УДК 621.315

ВЛИЯНИЕ ЗАХВАТА НОСИТЕЛЕЙ В ОКИСЛЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ

[1]Мустафаев Г.А.*, [2]Мустафаев А.Г., [1]Здравомыслов Д.М.

[1]Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
[2]Дагестанский государственный университет народного хозяйства

***zoone@mail.ru**

Аннотация. *В работе исследованы эффекты в полевых МДП-транзисторах, связанные с захватом зарядов ловушками, расположенными как в слое подзатворного окисла, так и на границе раздела Si/SiO_2. Показано, что появление положительного заряда, вызывается захватом дырок ловушками, расположенными вблизи границы валентной зоны анода, а при больших стрессовых дозах преобладающую роль начинает играть захват электронов. В случае отрицательных напряжений на затворе положительный заряд в окисле расположен вблизи границы раздела Si/SiO_2 (~1 нм), то есть в пределах туннелирования электронов. Ток через тонкий окисел, возникающий вследствие эффекта Фаулера–Нордхейма, приводит к накоплению зарядов в слое окисла, а также к образованию ловушек на границе раздела Si/SiO_2.*

Ключевые слова: подзатворный окисел, туннельный захват, полевой транзистор, дрейф порогового напряжения, граница раздела, стрессовая доза, эффект Фаулера-Нордхейма, деградация характеристик, плотность тока.

THE EFFECT OF CARRIER CAPTURE IN OXIDE ON THE CHARACTERISTICS OF MRI TRANSISTORS

[1]Mustafaev G.A., [2]Mustafaev A.G., [1]Zdravomyslov D.M.

[1]Kabardino-Balkarian State University
[2]Dagestan State University of National Economy

Abstract. *The paper investigates the effects in field-effect MRI transistors associated with the capture of charges by traps located both in the subcutaneous oxide layer and at the Si/SiO_2 interface. It is shown that the appearance of a positive charge is caused by the capture of holes by traps located near the boundary of the valence band of the anode, and at high stress doses, electron capture begins to play a predominant role. In the case of negative gate voltages, the positive charge in the oxide is located near the Si/SiO_2 interface (~1 nm), that is, within the limits of electron tunneling. The current through a thin oxide, resulting from the Fowler-Nordheim effect, leads to the accumulation of charges in the oxide layer, as well as to the formation of traps at the Si/SiO_2 interface.*

Keywords: gate oxide, tunnel capture, field effect transistor, threshold voltage drift, interface, stress dose, Fowler-Nordheim effect, degradation of characteristics, current density.

Введение

Явление туннельного захвата носителей слоем тонкого окисла – эффект Фаулера–Нордхейма, широко используется в постоянных ЗУ с электрической записью и стиранием информации. Однако в полевых МДП-транзисторах (МДП ПТ) с малыми размерами элементов эффект Фаулера–Нордхейма играет отрицательную роль, вызывая дрейф порогового напряжения и снижение крутизны характеристики [1–6]. Ухудшение параметров МДП ПТ связано с захватом зарядов ловушками, расположенными как в слое

подзатворного окисла, так и на границе раздела Si/SiO_2. В работе исследованы оба эффекта с целью оценки степени их индивидуального влияния на характеристики МДП ПТ.

Результаты и обсуждение

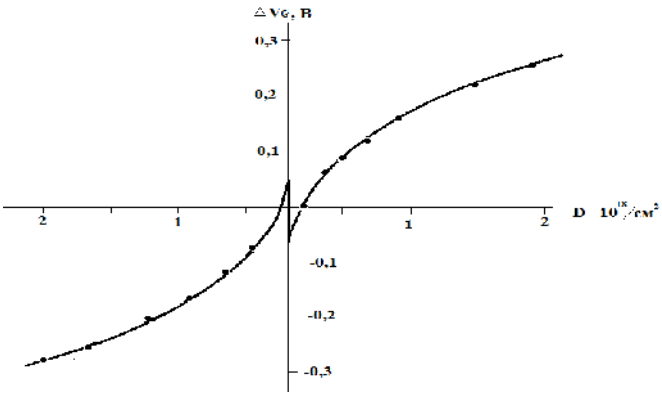
Для исследования использовались тестовые структуры МДП-конденсаторов и n-канальные МДП полевые транзисторы с кремниевыми затворами. Приборы изготавливались на подложках р- типа с ориентацией (100) и концентрацией примеси 2×10^{15} $см^{-3}$ (для МДП- конденсаторов) и $1{,}3\times10^{17}см^{-3}$ (для МДП ПТ). Окисел для тех и других структур имел толщину 10 нм и выращивался в сухом O_2 при температуре 900 °С с последующим 10-минутным отжигом в N_2 при той же температуре [7]. Эффективная длина канала МДП ПТ составляла 1,3 мкм, ширина канала – 1,5 мкм. Контактные площадки изготавливались из алюминия (Al). С целью улучшения качества омических контактов и уменьшения плотности поверхностных состояний все образцы после металлизации подвергались 20-и минутному отжигу в форминг-газе при температуре 450 °С.

Экспериментальная установка для исследований состояла из следующих приборов: источников тока и напряжения для создания электрического поля и тока в окисле, приборов для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) эффекта Фаулера–Нордхейма и приборов для измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) на частоте 1 МГц и квазистатических. Все приборы были подключены к компьютеру, используемому для управления приборами, регистрации и обработки результатов. Процедура исследований состояла в следующем. Первоначально на тестовых образцах измерялись ВФХ, а также прямые и обратные ВАХ. Затем приборы подвергались стрессовой нагрузке путем пропускания через них постоянного тока Фаулера–Нордхейма. Через определенные промежутки времени испытания прерывались и проводились повторные измерения ВФХ и ВАХ. Процедура повторялась до полного отказа приборов.

С целью минимизации паразитного захвата зарядов при измерении ВАХ плотность тока выбиралась на два порядка меньше, чем токи нагрузки.

Пропускание тока через окисел при любой полярности приводит к появлению как положительных, так и отрицательных фиксированных зарядов [3]. Захват положительного заряда окислом выражается в уменьшении напряжения на затворе, тогда как о захвате отрицательного заряда свидетельствует увеличение напряжения на затворе.

На рис. 1 приведена зависимость изменения напряжения на затворе от стрессовой дозы – количества электронов, прошедших через 1 $см^2$ окисла при отрицательном (1) и при положительном (2) смещении на затворе при плотности тока 0,2 $мА/см^2$.



1 2

Рис. 1. Зависимость изменения напряжения на затворе МДП ПТ
от стрессовой дозы-количества электронов, прошедших через 1 $см^2$ окисла
при отрицательном (1) и при положительном (2) смещении на затворе

Появление положительных зарядов, как можно предположить, вызывается захватом дырок ловушками, расположенными вблизи границы валентной зоны анода.

Сами же дырки возникают в результате генерации пар носителей под действием туннелирующих электронов. При больших стрессовых дозах преобладающую роль начинает играть захват электронов.

Помимо захвата зарядов окислом, в процессе пропускания тока через окисел имел место также захват зарядов поверхностными состояниями на границе раздела Si/SiO_2. Распределение ловушек по энергиям в запрещенной зоне было получено на основании квазистатических ВФХ. Оно имеет пик в районе 0,65 эВ.

Важное значение имеет влияние эффекта Фаулера–Нордхейма на пороговое напряжение МДП ПТ. На рис. 2 приведена зависимость изменения порогового напряжения ΔV_T от стрессовой дозы при положительном напряжении на затворе. На этом же рисунке показан график изменения напряжения на затворе $\Delta V_{\dot{g}}$, которое зависит только от величины заряда, захваченного окислом. Таким образом, их разность $(\Delta V_T - \Delta V_{\dot{g}})$ дает вклад, вносимый захватом на поверхностных состояниях.

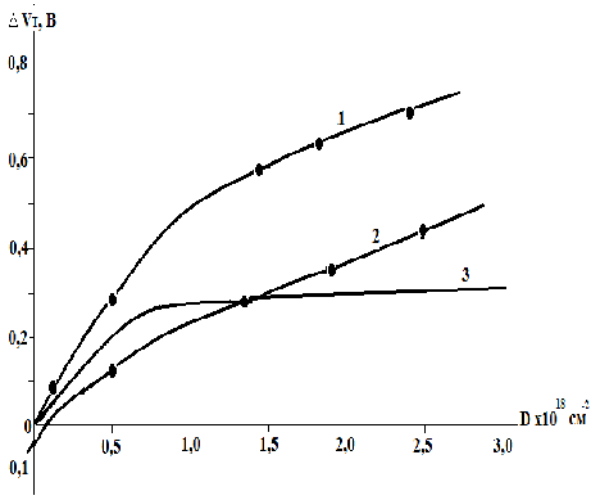


Рис. 2. Зависимость изменения порогового напряжения ΔV_T (1) от стрессовой дозы при положительном напряжении на затворе, 2 – изменения напряжения на затворе $\Delta V_{\dot{g}}$, 3 – разность $(\Delta V_T - \Delta V_{\dot{g}})$

В случае отрицательных напряжений на затворе (рис. 3) положительный заряд в окисле расположен вблизи границы раздела Si/SiO_2 (~1 нм), то есть в пределах туннелирования электронов, при этом смещение $\Delta V_{\dot{g}}$ за счет данного заряда достаточно мало. Полагая скорость генерации поверхностных состояний такой же, как и при положительном смещении, можно выделить вклад захваченного в окисле положительного заряда.

На основании измеренных зависимостей тока стока I_d от напряжения на затворе V_g рассчитывалась крутизна характеристики МДП ПТ. На графиках зависимости крутизны характеристики от напряжения на затворе при различных стрессовых дозах заметно сильное падение крутизны при увеличении стрессовой дозы. Это объясняется уменьшением подвижности электронов, вследствие дополнительного рассеяния на зарядах, захваченных ловушками на границе раздела Si/SiO_2 [3].

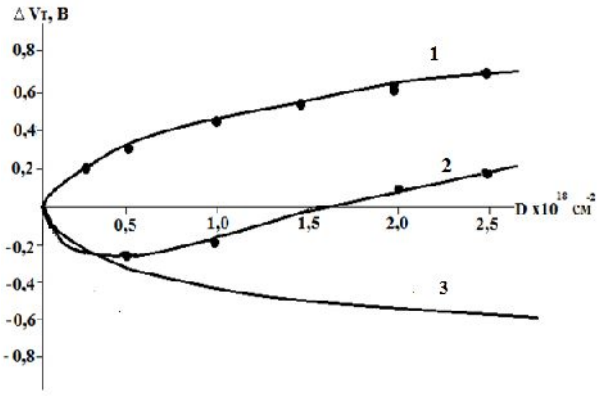


Рис. 3. Зависимость изменения порогового напряжения ΔV_T (2) от стрессовой дозы при отрицательном напряжении на затворе: 1 – изменения напряжения на затворе $\Delta V_{\dot{g}}$, 3 – разность $(\Delta V_T - \Delta V_{\dot{g}})$

Выводы

1. Ток через тонкий окисел, возникающий вследствие эффекта Фаулера-Нордхейма, приводит к накоплению зарядов в слое окисла, а также к образованию ловушек на границе раздела Si/SiO_2.

2. При малых стрессовых дозах захваченный окислом заряд, независимо от полярности напряжения на затворе, положителен и располагается вблизи анода, а при дозах более 10^{17} $см^{-2}$ захватывается отрицательный заряд.

3. Распределение состояний на границе раздела Si/SiO_2 слабо зависит от полярности напряжения на затворе, и имеет выраженный пик в районе 0,65 эВ от края валентной зоны.

4. Полученные результаты указывают на то, что влияние эффекта Фаулера–Нордхейма изменяется только итоговой стрессовой дозой и не зависит от плотности тока. Этот вывод является обоснованием применения ускоренных испытаний при повышенных нагрузочных токах.

5. Заметная деградация характеристик МДП ПТ наблюдается при стрессовых дозах, превышающих 10^{17} $см^{-2}$. Достаточно большая стрессовая доза может иметь место и в результате эмиссии из канала горячих электронов.

Библиография

1. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: учебное пособие для вузов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 240 с.

2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 456 с.

3. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 800 с.

4. Mustafaev G.A., Khasanov A.I., Mustafaev A.G., Cherkesova N.V. Thin Layers of Oxide Coating in Very-Large-Scale Integration // Proceedings of the International Symposium, ISEES 2018. Dordrecht: Atlantis Press, 2018. P. 397–399.

5. Мустафаев Г.А., Мустафаев Аб.Г., Мустафаев Ар.Г. Влияние конструкции на характеристики субмикронных КНИ МОП-транзисторов // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 7. С. 8–12.

6. Мустафаев Ар.Г., Мустафаев Аб.Г. Проблемы масштабирования затворного диэлектрика для МОП-технологии // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 4. С. 17–21.

7. Патент РФ № 2688864. Способ изготовления полупроводникового прибора / Г.А. Мустафаев, Н.В. Черкесова, А.Г. Мустафаев, А.Г. Мустафаев. Опубл. 22.05.2019. Бюл. № 15.