

Влияние низкополевой инжекции носителей тока на электрические свойства МОП структур

© В.Н. Мордкович[¶], А.Д. Мокрушин, Н.М. Омеляновская

Институт проблем технологии микроэлектроники Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 1 ноября 2006 г. Принята к печати 13 ноября 2006 г.)

Методом высокочастотных вольт-фарадных характеристик исследовалось влияние низкополевой инжекции на электрические свойства SiO₂-Si в МОП структурах с подложками *n*- и *p*-типа проводимости. Показано, что во всех случаях при инжекции, независимо от полярности напряжения на затворе, в окисле возникает положительный эффективный заряд, который после инжекции релаксирует с временами, зависящими от величины смещения на затворе и типа МОП структуры. В структурах с *p*-Si при положительной полярности напряжения на затворе в процессе инжекции на вольт-фарадных характеристиках наблюдалось появление минимума при переходе к состоянию инверсии и возрастание с ростом этого напряжения величины инверсионной емкости (по сравнению с исходной величиной). В постинжекционный период происходило постепенное приближение величины емкости к начальному состоянию до инжекции.

PACS: 73.40.Qv

1. Введение

Постоянной тенденцией развития микроэлектроники является увеличение плотности элементов на кристалле или, иными словами, уменьшение длины канала L_{ch} МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) транзисторов. Соответственно уменьшается и толщина подзатворного диэлектрика d . В настоящее время освоен диапазон L_{ch} в несколько десятков нм, при этом величина d не должна превышать несколько нм [1]. При столь малой толщине диэлектрика из двуокиси кремния и обычных затворных смещениях туннельные токи достигали бы непомерно больших величин. В связи с этим проблема полевой инжекции носителей тока в подзатворный диэлектрик приобретает особый интерес.

Инжекция носителей заряда из затвора или подложки МДП структуры создает в подзатворном диэлектрике эффективный заряд, который складывается из фиксированного заряда в объеме диэлектрика и заряда на поверхностных состояниях (ПС) [2-4]. В результате накопления этого заряда происходит изменение напряжения плоских зон и пробойного напряжения в диэлектрике, что в свою очередь может привести к нестабильности и деградации приборов [5].

Следует различать низко- и высокополевую инжекцию. В случае двуокиси кремния высокополевая инжекция электронов соответствует напряженностям электрического поля свыше 7 МВ/см [4-5], когда электроны на длине свободного пробега приобретают энергию, сравнимую с шириной запрещенной зоны SiO₂. Это приводит к лавинному рождению свободных электронов и дырок по всему объему окисла. Менее подвижные дырки дрейфуют к границе SiO₂/Si, где они захватываются структурными дефектами и создают фиксированный положительный заряд. Фактически высокополевая инжекция электронов является предпробойным состоянием

окисла и для ее реализации требуются МОП структуры (металл-окисел-полупроводник) хорошего качества.

В ряде работ было показано, что накопление положительного заряда в окисле МОП структуры происходит и в условиях низкополевой инжекции [6-8], т.е. при напряженностях поля, значительно меньших 7 МВ/см. В этом случае накопление заряда может быть связано либо с захватом инжектируемых дырок ловушками, либо с явлением ударной ионизации нейтральных поверхностных центров „горячими“ инжектируемыми электронами [2,6].

Для управления свойствами МОП структур необходимо знать возможности изменения состояния дефектов в подзатворном диэлектрике и на границах раздела под влиянием инжекционного воздействия.

С этой целью в настоящей работе были проведены исследования процессов, происходящих в кремниевых МОП конденсаторах в условиях низкополевой инжекции (электрические поля в интервале 2-5 МВ/см) при инжекции носителей как из подложки, так и из затвора.

2. Образцы и методы исследования

В работе исследовались МОП структуры на основе кремния *p*-типа проводимости с толщинами окисного слоя 760, 1500 Å и *n*-типа с толщиной окисла 1700 Å. Концентрация носителей составляла величину $\sim 10^{15}$ см⁻³. Кремний окислялся при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$ в атмосфере сухого кислорода. Омический тыловой контакт на пластинах формировался нанесением высокопроводящего слоя. Алюминиевые затворы, полученные вакуумным напылением металла через маску, имели форму квадрата со сторонами 0.4 или 1 мм либо круга диаметром 1.1 мм.

Инжекция носителей осуществлялась в режиме постоянного напряжения, прикладываемого между затвором и подложкой. Потенциал подложки считался нулевым, потенциал затвора был либо положительным, либо отри-

[¶] E-mail: mord@mail1.lebedev.ru

цательным. Абсолютная величина напряжения варьировалась в пределах от 30 до 80 В, при этом напряженность электрического поля в окисле (без учета исходного и накапливаемого в процессе инжекции положительного заряда) составляла от 2 до 5 МВ/см, что позволяет пренебречь влиянием положительного заряда на величину поля в окисле. Токи инжекции регистрировались электрометром и имели значение в районе 10 нА. Исходя из величин тока и времени инжекции оценивали суммарный инжектированный заряд, который для всех исследованных образцов достигал значений в несколько мКл/см². После каждого сеанса инжекции (или определенного времени выдержки образца после окончания инжекции) проводились измерения высокочастотных (500 кГц) вольт-фарядных характеристик (ВФХ), по которым рассчитывались величины напряжения плоских зон V_{FB} . Затем по сдвигам V_{FB} определялись величина и знак эффективного заряда $Q_{эф}$, накопленного в результате инжекционного воздействия.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлена серия ВФХ для образца на подложке p -типа проводимости после ряда последовательных актов инжекции при положительном потенциале на затворе, $V_{gi} > 0$, где емкость C нормирована на емкость диэлектрика C_d . Первые три сеанса инжекции привели к практически параллельному смещению ВФХ влево по оси затворного напряжения. Последнее, более интенсивное инжекционное воздействие наряду с еще более существенным сдвигом влево изменило и наклон ВФХ.

Кроме отмеченного сдвига ВФХ, в области малых отрицательных затворных напряжений после каждого акта инжекции наблюдалось появление минимума, за которым следовала область нижнего плато. Величина

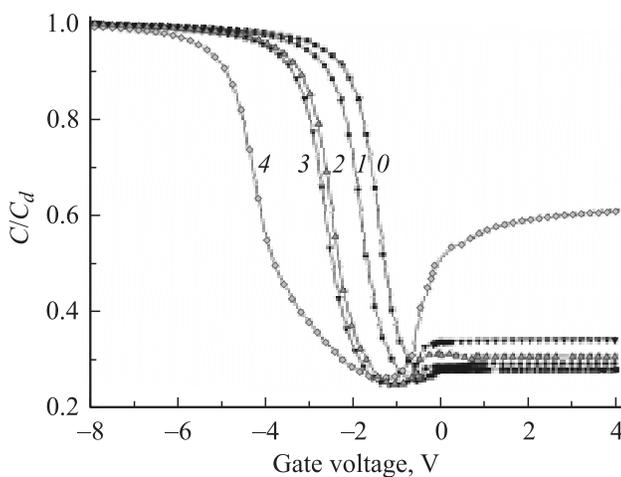


Рис. 1. Вольт-фарядные характеристики МОП структуры на подложке p -Si после ряда последовательных актов инжекции при положительном потенциале на затворе, $V_{gi} > 0$. 0 — исходный образец; напряженность электрического поля, МВ/см/время, мин: 1 — 2.7/5; 2 — 3.3/5; 3 — 3.6/7; 4 — 4.3/10.

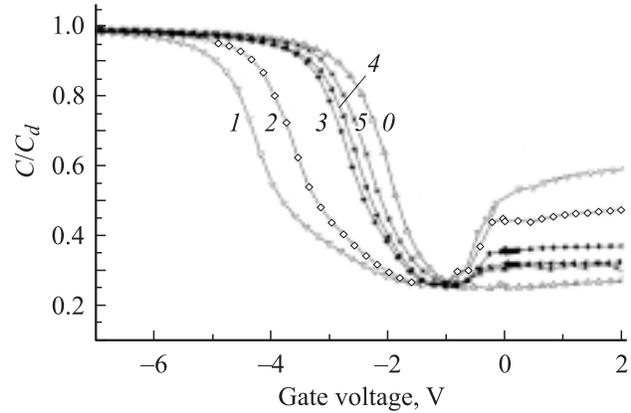


Рис. 2. Вольт-фарядные характеристики МОП структуры на подложке p -Si после 4-й инжекции (см. рис. 1) в зависимости от времени t в постинжекционном периоде: 2 — 10 мин, 3 — 100 мин, 4 — 160 мин, 5 — 27 ч. 0 — исходный образец, 1 — сразу после инжекции.

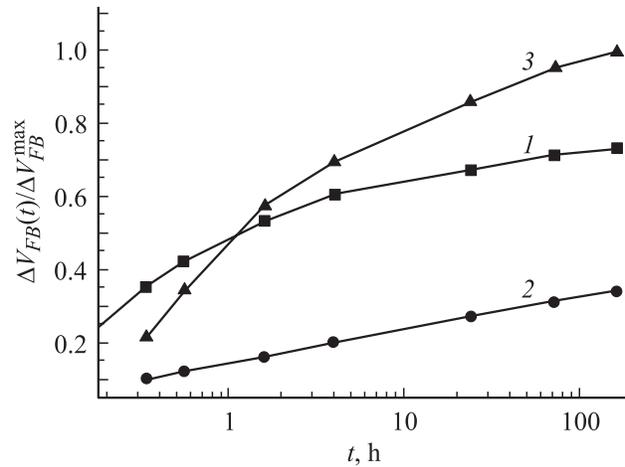


Рис. 3. Релаксационные кривые относительных сдвигов напряжения плоских зон для МОП структур на подложках p -Si после инжекции при $V_{gi} > 0$ (1) и $V_{gi} < 0$ (2), а также для МОП структуры на подложке n -Si после инжекции при $V_{gi} < 0$ (3).

емкости C на нижнем плато после каждого акта инжекции увеличивалась, а для последнего инжекционного воздействия превышала исходное значение инверсионной емкости в два с лишним раза.

Нами было замечено, что образующееся в результате инжекции новое состояние МОП структуры нестабильно во времени. Наглядной демонстрацией этой нестабильности служит рис. 2, на котором показаны изменения во времени ВФХ, полученной после 4-го акта инжекции (кривая 4 на рис. 1). Видно, что с увеличением времени выдержки образца после окончания инжекции (t) имеет место обратный сдвиг кривых ВФХ и уменьшение емкости на нижнем плато, т.е. система релаксирует к исходному (до инжекции) состоянию. О скорости этой релаксации при комнатной температуре можно судить

по рис. 3 (кривая 1), на котором показана временная зависимость обратного сдвига напряжения плоских зон $\Delta V_{FB}(t)$ по отношению к максимальному инжекционно-индуцированному сдвигу ΔV_{FB}^{\max} (по абсолютному значению). С ростом температуры (от комнатной до ~ 350 К), при которой выдерживались образцы после инжекционного воздействия, скорость релаксации увеличивалась. Приводимые здесь количественные данные относятся только к комнатной температуре.

На рис. 4 представлены ВФХ, полученные для ряда инжекционных воздействий на МОП конденсаторы на основе кремния p -типа проводимости при отрицательном напряжении на затворе, $V_{gi} < 0$. В этом случае с каждым последовательным актом инжекции также происходит сдвиг ВФХ влево, но несмотря на более интенсивное инжекционное воздействие величина максимального сдвига значительно меньше по сравнению со случаем положительного напряжения на затворе (рис. 1). При этом изменений емкости на нижнем плато ВФХ практически не наблюдается. С ростом времени выдержки после окончания процесса инжекции также происходит релаксация системы к исходному состоянию (см. рис. 3). Судя по наклону кривых 1 и 2 на рис. 3, скорость релаксации практически не зависит от полярности затворного потенциала в процессе инжекции, при этом кривая 2 располагается существенно ниже кривой 1. Более детальный анализ рис. 3 будет дан при обсуждении результатов.

Инжекция в МОП структурах на основе n -Si также вызывала сдвиг ВФХ в сторону отрицательных напряжений, независимо от знака напряжения на затворе. Во всех этих случаях кривые сдвигались строго параллельно ВФХ для исходного состояния, уровень нижнего плато в инверсионной области практически не изменялся. Кроме того, следует отметить, что при сравнимых по

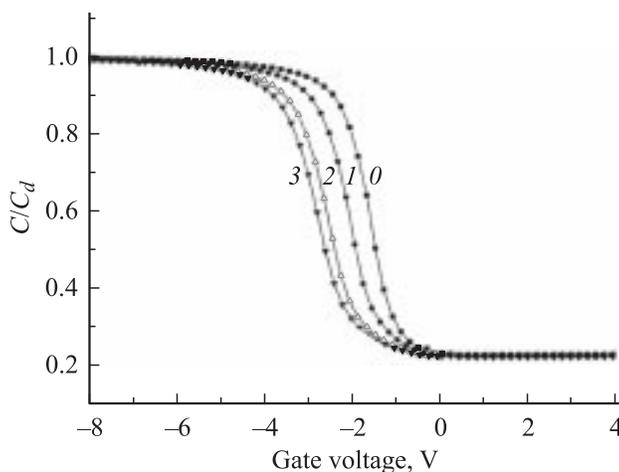


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики для МОП структуры на подложке p -Si после ряда последовательных актов инжекции при отрицательном потенциале на затворе в течение 10 мин. 0 — исходный образец; напряженность электрического поля МВ/см: 1 — 4.0, 2 — 4.7, 3 — 4.7.

Максимальные сдвиги напряжения плоских зон ΔV_{FB}^{\max} и соответствующие им эффективные заряды $Q_{\text{эф}}$, индуцированные инжекцией носителей тока в МОП структурах на основе кремния p - и n -типа проводимости при положительном и отрицательном потенциале затвора

Тип проводимости	Потенциал затвора	$-\Delta V_{FB}^{\max}$, В	$Q_{\text{эф}}$, 10^{-8} Кл/см ²
p	+	2.7	6.7
p	-	1.2	3.0
n	+	8.2	16.4
n	-	4.5	8.9

интенсивности суммарных инжекционных воздействий величина сдвига ВФХ для n -Si была в несколько раз больше, чем для p -Si. В таблице приведены максимальные инжекционно-индуцированные сдвиги ΔV_{FB}^{\max} и соответствующие им эффективные заряды $Q_{\text{эф}}$ для исследованных нами четырех вариантов инжекции. Во всех случаях суммарная интенсивность инжекционного воздействия, определяемая напряженностью прикладываемого электрического поля и временем инжекции, была примерно одинаковой. Видно, что величины ΔV_{FB}^{\max} и $Q_{\text{эф}}$ для n -Si существенно больше, чем для p -Si.

Для МОП конденсаторов на основе электронного кремния, подвергнутых инжекции при отрицательном потенциале затвора, изучалось поведение ВФХ в зависимости от времени выдержки образца после окончания процесса инжекции. Результаты представлены кривой 3 на рис. 3. В этом случае скорость релаксации значительно больше, чем для дырочного кремния: исходное состояние полностью восстанавливается за времена ~ 100 ч.

4. Обсуждение полученных результатов

Сдвиг вольт-фарадных характеристик в сторону отрицательных затворных смещений при каком-либо воздействии на МОП структуру означает накопление положительного заряда в окисле. Полученные нами результаты свидетельствуют, что, независимо от полярности приложенного при инжекционном воздействии напряжения на затворе МОП структуры и от типа проводимости подложки, результатом инжекции во всех случаях являлось появление в подзатворном окисле эффективного положительного заряда. Чтобы понять этот результат, рассмотрим особенности инжекции электронов и дырок в окисел, исходя из энергетической диаграммы для системы кремний-диоксид кремния-алюминий. На рис. 5,а представлена такая диаграмма для кремния p -типа проводимости при нулевом потенциале затвора и отсутствии заряда в окисле. При этом для ширины запрещенной зоны аморфного SiO_2 принято наиболее достоверное значение $E_g = 8.0$ эВ, полученное в недавней работе [9]. Видно, что высоты барьеров

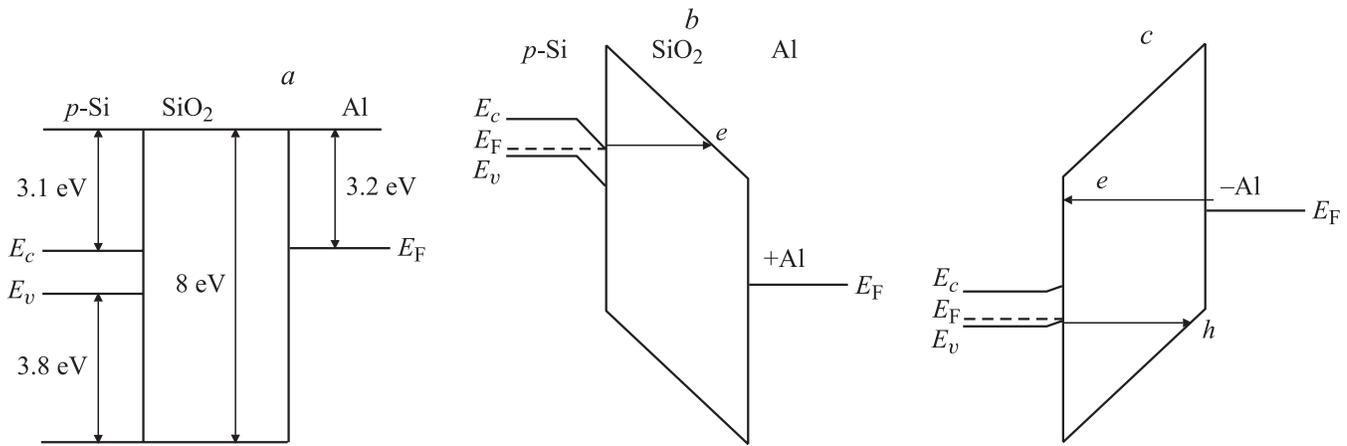


Рис. 5. Энергетические диаграммы системы $p\text{-Si-SiO}_2\text{-Al}$: a — в отсутствие встроенного в окисел заряда и при нулевом потенциале затвора; b — при положительном потенциале затвора; c — при отрицательном потенциале затвора. E_c — край зоны проводимости, E_v — край валентной зоны, E_F — уровень Ферми.

для проникновения электронов и дырок из кремния в окисел составляют соответственно 3.1 и 3.8 эВ, а для проникновения электронов из алюминия в окисел — 3.2 эВ. На рис. 5, b представлена аналогичная диаграмма при положительном потенциале затвора. Электрическое поле направлено таким образом, что возможна инжекция только электронов из кремния в окисел. Вызываемое внешним полем в несколько МВ/см искривление зон в кремнии приводит к переходу электронов с примесных центров в инверсионный слой вблизи границы Si/SiO_2 . Именно эти электроны и могут туннелировать в зону проводимости окисла, как это показано на рис. 5, b . Напомним, что в процессе окисления кремния в области границы толщиной 50–100 Å образуется большое количество дефектных центров, которым соответствуют энергетические уровни различной глубины в запрещенной зоне окисла. Часть этих центров может оказаться в заряженном состоянии, причем центры с мелкими уровнями релаксируют со временем (т.е. теряют заряд), тогда как глубокие центры создают так называемый встроенный (технологический) положительный заряд — его наличие в исходных МОП структурах является общеизвестным фактом. В таком случае накопление дополнительного положительного заряда в окисле в результате электронной инжекции можно объяснить ударной ионизацией нейтральных центров в области интерфейса, т.е. горячий инжектируемый электрон выбивает связанный электрон, оставляя центр положительно заряженным. При низкополевой инжекции энергии электрона недостаточно для ионизации глубоких центров, поэтому в ионизации могут участвовать лишь неглубокие центры. Накопленный в процессе инжекции положительный заряд обуславливает притяжение электронов из кремния (неосновных носителей для $p\text{-Si}$) к границе Si/SiO_2 и возможность их туннелирования на ионизированные неглубокие центры. С реализацией такого процесса мы

и связываем релаксацию инжекционно-индуцированного положительного заряда в окисле МОП структуры.

На рис. 5, c показана зонная диаграмма МОП структуры на основе кремния p -типа проводимости при отрицательном потенциале затвора. В этом случае возможна инжекция в окисел дырок из кремния и электронов из алюминиевого затвора. В результате инжекции дырки оказываются в объеме окисла и могут захватиться как глубокими, так и неглубокими центрами [6,10,11]. В этом случае накопленный заряд складывается из двух частей: фиксированный заряд, соответствующий глубоким уровням, и нестабильный во времени релаксирующий заряд, связанный с неглубокими центрами. Анализ приведенных в таблице результатов показывает, что в случае инжекции для $\text{Si } p$ -типа при отрицательном потенциале затвора максимальный сдвиг напряжений плоских зон (а следовательно, и накопленный положительный заряд) сравнительно мал. Мы объясняем это тем, что наряду с туннелированием дырок имеет место инжекция электронов из алюминия в окисел, причем электронные токи являются преобладающими [9]. Наличие сравнительно большого числа свободных электронов в зоне проводимости окисла обуславливает заметную скорость их захвата положительно заряженными центрами, что и служит причиной малого результирующего заряда окисла. К выводу о наличии фиксированного заряда в результате инжекции в $p\text{-Si}$ при отрицательном V_{gi} приводит и анализ рис. 3: из кривой 2 следует, что даже за максимальное время выдержки в наших экспериментах (порядка недели) уменьшение заряда составило всего около трети от его полной величины, тогда как для кривой 1 аналогичное уменьшение по крайней мере вдвое больше. Зависимость 3 на этом же рисунке относится к кремнию n -типа проводимости и свидетельствует о гораздо большей скорости релаксации в этом случае. Процесс релаксации обусловлен туннелированием электронов кремния на соответствующий энергетический

уровень положительно заряженных центров. Этот процесс имеет барьерный характер и может осуществляться лишь наиболее энергичными электронами проводимости (на хвосте максвелловского распределения). Очевидно, что в кремнии n -типа таких электронов гораздо больше, а скорость релаксации накопленного при инжекции заряда должна быть выше по сравнению с кремнием p -типа.

Как уже отмечалось при изложении результатов, из четырех исследованных нами вариантов инжекции лишь в случае кремния p -типа проводимости с положительным потенциалом затвора наблюдалось изменение формы вольт-фарадной кривой: уменьшался наклон средней части и повышался уровень нижнего плато в инверсионной области (рис. 1). Уменьшение наклона говорит об образовании дополнительных поверхностных состояний на границе кремний–окисел. Дефекты, отвечающие этим состояниям, начинают принимать участие в рекомбинационно-генерационных процессах, протекающих в области интерфейса Si/SiO₂. Времена таких процессов, по-видимому, уже не удовлетворяют условиям измерения высокочастотных ВФХ, которые после инжекции (см. рис. 1) по форме напоминают низкочастотные ВФХ [10,11]. Такую форму ВФХ можно связать с появлением значительного количества неосновных носителей, т. е. в нашем случае с электронами упомянутого выше инверсионного слоя, частично сохраняющегося и по окончании процесса инжекции. По мере релаксации накопленного положительного заряда пропадают и изменения в форме ВФХ, она принимает исходный вид (рис. 2).

Детальное рассмотрение процессов обеднения и инверсии для идеальных МОП структур проводилось в ряде работ [10,11]. В них отмечалось, что времена релаксации для перехода структур в равновесное инверсионное состояние при комнатной температуре составляют несколько десятков секунд. В то же время в работах, где изучались времена релаксации в реальных структурах после облучения и других воздействий, для объяснения этих процессов привлекался процесс туннелирования носителей тока как из затвора, так и из подложки [12–14], причем эти времена составляли десятки часов и более. Это качественно соответствует обнаруженным в данной работе временам возвращения структур после инжекционных воздействий к исходному состоянию.

5. Заключение

Проведенные нами исследования показали, что в кремниевых МОП структурах при наличии в окисле внешнего поля напряженностью 2–5 МВ/см происходит инжекция носителей в окисел, которая приводит к накоплению положительного заряда в окисле независимо от типа проводимости кремния и полярности потенциала на затворе V_{gi} . Наибольшая величина заряда наблюдается для Si n -типа проводимости при $V_{gi} > 0$, наименьшая —

для Si p -типа при $V_{gi} < 0$. Как правило, инжекционно-индуцированный заряд нестабилен во времени и система релаксирует к исходному состоянию за времена в десятки и даже сотни часов.

Авторы благодарны Е.А. Бобровой за интерес к работе и плодотворные дискуссии.

Список литературы

- [1] А.А. Орликовский. *Матер., X симп. „Нанобизика и наноэлектроника“* (Нижний Новгород, 2006) с. 51.
- [2] D.J. DiMaria, D. Arnold, E. Cartier. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2119 (1992).
- [3] M. Itsumi. *J. Appl. Phys.*, **52**, 3491 (1981).
- [4] D.J. DiMaria, D.A. Buchanan, I.H. Stathis, I.E. Stahlbuch. *J. Appl. Phys.*, **77**, 2032 (1995).
- [5] D.J. DiMaria, E. Cartier, D. Arnold. *J. Appl. Phys.*, **73**, 3367 (1993).
- [6] A.N. Nazarov, V.I. Kilchitskaja, J.P. Barchuk. In: *Progress in SOI Structures and Devices Operating at Extreme Conditions*, ed. by F. Balestra et al. (Kluwer Academic Publishers, 2002) p. 139.
- [7] D. Arnold, E. Cartier, D.J. DiMaria. *Phys. Rev. B*, **49**, 10 278 (1994).
- [8] D.J. DiMaria, E. Cartier, D.A. Buchanan. *J. Appl. Phys.*, **80**, 304 (1996).
- [9] К.А. Насыров, С.С. Шаймеев, В.А. Гриценко, Ж.Х. Хан, С.В. Ким, Ж.В. Ли. *ЖЭТФ*, **129** (5), 926 (2006).
- [10] *Свойства структур металл–диэлектрик–полупроводник*, под ред. А.В. Ржанова (М., Наука, 1976).
- [11] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Энергия, 1973).
- [12] A. Meelertzhage. *J. Appl. Phys.*, **73** (7), 3569 (1993).
- [13] D. Kropman. *Appl. Surf. Sci.*, **166** (1–4), 475(2000).
- [14] Д.В. Николаев, И.В. Антонова, О.В. Наумова, В.П. Попов, С.А. Смагулова. *ФТП*, **36** (7), 853 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of low field injection of current carriers on electrical properties of MOS structures

V.N. Mordkovich, A.D. Mokrushin, N.M. Omeljanovskaya

Institute of Microelectronics Technology,
Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russia

Abstract The influence of low field injection on electrical properties of metal–SiO₂–Si structures with n - and p -substrates were investigated by high frequency capacitance–voltage characteristics. It was shown that in process of injection an effective positive charge in SiO₂ is generated independent of gate potential sign and substrate conductivity types. This charge is unstable and decreases in time after completion of enjection. In the case of MOS structures with p -Si and positive potential on gate one can see an appearance of capacitance minimum in inversion region of characteristics and increasing of this effect with gate potential growth in comparison with uninjected case. In postinjection situation the capacitance values approaches to initial ones.