

Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле

© Е.А. Боброва[¶], Н.М. Омеляновская*

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

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

(Получена 7 февраля 2008 г. Принята к печати 18 февраля 2008 г.)

Исследовались МОП структуры на основе кремния *p*- и *n*-типа, подвергнутые воздействию напряжения обеих полярностей величиной до 70 В. Во всех случаях наблюдалось увеличение эффективного положительного заряда на границе Si/SiO₂. При этом в структурах с Si *p*-типа появлялось скачкообразное увеличение высокочастотной емкости в области инверсии при некотором пороговом напряжении. Увеличение емкости и пороговое напряжение определялись величиной эффективного заряда и площадью затвора структуры. Наблюдаемый эффект объяснен латеральной диффузией свободных электронов, накопленных в полупроводнике вблизи контакта затвора. После окончания воздействия напряжения на структуры происходило восстановление вольт-фарадной характеристики до состояния, близкого к исходному, за время релаксации, характерное для обратного дрейфа ионов и выброса носителей путем туннелирования с медленных ловушек вблизи границы Si/SiO₂.

PACS: 73.40.Qv, 81.40.Rs, 85.30.De

1. Введение

Исследование тестовых МОП структур, используемых в микроэлектронике для оценки параметров полупроводника на основе анализа вольт-фарадных характеристик (ВФХ), требует учета возможных краевых эффектов. Ранее рассматривалось влияние краевых эффектов в МОП структурах на процессы релаксации емкости из состояния обеднения в работах [1,2], где было показано, что роль краевых эффектов существенна при определении объемного времени генерации и скорости поверхностной рекомбинации. В работе [1] сделаны оценки влияния латеральных потоков носителей заряда на релаксацию емкости МОП структуры после импульса обеднения. По расчетам авторов, краевые эффекты могут проявляться при диаметре затвора, достигающем 1500 мкм.

При этом не принималось во внимание наличие встроенного положительного заряда, обычно присутствующего в SiO₂ как под контактом, так и в ближайшей окрестности. Однако такой заряд в окисле, возникающий как в процессе изготовления МОП структур, так и в результате радиационного облучения [3] или инжекции носителей заряда электрическим полем [4,5], может привести к появлению связанных с этим зарядом дополнительных электрических полей и соответствующих краевых эффектов, влияющих на измеряемые параметры МОП структуры.

В данной работе изучалось влияние на ВФХ краевого эффекта, обусловленного изменением эффективного заряда на границе Si/SiO₂ в МОП структурах под воздействием внешнего электрического поля.

2. Эксперимент

В работе исследовались МОП структуры, изготовленные на пластинах кремния *p*- и *n*-типа, окисленного в атмосфере сухого кислорода при температуре 1000°C с толщинами *d* окисного слоя от 760 до 1700 Å, концентрацией основных носителей $\sim 10^{15}$ см⁻³ и площадью затворного контакта (далее просто контакт) *S* от 0.16 до 1 мм². Структуры подвергались при комнатной температуре нескольким циклам воздействия постоянного напряжения полярностями разного знака в интервале от 40 до 70 В в течение времени до 7 мин. Далее полярность указана относительно затворного контакта. Соответствующие электрические поля имели значения от 2 до 5.3 МВ/см. С помощью методики высокочастотных (500 кГц) вольт-фарадных характеристик определялось изменение напряжения плоских зон. По смещению напряжения плоских зон оценивалось изменение величины эффективного заряда на границе Si/SiO₂. Надбарьерные токи инжекции с учетом потенциальных барьеров для свободных носителей (≥ 3 эВ) и токи туннелирования Фаулера–Нордгейма [6] для используемых полей были малы и не могли привести к изменению заряда в окисле.

3. Результаты и обсуждение

Воздействие внешнего напряжения приводило к параллельному смещению ВФХ к отрицательным напряжениям, т.е. к накоплению эффективного положительного заряда на границе Si/SiO₂ независимо от полярности напряжения и типа проводимости кремния. Кроме того, для структур с Si *p*-типа после воздействия положительным напряжением на нижнем плато ВФХ (область инверсии) при некотором напряжении наблюдалось скач-

[¶] E-mail: bobrova@lebedev.ru

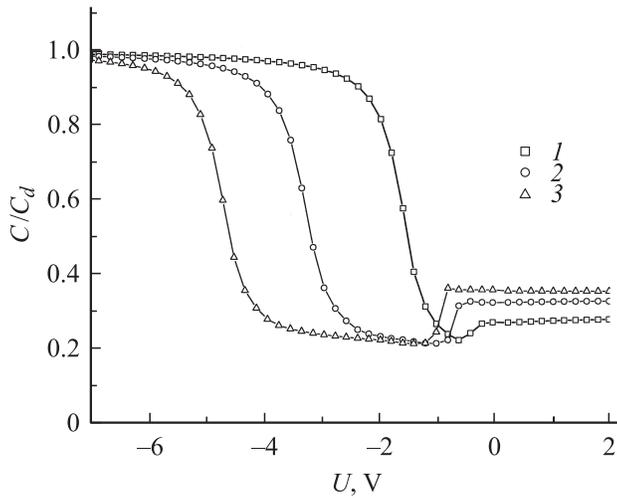


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики МОП структуры с параметрами $S = 1 \text{ мм}^2$, $d = 1500 \text{ Å}$: 1 — исходная; 2 — после выдержки под напряжением 50 В, 7 мин; 3 — под напряжением 70 В, 7 мин.

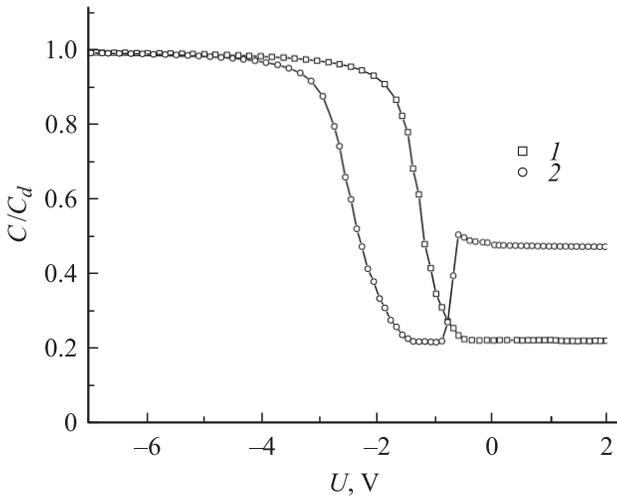


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики МОП структуры с параметрами $S = 0.16 \text{ мм}^2$, $d = 760 \text{ Å}$: 1 — исходная; 2 — после выдержки под напряжением 40 В, 5 мин.

скообразное увеличение емкости относительно исходной величины (рис. 1 и 2).

После приложения положительного напряжения плотность центров эффективного заряда на границе Si/SiO₂ увеличивалась на $\sim 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (кривая 3) для структуры на рис. 1 и на $\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ для структуры на рис. 2. При воздействии отрицательным напряжением эти величины были примерно в 2 раза меньше. Точка скачкообразного изменения емкости смещалась к отрицательным напряжениям с ростом эффективного заряда и все более отодвигалась относительно напряжения плоских зон. Емкость на нижнем плато после каждого акта воздействия увеличивалась. Для структуры с наименьшей площадью контакта (рис. 2) в области инверсии

ВФХ наблюдался существенно больший скачок емкости. После окончания воздействия напряжения на МОП структуры происходило восстановление вольт-фарадных характеристик до состояния, близкого к исходному, за время около 30 ч.

Наличие положительно заряженных ионов в окисле типично для кремниевых МОП структур. Ионы в окисле часто находятся вблизи интерфейсов [7]. На границе Si/SiO₂ они, с большой вероятностью, закреплены из-за высокой разупорядоченности слоя окисла, в то время как ионы, находящиеся на границе металл-окисел, могут быть подвижными. Поэтому дрейф ионов будет существенным при положительной полярности на затворе. Изменение эффективного заряда, обусловленного дрейфом ионов, подтверждалось типом гистерезиса ВФХ.

Отмеченное выше смещение ВФХ всегда одинаковой полярности указывает на то, что помимо дрейфа положительных ионов в окисле присутствует второй механизм изменения эффективного заряда на границе Si/SiO₂. Этим механизмом может быть туннельная инжекция свободных носителей (дырок) из полупроводника на медленные ловушки на границе Si/SiO₂. Такой механизм будет преобладающим при воздействии на МОП структуры отрицательным напряжением. В структурах с Si *p*-типа это будет происходить в режиме накопления, а в структурах с Si *n*-типа — в режиме инверсии.

Времена восстановления ВФХ после снятия внешнего напряжения соответствуют процессам, характерным для обратного дрейфа ионов [8] или выброса за счет туннелирования носителей [9], захваченных медленными ловушками на границе Si/SiO₂.

Скачкообразное изменение емкости на нижнем плато ВФХ в случае Si *p*-типа обусловлено влиянием электрического поля, выходящего за пределы затворного контакта как в окисле, так и в полупроводнике, благодаря чему вокруг контакта под воздействием положительного напряжения образуется слой с повышенным эффективным положительным зарядом в окисле и повышенной степенью инверсии в полупроводнике (*n*⁺-слой). После снятия напряжения *n*⁺-слой некоторое время поддерживается эффективным положительным зарядом в окисле вблизи контакта. В процессе измерения ВФХ в области перехода от обеднения к инверсии степень инверсии под контактом увеличивается и становится равной степени инверсии в области вокруг контакта. В этом случае в равновесных условиях измерения высокочастотной ВФХ скорость поступления неосновных носителей (электронов) под контакт будет определяться в основном не процессами генерации в области пространственного заряда под контактом, а латеральным обменом электронами, накопленными в краевой области. При этом емкость на нижнем плато ВФХ скачком возрастает. При импульсных измерениях наличие инверсионного слоя вокруг контакта и обусловленный им латеральный поток носителей будут влиять на определение объемного времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации.

Степень инверсии в области вокруг затворного контакта возрастает с увеличением накопленного положительного заряда в окисле. Это приводит к росту скачкообразного изменения емкости и расширению области напряжений, где латеральный потенциальный барьер $n^+ - p$ на границе контакта еще существует. Аналогичные изменения ВФХ происходят при пороговом напряжении в n -канальных полевых транзисторах [10].

Время релаксации емкости на нижнем плато соответствует релаксации положительного заряда в окисле. Влияние латеральных потоков носителей заряда подтверждается также более сильно выраженным скачком емкости в структурах с меньшей площадью контакта при сравнимых величинах эффективного заряда (рис. 2).

В области нижнего плато плотность электронов вокруг контакта так же, как и под контактом, достигает значений, соответствующих сильной инверсии. При подвижности электронов в инверсионном канале $600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [11] латеральная диффузия электронов в область под контактом за время, равное половине периода измерительного сигнала ($\sim 2 \text{ мкс}$), меньшего типичных времен жизни в Si, пройдет на расстояние около 40 мкм . Из-за диффузии электронов в область под контактом высокочастотная емкость этой области становится соизмеримой или малой по сравнению с емкостью окисла. В результате суммарная емкость МОП структуры в области инверсии, по нашим оценкам, возрастает до значений, близких к экспериментальным.

Сходные изменения ВФХ наблюдались в результате низкополевой инжекции носителей заряда в МОП структуры на основе Si p -типа в работе [5]. На ВФХ при переходе от обеднения к инверсии вначале достигался минимум, но затем происходило плавное возрастание емкости, что авторы объясняли влиянием поверхностных состояний, генерируемых в процессе инжекции носителей в окисел. На появление поверхностных состояний указывало и заметное изменение наклона ВФХ после инжекции при достаточно высоких напряжениях на затворе. Однако в области инверсии, возможно, имеет место сочетание роли поверхностных состояний и краевого эффекта.

В МОП структурах на основе Si n -типа в области инверсии на ВФХ не наблюдалось скачка емкости. Это связано с тем, что из-за наличия положительного заряда в окисле вокруг затворного контакта всегда имеется n -слой. При этом образуется латеральный потенциальный ($n - p$ или $n^+ - p$) барьер, препятствующий обмену носителями из приконтактной области с подконтактной областью полупроводника.

4. Заключение

Таким образом, появление заряда на границе Si/SiO₂ вызывает краевые эффекты, проявляющиеся в скачкообразном увеличении высокочастотной емкости в области

перехода от обеднения к инверсии при некотором пороговом напряжении. Это явление в МОП структурах на основе кремния p -типа связано с наличием положительного заряда в окисле и с формированием инверсионного слоя в полупроводнике как под затворным контактом, так и за его пределом вблизи границы контакта. Наличие указанного скачка емкости означает, что при измерении параметров МОП структуры методом импульсного обеднения следует учитывать также вклад в релаксацию емкости латерального потока носителей заряда, обусловленного зарядом в окисле вокруг затворного контакта. Экспериментальные данные свидетельствуют также о захвате дырок из полупроводника на медленные состояния на границе Si/SiO₂ при отрицательной полярности на затворе. После окончания воздействия постоянного напряжения на МОП структуры происходит восстановление ВФХ МОП структур за время, характерное для обратного дрейфа ионов и выброса носителей с медленных ловушек за счет туннелирования.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук В.Н. Мордковичу за внимание к работе, обсуждение и полезные замечания.

Список литературы

- [1] D.K. Schroder, H.C. Nathanson. Sol. St. Electron., **13**, 577 (1970).
- [2] А.К. Захаров, И.Г. Неизвестный, В.Н. Овсяк. В сб.: *Свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник*, под ред. А.В. Ржанова (М., Наука, 1976) с. 47.
- [3] M. Knoll, D. Brauning, W.R. Fahrner. J. Appl. Phys., **53** (10), 6946 (1982).
- [4] D.J. DiMaria, D. Arnold, F. Cartier. Appl. Phys. Lett., **60**, 2119 (1992).
- [5] В.Н. Мордкович, А.Д. Мокрушин, Н.М. Омеляновская. ФТП, **46** (6), 721 (2007).
- [6] L.P. Trombetta, F.J. Feil, R.J. Zeto. J. Appl. Phys., **69**, 2512 (1991).
- [7] В.Г. Литовченко, А.П. Горбань. *Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник* (Киев, Наук. думка, 1978) гл. 1, с. 25.
- [8] Д.В. Николаев, И.В. Антонова, О.В. Наумова, В.П. Попов, С.А. Смагулова. ФТП, **36** (7), 853 (2002).
- [9] V. Lakshamanna, A.S. Vengurlekar. J. Appl. Phys., **63**, 4548 (1988).
- [10] Y. Nissan-Cohen, J. Shappir, D. Frohman-Bentchkowsky. J. Appl. Phys., **58**, 2252 (1985).
- [11] А.А. Гузев, Г.Л. Курьшев, С.П. Сеница. В сб.: *Свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник*, под ред. А.В. Ржанова (М., Наука, 1976) с. 99.

Редактор Т.А. Полянская

Features of capacitance-voltage characteristics in MOS structure due to oxide charge

*E.A. Bobrova, N.M. Omeljanovskaya**

P.N. Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

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

Abstract The MOS structures based on p and n -type silicon were investigated after its exposure to the two polarity biases up to 70 V. The effective positive charge increase was observed at Si/SiO₂ interface in all cases. At the same time in MOS structure based on p -type silicon the rapid increase of high frequency capacitance occurred at threshold voltage in inversion region. The magnitudes of these increases and threshold voltages were defined by positive charge at the Si/SiO₂ interface and the gate area. This effect can be attributed to lateral diffusion of free electrons accumulated close to the gate contact. If MOS structure bias is taken off then capacitance-voltage characteristics tends to initial one with relaxation time typical to reverse ion drift or ejection of carriers from slow traps via tunneling mechanism.