

УДК 621.315.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ SiO₂

© 2021 г. Ю. О. Куланчиков^{a, b, *}, П. С. Вергелес^a, Е. Б. Якимов^a

^aИнститут проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук, Черноголовка, Московская область, 142432 Россия

^bНациональный исследовательский технологический университет “МИСИС”, Москва, 119049 Россия

*e-mail: kul_ura@mail.ru

Поступила в редакцию 30.12.2020 г.

После доработки 22.02.2021 г.

Принята к публикации 28.02.2021 г.

Методом измерения вольт-фарадных (C–V) характеристик исследовано влияние облучения электронным пучком на свойства структур металл–диэлектрик–полупроводник Al/SiO₂/n-Si. Обнаружено, что эффекты зарядки и образование новых центров на границе раздела SiO₂–Si в структурах на основе n-Si проявляются при значительно больших дозах облучения, чем в случае p-Si. Выявлено понижение эффективной концентрации доноров в результате облучения, которое объясняется пассивацией фосфора водородом. Отжиг в течение 10 мин при температуре 100°C приводил к восстановлению эффективной концентрации доноров, а после отжига при 250°C наблюдалось полное восстановление C–V-кривых до исходного состояния.

Ключевые слова: SiO₂, МДП-структура, C–V-характеристики, электронный пучок, облучение, объемный заряд, водород.

DOI: 10.31857/S1028096021100113

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение изолирующих и диэлектрических материалов в современной полупроводниковой технологии порождает интерес к исследованию процессов накопления электрического заряда и его релаксации в этих материалах при их облучении различными типами ионизирующего излучения (гамма и рентгеновские, нейтронные и другие пучки) [1, 2]. Исследования процессов накопления заряда в диэлектриках необходимы также для повышения радиационной стойкости полупроводниковых приборов, разработки изоляционных материалов для защиты спутников и космических аппаратов и т.д. Кроме того, понимание кинетики накопления электрического заряда играет важную роль для коррекции влияния эффектов зарядки при количественной характеристики изолирующих материалов методами растровой электронной микроскопии (РЭМ). В последнем случае основное влияние оказывает поверхностный потенциал, формирующийся в результате зарядки, и значительная часть работ была посвящена исследованию этого потенциала [3, 4]. Было показано [3], что он может достигать значений в несколько килоэлектронвольт, при этом, как следует из работы [4], формирование

поверхностного потенциала не может быть объяснено без учета распределения в диэлектрическом слое неравновесных электрон-дырочных пар, рождаемых падающим пучком. В другой группе работ проводились исследования фиксированного заряда в оксидном слое и ловушек на границе раздела диэлектрик/полупроводник, формирующихся в тонком слое диэлектрической пленки при облучении ионизирующими пучками [1, 2, 5, 6].

Однако, несмотря на многочисленные исследования, динамика зарядки диэлектриков при облучении электронным пучком до сих пор не до конца понятна. В частности, формирование новых состояний на границе раздела SiO₂/Si объяснялось в работах [1, 2] переносом рожденных при облучении дырок к границе раздела с последующим преобразованием захваченных дырок в ловушки на границе раздела. В [5] было показано, что формирование ловушек может происходить и с участием электронов. В ряде других работ (например, [7]) формирование ловушек на границе раздела объясняли реакциями с участием водорода. В случае исследования влияния облучения ионизирующего излучения на свойства металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) структур на

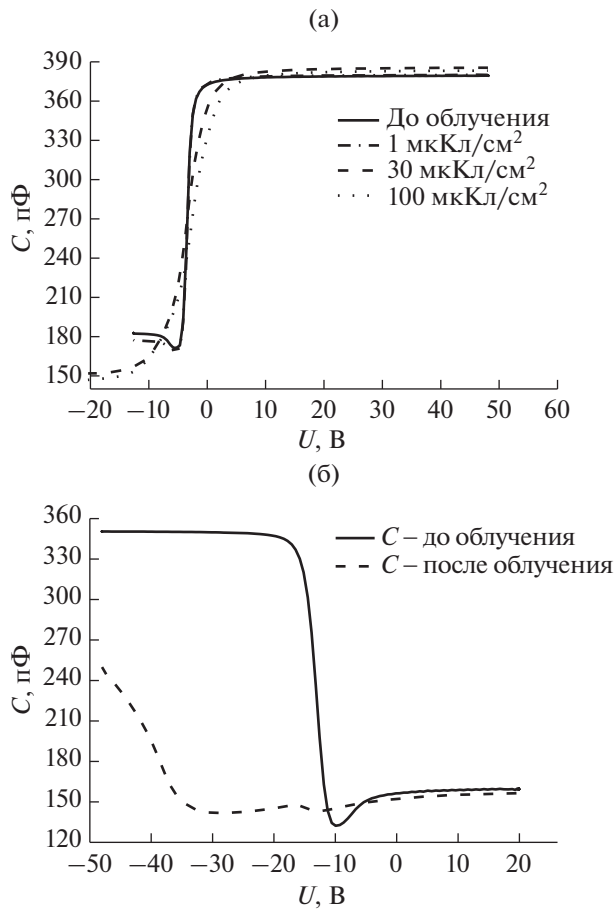


Рис. 1. C - V -характеристики исследуемых структур до и после облучения: а – подложка Si n -типа, б – подложка Si p -типа (доза облучения 2.5 мкКл/см²). Энергия падающего пучка 10 кэВ.

основе SiO₂/Si подавляющее число работ было выполнено на образцах с подложкой p -типа и лишь малая часть – на структурах с кремниевой подложкой n -типа проводимости. В то же время электрическое поле в пленке SiO₂ может зависеть от типа проводимости подложки. Поэтому представляло интерес сравнить влияние облучения ионизирующего облучения на накопление заряда в оксидном слое на подложках n - и p -типа проводимости при воздействии ионизирующего облучения.

В данной работе мы представляем результаты исследования накопления заряда в слое SiO₂ при облучении низкоэнергетическим электронным пучком и релаксации этого заряда методом измерения вольт-фарадных профилей (C - V -характеристики), для структур на подложках Si n -типа. Для сравнения часть измерений проводилась на МДП-структурах на подложках с проводимостью p -типа.

МЕТОДИКА И ОБРАЗЦЫ

В исследовании использовались образцы на подложке Si n -типа с толщиной слоя SiO₂ порядка 300 нм, легированные фосфором до концентрации 4.6×10^{14} см⁻³. Для сравнения часть измерений проводилась на структурах с подложкой Si p -типа проводимости, легированной бором до концентрации 3×10^{14} см⁻³, и толщиной диэлектрического слоя SiO₂ 200 нм. Оксидный слой получали термическим окислением кремния. Облучение проводилось в растровом электронном микроскопе JSM-840A в телевизионном режиме сквозь напыленные площадки металлизации при значении энергии первичных электронов 10 кэВ и максимальном токе пучка 3×10^{-9} А. Во всех экспериментах металлический контакт был заземлен либо на него подавалось напряжение. Доза облучения составляла от 6.25×10^{-2} до 100 мкКл/см². Как было показано в [5], при используемой энергии падающего пучка первичные электроны достигают кремниевой подложки. Изучение релаксации эффектов облучения при термическом отжиге проводилось в интервале температур 395–483 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вольт-фарадные (C - V) характеристики структуры на n -Si, облученной электронами, представлены на рис. 1а. Для сравнения аналогичные характеристики на p -Si представлены на рис. 1б. Видно, что на n -Si даже при дозе 100 мкКл/см² объемный заряд в оксиде, который проявляется в сдвиге C - V -характеристики по оси напряжений, небольшой, и основной эффект облучения заключается в изменении наклона характеристик и уменьшении емкости при отрицательном смещении в режиме инверсии. Изменение наклона характеристики свидетельствует об образовании новых состояний на границе раздела полупроводник/диэлектрик, а уменьшение емкости в режиме инверсии свидетельствует об увеличении ширины области объемного заряда в кремнии, т.е. о понижении эффективной концентрации доноров. Чувствительность структур на p -Si к облучению электронами была существенно выше (рис. 1б), что хорошо согласуется с результатами, полученными ранее в работах [5, 6, 8]. Заметный сдвиг характеристики в сторону отрицательных напряжений и изменение ее наклона на p -Si наблюдалось уже при дозах облучения, меньших 1 мкКл/см². Кроме того, на структурах на p -Si даже облучение с дозой порядка 100 мкКл/см² не приводило к заметному изменению емкости в режиме инверсии, т.е. уменьшения эффективной концентрации акцепторов не наблюдалось.

В работе [5] было показано, что приложенное к исследуемой структуре во время ее облучения

напряжение может существенным образом влиять на эффекты накопления заряда как в объеме оксидного слоя, так и на интерфейсе SiO_2/Si . Поэтому представляло интерес сравнить влияние напряжения, приложенного во время облучения, на эффект накопления заряда в структурах с подложкой n -типа проводимости. На рис. 2 представлены $C-V$ -характеристики, демонстрирующие влияние приложенного напряжения в процессе облучения для структур n - и p -типа проводимости. Прежде всего, следует отметить, что качественно влияние приложенного напряжения в обоих типах структур подобно. При приложении отрицательного напряжения к металлическому электроду кривые немного смещаются в сторону отрицательных напряжений, а при положительном напряжении они также смещаются в сторону отрицательных напряжений. Следует отметить, что, если на структуре n -Si приложенное положительное напряжение в основном изменяло наклон $C-V$ -кривых, т.е. увеличивало плотность состояний на границе раздела, на структуре p -Si такое напряжение приводило к существенному сдвигу $C-V$ -кривых в сторону отрицательных напряжений, т.е. к увеличению положительного заряда в оксиде. Повышение эффективности процесса генерации ловушек на границе раздела SiO_2/n -Si можно объяснить инжекцией горячих электронов из подложки n -типа [9, 10]. Действительно, поскольку, согласно [11], пленка SiO_2 при облучении становится проводящей, доля напряжения, приложенная к полупроводнику, увеличивается. А деградация полевых транзисторов наблюдалась уже при приложенных к затвору напряжениях порядка нескольких вольт [9, 10]. Генерация неравновесных носителей заряда электронным пучком и их последующая диффузия, и дрейф приводят к тому, что распределение электрических полей в SiO_2 может отличаться от сформировавшегося после окончания облучения, что существенно усложняет анализ результатов, особенно результатов с приложенным внешним полем.

Для исследования стабильности изменения свойств структур в результате облучения низкоэнергетичным электронным пучком, была исследована релаксация $C-V$ -кривых при термическом отжиге. $C-V$ -кривые измерялись после 10 мин изохронного отжига структур, облученных электронами с энергией 10 кэВ дозой 90 мкКл/см². Как и в случае МДП-структур с подложкой p -типа [5], при температуре 250°C происходило полное восстановление $C-V$ -кривых до исходного состояния, и соответственно происходили как релаксация накопленного объемного заряда, так и отжиг или пассивация образованных при облучении состояний на границе раздела (рис. 3). Похожее температуры отжига наблюдались и в других работах [12, 13]. В то же время для восстановления

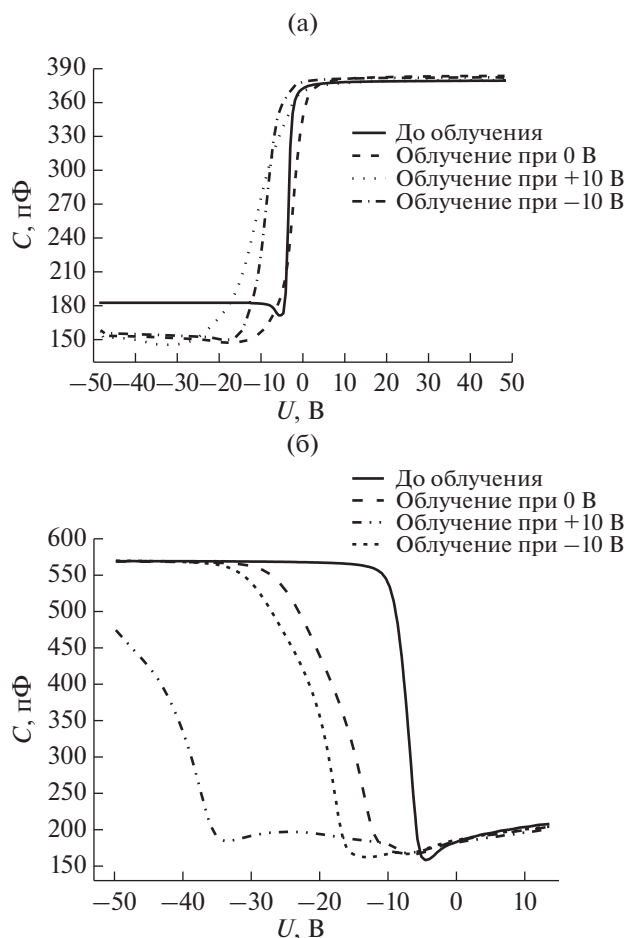


Рис. 2. Изменение $C-V$ -характеристик исследуемой структуры при облучении с напряжением смещения +10, 0, -10 В. а – подложка Si n -типа (доза облучения 100 мкКл/см²); б – подложка Si p -типа (доза облучения 6.25×10^{-2} мкКл/см²). Энергия падающего пучка $E_b = 10$ кэВ.

емкости в режиме инверсии достаточно было отжиги при 100°C.

Уменьшение эффективной концентрации доноров (фосфора) в кремнии при облучении электронным пучком можно было бы объяснить его пассивацией водородом. Водород может генерироваться как за счет стимулированной горячими электронами депассивации дефектов на интерфейсе SiO_2/Si [14], так и стимулированной электронным пучком диссоциации молекул водорода или воды на границе раздела металл- SiO_2 [15, 16]. Атомарный водород легко диффундирует в SiO_2 [14] и в кремнии [17], поэтому он вполне может достичь границы раздела SiO_2/Si даже при его образовании на поверхности SiO_2 . Температуры диссоциации пар фосфор-водород также близки к температуре восстановления эффективной концентрации доноров в настоящей работе [18]. Воз-

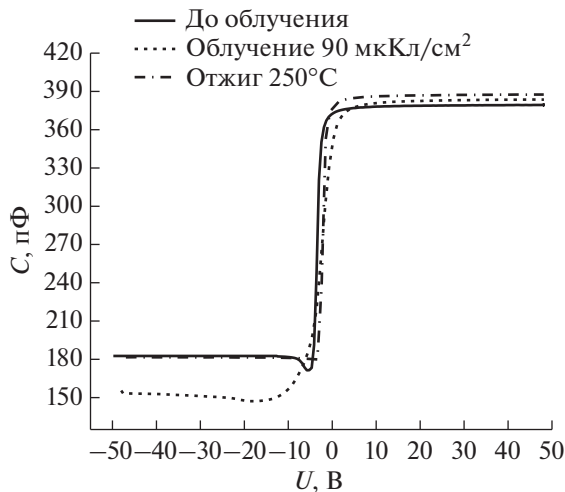


Рис. 3. С–V-характеристики до облучения, после облучения и после отжига.

никает вопрос, почему в наших экспериментах наблюдалась только пассивация водородом фосфора, хотя известно, что водород более эффективно взаимодействует с бором [19]. Одно из объяснений может быть связано с тем, что, как видно на рис. 1б, в структуре $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ в Si образуется инверсный слой, и при облучении концентрация электронов в этом слое возрастает. Поэтому при проникновении водорода в кремний он может заряжаться отрицательно, и тогда электрическое поле будет препятствовать его проникновению вглубь подложки и пассивации бора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние облучения электронным пучком с энергией 10 кэВ на вольт-фарадные характеристики МДП-структур $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$. Показано, что для появления заметного объемного заряда и образования новых центров на границе раздела SiO_2/Si доза облучения должна превышать несколько десятков мкКл/см^2 , в то время как в структурах на основе $p\text{-Si}$ влияние облучения заметно уже при дозах порядка 10^{-2} мкКл/см^2 . Выявлено понижение эффективной концентрации доноров в результате облучения, которое может свидетельствовать о пассивации фосфора водородом, освободившимся в результате облучения. Отжиг в течение 10 мин при температуре 100°C приводил к восстановлению эффективной концентрации доноров, а после отжига при 250°C наблюдалось полное восстановление С–V-кривых до исходного состояния.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа финансировалась в рамках Государственного задания № 075-00355-21-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oldham T.R., McLean F.B. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003, V. 50. № 3. P. 483. <https://doi.org/10.1109/tns.2003.812927>
2. Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M., Felix J.A., Dodd P.E., Paillet P., Ferlet-Cavrois V. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55 № 4. P. 1833. <https://doi.org/10.1109/tns.2008.2001040>
3. Rau E.I., Fakhfakh S., Andrianov M.V., Evstafeva E.N., Jbara O., Rondot S., Mouze D. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B. 2008. V. 266. P. 719. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.12.093>
4. Pay Э.И., Евстафьева Е.Н., Андрианов М.В. // ФТТ. 2008. Т. 50. № 4. С. 599.
5. Vergeles P.S., Kulanchikov Yu.O., Yakimov E.B. // J. Electron. Mater. 2020. V. 49. № 9. P. 5178. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08080-3>
6. Куланчиков Ю.О., Вергелес П.С., Якимов Е.Б. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22. № 2. С. 112. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-2-111-116>
7. Brown D.B., Saks N.S. // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. P. 3734. <https://doi.org/10.1063/1.349226>
8. Sedlovets D.M., Knyazev M.A., Trofimov O.V., Koveshnikov S.V. // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2020. V. 28. P. 309. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2019.1708731>
9. Vuillaume D., Bravaix A., Goguenheim D. // Microel. Reliab. 1998. V. 38. P. 7. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(97\)00179-0](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(97)00179-0)
10. Cho M., Roussel P., Kaczer B., Degraeve R., Franco J., Aoulaiche M., Chiarella T., Kauerauf T., Horiguchi N., Groeseneken G. // IEEE Trans. Electron Dev. 2013. V. 60. P. 4002. <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2285245>
11. Борисов С.С., Вергелес П.С., Якимов Е.Б. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. Т. 9. С. 62.
12. Lelis A.J., Oldham T.R., Boesch H.E. Jr, McLean F.B. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1989. V. 36. P. 1808. <https://doi.org/10.1109/23.45373>
13. Zhang J., Pintilie I., Fretwurst E., Klanner R., Perrey H., Schwandt J. // J. Synchrotron Rad. 2012. V. 19. P. 340. <https://doi.org/10.1107/S0909049512002348>
14. Tuttle B.R., McMahon W., Hess K. // Superlattices and Microstructures. 2000. V. 27. № 2/3. P. 229. <https://doi.org/10.1006/spmi.1999.0804>
15. Феклисова О.В., Якимов Е.Б., Ярыкин Н.А. // ФТП. 1994. Т. 28. С. 2179.
16. Feklisova O.V., Yakimov E.B., Yarykin N.A. // Mater. Science & Engineering B. 1996. V. 42. P. 274. [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(96\)01953-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(96)01953-8)
17. Феклисова О.В., Якимов Е.Б., Ярыкин Н.А. // ФТП. 2002. Т. 36. № 3. С. 301.
18. Fukata N., Sasaki S., Fujimura S., Haneda H., Murakami K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1996. V. 35. P. 3937. <https://doi.org/10.1143/JJAP.35.3937>
19. Weber J., Knack S., Feklisova O.V., Yarykin N.A., Yakimov E.B. // Microelectronic Engineering. 2003. V. 66. P. 320. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(02\)00926-7](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(02)00926-7)

Investigation of the Low Energy Electron Beam Irradiation Effect on Capacitance–Voltage Characteristics of SiO₂

Yu. O. Kulanchikov^{1, 2, *}, P. S. Vergeles¹, E. B. Yakimov¹

¹*Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

²*National Research Technological University MISIS, Moscow, 119049 Russia*

**e-mail: kul_ura@mail.ru*

Electron beam irradiation effect on the properties of metal-insulator–semiconductor structures Al/SiO₂/*n*-Si have been studied by the measurements of capacitance–voltage (C–V) characteristics. It is observed that charging and a formation of new centers on the SiO₂/Si interface manifest themselves at much larger irradiation doses as compared with *p*-Si. A decrease of effective donor concentration due to irradiation is revealed, which is explained by hydrogen passivation of phosphorus. Annealing at 100°C for 10 min. leads to recovery of effective donor concentration while after annealing at 250°C a total recovery of C–V curves to their initial state is observed.

Keywords: SiO₂, MIS structure, C–V characteristics, electron beam, irradiation, bulk charge, hydrogen.