

Исследование влияния ультразвукового воздействия на генерационные характеристики предварительно облученной границы раздела кремний–диоксид кремния

© П.Б. Парчинский[¶], С.И. Власов, Л.Г. Лигай

Национальный университет Узбекистана,
700174 Ташкент, Узбекистан

(Получена 9 июня 2004 г. Принята к печати 28 декабря 2005 г.)

При помощи метода релаксации неравновесной емкости структуры металл–окисел–полупроводник изучено влияние ультразвукового воздействия на генерационные параметры границы раздела Si–SiO₂, облученной γ -квантами. Обнаружено уменьшение генерационного времени жизни под влиянием ультразвуковой обработки. Показано, что в облученных и необлученных структурах изменение генерационных параметров под влиянием ультразвука носит существенно различный характер.

PACS: 73.40.Qv, 73.20.Nb, 61.80.Ed, 73.50.Gr

Структуры типа металл–окисел–полупроводник (МОП структуры) на основе кремния в настоящее время являются основой широкого класса полупроводниковых приборов и структурных элементов интегральных схем. При этом характеристики границы раздела полупроводник–окисел могут оказывать существенное влияние на параметры изготавливаемых приборов и структур [1,2]. Известно, что радиационное облучение ведет к деградации электрофизических параметров границы раздела Si–SiO₂ и, в частности, к ухудшению ее генерационно-рекомбинационных характеристик [3,4]. Ранее было показано, что ультразвуковая (УЗ) обработка ведет к уменьшению эффективного поверхностного заряда в МОП структурах, предварительно облученных γ -квантами [5]. Этот факт, а также данные ряда работ [6–8] о позитивном влиянии УЗ обработки на дефектную структуру полупроводников обуславливают интерес к изучению влияния УЗ воздействия на генерационно-рекомбинационные характеристики границы раздела Si–SiO₂ в МОП структурах, подвергнутых облучению.

В настоящей работе при помощи метода изотермической релаксации неравновесной емкости МОП структуры [9] изучалось влияние УЗ обработки на генерационные характеристики границы раздела Si–SiO₂, облученной γ -квантами. При анализе полученных результатов они сопоставлялись с полученными ранее данными о влиянии УЗ обработки на генерационные характеристики необлученной границы раздела [10]. Исследуемые структуры изготавливались путем термического окисления поверхности кремния *n*-типа проводимости с кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$ и удельным сопротивлением 0.2 Ом·см. Окисление проводилось в атмосфере сухого кислорода при температуре 900°C в течение 1 ч с последующим медленным охлаждением (10°C/мин). Управляющий электрод площадью 0.01 мм² и омический контакт к кремниевой подложке изготавливались путем вакуумного напыления алюминия. Полученные структуры облучались γ -квантами от источника ⁶⁰Co дозой 10⁶ рад. Облучение проводилось без

смещения на полевом электроде. После γ -облучения исследуемые структуры подвергались воздействию УЗ обработки с частотой 2.5 МГц, мощностью 0.5 Вт/см² и длительностью 45 мин.

Измерения процессов релаксации неравновесной емкости исследуемых структур проводились при температуре 0°C на частоте тестового сигнала 150 кГц. Использовался режим измерений, при котором на МОП структуру, находящуюся в состоянии инверсии при напряжении $V = V_1$, подавался импульс напряжения ΔV_1 , переводящий ее в состояние более глубокой инверсии. Выбор данного режима измерений обусловлен тем, что он позволяет пренебречь вкладом, вносимым перезарядкой поверхностных состояний, в поверхностные генерационные токи [11]. Поскольку темп поверхностной генерации зависит от поверхностной концентрации носителей заряда [12], величина V выбиралась таким образом, чтобы обеспечить равенство значений поверхностного потенциала ψ_s в исследуемых структурах до и после воздействия γ -облучения и УЗ обработки. Связь между значениями V и ψ_s определялась при помощи метода высокочастотных вольт-фарадных характеристик [13]. Значения V_1 , определенные из указанных выше соображений, составляли –16 В для исходных необлученных структур, –32 В для структур, подвергнутых γ -облучению, и –30 В для структур, подвергнутых γ -облучению и последующей УЗ обработке.

Различие значений V обусловлено изменением эффективного заряда границы раздела Si–SiO₂ в результате γ -облучения и УЗ воздействия. Амплитуда импульса ΔV , переводящего структуру в неравновесное состояние, во всех случаях выбиралась равной 2 В.

Согласно [9,14] процесс релаксации неравновесной емкости МОП структуры может быть описан формулой

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C_0}{C(t)} \right)^2 = \frac{2n_i}{\tau_g N_a} \frac{C_0}{C_f} \left(\frac{C_f}{C(t)} - 1 \right) + 2 \frac{C_0 n_i S_g}{\varepsilon_0 \varepsilon N_a}, \quad (1)$$

где C_0 — емкость слоя SiO₂, определяемая как емкость МОП структуры в состоянии обогащения, $C(t)$ — значения неравновесной емкости структуры в процессе ее

[¶] E-mail: pavelphys@mail.ru

релаксации во времени t , C_f — емкость структуры после прекращения процесса релаксации, n_i — собственная концентрация носителей заряда в Si, N_a — концентрация легирующей примеси, S_g — скорость поверхностной генерации на границе раздела Si–SiO₂, τ_g — генерационное время жизни в прилегающей к границе раздела области Si, ε — диэлектрическая проницаемость, ε_0 — электрическая постоянная.

Выражение (1) есть уравнение прямой в координатах $[C_f/C(t) - 1]$ и $(d/dt)[C_0/C(t)]^2$, причем угол ее наклона определяется величиной τ_g , а величина отрезка, отсекаемого прямой на оси $(d/dt)[C_0/C(t)]^2$ — значением S_g . Таким образом, измерение процесса релаксации неравновесной емкости и последующая обработка полученных зависимостей по формуле (1) позволяют определить генерационные параметры как на границе раздела Si–SiO₂, так и в прилегающей к ней области Si.

На рис. 1 представлены релаксационные кривые емкости $C(t)$ одной из исследуемых МОП структур, полученных до γ -облучения, а также после воздействия на нее γ -облучения и УЗ обработки. На рис. 2 представлены те же зависимости, обработанные согласно [9,14] и построенные в координатах $(d/dt)[C_0/C(t)]^2$ и $[C_f/C(t) - 1]$. Из приведенных зависимостей видно, что как γ -облучение, так и последующая УЗ обработка облученных структур ведут к уменьшению времени процесса релаксации неравновесной емкости.

Увеличение скорости процесса релаксации после γ -облучения обусловлено как увеличением скорости поверхностной генерации, так и уменьшением генерационного времени жизни. Так, значения скорости поверхностной генерации и генерационного времени жизни, определенные из представленной на рис. 2 зависимости, составляли $S_g = (12 \pm 0.5)$ см/с, $\tau_g = (2 \pm 0.2) \cdot 10^{-6}$ с до облучения и $S_g = (31 \pm 1.5)$ см/с, $\tau_g = (3.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-7}$ с после γ -облучения. Этот результат свидетельствует об увеличении концентрации генерационных центров как на границе раздела Si–SiO₂, так и в прилегающей к ней области Si, что хорошо согласуется с имеющимися в литературе данными о влиянии облучения на генерационные характеристики МОП структур [3,4].

Напротив, как видно из рис. 2, уменьшение времени релаксации неравновесной емкости, наблюдаемое после УЗ обработки облученных структур, обусловлено в основном уменьшением значений τ_g , в то время как величина S_g остается практически неизменной (значения генерационного времени жизни и скорости поверхностной генерации после УЗ обработки, определенные из представленной на рис. 2 зависимости, составили $S_g = (30 \pm 1.5)$ см/с, $\tau_g = (2.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-7}$ с). Отметим, что, несмотря на значительный разброс значений S_g и τ_g , наблюдаемый в исследуемых МОП структурах после γ -облучения, во всех структурах последующая УЗ обработка приводила к значительному, в 1.5–2.5 раза, уменьшению значений τ_g и незначительным изменениям S_g . Так, в большинстве исследованных структур изменение значений S_g после УЗ обработки не превышало 10%, при

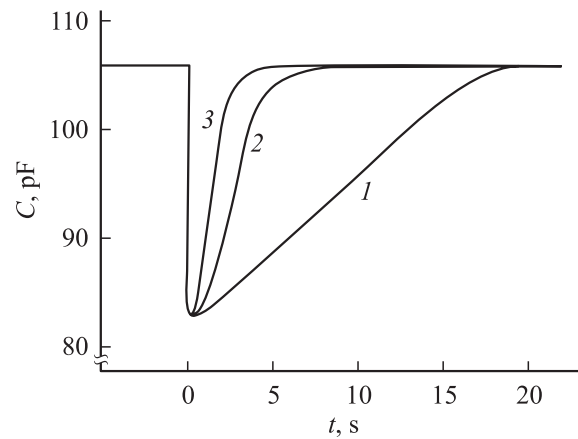


Рис. 1. Релаксационные зависимости неравновесной емкости МОП структуры: 1 — до γ -облучения, 2 — после γ -облучения, 3 — после γ -облучения и ультразвуковой обработки.

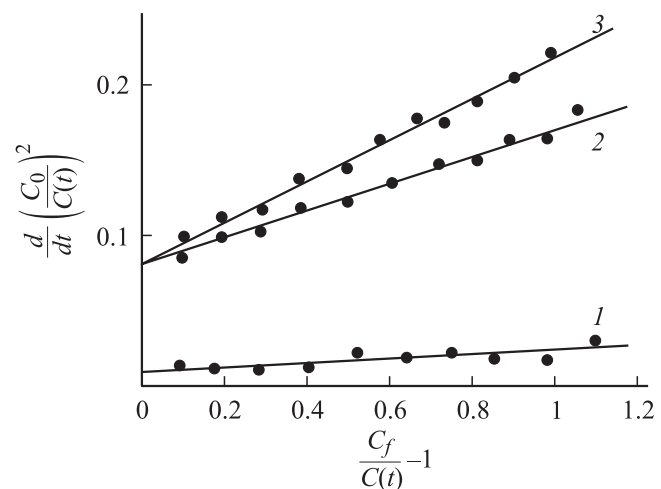


Рис. 2. Релаксационные зависимости неравновесной емкости МОП структуры в координатах $(d/dt)(C_0/C(t))^2$ и $(C_f/C(t) - 1)$: 1 — до γ -облучения, 2 — после γ -облучения, 3 — после γ -облучения и ультразвуковой обработки.

этом наблюдалось как уменьшение, так и увеличение скорости поверхностной генерации. Данные результаты свидетельствуют о том, что УЗ обработка облученных структур слабо влияет на концентрацию генерационных центров на границе раздела Si–SiO₂ и в то же время ведет к существенному увеличению их концентрации в прилегающей к границе раздела области Si.

Ранее было показано, что при воздействии УЗ обработки на необлученные границы раздела Si–SiO₂ происходит значительное уменьшение значений S_g (в 3–5 раз), в то время как величина τ_g увеличивается в среднем на 50% [10]. Таким образом, эффекты, наблюдаемые при УЗ воздействии на облученную и необлученную границы раздела Si–SiO₂, носят существенно различный характер. При этом используемые в [10] режимы УЗ обработки были аналогичны используемым в данной работе, а исследуемые структуры

были изготовлены в едином технологическом цикле со структурами, исследованными в настоящей работе. Исходя из вышесказанного можно заключить, что различие результатов, полученных при исследовании УЗ воздействия на облученные и необлученные структуры, не связано с особенностями исследованных образцов или различиями в режимах УЗ обработки, а обусловлено спецификой взаимодействия знакопеременных упругих напряжений, возникающих в процессе УЗ воздействия, на дефектную структуру границы раздела Si–SiO₂ в облученных и необлученных структурах.

Рассмотрим природу обнаруженных эффектов в рамках имеющихся представлений о влиянии УЗ обработки на дефектную структуру полупроводников. Известно, что граница раздела Si–SiO₂, образующаяся в результате термического окисления поверхности Si, характеризуется наличием полей внутренних напряжений [1]. Согласно [7] наличие таких напряжений является фактором, стимулирующим перестройку дефектной структуры полупроводника при УЗ воздействии. Поэтому эффекты, связанные с УЗ обработкой в необлученных структурах на границе раздела Si–SiO₂, должны быть выражены сильнее, чем в объеме Si, что согласуется с результатами, полученными в [10]. С другой стороны, процесс радиационного дефектообразования на границе раздела Si–SiO₂ приводит к релаксации имеющихся на ней внутренних механических напряжений. Поэтому при одинаковой мощности и интенсивности УЗ воздействия эффекты перестройки дефектной структуры границы раздела в облученных структурах должны протекать значительно менее интенсивно, чем в необлученных структурах. Этим объясняется слабое изменение значения S_g после УЗ воздействия на облученные структуры, наблюдаемое в данной работе.

Рассмотрим теперь возможную природу наблюдаемых изменений величины τ_g . Известно, что в области Si, прилегающей к границе раздела, наблюдаются скопления (ассоциации) примесных атомов и собственных дефектов полупроводника. В [7] показано, что УЗ воздействие приводит к распаду примесных ассоциаций. При этом отделившиеся от скоплений атомы примеси могут взаимодействовать с радиационными дефектами, возникшими при облучении исследуемых структур, и образовывать устойчивые электрически активные комплексы типа вакансии–атом примеси (А-центры, Е-центры и т.д.). Такие комплексы являются эффективными генерационными центрами [3], и их образование приводит к уменьшению значений τ_g в структурах, подвергнутых УЗ воздействию. Поскольку облучение ведет к значительному увеличению концентрации вакансий в приповерхностной области Si, вероятность образования вакансионно-примесных комплексов и, как следствие, уменьшение генерационного времени жизни в облученных структурах много больше, чем в необлученных.

Напротив, распад примесных ассоциатов в необлученных структурах не сопровождается образованием значительных концентраций вакансионно-примесных комплексов и может приводить к некоторому уменьшению

генерационной активности и (наблюдаемому в [10]) увеличению генерационного времени жизни.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что УЗ обработка структур, предварительно облученных γ -квантами, ведет к существенному уменьшению значений τ_g в области Si, прилегающей к границе раздела Si–SiO₂. Данный эффект свидетельствует об увеличении концентрации генерационных центров в этой области. Такими центрами могут являться вакансионно-примесные комплексы, образующиеся при взаимодействии атомов примеси, отделившихся от примесных ассоциатов в результате УЗ воздействия, с радиационными дефектами. В то же время УЗ обработка облученных структур слабо влияет на величину скорости поверхностной генерации. Это обусловлено тем, что процесс радиационного дефектообразования сопровождается релаксацией внутренних механических напряжений на границе раздела Si–SiO₂. Поэтому дефектная структура, образующаяся на границе раздела в результате облучения, обладает большей устойчивостью к воздействию УЗ обработки по сравнению с дефектной структурой необлученной границы раздела.

Список литературы

- [1] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в ИМС* (М., Энергоатомиздат, 1988).
- [2] Ю.С. Чистов, В.Ф. Сынов. *Физика МДП-структур* (Воронеж, Изд-во ВГУ, 1986).
- [3] В.Я. Киблик, Р.О. Литвинов, В.Г. Литовченко, Н.М. Литвиненко. Укр. физ. журн., **22**, 1097 (1977).
- [4] С.З. Зайнабидинов, Ш.Х. Йулчиев, П.Б. Парчинский. Узб. физ. журн., **3**, 201 (2001).
- [5] П.Б. Парчинский, С.И. Власов, Р.А. Муминов, Х.Х. Исмаилов, У.Т. Тургунов. Письма ЖТФ, **26** (10), 40 (2000).
- [6] И.В. Островский, Л.П. Стебленко, А.Б. Надточий. ФТП, **34**, 257 (2000).
- [7] Е.Ю. Брайловский, А.П. Здебский, В.Л. Корчная, Г.Н. Семенова, М.Я. Скороход, Ю.А. Тихорин, Л.С. Хазан, М.К. Шейкман. Письма ЖТФ, **13**, 1310 (1987).
- [8] И.В. Островский, Л.П. Стебленко, А.Б. Надточий. ФТТ, **42** (3), 478 (2000).
- [9] J.S. Kang, D.K. Schroder. Phys. Status Solidi A, **89**, 13 (1985).
- [10] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках* (Л., Наука, 1981).
- [11] В.Г. Литовченко, А.П. Горбань. *Основы физики микроэлектронных систем металл–диэлектрик–полупроводник* (Киев, Наук. думка, 1978).
- [12] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1.
- [13] П.Б. Парчинский, С.И. Власов, Л.Г. Лигай, О.Ю. Щукина. Письма ЖТФ, **29** (9), 83 (2003).
- [14] M. Zerbst. Z. Angew. Phys., **22**, 3039 (1966).

Редактор Л.В. Шаронова

Effect of ultrasonic treatment on the generation parameters of irradiated silicon–silicon dioxide interface

P.B. Parchinskiy, S.I. Vlasov, L.G. Leegy

National University of Uzbekistan,
700174 Tashkent, Uzbekistan

Abstract Effect of ultrasonic treatment on the generation parameters of γ -irradiated Si–SiO₂ interface has been studied by the pulsed metal–insulator–semiconductor capacitance method. The increase of generation lifetime in the space charge region of Si was observed. It was shown, that generation parameters modification of irradiated and non-irradiated Si–SiO₂ interface under ultrasonic treatment is significantly different.