

ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРЫ «КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ» НАКОПЛЕННОЙ ДОЗЫ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ

¹Черкесова Н.В.*, ¹Мустафаев Г.А., ²Мустафаев А.Г.

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства

*natasha07_2002@mail.ru

Исследованы поверхностные состояния, фиксированный заряд в оксиде и плотность захваченных дырок на обеих поверхностях раздела скрытого оксидного слоя при различных значениях дозы излучения, смещения на подложке и технологических параметров. Проведена оценка влияния рентгеновского излучения на сдвиг напряжения для транзисторов с каналом, образованным скрытым оксидом, при облучении в зависимости от дозы облучения. Показано, что для поверхности раздела пленка/оксид смещение вызывает уменьшение плотности захваченного заряда, и характеристика приобретает линейную зависимость от дозы, а снижение ширины канала сопровождается ростом радиационной чувствительности. Показанные результаты свидетельствуют о том, что устойчивость скрытых оксидов к воздействию накопленной дозы излучения заметно возрастает при подаче на подложку в процессе облучения отрицательного напряжения смещения.

Ключевые слова: «кремний-на-изоляторе», полевой транзистор, пороговое напряжение, гамма излучения, затвор, канал, оксид, запрещенная зона, поверхность раздела, напряжения смещения.

EFFECT OF ACCUMULATED GAMMA RADIATION DOSE ON «SILICON-ON-INSULATOR» STRUCTURES

¹Cherkesova N.V., ¹Mustafaev G.A., ²Mustafaev A.G.

¹Kabardino-Balkarian State University

²Dagestan State University of National Economy

With varying levels of radiation dose, displacement on the substrate, and technological parameters, the characteristics of the outer layer, the static charge in the oxide, and the number of confined holes on both sides of the internal oxide layer were examined. Based on the amount of radiation absorbed, the voltage shift of transistors with a channel made by a latent oxide when exposed to X-rays was investigated. An assessment was made of the effect of X-ray radiation on the voltage shift for transistors with an oxide channel created by latent oxide during radiation, depending on the radiation dose. Additionally, an increase in radiation sensitivity is mirrored by a decrease in channel width. The study demonstrated that the protection from radiation of latent oxides significantly increases when a negative voltage is applied to the substrate during irradiation.

Keywords: «silicon-on-insulator», field-effect transistor, threshold voltage, gamma radiation, gate, channel, oxide, band gap, interface, mixing voltages.

Введение

Как известно [1–5], интегральные схемы КМОП кремний-на-изоляторе (КНИ) имеют ряд преимуществ перед обычными КМОП интегральными схемами: схемы защищены от перехода в режим «зашелки», что резко повышает их надежность в ряде экстремальных случаев, они имеют повышенное быстродействие из-за уменьшенной емкости полупроводниковых переходов, повышенную стойкость по отношению к воздействию мощности дозы и воздействию единичных частиц. Вместе с тем при воздействии на приборы КНИ накопленной дозы гамма излучения, положительные заряды захватываются окисными пленками. Из-за этих захваченных зарядов, n-канальные МОП полевые транзисторы могут увеличивать токи утечки из-за повышения проводимости обратных каналов, при

этом n - и p -канальные транзисторы будут иметь повышенное смещение порогового напряжения на передних и обратных затворах. Если этот эффект значительно снизить совершенствованием конструкции, тогда КНИ-приборы будут иметь высокие характеристики стойкости по отношению к воздействию облучения, и надежность их в условиях облучения будет возрастать. Это крайне важная характеристика КНИ-полупроводниковых интегральных схем и для их оценки надежности важны проверки стойкости этих интегральных схем к воздействию накопленной дозы гамма излучения.

Результаты и обсуждение

При создании радиационно-стойких интегральных схем широкое применение находит SIMOX-технология, основанная на формировании оксидного слоя имплантацией ионов кислорода [6, 7]. В работе исследованы поверхностные состояния, фиксированный заряд в оксиде и плотность захваченных дырок на обеих поверхностях раздела скрытого оксидного слоя при различных значениях дозы излучения, смещения на подложке и технологических параметров. Имплантацию ионов кислорода с энергией 150–160 кэВ, дозой $1,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ проводили при температуре 600–650 °С с последующим отжигом пластины кремния n -типа (удельное сопротивление 4,5 Ом·см) при температуре 1300 °С в течение 4-х часов в атмосфере N_2/O_2 [8]. Облучение проводили рентгеновским излучением с энергией 10 кэВ с накопленной дозой от 10 крад до 1 Мрад (Si). В процессе облучения на подложку подавали напряжение смещения от -5 до $+5$ В. На верхний затвор p - и n -канальных транзисторов подавали напряжение смещения -5 и $+5$ В, соответственно. Сразу после облучения измеряли пороговое напряжение и наклон кривых в подпороговой области, после чего снимали вольт – фарадные характеристики.

Влияние рентгеновского излучения на сдвиг напряжения для транзисторов с каналом, образованным скрытым оксидом, при заземленной подложке и смещении на подложке -5 В при облучении в зависимости от дозы облучения показано на *рис. 1*.

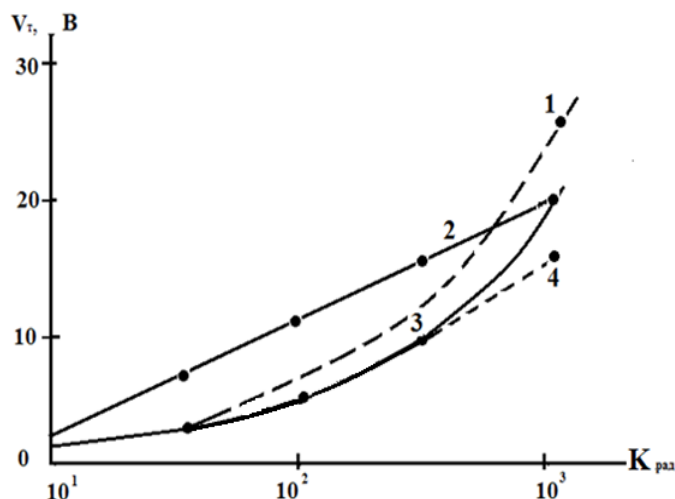


Рис. 1. Влияние рентгеновского излучения на сдвиг напряжения для транзисторов в зависимости от дозы облучения: 1- и 3 – сдвиг напряжения в середине ширины запрещенной зоны при облучении, 2- и 4 – сдвиг порогового напряжения для n - и p - канальных транзисторов

При воздействии ионизирующих излучений нейтральный уровень, разделяющий донорные и акцепторные ловушки, находится на расстоянии всего нескольких величин kT/q от середины запрещенной зоны, поэтому параметр сдвиг напряжения в середине ширины запрещенной зоны при облучении в зависимости от дозы облучения может хорошо аппроксимировать сдвиг напряжения, обусловленный только зарядом оксида [9]. С другой стороны, для полевых МДП транзисторов пороговое напряжение V_t связано с суммарным зарядом оксида и плотностью поверхностных ловушек с энергетическим уровнем, соответствующим началу инверсии. Поэтому отмечается хорошая корреляция величин сдвига порогового напряжения и V_t , причем при этом возникает незначительное число ловушек на границе раздела. Подача отрицательного смещения при облучении (особенно с дозой более 100 крад) приводит к снижению числа захваченных дырок.

Характер зависимостей величины захваченного заряда от дозы облучения свидетельствует о том, что при нулевом смещении плотность захваченного заряда примерно одинакова на обеих поверхностях раздела, в то время как при смещении -5 В захват дырок на поверхности раздела подложка/оксид заметно усиливается даже при дозе всего 10 крад (Si).

Для поверхности раздела пленка/оксид смещение -5 В вызывает уменьшение плотности захваченного заряда, и характеристика приобретает линейную зависимость от дозы. Для определения области, где захват заряда, минимальный, построили зависимость пороговых напряжений от смещения на подложке при дозе облучения 100 крад. Величины пороговых напряжений n - и p -канальных приборов минимальны при смещении -3 и -2 В, соответственно, а величина сдвига напряжения в середине ширины запрещенной зоны при облучении в зависимости от дозы облучения, практически неизменна в интервала от -2 до -4 В.

Минимальное значение достигается, как результат действия трех одновременно действующих эффектов: снижения доли рекомбинированных пар электрон-дырка, генерированных у поверхности раздела, при увеличении электрического поля (т. е. увеличения числа захваченных дырок), удаления дырок с поверхности раздела пленка/оксид по мере возрастания отрицательного смещения и обратного соотношения между поперечным сечением захвата носителей и величиной приложенного поля. При этом всегда для данной поверхности раздела имеется такое поле, при котором плотность захваченного заряда минимальная.

Известно [6], что плотность электрически активных дефектов, созданных при внедрении ионов кислорода, до облучения намного выше в пленке и у поверхности раздела пленка/оксид, чем в подложке и у поверхности раздела подложка/оксид – поверхности раздела. Эксперименты показали, что облучение с дозой 100 крад при различных смещениях на подложке приводит к изменению плотности захваченного заряда на обеих поверхностях раздела. При напряжениях смещения, вызывающих притягивание дырок к поверхности раздела, скорость встраивания заряда для поверхности раздела подложка/оксид составляет $3,9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ В}^{-1}$. Это означает, что, несмотря на более высокие значения плотности фиксированного заряда и поверхностных состояний до облучения в первом случае, обусловленное облучением число дырочных ловушек практически одинаковое для обеих поверхностей. Однако при отталкивании дырок от поверхности раздела на поверхность раздела подложка/оксид захватывается меньшее количество дырок, чем на поверхности раздела пленка/оксид, поскольку в первом случае минимальная величина Q_{0t} ниже. Поскольку островки кремния обнаружены в скрытом оксиде только у поверхности раздела подложка/оксид, можно ожидать, что эта поверхность раздела будет содержать и большее число ловушек.

Затем схемы облучались рентгеновским излучением с энергией 160 кэВ. Мощность дозы облучения для всех облучавшихся образцов была 85 рад по кремнию в сек. Все образцы облучались в течение 30 минут.

Перед облучением пороговое напряжение обратного затвора составляло 22 ± 2 В. Пороговые напряжения обычного, переднего затвора составляли для n -канала около $0,5 \pm 0,1$ В и для p -канального транзистора $-0,7 \pm 0,1$ В. Токи утечки краевых транзисторов были перед облучением порядка $0,1$ пА/мкм ширины канала. Среднее значение подвижности носителей было для n -канальных транзисторов 900 и $400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для p -канальных транзисторов.

После облучения при различных смещениях 5,0 и -5 В до дозы 10 крад по кремнию не наблюдалось заметного увеличения порогового напряжения обоих типов транзисторов обратного затвора. При увеличении дозы облучения пороговое напряжение начинает сильно увеличиваться. При накопленной дозе порядка 200–300 крад для n -канального транзистора оно превышает -100 В для смещения $+5$ В, около -80 В для смещения 0 В и около -40 В для смещения -5 В. Несколько меньше смещение порогового напряжения для p -канального транзистора. Оно также невелико для дозы 10 крад, и возрастает с увеличением воздействия дозы порядка 200 крад смещение составляет на много больше -100 В для смещения $+5$ В, около -60 В, при смещении 0 В; около -50 В при смещении -5 В. Во всех случаях отрицательное смещение вызывает меньшее смещение порогового напряжения обратного канала. Положительное смещение вызывает повышенное смещение порогового напряжения захватом дырок. Это характерно для разных структур МОП приборов.

Вольтамперные характеристики МОП приборов в случае положительного смещения обратного заряда ($+5$ В) приведены на *рис. 2*. В связи с присутствием электрического поля в погруженном оксиде, дырки захватываются вблизи обратного перехода, что вызывает сбор электронов на кремниевой пленке, как это показано на *рис. 3*.

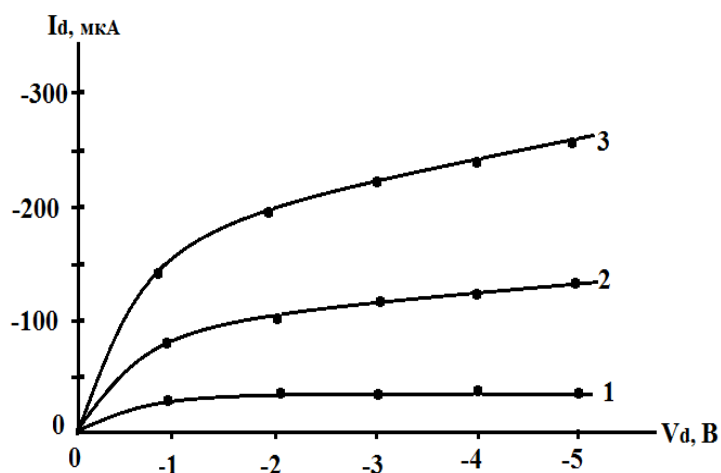


Рис. 2. Вольтамперные характеристики МОП приборов в случае положительного смещения обратного заряда (+5 В): 1 – $V_g = -2$ В, 2 – $V_g = -3$ В, 3 – $V_g = -4$ В

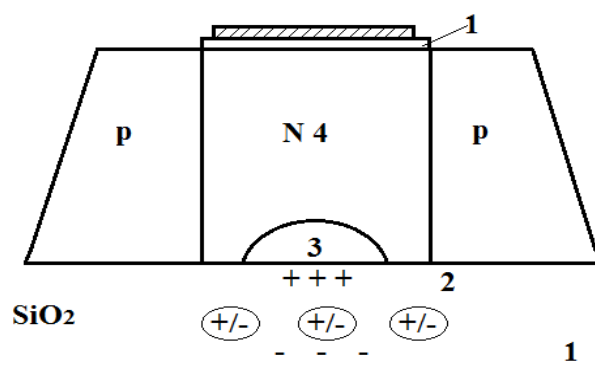


Рис. 3. Сбор электронов на кремниевой пленке: 1 – генерирование дырок на поверхности (на границе) окисной пленки; 2 – захват дырок на поверхности (границе) обратного перехода; 3 – сбор электронов на обратной стороне кремния; 4 – уменьшение области поверхностного заряда

Транзисторы подвергались облучению от источника при напряжении на затворе +5 В. На рис. 4 представлена зависимость отношения сдвига порогового напряжения при облучении к дозе облучения от ширины канала и толщине подзатворного окисла $t_{ox} = 35$ нм.

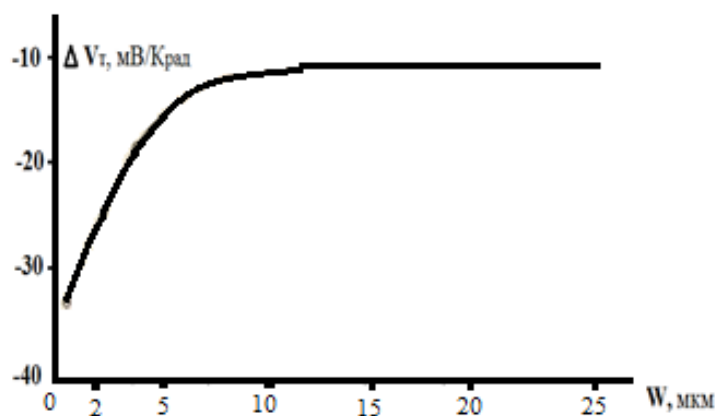


Рис. 4. Зависимость отношения сдвига порогового напряжения при облучении к дозе облучения ($\Delta V_T / \text{доза}$ [мВ/Крад]) от ширины канала

Видно, что, начиная с 4 мкм снижение ширины канала сопровождается быстрым ростом радиационной чувствительности. Этот эффект следует учитывать при пропорциональной миниатюризации МОП-структур, предназначенных для использования в радиационно-стойких сверхбольших ИС.

Чтобы объяснить влияние геометрий прибора на его радиационную чувствительность, были проведены расчеты на двумерной модели МОП-структуры. Использовалась программа, позволяющая независимо задавать величину заряда в полевом окисле и подзатворном окисле. В нашем случае эти значения выбирались следующим образом. График, приведенный на *рис. 4*, показывает, что радиационная чувствительность порогового напряжения составляет $\sim 12,5$ мВ/крад при ширине канала 25 мкм. Эта величина соответствует радиационной чувствительности только подзатворного окисла, поскольку та часть канала, на которую распространяется действие двумерного краевого поля, в этом случае пренебрежимо мала. При толщине подзатворного окисла 35 нм величина 12,5 мВ/крад означает, что при дозе облучения 14 крад плотность генерируемого заряда составляет $1 \cdot 10^{11}$ см⁻². Это в свою очередь приводит к предположению, что весь этот заряд сосредоточен у границы раздела кремний-окисел.

Двумерная модель, построенная для ширины канала 0,8 мкм и значений напряжения на подложке и затворе соответственно 0 и 0,5 В, показывает, что после облучения эквипотенциальные контуры сдвигаются в глубину подложки. Это соответствует повышению потенциала вблизи поверхности кремния и, следовательно, уменьшению V_T . Такой эффект сильнее выражен при малой ширине канала, так как в МОП транзисторах с узким каналом исходные значения V_T выше, чем в транзисторах с широким каналом из-за относительно большего влияния краевого поля, существующего на границе полевого и подзатворного окислов, благодаря разнице потенциалов поверхности под этими окислами и стремящегося снизить потенциал поверхности под подзатворным окислом. При облучении эффект краевого поля ослабляется в связи с преимущественным накоплением заряда в полевом окисле, толщина которого примерно в 10 раз больше, чем подзатворного. Потенциал поверхности под полевым окислом возрастает при облучении более значительно, чем под тонким подзатворным окислом, разница потенциалов сглаживается, и краевое поле уменьшается. Поэтому результирующее снижение V_T в МОП-транзисторах с узким каналом оказывается более значительным, чем в приборах с широким каналом.

Выводы

Минимальное значение величины пороговых напряжений достигается как результат действия трех одновременно действующих эффектов: снижения доли рекомбинированных пар электрон-дырка, генерированных у поверхности раздела, удаления дырок с поверхности раздела пленка/оксид и обратного соотношения между поперечным сечением захвата носителей и величиной приложенного поля.

Показано, что устойчивость скрытых оксидов к воздействию накопленной дозы излучения возрастает при подаче на подложку в процессе облучения отрицательного напряжения смещения. Практически важным является и такой факт, как меньшая подверженность захвату заряда в процессе облучения при нулевом смещении образцов с меньшим количеством дефектов до облучения.

Библиография

1. Герасименко, Н.Н., Мордкович В.Н. Радиационные эффекты в системе полупроводник – диэлектрик // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 6. С. 5–19.
2. Мустафаев, А.Г., Мустафаев А.Г. Влияние накопленной дозы излучения на КМОП-транзисторы изготовленные по КНС технологии // Нано – и микросистемная техника. 2008. № 9. С. 44–46.
3. Мустафаев, А. Г., Мустафаев Г. А. Радиационная стойкость КНИ МОП транзисторов к накопленной дозе ионизирующего излучения // Нано – и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 47–49.
4. Gaillardin M., Goiffon V., Marcandella C., Girard S., Martinez M., Paillet P., Magnan P, Estriebeau M. Radiation effects in CMOS isolation oxides: differences and similarities with thermal oxides // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013. V. 60, N 4. P. 2623–2629.
5. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В., Мустафаев А.Г. Конструктивные приемы увеличения радиационной стойкости КНИ МОП транзисторов к накопленной дозе ионизирующего излучения // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2018. Т. 8, № 4. С. 10–12.
6. Мустафаев А.Г. Технология формирования кремниевых пластин со скрытым слоем // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 11–14.
7. Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г. Разработка процесса формирования глубокой изоляции структур кремний на изоляторе // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 1. С. 30–32.
8. Патент РФ №2340038. Способ изготовления полупроводникового прибора / А.Г. Мустафаев, Г.А. Мустафаев. Заявл. 04.12.2006. Опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.
9. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. М., 1988. 255 с.