

ВЛИЯНИЕ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ СТРУКТУР $\text{SiO}_2\text{—Si}$

Болдырев С. Н., Виленкин А. Я., Мордкович В. Н.,
Омельяновская Н. М., Саакян А. А.

Методом DLTS исследованы профили дефектов вакансионной природы у поверхности кремния, покрытого окисной пленкой, после облучения структур пучком электронов с энергией 4 МэВ. Показано, что «затягивание» радиационных нарушений в глубь кристалла связано с воздействием упругих напряжений в системе Si—SiO_2 , в то время как силы электрического происхождения, которые индуцируются зарядом в окисле и на границе раздела Si—SiO_2 , могут приводить к появлению немонотонного распределения радиационных дефектов в пределах ОПЗ. Предложена модель вторичного дефектообразования. Проведен расчет эффективной силы, действующей на поток первичных точечных дефектов в кремнии, покрытом окисной пленкой различной толщины. Получена оценка значения скорости протекания квазихимической реакции образования дивакансии.

Процесс радиационного дефектообразования в структурах имеет свои особенности на границе раздела двух фаз. Известно, что эти особенности обусловлены влиянием силовых полей в таких структурах [1]. В [2–4] исследованы модельные ситуации, когда процесс дефектообразования протекает в условиях воздействия одного из силовых факторов (упругого либо электрического). При изучении радиационных эффектов в структуре $\text{SiO}_2\text{—Si}$ ситуация более сложная, так как силовое поле вблизи границы раздела двух фаз смешанной природы. Различие в коэффициентах термического расширения и структурных параметрах приводит к появлению в кристалле кремния упругих напряжений при выращивании на его поверхности окисной пленки. Одновременно встроенный в окисле электрический заряд создает вблизи границы раздела электрическое поле, которое проникает в объем кристалла на глубину экранирования.

Целью работы являлось изучение роли электрического и упругого силового фактора в формировании профиля устойчивых радиационных нарушений у поверхности окисленного кремния при электронном облучении.

Экспериментальные результаты

Исследованные структуры были подготовлены на кремнии *n*-типа проводимости с концентрацией мелкой примеси $N_P = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (фосфор). Концентрация кислорода в кристаллах составляла $N_O = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На лицевой поверхности пластин находился окисел, полученный путем высокотемпературного выращивания в атмосфере сухого кислорода, толщиной 0.15 и 0.37 мкм, который определял уровень упругих напряжений в кристалле и электрическое поле у поверхности в соответствии с фиксированным в окисле зарядом (заряд в окисле контролировался по $C\text{—}V$ -характеристикам). В качестве контрольных использовались пластины с естественным окислом, которые подвергались облучению в свободном состоянии и состоянии изгиба (выпуклая поверхность находилась со стороны падающего пучка электронов). Облучение проводилось электронами с энергией 4 МэВ при плотности тока 0.05 и 0.1 мкА/см², при этом были набраны дозы 10^{13} и 10^{15} см^{-2} соответственно. Экспериментальные профили дефектов на

облученных при комнатной температуре образцах получены методом DLTS [5]. Восстановление профиля дефектов по результатам измерений емкости переарядки глубоких уровней осуществлялось по методике, описанной в [6].

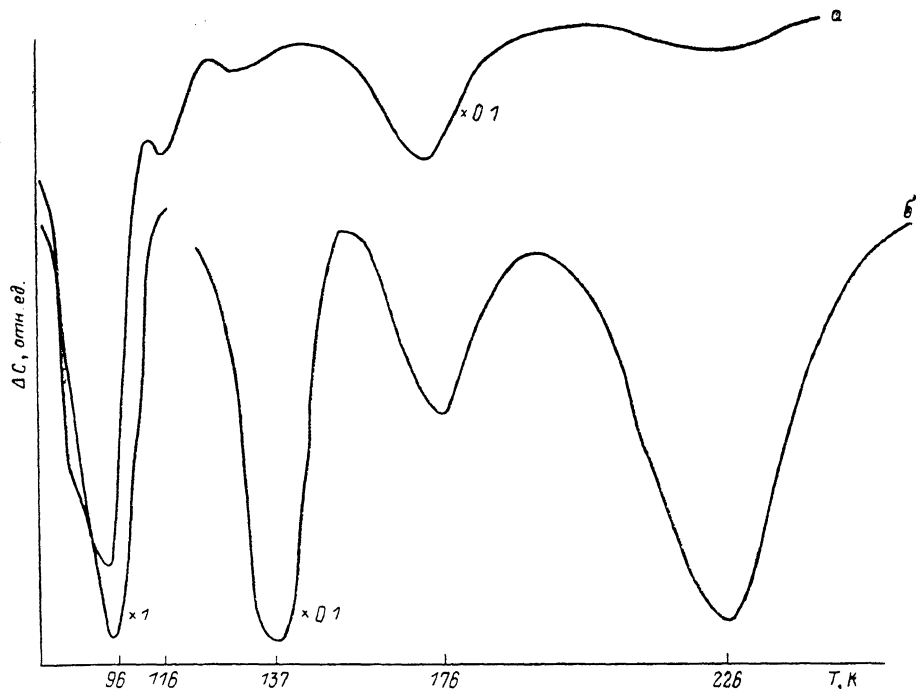


Рис. 1. Спектр DLTS, полученный на кремнии с пленкой окисла, после облучения электронами с энергией 4 МэВ.

Доза облучения, см⁻²: а — 10¹³, б — 10¹⁶.

Характерный спектр DLTS для исходного кремния с пленкой окисла после облучения электронами показан на рис. 1. К числу идентифицированных нами на основе литературных данных [7, 8] дефектов можно отнести А-центр (0.18 ± 0.01 эВ), Е-центр (0.44 ± 0.01 эВ) и дивакансию V₂ (0.23 ± 0.01 эВ). Существует предположение, что уровень, обозначенный индексом II (0.27 ± 0.01 эВ) принадлежит комплексу V₃ — 0. Уровень III (0.36 ± 0.01 эВ) не идентифицирован. На рис. 2 приведены профили распределения вблизи поверхности

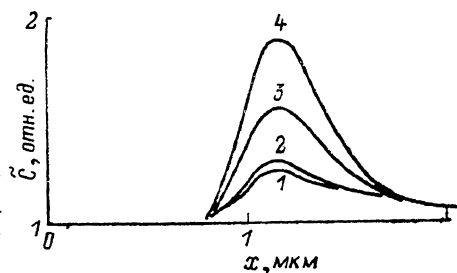


Рис. 2. Профили дефектов у поверхности кремния с пленкой естественного окисла после облучения электронами.

Центры: 1 — А, 2 — Е, 3 — дивакансия, 4 — II.

А-, Е-центров дивакансии и II-центра для гнutoго образца (доза 10¹³ см⁻²). На рис. 3 приведены профили А-центра для различных образцов.

Обращают на себя внимание немонотонный характер распределения радиационных повреждений вакансионной природы по глубине для дозы 10¹³ см⁻² и его зависимость от толщины окисла на поверхности пластин, подвергнутых облучению.

Обсуждение

В основе модели, использованной нами для объяснения наблюдаемых экспериментально закономерностей, лежат следующие положения. 1) Процесс образования устойчивых вторичных радиационных повреждений есть результат

взаимодействия первичных вакансий V и J межузельных атомов с различными стоками в объеме и у поверхности кристалла. При этом сама поверхность (граница раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$) предполагается бесконечным стоком для V и J . 2) Генерация первичных V и J однородна по объему кристалла (пробег электронов первичного пучка существенно превышает толщину образцов). 3) Объемными стоками для V являются атомы кислорода и ионы фосфора. Учитывается также реакция образования дивакансии. 4) Предполагается, что для выбранных условий облучения вероятность взаимной аннигиляции V и J мала. 5) Предполагается, что межузельные атомы вследствие высокой подвижности уходят к поверхности и там исчезают. 6) Объемные стоки для V ненасыщающиеся, а распре-

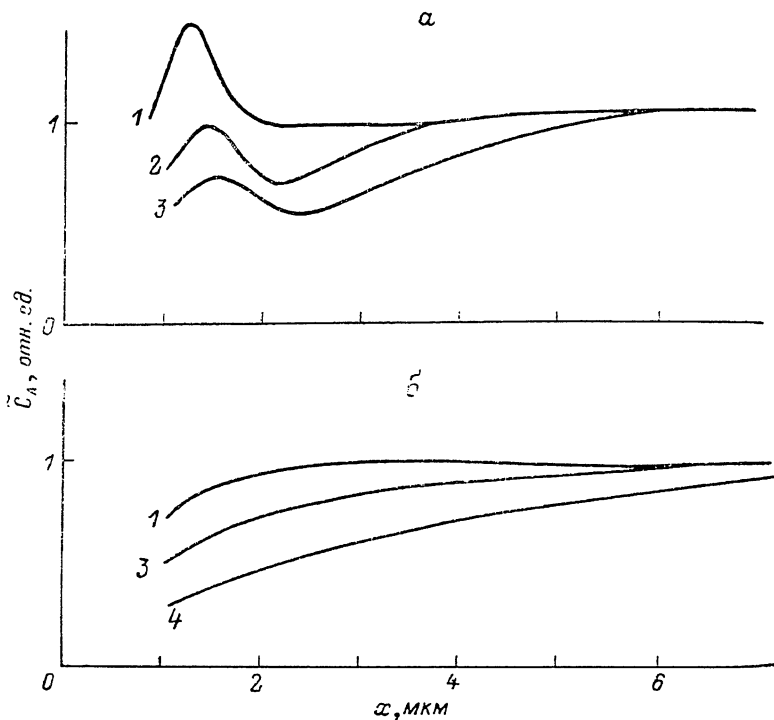


Рис. 3. Профиль А-центра у поверхности кремния, облученного электронами.

Доза, см^{-2} : а — 10^{18} , б — 10^{15} . 1 — кремний с пленкой естественного окисла в свободном состоянии; толщина окисла, мкм: 2 — 0.15, 3 — 0.37; 4 — кремний с пленкой естественного окисла в изогнутом состоянии.

деление V квазистационарно [9]. 7) Образование устойчивых радиационных повреждений с участием V (А- и Е-центры, V_2) рассматривается в рамках квазикимического подхода и описывается уравнениями

$${}^1_2 C_A = K_1 C_V N_O t, \quad C_E = K_2 C_V N_P t, \quad C_{V_2} = K_3 C_V^2 t. \quad (1)$$

8) Миграция первичных вакансий происходит в поле обобщенной силы F с подвижностью μ .

В уравнениях (1) $K_1, K_2, K_3, C_A, C_E, C_{V_2}$ — константы скоростей квазикимических реакций образования А- и Е-центров и дивакансии и их концентрации, C_V — квазистационарная концентрация вакансий, t — время облучения.

Из (1) видно, что профили А- и Е-центров с точностью до множителя повторяют профиль V при N_O и N_P , не зависящих от координаты. Дивакансия и многовакансионные комплексы должны иметь более сильную по сравнению с А- и Е-центрами зависимость от координаты x в соответствии с порядком реакции. Это утверждение иллюстрируют кривые на рис. 2. В частности, более сильная немонотонность и совпадение характеристических точек перегиба профиля II-центра по сравнению с профилем дивакансий дают косвенное подтверждение предположения о том, что II-центр — вакансионный комплекс высшего (по отношению к V_2) порядка.

Из (1) следует, что $K_1/K_2 = (C_A/C_E)(N_P/N_O)$. Подстановка экспериментально определенных значений концентраций дает для указанного отношения скоростей квазихимических реакций величину $\sim 5 \cdot 10^{-3}$, которая хорошо совпадает со значением, приводимым в [10]. Это отношение не зависит от x , что позволяет сделать вывод о его независимости от силовых полей, по крайней мере в выбранном интервале их изменения.

Используя (1), можно получить выражение

$$K_3 = K_1 K_2 N_O N_P t C_{V_2} / C_A C_E,$$

которое позволяет оценить порядок K_3 с помощью имеющихся сведений об абсолютных величинах K_1 и K_2 [11]. Найденная величина составила $\sim 10^{-8}$ см³/с.

Как отмечалось, распределение C_A и C_E , согласно (1), подобно распределению C_V , которое в квазистационарном приближении представляет собой результат решения уравнения вида

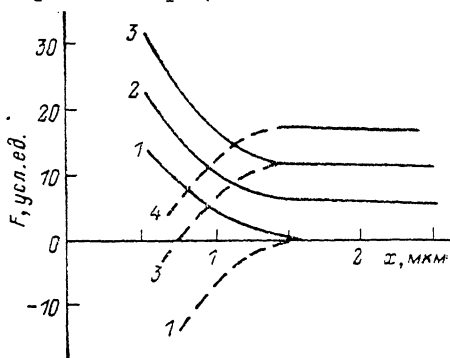
$$\partial/\partial x (D \partial C_V / \partial x - \mu F C_V) - \partial C_A / \partial t - \partial C_E / \partial t - \partial C_{V_2} / \partial t + G = 0, \quad (2)$$

где D — коэффициент диффузии; V , G — скорости генерации V и J .

Переходя к безразмерным концентрациям и длине, можно с учетом (1) записать (2) в виде

$$\partial/\partial x (\partial \bar{C}_V / \partial \bar{x} - F \gamma \bar{C}_V) - \bar{C}_V + 1 = 0. \quad (3)$$

Рис. 4. Профиль эффективной силы, действующей на вакансию.



Дова, см⁻²: сплошные — 10^{13} , штриховые — 10^{15} . 1 — кремний с пленкой естественного окисла в свободном состоянии; толщина окисла, мкм: 2 — 0.15, 3 — 0.37; 4 — кремний с пленкой естественного окисла в изогнутом состоянии.

G/α — единица измерения концентрации, $\sqrt{D/\alpha}$ — единица измерения длины, $\alpha = K_1 N_O + K_2 N_P$, $\gamma = (1/kT) \sqrt{D/\alpha}$, k — постоянная Больцмана, T — температура кристалла.

Из (3) можно получить выражение для силы

$$F = (1/\gamma) \left(\partial \bar{C}_V / \partial \bar{x} - \int_0^{\bar{x}} \bar{C}_V d\bar{x} + \bar{x} \right) \bar{C}_V,$$

используя которое легко по профилю \bar{C}_V либо подобному ему профилю \bar{C}_A или \bar{C}_E восстановить профиль силового поля у поверхности.

На рис. 4 показан результат такого восстановления распределения силы по профилям A -центров, представленным на рис. 3. Видно, что имеет место наложение двух силовых факторов. Исходя из физической природы изучаемой структуры, разумно предположить, что постоянная составляющая силы — результат упругого прогиба пластины под действием окисла либо внешней силы. Короткодействующая составляющая силы у поверхности электрического происхождения, о чем свидетельствует расстояние, на котором она имеет значительную величину (несколько дебаевских длин). Направление силы электрического происхождения на дозах 10^{13} и 10^{15} см⁻² различно. Нами предложено следующее объяснение этого факта.

Исходные окислы на исследованных нами структурах имели изначально небольшой встроенный положительный заряд, соответствующий плотности поверхностных состояний $\sim 5 \cdot 10^{10}$ см⁻². Имеются данные, свидетельствующие о том, что поток достаточно высокоэнергетичных электронов приводит к появлению в пленке окисла на поверхности кремния наведенного электрического заряда противоположного по отношению к исходному знака, который стекает по окончании процесса облучения [12]. Вместе с тем известно, что по мере на-

бора дозы растет плотность поверхностных состояний, которые захватывают на себя положительный заряд [13]. Таким образом, можно предположить, что при дозе 10^{13} см⁻² динамический наведенный в окисле заряд (отрицательный) определяет электрическое поле у поверхности кремния, в то время как для дозы 10^{15} см⁻² накапливающийся положительный заряд превосходит по величине наведенный отрицательный.

Появление экстремума на профиле вакансионных центров для дозы 10^{13} см⁻² связано с частичным «выметанием» заряженных вакансий, генерируемых в области пространственного заряда, полем электрических сил. Учитывая знак заряда, наведенного в окисле, можно сделать вывод о том, что первичные вакансии, рождающиеся при облучении, заряжены отрицательно. Спад концентрации к поверхности определяется сильной поглощающей способностью границы раздела Si—SiO₂. Увеличение толщины окисла ведет к росту градиента нормальных упругих напряжений и упругой силы, действующей на вакансии. Это приводит к «затягиванию» профиля дефектов вакансионной природы в глубь кристалла по направлению действия силы.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Выявлены закономерности изменения профиля радиационных дефектов вакансионной природы в присутствии поля упругих сил у поверхности кремния, покрытого пленкой SiO₂, при электронном облучении.
2. Обнаружена немонотонность профиля устойчивых радиационных нарушений с участием вакансий вблизи поверхности окисленного кремния при электронном облучении (доза 10^{13} см⁻²), которая объяснена в рамках предложенной модели влиянием сил электрического происхождения.
3. В рамках квазихимического рассмотрения процесса вторичного дефектообразования и диффузионно-дрейфового описания потоков первичных вакансий предложена процедура восстановления профиля силовых полей по экспериментально найденному распределению А- либо Е-центра.
4. Получено косвенное подтверждение предположения о том, что центр с глубиной залегания 0.27 эВ представляет собой комплекс, содержащий более двух вакансий.
5. Получена оценка значения константы скорости квазихимической реакции образования дивакансии.

Список литературы

- [1] Герасименко Н. Н., Мордкович В. Н. // Поверхность. 1987. № 6. С. 5.
- [2] Болотов В. В., Карпов А. В., Стучинский В. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 49—55.
- [3] Бобрикова О. В., Стась В. Ф. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 143—145.
- [4] Саралидзе З. К. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 1. С. 239—240.
- [5] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 176 с.
- [6] Kimiyoshi Yamasaki, Minoru Yoshida, Takuo Sagano // Japan. J. Appl. Phys. 1979. V. 18. N 1. P. 113—122.
- [7] Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. М., 1988. С. 120.
- [8] Тахмазиди Г. А. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 4. С. 608—610.
- [9] Морозов Н. П., Скупов В. Д., Тетельбаум Д. И. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 3. С. 464—468.
- [10] Винецкий В. Л., Холодарь Г. А. Радиационная физика полупроводников. Киев, 1979. 336 с.
- [11] Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1977. 255 с.
- [12] Болдырев С. Н. // Матер. X Всес. симп. по растровой электронной микроскопии. Запорожье, 1989. С. 64.
- [13] Мордкович В. Н. // Электрон. техн. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1974. В. 8. С. 63.

Институт
проблем технологии микроэлектроники
и особочистых материалов АН СССР
Черноголовка

Получена 14.08.1989
Принята к печати 6.10.1989