ru](mailto:bondarenko_gg@rambler.ru).

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

**Коротков Сергей Игоревич** — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана, аспирант. Специалист в области материалов электронной техники. E-mail: [p1kf@bmstu-kaluga.ru](mailto:p1kf@bmstu-kaluga.ru).