УДК 621.328

ДЕГРАДАЦИЯ СТРУКТУР МЕТАЛЛ — ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ — КРЕМНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ И ИНЖЕКЦИИ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ КРЕМНИЯ В ОКИСЕЛ

Ю. Н. Касумов, С. Н. Козлов, А. Н. Невзоров

(кафедра общей физики для химического факультета)

Показано, что инжекция электронов из кремния в окисел и электронное облучение приводят к одинаковым изменениям энергетических спектров поверхностных состояний и возрастанию зарядовой нестабильности структур Si—SiO₂ — металл независимо от типа проводимости кремниевой подложки. Возникающая зарядовая нестабильность связана с генерацией подвижных ионов и медленных электронных состояний в окисле. Характер энергетического спектра поверхностных состояний зависит от условий проведения инжекции электронов.

Базовые для современной микроэлектроники структуры металл двуокись кремния — кремний (МДК) при различных радиационных воздействиях «деградируют» — претерпевают неконтролируемые изменения электрофизических параметров (в первую очередь заряда окисного слоя и плотности центров захвата носителей заряда в переходном слое Si—SiO₂). Такая «деградация» существенно ограничивает диапазон использования МДК-структур и потому является в последние годы предметом многочисленных исследований (см., напр., [1—3]). Качественно похожие явления происходят при инжекции электронов из кремния в окисный слой (в отсутствие радиации). В настоящей работе с целью выяснения возможности тестирования радиационной стойкости МДК-структур методами, основанными на инжекционных воздействиях, проведено количественное сопоставление эффектов, наблюдающихся при облучении МДК-структур электронным пучком и при инжекции электронов из кремния в окисел.

В экспериментах использовались МДК-структуры, полученные термическим окислением в сухом кислороде кремния р- и п-типа с ориентацией поверхности (100). Толщина окисла 1000 Å, металлические элек-троды площадью 0,92 и 1,25 мм² создавались термическим испарением Al или Мо в вакууме. Лавинная инжекция электронов из p-Si в SiO₂ осуществлялась в импульсном режиме (длительность импульса 5 мкс, период повторения 10 мкс, амплитуда 50—80 В), обеспечивающем однородное протекание потока электронов по площади МДК-структуры [4]. Плотность потока электронов в процессе деградации поддерживалась постоянной ($\sim 10^{14}$ электрон см⁻²). Количество электронов, протекающих через границу раздела Si—SiO₂ (доза лавинной инжекции D_i), определялось путем интегрирования постоянного тока через МДК-структуру, измеряемого прибором В7-30. Электронное облучение проводилось в электронном микроскопе пучком электронов с энергией 10 кэВ и плотностью тока $\sim 0,15$ мкА см⁻². Доза облучения D_e варьировалась в пределах 2·10¹²-1·10¹⁶ электрон см⁻². Концентрация поверхностных электронных состояний (ПС) на границе Si-SiO₂ измерялась. емкостными методами (квазистатическим и высокочастотным). Все процессы и измерения проводились при комнатной температуре. Исхолные структуры характеризовались низкой плотностью ПС в средней части

86

запрещенной зоны кремния ($N_{SS} \sim 1 \cdot 10^{10} \ \Im B^{-1} \cdot cm^{-2}$) и отсутствием ионного дрейфа в электрическом поле $1 \div 2 \cdot 10^6 \ B \cdot cm^{-1}$ при 300 К.

На рис. 1 приведены типичны энергетические спектры плотности ПС кремния $N_{SS}(E)$ до и после лавинной инжекции электронов из Si в SiO₂, а также облучения электронами. Оба воздействия приблизительно одинаково влияют на плотность ПС. Как видно из рис. 1, при электронном облучении структур на базе кремния *p*- и *n*-типа энергетический спектр ПС изменяется также идентично. Для обоих воздействий, как правило, характерно появление пика плотности ПС вблизи середины запрещенной зоны кремния, который обычно связывают с возникновением в переходном слое Si—SiO₂ оборванных связей типа \equiv Si в результате разрыва части напряженных и ослабленных Si—Si и Si—Oсвязей [5] — см. кривые 2—4. Кроме того, наблюдается рост *U*-образной компоненты энергетического спектра ПС, обусловленный возрастанием разупорядоченности этого слоя.

Рис. 1. Энергетические спектры ПС кремния в исходном состоянии (1), после облучения электронами с энергией 10 кэВ МДК-структур с подлож-кой *р*-типа (2) и *п*-типа (3); после лавинной инжекции электронов из Si в SiO₂ при напряжении на затворе между импульсами $V_g = +4$ В (4) и -5 В (5). Доза электронного облучения $D_e = 10^{13}$ электрон см⁻², доза лавинной инжекции $D_i = 10^{16}$ электрон см²



Оказалось, что характер энергетического спектра ПС, возникающих после лавинной инжекции, сильно зависит от условий проведения процесса инжекции. На рис. 1 показаны спектры ПС при проведении лавинной инжекции в двух режимах. В первом режиме на металлический электрод между импульсами обедняющего напряжения подавалось напряжение $V_g = +4$ B, и ПС как во время импульсов, так и между ними остаются заполненными электронами. Во втором режиме к электроду в промежуток времени между обедняющими импульсами прикладывалось Vg=-4 В; во время подачи импульса на ПС захватываются электроны, после окончания импульса — дырки. В этом режиме во время каждого цикла происходит $\sim 10^{10}$ — 10^{11} на 1 см² (в зависимости от величины N_{SS}) актов рекомбинации электронов и дырок через ПС. Из рис. 1 (кривая 5) следует, что в результате этого существенно растет U-образная компонента энергетического спектра ПС. Это доказывает, что один из эффективных механизмов диссипации энергии. освобождающейся в актах поверхностной рекомбинации электроннодырочных пар — дефектообразование на границе раздела Si-SiO2.

Важной компонентой процесса радизционной, а также инжекционной деградации МДК-структур является генерация «медленных» электронных состояний (МС), определяющих в значительной степени долговременную электрическую нестабильность МДК-структур.

В наших экспериментах появление MC регистрировалось по изменению заряда поверхности кремния ΔQ после подачи в течение 15 мин

на затвор напряжения $V_g = +10$ В. Величина ΔQ определялась по сдвигу высокочастотной вольт-фарадной характеристики вдоль оси напряжений (при этом учитывалась только «медленная» компонента заряда, не релаксирующая за время ~10 с). На рис. 2 показаны типичные зависимости ΔQ от дозы лавинной инжекции. Видно, что в области малых доз ($D_i \ll 3 \cdot 10^{17}$ электрон см⁻²) после приложения положительного напряжения V_g в окисле появляется дополнительный положительный заряд. Это можно объяснить только генерацией подвижных ионов в окисле. На образцах, имеющих в исходном состоянии повышенный ионный дрейф при комнатной температуре $\Delta Q/q \sim 10^{10}$ см⁻²



Рис. 2. Дозовые зависимости перезарядки поверхности кремния при подаче на металлический электрод напряжения V_{g} = +10 В для структур с обычным (1) и повышенным (2) ионным дрейфом в исходном состоянии

Рис. 3. Зависимость времени релаксации ионного заряда τ от температуры. Величина накопленного вблизи границы Si—SiO₂ заряда $\Delta q \sim 10^{11}$ (1) и 10^{12} на см⁻² (2)



(здесь q — величина элементарного заряда), после лавинной инжекции происходит более значительный рост плотности подвижного ионного заряда в окисле (см. рис. 2, 2). При этом оказывается возможным провести изучение кинетики релаксации ионного заряда при различных температурах. В результате можно вычислить энергию активации процесса ионного дрейфа: $E_a=0,6$ эВ при небольшой плотности ионного заряда $\Delta Q/q \sim 10^{11}$ см⁻² и $E_a=0,35$ эВ при $\Delta Q/q \simeq 10^{12}$ см⁻² (см. рис. 3). Такие величины E_a типичны для дрейфа ионов водорода в окисле [6]. Очевидно, в результате инжекции горячих электронов в SiO₂ происходит освобождение части локализованных ионов водорода. Наиболее вероятным механизмом такого освобождения представляется колебательное возбуждение связей О—Н или Si—Н с отрывом атома водорода и последующим заряжением его на одной из границ раздела Si—SiO₂, SiO₂— металл ($H \rightarrow H^+ + \bar{e}$). При повышенном содержании воды или ее фрагментов в окисном слое увеличиваются как ионный дрейф в окисле, так и генерация ионов в результате электронно-колебательного возбуждения МДК-структуры.

При дальнейшем увеличении дозы лавинной инжекции $(D_i > > 5 \cdot 10^{17}$ электрон см⁻²) преобладающую роль начинает играть генерация МС (величина ΔQ сначала уменьшается, а затем меняет знак из-за все возрастающего вклада перезарядки МС). Рост концентрации МС приблизительно пропорционален логарифму D_i , что свидетельствует о достаточно широком диапазоне сечений дефектообразования. Стимуляция ионного дрейфа и генерация МС в процессе электронного облучения МДК-структур происходят приблизительно так же, как и при ла-







Рис. 5. Кривые изохронного вакуумного отжига МС, возникающих в результэте лавинной инжекции ($D_i = 10^{19}$ электрон·см⁻²) (1) и облучения электролами ($D_e = 10^{16}$ электрон·см⁻²) (2)

винной инжекции электронов в SiO₂. В качестве примера на рис. 4 показана дозовая зависимость перезарядки поверхности кремния при подаче напряжения —10 В на металлический электрод для МДК-структур, предварительно деградированных в результате лавинной инжекции или облучения электронами. Видно, что зависимости ΔQ от дозы воздействия имеют сходный характер. Величины D_i и D_e, соответствующие одинаковым воздействиям как на медленную релаксацию, так и на генерацию ПС (см. рис. 1), отличаются примерно в 10³ раз. Приблизительно такое количество электронно-дырочных пар создает в SiO₂ один электрон с энергией 10 кэВ [7]. Кинетика релаксации заряда, накопленного на МС, одинакова для структур, подвергнутых лавинной инжекции и облучению электронами. Как видно из рис. 5, в обоих случаях термический отжиг МС происходит также идентично. Таким образом, деградация МДК-структур в результате радиационного воздействия и инжекции электронов из кремния в окисный слой происходит одинаково. Дозу инжекционного воздействия, имитирующего радиационное воздействие, легко рассчитать заранее, если известно, сколько электронно-дырочных пар генерируется в окисле в процессе облучения.

89

Выводы

1. Показано, что лавинная инжекция и электронное облучение приводят к близким изменениям энергетических спектров ПС и возрастанию зарядовой нестабильности МДК-структур независимо от типа проводимости кремниевой подложки.

2. Обнаружено, что характер энергетического спектра ПС сильно зависит от условий проведения инжекции электронов из кремния в окисел. Интенсивная рекомбинация электронно-дырочных пар через ПС сопровождается увеличением плотности U-образной компоненты спектра ПС.

3. Низкоэнергетическое (не сопровождающееся ударным смещением атомов решетки в результате столкновений с частицами высоких энергий) радиационное воздействие можно имитировать инжекционным, создающим эквивалентное количество электронов в окисном слое.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Smitz W., Young D. R.//J. Appl. Phys. 1983. 53, N 11. P. 6443. [2] Grunthaner F. J., Levis B. F., Zamani N., Maserjian J.//IEEE Trans. Nucl. Sci. 1980. NS-27, N 6. P. 1640. [3] Wang Y., Nishioka Y., Ma T. P., Barker R. C.//Appl. Phys. Lett. 1988. 52, N 7. P. 573. [4] Козлов С. Н., Потапов А. Ю. Препринт физ. ф-та МГУ. 1986, № 31. [5] Sah E. T., Sun J. Y.-C., Tzou J. J.-T.//J. Appl. Phys. 1983. 53, N 5. P. 254. [6] Youdou Z., Fengmei W., Guangheng Z.//Insulating Films on Semiconductors. N. Y., 1981. [7] Brown D. B.// //IEEE Trans. Nucl. Sci. 1986. NS-33, N 6. P. 1240.

Поступила в редакцию 22.03.89