

Влияние температуры на инжекционную модификацию диэлектрических пленок МДП-структур

В. В. Андреев, Г. Г. Бондаренко, А. А. Столяров,
М. С. Васютин, С. И. Коротков

Изучено влияние повышенной температуры на процессы, характеризующие изменение зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой SiO_2 , пассивированной пленкой ФСС, при сильнополевой инжекционной модификации. Установлено, что повышение температуры в процессе инжекционной модификации приводит к уменьшению плотности накапливаемого положительного заряда и, тем самым, снижает интенсивность деградационных процессов в МДП-структурах $\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{ФСС} - \text{Al}$. При этом увеличение сдвига напряжения середины запрещенной зоны в процессе инжекционной модификации, в основном, обусловлено уменьшением плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO_2 МДП-структур. Показано, что проведение сильнополевой инжекционной модификации МДП-структур $\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{ФСС} - \text{Al}$ в режиме поддержания постоянного напряжения на затворе при повышенных температурах увеличивает не только плотность захватываемого отрицательного заряда, но и его термостабильную компоненту.

Введение

Модификация интегральных схем и полупроводниковых приборов с МДП-структурой позволяет улучшать или корректировать их характеристики на завершающем этапе технологического цикла изготовления кристаллов или непосредственно на готовых приборах [1 – 6]. Основной целью модификации, как правило, является корректировка пороговых напряжений МДП-транзисторов за счет изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика. Изменение зарядового состояния диэлектрической пленки обычно осуществляют, используя радиационное и ультрафиолетовое облучения [1,2], плазменную обработку [3], воздействие сильных электрических полей [4 – 6] и др. 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 в процессе коррекции. Для

корректировки пороговых напряжений наиболее подходящими являются МДП-структуры, сформированные на основе термических пленок SiO_2 , легированных фосфором. Наличие пленки фосфорно-силикатного стекла (ФСС) обеспечивает создание в подзатворном диэлектрике электронных ловушек, способных накапливать отрицательный заряд, имеющий высокую временную и температурную стабильность [4 – 8]. Однако при инжекционной модификации с использованием сильнополевой туннельной инжекции по Фаулеру – Нордгейму в МДП-структурах наряду с накоплением отрицательного заряда на электронных ловушках в ФСС может происходить генерация положительного заряда в двуокиси кремния, рост плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник – диэлектрик, увеличение плотности электронных ловушек в SiO_2 , поляризация ФСС и т.д. [7]. При напряженностях электрических полей и плотностях инжектированного заряда, используемых для инжекционной модификации, наиболее заметные деградационные процессы, протекающие в МДП-

структуре — накопление положительного заряда и увеличение плотности поверхностных состояний. Для устранения деградационных процессов после инжекционной модификации проводят термический отжиг прибора [4 – 6]. Одним из путей повышения эффективности инжекционной модификации и уменьшения деградационных процессов является проведение инъекции электронов в многослойный диэлектрик при повышенных температурах.

В данной статье изучено влияние температуры на процессы, характеризующие изменение зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой SiO₂, пассивированной пленкой ФСС при сильнополевой инжекционной модификации.

Методика эксперимента и образцы

В качестве экспериментальных образцов использовали тестовые МДП-конденсаторы, изготовленные в заводских условиях на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией <100>. Двоокись кремния толщиной 90 нм получали термическим окислением кремния в сухом кислороде при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl. Пленку ФСС формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси POCl₃ – O₂ 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 10⁻⁵ – 10⁻² см² и удаляли оксид с обратной стороны пластины. Последующий отжиг проводили при температуре 475 °С в среде азота. Исходные образцы имели следующие характеристики: плотность поверхностных состояний в центре запрещенной зоны ~2·10¹⁰ эВ⁻¹ см⁻², плотность подвижного заряда в оксиде не более 1,6·10⁻⁹ Кл/см².

Модификацию зарядового состояния подзатворного диэлектрика МДП-структур проводили с использованием сильнополевой туннельной инъекции электронов из кремниевой подложки в диапазоне температур от 20 до 100 °С.

Для МДП-приборов с малой площадью затвора, какими являются МДП-транзисторы, проведение инжекционной модификации в режиме поддержания постоянного инжекционного тока вызывает большие затруднения, так как требуется подавать на образцы ток 10⁻¹² – 10⁻¹⁴ А при напряжениях 70 – 80 В. Реализовать подачу таких токов технически достаточно сложно, особенно в производственных условиях. Поэтому в данных исследованиях инъекцию заряда в подзатворный диэлектрик МДП-структур с целью его

модификации проводили в основном методом постоянного напряжения. Для повышения температурной стабильности накопленного в диэлектрике отрицательного заряда в соответствии с результатами, полученными в [4, 5], после инжекционной модификации МДП-структуры отжигали при температуре 200 °С в течение 1 часа.

Для исследования температурных зависимостей накопления положительного заряда в МДП-структурах использовалась сильнополевая инъекция заряда в диэлектрик в режиме постоянного тока. Применение данного режима позволяло непосредственно во время инъекции контролировать зарядовое состояние диэлектрической пленки по изменению напряжения, падающего на МДП-структуру [8].

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировали с использованием C – V-метода и метода управляемой токовой нагрузки [8, 9], заключавшегося в приложении к образцу импульса тока специальной формы, обеспечивающего заряд ёмкости МДП-структуры и последующую сильнополевую туннельную инъекцию электронов в диэлектрик, обычно осуществляемую в режиме протекания постоянного тока. Во время модификации процесс инъекции прерывался, и контролировалось смещение вольт-амперной характеристики МДП-структуры ΔV_I и приращение напряжения середины запрещенной зоны кремния (V_{MG}), характеризовавшие изменение зарядового состояния МДП-структуры [5].

Экспериментальные результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что для инжекционной модификации используемых экспериментальных образцов наиболее подходящим является режим инъекции электронов из кремния при положительных напряжениях на затворе от 70 до 75 В (это соответствовало плотностям тока 10⁻⁶ – 10⁻⁵ А/см²). Меньшие напряжения приводили к очень длительным временам обработки, а более высокие напряжения интенсифицировали нежелательные деградационные процессы, заключающиеся в генерации положительного заряда и возрастании плотности поверхностных состояний. На рис. 1 представлены временные зависимости изменения напряжения середины зоны (ΔV_{MG}) для МДП-структур Si – SiO₂ – ФСС – Al, полученные при различных температурах в режиме инъекции электронов из кремния при напряжении на затворе 73 В. Как видно из рис.1, с ростом температуры происходит интенсивное увеличение

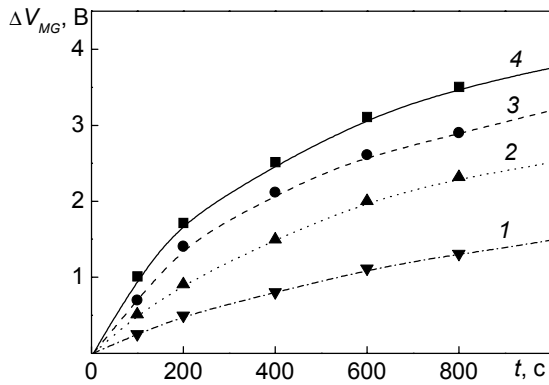


Рис. 1. Зависимости изменения напряжения середины зоны (ΔV_{MG}) для МДП-структур Si-SiO₂-ФСС-Al от времени под действием сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния при различных температурах, °С: 1 – 20; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100.

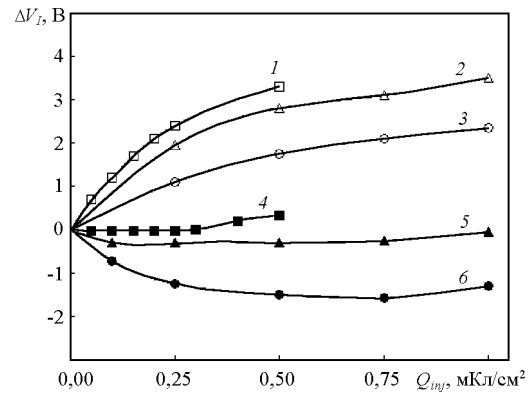


Рис. 2. Зависимость изменения напряжения на МДП-структурах Si – SiO₂ – ФСС – Al (кривые 1 – 3) и Si – SiO₂ – Al (кривые 4 – 6) от величины инжектированного заряда при различных амплитудах туннельного тока: 1, 4 – 10⁻⁷ А/см²; 2, 5 – 10⁻⁶ А/см²; 3, 6 – 10⁻⁵ А/см².

ΔV_{MG} . В работе [8] было показано, что кинетика изменения зарядового состояния МДП-структур Si – SiO₂ – ФСС – Al определяется не только захватом электронов на ловушки в ФСС, но и образованием положительного заряда дырок, генерированных ударной ионизацией и захваченных на ловушки в SiO₂ вблизи границы раздела диоксид кремния – полупроводник. В частности, уменьшение напряжения сдвига вольт-амперной характеристики в МДП-структурах Si – SiO₂ – ФСС – Al с ростом плотности тока инжекции, как было показано в [8], связано в основном с генерацией положительного заряда (рис. 2). На рис. 2 представлены зависимости изменения напряжения на МДП-структурах Si – SiO₂ – ФСС – Al (кривые 1 – 3) и Si – SiO₂ – Al (кривые 4 – 6), изготовленных в одном технологическом процессе, от величины инжектированного заряда при различных амплитудах туннельного тока: 1, 4 – 10⁻⁷ А/см²; 2, 5 – 10⁻⁶ А/см²; 3, 6 – 10⁻⁵ А/см². Как видно из рис. 2, изменение зарядового состояния структур Si – SiO₂ – ФСС – Al не является простой суперпозицией накопления положительного и отрицательного зарядов, а имеет более сложный характер и, по-видимому, зависит от взаимодействия электрических полей, создаваемых данными зарядами. Для определения вклада каждого из этих зарядов в температурную зависимость изменения напряжения на МДП-структурах Si – SiO₂ – ФСС – Al при сильнополевой инжекционной модификации необходимо исследовать температурные зависимости накопления положительного заряда в диоксиде кремния и сопоставить их с изменением напряжения в диэлектрической пленке SiO₂ – ФСС.

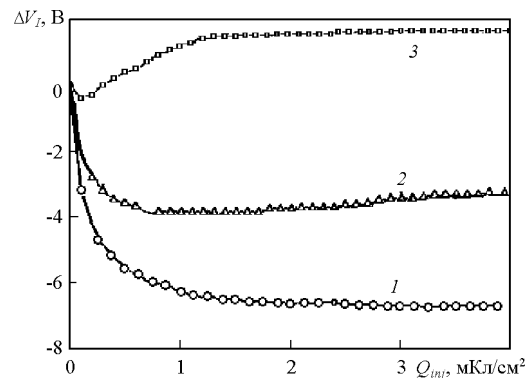


Рис. 3. Изменение напряжения на МДП-структуре Si-SiO₂-Al под действием сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния в зависимости от инжектированного заряда при плотности тока 1 мА/см² для различных температур образца, °С: 1 – 20; 2 – 50; 3 – 100.

Для исследования процесса генерации положительного заряда в МДП-структурах с SiO₂ проводили сильнополевую туннельную инжекцию электронов из кремниевого электрода. Диапазон инжекционного тока I_S , используемого для стрессового воздействия, изменялся в пределах 10⁻⁵ – 10⁻² А/см². На рис. 3 показаны изменения напряжения на МДП-структуре Si – SiO₂ – Al в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью 1 мА/см², полученные при различных температурах образцов. В соответствии с [9, 10], данные изменения напряжения пропорциональны плотности положительного заряда, накапливающегося в диэлектрической пленке МДП-структуры в процессе тун-

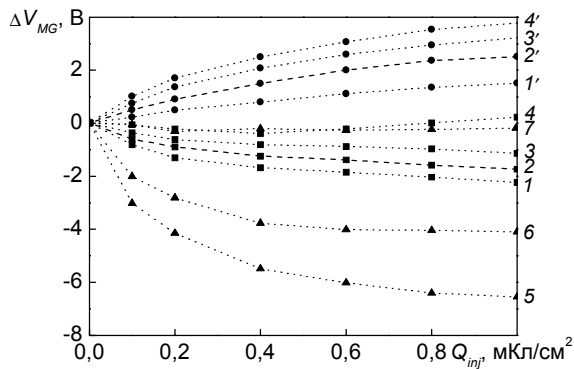


Рис. 4. Зависимости изменения напряжения ΔV_{MG} для МДП-структур Si – SiO₂ – Al (кривые 1 – 7) и Si – SiO₂ – ФСС – Al (кривые 1' – 4') под действием сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния в зависимости от инжектированного заряда для различных температур и плотности тока инжекции: 1, 5, 1' – 20 °С; 2, 6, 2' – 50 °С; 3, 3' – 75 °С; 4, 7, 4' – 100 °С; 1 – 4, 1' – 4' – плотность тока инжекции 10^{-6} А/см²; 5, 6, 7 – плотность тока инжекции 10^{-3} А/см².

нельной инжекции электронов. Как видно из рис. 3, с ростом температуры наблюдается снижение плотности положительного заряда, что может быть связано с термической ионизацией части заполненных дырочных ловушек.

В работе [10] было показано, что температурные зависимости плотности дырок, накапливающихся в пленке SiO₂ МДП-структур, при различных плотностях туннельного тока спрямляются в координатах $\ln(p) - 1/T$ и имеют близкий наклон. Причем толщина окисла в МДП-структурах и технология изготовления образцов оказывали незначительное влияние на эти зависимости. Анализ экспериментальных данных, приведенных в [9, 10], позволил сделать вывод о наличии термической ионизации части заполненных дырочных ловушек, что подтверждает результаты, полученные в [10].

На рис. 4 показаны зависимости изменения напряжения ΔV_{MG} на МДП-структурах Si – SiO₂ – Al и Si – SiO₂ – ФСС – Al под действием сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния в зависимости от инжектированного заряда для различных температур. Из графиков видно, что основной вклад в увеличение напряжения на МДП-структурах с многослойным диэлектриком SiO₂ – ФСС при сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния с ростом температуры оказывает уменьшение накопления положительного заряда дырок, захватываемых на ловушки в диоксиде кремния.

В результате проведенных исследований установлено, что выполнение сильнополевой инжекционной модификации МДП-структур в режиме поддержания постоянного напряжения на затворе при повышенных температурах увеличивает не только плотность захватываемого отрицательного заряда, но и его термостабильную компоненту. После отжига инжекционно модифицированных МДП-структур Si – SiO₂ – ФСС – Al в течение часа при 200 °С характер кривых, приведенных на рис. 1, сохранялся, однако абсолютные значения ΔV_{MG} уменьшались примерно на 40 %. 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, таким образом, существенно снижает плотность накапливаемого положительного заряда. Как известно [11], накопление положительного заряда сопровождается увеличением плотности поверхностных состояний и является одним из основных деградационных процессов, приводящих со временем к пробое 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.

Выводы

1. Установлено, что повышение температуры в процессе инжекционной модификации приводит к уменьшению плотности накапливаемого положительного заряда и, тем самым, снижает интенсивность деградационных процессов в МДП-структурах Si – SiO₂ – ФСС – Al.

2. Определено, что увеличение сдвига напряжения середины запрещенной зоны при инжекционной модификации, проводимой при повышенных температурах, в основном обусловлено

уменьшением плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO₂ МДП-структур.

3. Установлено, что выполнение инжекционной модификации МДП-структур Si – SiO₂ – ФСС – Al в режиме поддержания постоянного напряжения на затворе при повышенных температурах увеличивает не только плотность захватываемого отрицательного заряда, но и его термостабильную компоненту.

Литература

1. 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.
2. Левин М.Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р. Моделирование процессов рентгеновской корректировки пороговых напряжений МДП-интегральных схем. Микроэлектроника, 2006, т. 35, № 5, с. 382 – 391.
3. Назаров А.Н., Лысенко В.С. ВЧ плазменная обработка как метод радиационно-термического наводораживания микроэлектронных кремниевых структур. Микроэлектроника, 1994, т. 23, № 4, с. 45 – 65.
4. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high-fields. Vacuum, 2002, v. 67/3-4, p. 507 – 511.
5. Андреев В.В. Плазменная и инжекционная модификация электрофизических характеристик МДП-структур. Физика и химия обработки материалов, 2001, № 6, с. 47 – 53.
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. Солдатов В.С., Соболев Н.В., Варлашов И.Б. и др. Электронный захват в МДП-структурах с термическим оксидом кремния при туннельной инжекции. Изв. вузов. Физика, 1989, № 12, с. 82 – 84.
8. 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.
9. 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.
10. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Драч В.Е., Лоскутов С.А., Столяров М.А., Чухраев И.В. Влияние температуры на накопление положительного заряда в МДП-структурах в условиях сильнополевой инжекции. Перспективные материалы, 2006, № 4, с. 32 – 37.
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.

Андреев Владимир Викторович — Калужский филиал МГТУ им.Н.Э.Баумана, доктор технических наук, доцент. Специалист в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов.

Бондаренко Геннадий Германович — Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского государственного института электроники и математики (технического университета), заместитель директора, доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области материалов электронной техники.

Столяров Александр Алексеевич — Калужский филиал МГТУ им.Н.Э.Баумана, доктор технических наук, профессор. Специалист в области материалов электронной техники.

Васютин Максим Сергеевич — Калужский филиал МГТУ им.Н.Э.Баумана, аспирант. Специалист в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов.

Коротков Сергей Игорьевич — Калужский филиал МГТУ им.Н.Э.Баумана, студент. Специалист в области материалов электронной техники.