

Накопление заряда в диэлектрике и состояния на границах структур кремний-на-изоляторе при облучении электронами и γ -квантами

© Д.В. Николаев, И.В. Антонова, О.В. Наумова, В.П. Попов, С.А. Смагулова

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 5 сентября 2002 г. Принята к печати 5 сентября 2002 г.)

Исследованы накопление заряда в диэлектрике и состояния на границах структур кремний-на-изоляторе при облучении их электронами (энергия 2.5 МэВ) и γ -квантами (энергия 662 кэВ). Обнаружено, что в скрытом диэлектрике структур после облучения появляется дополнительный положительный заряд. Концентрация ловушек для дырок, генерируемых в окисле облучением, вблизи границы с подложкой выше, чем у границы сращивания (отсеченный слой кремния)/окисел. Показано, что наличие даже небольшого встроенного поля в структурах ($F \gtrsim 5 \cdot 10^3$ В/см) приводит к эффективному разделению носителей. Генерация дополнительных состояний на границах Si/SiO₂ в структурах кремний-на-изоляторе отсутствует при обоих видах облучения, хотя наблюдается в исходном термическом окисле.

1. Введение

Основными результатами воздействия облучения на структуры, содержащие диэлектрические и полупроводниковые слои, являются введение дополнительного, чаще положительного, заряда в диэлектрике, генерация состояний на границе полупроводник/диэлектрик и генерация дефектов в объеме полупроводника. Влияние ионизирующего излучения (рентгеновских и γ -лучей, потока электронов, нейтронов, α -частиц и т. д.) на характеристики структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) изучается на протяжении нескольких десятилетий [1]. В результате были разработаны способы увеличения радиационной стойкости микросхем на основе МДП транзисторов, такие как использование тонких окислов [1] и составных диэлектриков (SiO₂/Si₃N₄/SiO₂) [2].

В структурах кремний-на-изоляторе (КНИ/SOI) благодаря малой толщине рабочего слоя кремния и отсечению его диэлектриком от радиационных дефектов, генерируемых в подложке, наиболее важными с точки зрения изменения свойств КНИ при облучении являются введение заряда в скрытый диэлектрик и генерация состояний на границе с окислом [3,4]. Заряд в скрытом диэлектрике и состояния на границе (отсеченный слой кремния)/диэлектрик являются параметрами КНИ материалов, непосредственно влияющими на работу приборов, создаваемых в отсеченном слое кремния, поскольку они приводят к созданию дополнительного канала проводимости вблизи границы раздела с полупроводником и смещению порогового напряжения транзистора.

Наиболее подробно влияние радиации на КНИ исследовано для структур, создаваемых имплантацией кислорода (SIMOX) [5]. Так, в частности, при облучении SIMOX-структур наблюдаются следующие особенности, зависящие от технологии их создания: 1) в структурах, имеющих более совершенный скрытый диэлектрик (т. е. подвергнутых более длительному отжигу или отжигу при более высокой температуре), накапливается меньший заряд; 2) в окисле формируются как дырочные, так и электронные ловушки, соответствен-

но накапливаются и положительный, и отрицательный заряды, приводя к частичной взаимной компенсации [6]; 3) плотность поверхностных состояний в случае SIMOX-структур, созданных многократной имплантацией кислорода, практически не меняется при облучении, тогда как в SIMOX-структурах, созданных однократной имплантацией, имеет место генерация дополнительных состояний [7,8].

Для КНИ структур, полученных с использованием технологии прямого сращивания пластин кремния, в литературе имеются в основном данные по влиянию облучения на BESOI-структуры (bonded and etched back SOI) [9], в которых уменьшение толщины одной из сращённых пластин кремния осуществляется путем травления. Поведение BESOI-структур при облучении схоже с поведением МОП (металл–окисел–полупроводник) структур с термически выращенным окислом. В скрытом окисле BESOI-структур накапливается, как правило, положительный заряд. В BESOI-структурах проявляется водород, вводимый за счет гидрофилизации поверхности при процедуре сращивания. Он считается ответственным за изменение электрофизических характеристик скрытого окисла [10,11] по сравнению с характеристиками исходного окисла.

Данные по влиянию облучения на КНИ структуры, полученные с использованием технологии сращивания пластин кремния с последующим отслаиванием тонкой пленки от одной из них за счет имплантации водорода (метод Smart-Cut [12]), в литературе практически отсутствуют. Цель данной работы — исследование процесса накопления заряда в скрытом окисле структур кремний-на-изоляторе, изготовленных с использованием водородного расслоения, и сравнение с аналогичными процессами в МОП структурах.

2. Методика эксперимента

Для исследований использовались КНИ структуры, полученные по технологии Dele-Cut [13]. Данный метод использует сращивание имплантированной водо-

Таблица 1. Основные параметры КНИ и МОП структур и величина заряда в диэлектрике до и после электронного и γ -облучения

Структура	Толщина диэлектрика, мкм	Тип проводимости слоев	$Q_0, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$Q, 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (электроны, $3 \cdot 10^6$ рад)	$Q, 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (γ -кванты, $3 \cdot 10^6$ рад)
SOI-1	0.11	<i>p</i> -Si/SiO ₂ / <i>n</i> -Si	1.1	7	10
SOI-2	0.28	<i>n</i> -Si/SiO ₂ / <i>p</i> -Si	3.5	25.3	—
SOI-3	0.40	<i>n</i> -Si/SiO ₂ / <i>n</i> -Si	1.8	17	23
SOI-4	0.41	<i>n</i> -Si/SiO ₂ / <i>n</i> -Si	2.4	24	—
SOI-5	0.36	<i>p</i> -Si/SiO ₂ / <i>n</i> -Si	3.0	—	16
MOS-1	0.13	<i>n</i> -Si	1.1	2.83	8.7
MOS-2	0.36	<i>n</i> -Si	3.1	3.7	5.2

Примечание. Q_0 — исходный заряд в окисле, Q — суммарный фиксированный заряд в окисле.

родом пластины кремния с окисленной подложкой с последующим расщеплением первой пластины по слою, ослабленному имплантацией водорода. Граница между отсеченным слоем кремния и окислом является границей срачивания. Граница окисел/подложка формировалась в процессе термического окисления. Все окислы, использованные для создания МОП и КНИ структур, были выращены в режиме влажного окисления при температуре 1000°C. Для проведения электрофизических измерений были изготовлены меза-структуры с алюминиевыми контактами к отсеченному слою кремния и подложке. Площадь меза-структуры составляла $300 \times 300 \text{ мкм}^2$ и была одинаковой для всех исследованных образцов. В табл. 1 представлены основные параметры исследованных КНИ (SOI) и МОП (MOS) структур. Исследовались КНИ структуры с различными типами проводимости в отсеченном слое кремния и подложке, а также с различными толщинами скрытого окисла (0.11–0.41 мкм) и отсеченного слоя кремния (0.48–1.70 мкм). Концентрация носителей заряда в исходном кремнии лежала в интервале $(0.3–1.0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Структура SOI-4 была изготовлена из кремния, выращенного методом зонной плавки, остальные КНИ и МОП структуры — из кремния, выращенного методом Чохральского. Для исследования изменения свойств окисла в процессе изготовления КНИ структур измерения проводились также на МОП структурах, изготовленных с использованием тех же пластин кремния и тех же окислов, что и для КНИ структур. Заряд в окисле, концентрации носителей и плотность состояния (DOS) на границах исследовались с помощью высокочастотных вольт-фарадных ($C-V$) характеристик. Облучение проводилось электронами и γ -квантами. Облучение электронами с энергией 2.5 МэВ проводилось в импульсном режиме с длительностью импульса 400 мкс. Плотность тока в импульсе составляла 0.1–0.3 А/см². Частота следования импульсов регулировалась так, чтобы средняя температура образца во время облучения не превышала 50°C. Вторым источником являлся цезий ¹³⁷Cs, обеспечивающий непрерывное излучение γ -квантов с энергией 662 кэВ и скоростью набора дозы 100 рад/с. В обоих случаях облучение проводилось в диапазоне доз $D = 10^5–10^7$ рад. Структуры облучались без приложения дополнительного смещения.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1, *a, b* представлены $C-V$ -характеристики для структур SOI-1 и SOI-3, облученных электронами и γ -квантами соответственно. Структура SOI-1 имеет *p*-тип проводимости в отсеченном слое кремния и *n*-тип в подложке, что и определяет ступенчатый вид $C-V$ -характеристики. В случае совпадения типов проводимости в отсеченном слое кремния и подложке (SOI-3) $C-V$ -характеристика имеет также две области модуляции емкости от максимального значения C_{max} до двух минимальных. Модуляция емкости при положительном смещении связана в обоих структурах с формированием области пространственного заряда в отсеченном слое кремния, а при отрицательном смещении — в подложке. Максимальная емкость структуры определяется емкостью скрытого диэлектрика. Минимальная емкость (минимальные емкости) и (или) значение емкости на ступеньке определяются концентрацией носителей в отсеченном слое кремния и подложке.

Из смещения областей модуляции емкости по оси напряжений видно, что в процессе облучения в обоих случаях происходит накопление положительного заряда в захороненном окисле. Наклон кривых в области модуляции емкости, который определяется плотностью поверхностных состояний, практически не меняется. Минимальное значение емкости и величина емкости на ступеньке также практически не изменяются в использованном диапазоне доз облучения. Это означает, что концентрация носителей заряда в отсеченном слое кремния и подложке в процессе облучения практически остаются постоянными.

На рис. 1, *c* представлены $C-V$ -характеристики МОП структуры с кремнием *n*-типа проводимости в зависимости от дозы облучения электронами. В отличие от КНИ структур, здесь наблюдается не только сдвиг области модуляции в сторону больших напряжений, но и значительное изменение наклона $C-V$ -характеристики с набором дозы, что соответствует росту плотности поверхностных состояний при облучении.

Из $C-V$ -характеристик КНИ и МОП структур по напряжению плоских зон рассчитывался заряд в диэлектрике. Для примера на рис. 2 представлены зависи-

мости накопленного заряда на каждой из границ (граница окисел/подложка — заряд Q_s ; граница (отсеченный слой кремния/окисел) — заряд Q_f) и суммарного заряда $Q_s + Q_f$ в скрытом диэлектрике SOI-4 от дозы облучения электронами. Видно, что заряд на обеих границах выходит на насыщение при дозе электронов $3 \cdot 10^6$ рад. Это наблюдается для всех исследованных КНИ структур. В МОП структурах выход на насыщение происходит уже при дозе $(1-3) \cdot 10^5$ рад.

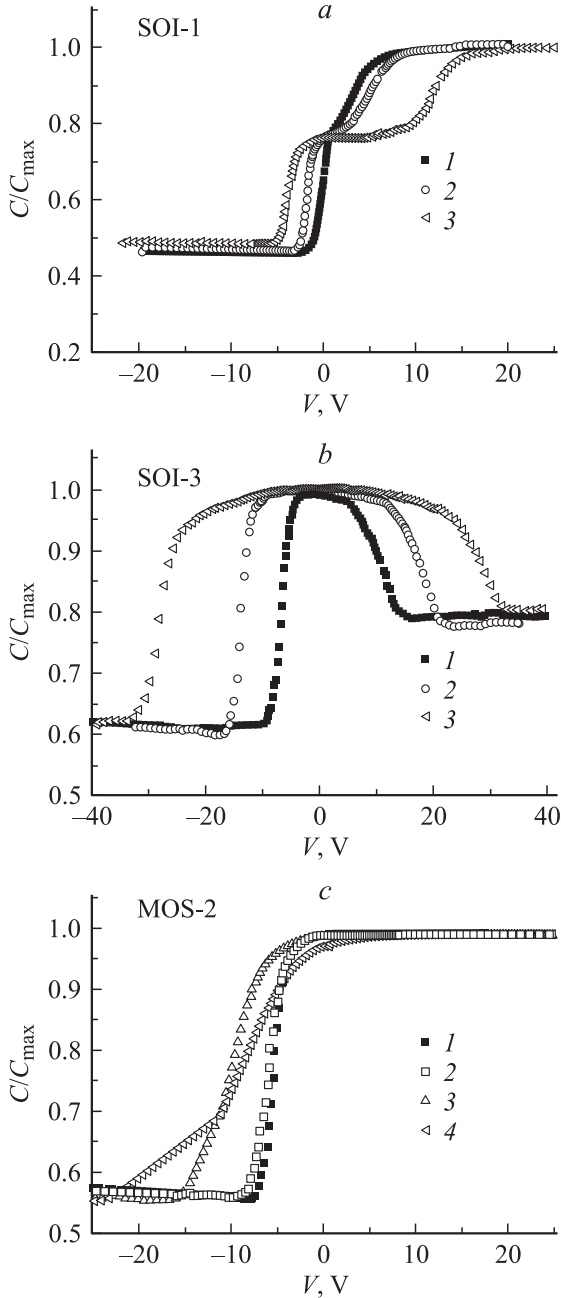


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики структур SOI-1 (a), SOI-3 (b) и MOS-2 (c) в зависимости от дозы облучения электронами (a, c) и γ -квантами (b). a: $D = 0$ (1), 10^5 (2), 10^7 рад (3); b: $D = 0$ (1), $3 \cdot 10^5$ (2), 10^7 рад (3); c: $D = 0$ (1), 10^5 (2), 10^6 (3), 10^7 рад (4).

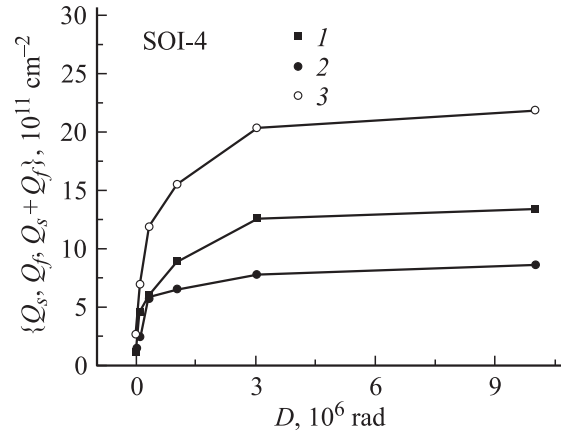


Рис. 2. Зависимость встроенного заряда в скрытом окисле SOI-4 от дозы электронного облучения. 1 — заряд Q_s , приведенный к границе окисел/подложка; 2 — заряд Q_f , приведенный к границе (отсеченный слой кремния)/окисел, 3 — суммарный заряд $Q_s + Q_f$.

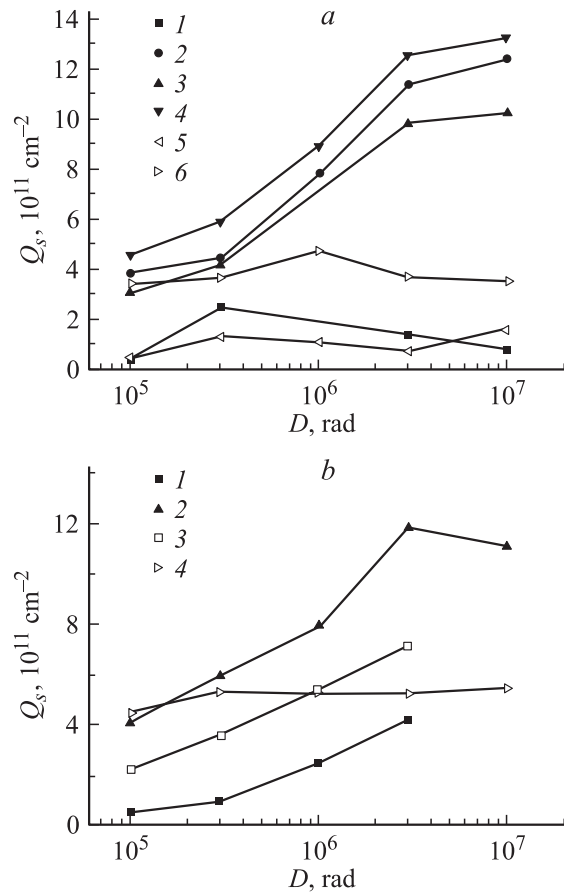


Рис. 3. Зависимость заряда Q_s на границе окисел/подложка для различных КНИ и МОП структур от дозы облучения электронами (a) и γ -квантами (b). a: 1 — SOI-1, 2 — SOI-2, 3 — SOI-3, 4 — SOI-4, 5 — MOS-1, 6 — MOS-2; b: 1 — SOI-1, 2 — SOI-3, 3 — SOI-5, 4 — MOS-2.

Таблица 2. Заряды, приведенные к границам в диэлектрике, напряженность встроенного поля F и величина контактного потенциала φ_c в КНИ и МОП структурах после электронного и γ -облучения

Структура	Облучение электронами		γ -облучение		$F, \text{В/см}$	$\varphi_c, \text{В}$
	$Q_f, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$Q_s, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$Q_f, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$Q_s, 10^{11} \text{ см}^{-2}$		
SOI-1	4.6	2.3	5.8	4.2	$-6.54 \cdot 10^4$	-0.693
SOI-2	10.3	15	—	—	$1.93 \cdot 10^4$	0.54
SOI-3	7.1	9.4	11.3	11.8	$4.49 \cdot 10^2$	0.018
SOI-4	8.5	15	—	—	$4.48 \cdot 10^3$	0.184
SOI-5	—	—	8.8	7.1	$-1.91 \cdot 10^4$	-0.69
MOS-1	—	2.83	—	8.7	$-2.34 \cdot 10^4$	-0.206
MOS-2	—	3.7	—	5.2	$-8.13 \cdot 10^3$	-0.217

Примечание. Q_s — фиксированный заряд в окисле, приведенный к границе окисел/подложка; Q_f — фиксированный заряд в окисле, приведенный к границе окисел/отсеченный слой кремния).

На рис. 3, *a, b* изображены зависимости накопленного заряда от дозы облучения электронами и γ -квантами для различных КНИ и МОП структур. Так как в КНИ структурах окисел, в отличие от МОП структур, имеет не одну, а две границы раздела с полупроводником, то для корректности сравнения с МОП структурами на рис. 3, *a, b* приведены значения заряда только на одной границе КНИ структур, а именно — на границе раздела окисла с подложкой. Из рис. 3, *a, b* видно, что имеют место как случаи, когда заряд, вводимый в окисел КНИ структуры, примерно совпадает с зарядом в аналогичной МОП структуре, так и случаи, когда заряд в КНИ структуре существенно больше, чем в МОП структуре. Заряды на обеих границах и суммарный заряд в скрытом диэлектрике для остальных КНИ и МОП структур до облучения и для дозы $3 \cdot 10^6$ рад приведены в табл. 1 и 2.

Из наклона в области модуляции $C-V$ -характеристики рассчитывалась плотность поверхностных состояний. На рис. 4 для примера приведены распределения плотности

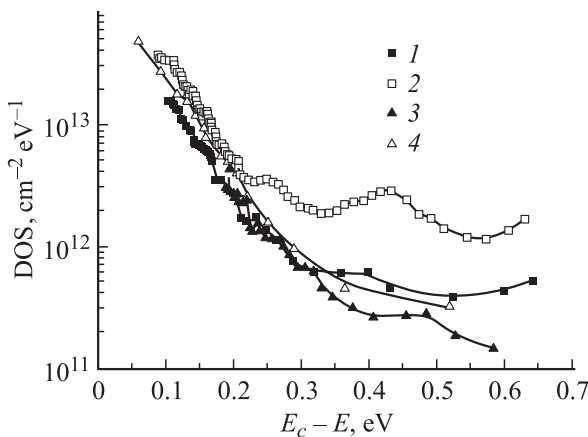


Рис. 4. Распределение плотности поверхностных состояний по энергии E на границе раздела окисел/кремний в запрещенной зоне кремния для MOS-1 (1, 2) и SOI-4 (3, 4, граница окисел/подложка) до (1, 3) и после (2, 4) облучения электронами дозой $3 \cdot 10^6$ рад.

поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния для МОП структур и одной из границ КНИ структур до и после облучения потоком электронов дозой $3 \cdot 10^6$ рад. Для структуры MOS-1 плотность состояний после радиационного воздействия возрастает примерно на порядок в сравнении с исходным значением. На границе окисел/подложка в SOI-4 исходная плотность состояний примерно такая же, как и в МОП структуре, но после облучения она практически не изменяется. Плотность состояний не изменяется в процессе облучения и на границе (отсеченный слой кремния)/окисел. Такая же ситуация имеет место и для остальных из исследованных КНИ и МОП структур, а именно — плотность состояний при облучении изменялась только в исходном окисле МОП структуры, а в КНИ структуре она оставалась постоянной.

4. Обсуждение

Данные, полученные после облучения КНИ и МОП структур электронами и γ -квантами, показывают, что основным эффектом является введение положительного заряда как в скрытом окисле КНИ, так и в окисле МОП. Это является типичным для термического окисла МОП структур и структур BESOI. Однако заряд, накопленный в скрытом окисле КНИ структур, в ряде случаев превосходит заряд в подзатворном окисле МОП структур. В то же время в других КНИ структурах после облучения вводится примерно такой же заряд, как в соответствующей МОП структуре.

В табл. 2 представлены значения контактной разности потенциалов (φ_c) и напряженности электрического поля (F) в диэлектрике КНИ и МОП структур, возникающих в результате разности работ выхода носителей заряда из отсеченного слоя кремния и подложки в КНИ структурах, металла и кремния в МОП структурах. В зависимости от знака и величины поля в скрытом окисле исследуемые КНИ и МОП структуры могут быть разделены на три группы. В табл. 3 представлены энергетические диаграммы, характерные

Таблица 3. Энергетические диаграммы КНИ и МОП структур в зависимости от величины и знака контактного электрического поля

SOI-1, SOI-5, MOS-1, MOS-2	SOI-3, SOI-4	SOI-2
$F_1 < 0$ $Q_f > Q_s$ $- \leftarrow +$	$0 < F \ll F_2$ $Q_f \approx Q_s$ $+ \rightarrow -$	$F_2 > 0$ $Q_f < Q_s$ $+ \rightarrow -$

Примечание. E_c — зона проводимости, E_v — валентная зона, E_F — уровень Ферми.

для каждой из групп. Так, если мы имеем структуру p -Si/SiO₂/ n -Si (отсеченный слой)/диэлектрик/подложка соответственно), то внутреннее электрическое поле (F_1) в диэлектрике направлено к отсеченному слою. В случае структур n -Si/SiO₂/ p -Si поле (F_2) направлено к границе с подложкой. Если типы проводимости в отсеченном слое кремния и подложке совпадают, n -Si/SiO₂/ n -Si, то знак и абсолютное значение напряженности внутреннего поля определяются разностью уровней легирования, и величина F существенно меньше, чем в первых двух случаях.

Как известно, облучение электронами и γ -квантами в основном оказывает ионизирующее действие на SiO₂. Оно вызывает разрыв связей и прежде всего напряженных связей в окисле. Наличие встроенного поля способно приводить к более эффективному разделению носителей заряда, возникающих в процессе облучения. Ясно, что в случае присутствия в окисле ловушек для дырок и в зависимости от знака встроенного поля в скрытом окисле накопление заряда будет идти в большей степени на одной из границ. Так, на рис. 5 представлена разность значений заряда на границах скрытого окисла КНИ структур после дозы облучения $3 \cdot 10^6$ рад в зависимости от напряженности встроенного электрического поля F . Видно, что различные значения накопленного заряда в исследуемых КНИ структурах вполне объяснимы воздействием внутреннего электрического поля. Если же сравнить значения заряда, накопленного при одинаковых условиях (по знаку и величине F) в МОП и КНИ структурах, то в последних, как видно из табл. 3, величина вводимого при облучении заряда несколько выше. Это позволило заключить, что в процессе изготовления КНИ происходит некоторая деградация свойств окисла, приводящая к большим величинам вводимого при облучении заряда. Нужно также отметить, что полевые испытания окислов КНИ структур до облучения свидетельствуют об отсутствии в них ловушек для носителей заряда [14].

Как показано в работе [10], свойства окисла после процедуры срачивания изменяются — происходит ге-

нерация поверхностных состояний и захват заряда в окисле во время инжекции электронов или дырок в слой SiO₂. Предположительно, это вызвано встраиванием водорода в структуру термического окисла [10]: водород взаимодействует со связью O₃Si–SiO₃ и образует O₃Si–H, эта группа диссоциирует при облучении на O₃Si– (E' -центр) и H. Последний, благодаря высокой подвижности, диффундирует с образованием H₂, в результате чего вероятность рекомбинации оказывается невелика. Авторами [15] показано, что при сращивании гидрофилизированных поверхностей концентрация водородных связей составляет $\sim 10^{15}$ см⁻². При использовании метода водородного расслоения концентрация водорода, присутствующего в КНИ структуре в процессе изготовления, более чем на порядок выше, чем в BESOI [16]. Поэтому обогащение окисла водородом во время срачивания и последующего отжига предполагается ответственным за деградацию термического окисла в КНИ структурах.

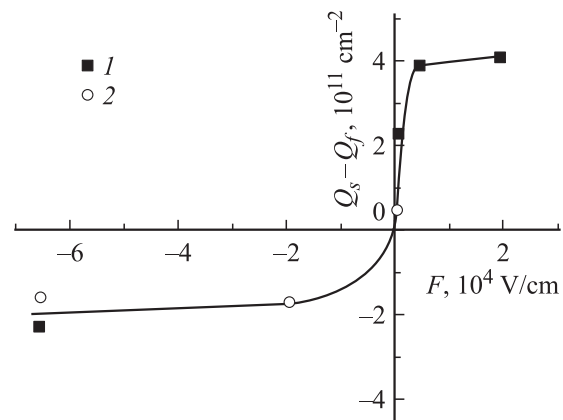


Рис. 5. Разность значений заряда ($Q_s - Q_f$), накопленного после облучения электронами (1) и γ -квантами (2) дозой $3 \cdot 10^6$ рад на границах КНИ структур, в зависимости от напряженности встроенного электрического поля.

Из рис. 5 также видно, что выход $Q_s - Q_f$ на насыщение происходит при относительно низких значениях F . Это означает, что небольшого значения напряженности электрического поля ($F \gtrsim 5 \cdot 10^3$ В/см) уже достаточно для разделения ионизированных носителей, и, следовательно, ловушки для дырок вводятся преимущественно вблизи границ раздела. Это согласуется с существующими представлениями о локализации вводимого облучением заряда в термическом окисле и BESOI (см., например, [17]). Большая величина $Q_s - Q_f$ для положительной напряженности поля говорит о том, что концентрация ловушек для дырок, генерируемых в окисле облучением, вблизи границы с подложкой выше, чем вблизи границы сращивания (〈отсеченный слой кремния〉/окисел). Последнее может быть связано с более высокой концентрацией напряженных связей в переходном слое SiO_x по сравнению с границей сращивания, где переходной слой практически отсутствует [18].

Плотность состояний на границе с подложкой примерно равна, а на границе с отсеченным слоем кремния в КНИ несколько выше плотности состояний на исходной границе с термическим окислом в МОП структурах. Более высокая плотность состояний на границе сращивания может быть связана с иной природой состояний, так как границы формировали разным способом. Кроме того, как было уже сказано, присутствие водорода в процессе изготовления КНИ структуры может приводить к дополнительной генерации состояний на границе кремния с окислом при термообработках [19]. Из рис. 4 следует, что в термическом окисле МОП структур при облучении происходит существенное увеличение плотности состояний, тогда как на границах КНИ структур генерация состояний не наблюдается. Сохранение плотности состояний при облучении может быть связано с пассивацией их водородом, освободившимся со связей в окисле, и(или) стабильностью связей, сформированных при высокой температуре [10]. Появление свободного водорода в процессе облучения согласуется с предположением, сделанным выше, и данными работы [10] о диссоциации в окисле групп $\text{O}_3\text{Si}-\text{H}$ при облучении на E' -центр и водород.

Суммарный заряд, введенный в скрытом диэлектрике КНИ и МОП структур после γ -облучения, больше заряда, вводимого при облучении электронами. Два вида облучения отличаются друг от друга по двум основным параметрам. Во-первых, энергия электронов существенно выше энергии γ -квантов (2.5 МэВ в случае электронов и 662 кэВ в случае γ -квантов). Этот фактор должен приводить к более эффективному введению заряда в окисле. Второй отличительный момент — высокая плотность тока электронов во время импульса, что могло вызвать повышенные температуры во время импульса, несмотря на невысокую среднюю температуру. Нагрев структур во время импульса электронов, соответственно рост вероятности рекомбинации нарушенных (ионизированных) связей, является, по-видимому, причиной более низкого суммарного заряда в окисле при облучении электронами.

5. Заключение

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы.

Присутствие водорода в КНИ структурах в процессе их изготовления оказывает двоякое действие. Это называется как фактор, способствующий росту встроенного заряда и неизменности поверхностных состояний в скрытом окисле КНИ в процессе облучения электронами и γ -квантами.

Наличие даже небольшого встроенного поля ($F \gtrsim 5 \cdot 10^3$ В/см) в КНИ структурах способно приводить к более эффективному накоплению заряда на одной из границ скрытого окисла КНИ структуры. Заряд на границе 〈отсеченный слой кремния〉/окисел, накопленный при облучении, можно уменьшить путем выбора типа проводимости и уровня легирования подложки таким образом, чтобы разделение носителей заряда привело к дрейфу дырок к подложке.

Концентрация ловушек для дырок, генерируемых в окисле облучением, вблизи границы с подложкой выше, чем вблизи границы сращивания (〈отсеченный слой кремния〉/окисел), что по-видимому, связано с наличием более протяженного переходного слоя на границе раздела, полученной термическим окислением.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 01-02-16986.

Список литературы

- [1] E.H. Nicollian, J.R. Brews. *MOS — Physics and Technology* (John Wiley & Sons, 1982).
- [2] K. Watanabe, M. Kato, T. Okabe, N. Nagata. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **33**, 1216 (1986).
- [3] S. Cristoloveanu, S.S. Li. *Electrical Characterization of Silicon-On-Insulator Materials and Devices* (Kluwer Academic Publishers, 1995).
- [4] J.P. Colinge. *Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI* (Kluwer Academic Publishers, 1997) p. 223.
- [5] K. Izumi, M. Dokin, H. Ariyoshi. *Electron. Lett.*, **14** (18), 593 (1978).
- [6] H.E. Boesch, Jr., T.L. Taylor, L.R. Hite, W.E. Bailey. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **37** (6), 1982 (1990).
- [7] F.T. Brady, S.S. Li, W.A. Krull. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **37** (6), 1995 (1990).
- [8] H.K. Annamalai, J.F. Bockman, N.E. McGruer, J. Chapski. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **37** (6), 2001 (1990).
- [9] W.P. Maszara, G. Goetz, A. Caviglia, J.B. McKitterick. *J. Appl. Phys.*, **64**, 4943 (1998).
- [10] A.G. Revesz, H.L. Hughes. *Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices*, ed. by J.P. Colinge et al. (Kluwer Academic Publishers, 1995) p. 133.
- [11] R.E. Stahlbush, G.J. Campisi, J.B. McKitterick, W. Maszara, P. Roitman, G.A. Brown. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **39**, 2086 (1992).
- [12] M. Bruel. *Electron. Lett.*, **31**, 1201 (1995).
- [13] В.П. Попов, И.В. Антонова, Л.В. Миронова, В.Ф. Стась. Патент РФ № 99120527/28(021735) от 28.09.99 г.

- [14] Д.В. Николаев, И.В. Антонова, О.В. Наумова, В.П. Попов, С.А. Смагулова. ФТП, **36** (7), 853 (2002).
- [15] D. Feijoo, Y.J. Chabal, S.B. Christman. *IEEE Int. Conf. Proc.* (1994) p. 89.
- [16] I.V. Antonova, V.P. Popov, V.F. Stas, A.K. Gutakovskii, A.E. Plotnikov, V.I. Obodnikov. *Microelectronic Engineering*, **48**, 383 (1999).
- [17] A.N. Nazarov. *Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices*, ed. by J.P. Colinge et al. (Kluwer Academic Publishers, 1995) p. 217.
- [18] В.П. Попов, И.В. Антонова, А.А. Французов, Л.Н. Софронов, Г.Н. Феофанов, О.В. Наумова, Д.В. Киланов. ФТП, **35** (9), 1078 (2001).
- [19] V.V. Afanas'ev, A. Stesmans. *Appl. Phys. Lett.*, **72** (1), 79 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

Charge accumulation in oxide and interface states of silicon-on-insulator structures after irradiation by electrons and γ -rays

D.V. Nikolaev, I.V. Antonova, O.V. Naumova, V.P. Popov, S.A. Smagulova

Institute of Semiconductor Physics,
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Charge accumulation in oxide and interface states of silicon-on-insulator structures (SOI) are investigated after irradiation by electrons ($E = 2.5$ MeV) and γ -rays ($E = 662$ keV). It is found that an additional positive charge is accumulated in a buried oxide of SOI structures after irradiation. The concentration of hole traps generated in oxide during the irradiation is higher at the interface with a substrate, than at the interlocked one (the cutoff silicon layer/the oxide). It is shown that the presence of even a small built-in field ($F \gtrsim 5 \cdot 10^3$ V/cm) in SOI structures results in the effective separation of ionized carriers. Generation of additional states at Si/SiO₂ interface in SOI structures was absent under both kinds of the irradiation though it had been observed in the initial thermal oxide.