

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22, № 2. С. 112—117.
DOI: 10.17073/1609-3577-2019-2-112-117

УДК 621.315

Влияние облучения пучком низкоэнергетических электронов на вольт–фарадные характеристики структуры Al/SiO₂/Si

© 2019 г. Ю. О. Куланчиков, П. С. Вергелес[§], Е. Б. Якимов

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН,
ул. Акад. Осипьяна, д. 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия*

Аннотация. Явление зарядки диэлектрических мишеней под воздействием электронного облучения давно известно и его учет необходим при характеристике диэлектрических материалов и покрытий методами электронной микроскопии, в электронно–лучевой литографии, при разработке диэлектрических покрытий для космических аппаратов и во многих других областях науки и техники. Существенное влияние на кинетику зарядки оказывает пространственное распределение электронов и дырок, формирующееся при облучении. При выбранной энергии пучка глубина проникновения электронов меньше толщины диэлектрика, что позволяет выявить вклад переноса неравновесных носителей заряда в формирование ловушек на границе раздела SiO₂/Si. Установлено, что воздействие низкоэнергетического электронного пучка приводит к существенному изменению наклона C–V–характеристик, т. е. к образованию ловушек на границе раздела. Проведено исследование влияния приложенного к исследуемой структуре напряжения как до облучения электронным пучком, так и во время облучения. Установлено, что, напряжение обеих полярностей, приложенное к исследуемой МДП–структуре, до ее облучения низкоэнергетическим электронным пучком практически не влияет на C–V–характеристики исследуемой МДП–структуры. При этом положительное напряжение, приложенное к металлизации в процессе облучения низкоэнергетическим электронным пучком, оказывает существенное влияние на характер изменений C–V–кривых, а отрицательное практически не оказывает влияния на C–V–характеристики. Исследование стабильности изменений, вызванных облучением электронным пучком, показало, что C–V–кривые исследуемой структуры медленно восстанавливаются даже при комнатной температуре. При этом приложенное отрицательное напряжение замедляло процесс релаксации накопленного заряда.

Ключевые слова: оксид кремния, низкоэнергетический электронный пучок, МДП–структура, C–V–характеристики

Введение

Явление зарядки диэлектрических мишеней под воздействием электронного облучения давно известно и его учет необходим при характеристике диэлектрических материалов и покрытий методами электронной микроскопии, в электронно–лучевой литографии, при разработке диэлектрических по-

крытий для космических аппаратов и во многих других областях науки и техники. В подавляющем большинстве исследований измеряли значение потенциала заряженной поверхности, который в основном определяется балансом между зарядом проникающих в материал первичных электронов и зарядом излученных вторичных электронов [1–9]. Однако, как показано в работе [10], существенное влияние на кинетику зарядки оказывает пространственное распределение электронов и дырок, формирующееся при облучении. Это распределение определяет и влияние облучения на параметры структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП), поскольку заряд вблизи поверхности

Куланчиков Юрий Олегович — студент, лаборант, e-mail: Kul_ura@mail.ru; **Вергелес Павел Сергеевич**[§] — канд. физ.–мат. наук, научный сотрудник, e-mail: vergelesp@gmail.com; **Якимов Евгений Борисович** — доктор физ.–мат. наук, главный научный сотрудник (yakimov@iptm.ru)

[§] Автор для переписки

компенсируется зарядом на металлическом контакте.

Цель работы — исследование влияния облучения электронным пучком на характеристики структур Al/SiO₂/Si. Исследования проводили с использованием измерения вольт-фарадных (C—V) характеристик, которые чувствительны к заряду на интерфейсе SiO₂/Si и в объеме пленки SiO₂ вблизи интерфейса.

Образцы и методы исследования

В исследовании влияния облучения электронным пучком на характеристики МДП-структуры использовали образцы на подложке Si p-типа проводимости, легированной бором (концентрация примеси составляла 3 · 10¹⁴ см⁻³, толщина диэлектрического слоя SiO₂ — 200 нм). Оксидный слой получали термическим окислением кремния. Диаметр металлических площадок — 1,6 мм. Однако в результате многочисленных измерений с прижимным зондом реальная площадь контакта могла уменьшаться.

Вольт-фарадные характеристики снимали с помощью C—V-плоттера PAR Model 410 на частоте 1 МГц. Облучение электронным пучком проводили при ускоряющем напряжении 2,5 кВ, ток пучка не превышал 1 нА, дозы облучения составляли 10, 20, 25 и 30 мкКл/см². Облучение образцов проводили в электронном микроскопе Jeol-840А в телевизионном режиме сквозь напыленные площадки металлизации из Al. Во всех экспериментах образцы были заземлены, поэтому накопленный в SiO₂ заряд компенсировался зарядом на металлическом контакте. При таких условиях облучения падающие электроны не достигают границы раздела SiO₂/Si, так как глубина проникновения электронов непосредственно в оксидный слой не превышала 80 нм.

Исследовали также влияние приложенного в процессе облучения электронным пучком напряжения на накопление заряда. Параметры облучения были такие же, как и в предыдущих экспериментах, но на металлизацию подавалось положительное или отрицательное напряжение для перехода поверхности полупроводника на границе раздела SiO₂/Si в область обогащения или сильной инверсии соответственно. Подачу напряжения осуществляли с помощью источника постоянного тока Б5-49.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены характерные C—V-кривые до и после облучения. Сравнение с рассчитанной идеальной кривой показывает, что C—V-кривая необлученной структуры уже смещается в сторону отрицательных напряжений, однако, наклон кривой близок к идеальной. Это смещение начальной C—V-кривой можно объяснить суммированием эффектов

от двух компонент. Первая компонента — это наличие разности работ выхода из металла и диэлектрика порядка -1 В. Однако, так как смещение начальной C—V-кривой исследуемой структуры гораздо больше -1 В, то основной вклад в смещение должен объясняться второй компонентой — встроенным положительным зарядом в объеме диэлектрического слоя SiO₂. После облучения низкоэнергетическим электронным пучком наблюдается изменение наклона кривой, без существенного смещения всей кривой в область отрицательных напряжений. Изменение наклона C—V-характеристики обычно объясняется образованием ловушек на границе раздела Si/SiO₂ [11, 12]. Однако при используемых в данной работе параметрах электронного пучка, первичные электроны не должны достигать границы раздела SiO₂/Si. Следовательно, образование ловушек на границе раздела Si/SiO₂ можно объяснить только переносом носителей заряда в объеме оксидного слоя и/или обменом носителями заряда с кремниевой подложкой.

На следующем этапе были проведены исследования влияния дозы облучения на C—V-характеристики исследуемой структуры. Полученные результаты приведены на рис. 2. Меньшая максимальная емкость структуры в данном случае объясняется меньшим размером металлической площадки. Хорошо видно, что при увеличении дозы облучения C—V-кривая становится более полой. При этом в области инверсии сдвиг напряжения практически не зависит от облучения. Обычно объемный заряд в диэлектрической пленке определяется из смещения напряжения плоских зон по сравнению с рассчитанной идеальной кривой [13], а изменение наклона свидетельствует о формиро-

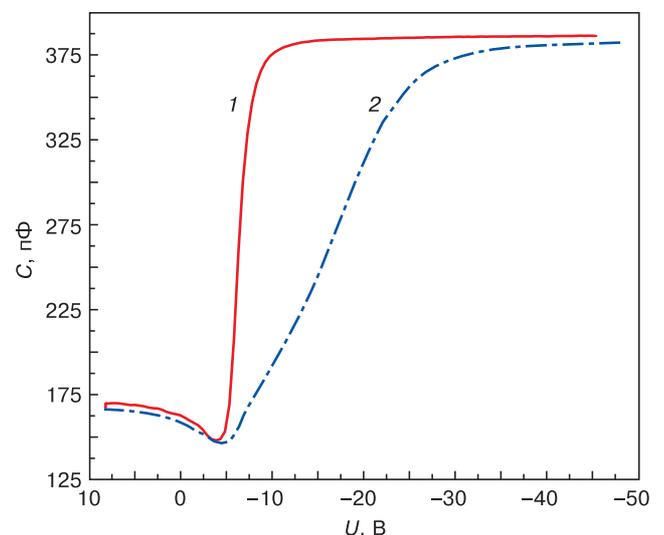


Рис. 1. C—V-характеристики исследуемой структуры до (1) и после (2) облучения. Ускоряющее напряжение 2,5 кэВ, ток пучка 1 нА, доза облучения 15 мкКл/см²
 Fig. 1. C—V characteristics of the studied structure (1) before and (2) after irradiation. Accelerating voltage 2.5 keV, beam current 1 nA, radiation dose 15 μC/cm²

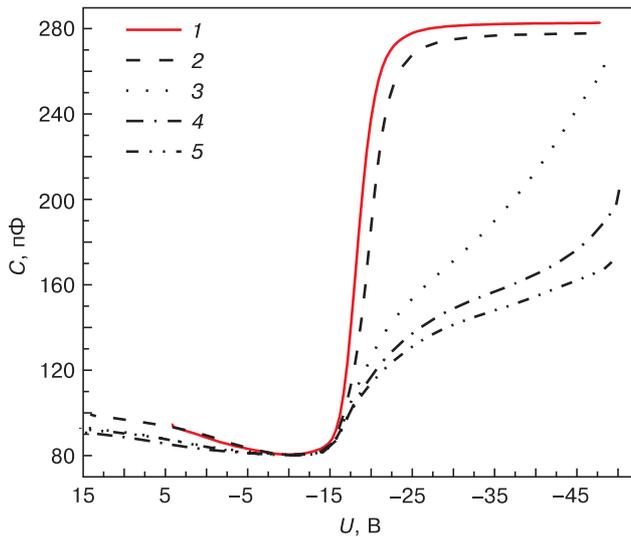


Рис. 2. Изменение C–V-характеристики в зависимости от дозы облучения: 1 — до облучения; 2–5 — облучение дозой 10, 20, 25 и 30 мкКл

Fig. 2. Change in C–V characteristics depending on the dose of radiation: (1) before irradiation, (2–5) irradiation with a dose of 10, 20, 25 and 30 μC

вании поверхностных состояний. Однако в таком случае неизменность зависимости от напряжения в области инверсии заставляет предположить, что эффект объемного заряда точно компенсирует эффект поверхностных состояний. Более вероятным представляется предположение о том, что в случае облучения электронным пучком низкой энергии, объемный заряд в пленке SiO₂ практически не изменяется, в то время как плотность состояний на границе раздела Si/SiO₂ повышается при росте дозы облучения.

Для проверки предположения об обмене носителями заряда оксида с кремниевой подложкой были проведены исследования влияния приложенного к металлизации напряжения на накопление заряда при облучении и его последующую релаксацию. Сначала было проверено влияние приложенного при комнатной температуре напряжения на исходную МДП-структуру. На рис. 3 представлены результаты такого эксперимента для напряжений смещения –40 В и +40 В. Из рис. 3, а видно, что положительное напряжение вообще не влияет на встроенный заряд диэлектрика. Отрицательное напряжение приводит к небольшому сдвигу без изменения наклона кривой в область отрицательных напряжений (см. рис. 3, б). Такой сдвиг свидетельствует о повышении положительного заряда в объеме оксидного слоя и/или его смещении к границе раздела. Поскольку приложенное отрицательное смещение препятствует смещению положительного заряда к границе раздела, наиболее вероятной причиной сдвига C–V-кривой является инжекция дырок из кремния в SiO₂.

При исследовании влияния приложенного к металлизации напряжения на накопление заряда во время облучения электронным пучком было обнаружено следующее. Влияние облучения меньше при подаче на металлическую площадку отрицательного напряжения (электрическое поле в диэлектрике притягивало дырки к металлическому контакту), чем при приложении положительного смещения (электрическое поле в диэлектрике отталкивало дырки к границе Si/SiO₂). На рис. 4 приведены отдельные C–V-характеристики для одной и той же металлической площадки, к которой во время облучения прикладывалось напряжение (доза облу-

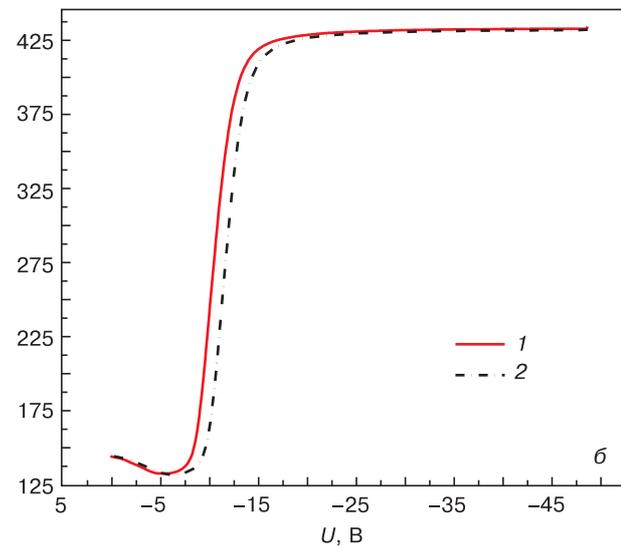
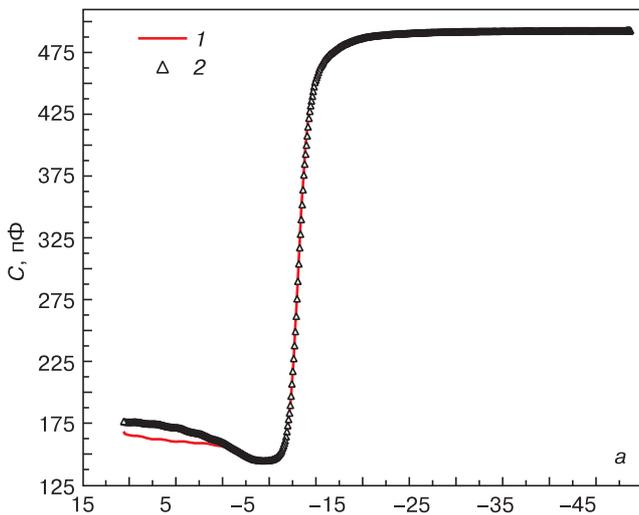


Рис. 3. Изменение C–V-характеристик исследуемой структуры до облучения электронным пучком при приложении к металлизации различных напряжений смещения: а — +40 В (инверсия); б — –40 В (обогащение); 1 — до приложения напряжения; 2 — после приложения напряжения в течение 15 мин.

Fig. 3. Change in the C–V characteristics of the structure under study prior to irradiation with an electron beam when various bias voltages are applied to metallization: (a) +40 V (inversion), (б) –40 V (accumulation), (1) before applying voltage, (2) after applying voltage for 15 min.

чения составляла 20 мкКл/см²). Из рис. 4 видно, что при приложении к металлизации положительного напряжения 10 В изменяется не только наклон C—V-кривой, но и происходит смещение в область отрицательных напряжений. Следовательно, можно сделать вывод, что накопление заряда происходит не только на границе Si/SiO₂, но и в объеме диэлектрика.

Как уже отмечалось ранее, для используемой энергии электронов глубина генерации электронно-дырочных пар не превышает половины толщины пленки SiO₂. Также, в работах [14, 15] было показано, что длина пробега дырок в SiO₂ не превышает несколько десятков нанометров. Необходимо отметить, что встроенное электрическое поле в необлученном образце, возникающее из-за положительного заряда в оксидном слое, подавляет транспорт дырок к границе раздела Si/SiO₂ и стимулирует дрейф электронов к интерфейсу. При этом вклад в это поле от зарядов вблизи металлического контакта экранируется и, следовательно, основной вклад в величину поля будет давать положительный заряд, расположенный вблизи интерфейса. Как видно из результатов экспериментов, при облучении при нулевом смещении на металлической площадке положительный заряд в оксидном слое возрастает. При этом электрическое поле внутри диэлектрика должно препятствовать переносу неравновесных дырок к границе раздела и стимулировать перенос электронов к ней. Таким образом, полученные результаты позволяют предположить, что формирование поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂ при облучении структуры низкоэнергетическим электронным пучком стимулируется неравновесными электронами,

достигающими границы раздела. Это не согласуется с широко распространенными представлениями [11, 12], согласно которым неравновесные электроны очень быстро покидают образец или рекомбинируют внутри него, а формирование поверхностных состояний и объемного заряда происходит при участии нерекombинировавших неравновесных дырок. Следует отметить, что проведенные исследования влияния электрического поля, приложенного в процессе облучения, показывают, что неравновесные дырки также могут стимулировать формирование поверхностных состояний (см. рис. 4), хотя и в этом случае процесс может стимулироваться инжекцией электронов из кремния, механизма, ответственного за деградацию приборов на основе МДП-структур [16—19].

Представляло интерес исследовать, насколько стабилен заряд, введенный при облучении. Такие исследования показали, что восстановление C—V-характеристик, хотя и очень медленное, происходит даже при комнатной температуре. Было обнаружено, что релаксация подчиняется логарифмическому закону

$$\Delta V = \Delta V_0 - A \ln(t/t_0),$$

где ΔV_0 — напряжение смещения после облучения электронным пучком, измеренное на уровне 0,8—0,9 от величины емкости в области обогащения; t — время отжига; A — коэффициент порядка 0,1—1 В; t_0 — некоторая нормировочная константа, имеющая величину порядка 150 с. Согласно работам [20, 21], полученную логарифмическую зависимость можно объяснить туннелированием электронов из кремниевой подложки в слой SiO₂, которые компенсируют в оксидном слое положительный заряд, накопленный в результате облучения электронным пучком. Для подтверждения этого предположения были проведены исследования влияния приложенного к металлическому электроду смещения на релаксацию накопленного после облучения заряда, которые показали, что накопленный заряд релаксировал при комнатной температуре быстрее при приложении к металлизации положительного напряжения, чем при подаче отрицательного. Это можно объяснить тем фактом, что в режиме инверсии (положительное напряжение) большее количество электронов может туннелировать в слой SiO₂ из кремниевой подложки, в то время как при обогащении (отрицательное напряжение) процесс инжекции электронов в оксидный слой существенным образом подавляется.

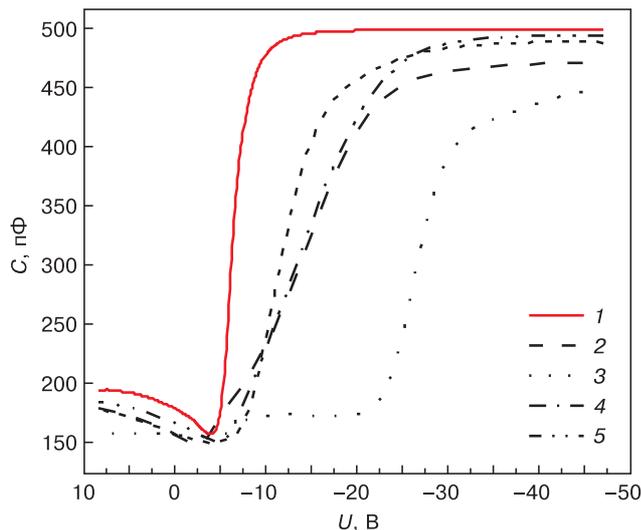


Рис. 4. Изменение C—V-характеристик исследуемой структуры до (1) и после (2—5) облучения с различным напряжением смещения: 2 — +10 В; 3 — 0; 4 — -10 В; 5 — -20 В. Доза облучения 20 мкКл/см²

Fig. 4. Change in the C—V characteristics of the studied structure before (1) and after (2—5) irradiation with different bias voltages: (2) +10 V, (3) 0, (4) -10 V; (5) -20 V. Dose 20 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

Заключение

Проведено исследование влияния облучения низкоэнергетическим электронным пучком на C—V-характеристики МДП-структуры Al/SiO₂/Si как

при закороченном металлическом контакте, так и с приложенным к нему напряжением во время облучения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что, при использованной в работе энергии электронного пучка для облучения, формирование поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂ может стимулироваться не только неравновесными дырками, как считалось ранее, но и неравновесными электронами. Исследована термическая стабильность объемного заряда и поверхностных состояний, созданных облучением. При этом показано, что при отжиге облученной МДП-структуры при 210 °С происходит практически полное восстановление исходного состояния структуры.

Библиографический список

- Jbara O., Belhaj M., Odof S., K. Msellak, Rau E. I., Andrianov M. V. Surface potential measurements of electron-irradiated insulators using backscattered and secondary electron spectra from an electrostatic toroidal spectrometer adapted for scanning electron microscope applications // *Rev. Sci. Instrum.* 2001. V. 72, Iss. 3. P. 1788—1795. DOI: 10.1063/1.1344596
- Cazaux J. Scenario for time evolution of insulator charging under various focused electron irradiations // *J. Appl. Phys.* 2004. V. 95, Iss. 2. P. 731—742. DOI: 10.1063/1.1632015
- Di Santo G., Coluzza C., Flammini R., Zanoni R., Decker F. Spatial, energy, and time-dependent study of surface charging using spectroscopy and microscopy techniques // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 102, Iss. 11. P. 114505. DOI: 10.1063/1.2817915
- Jbara O., Fakhfakh S., Belhaj M., Rondot S., Hadjadj A., Patat J. M. Charging effects of PET under electron beam irradiation in a SEM // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41, N 21. P. 245504. DOI: 10.1088/0022-3727/41/24/245504
- Cornet N., Goeriot D., Guerret-Piécourt C., Juvé D., Tréheux D., Touzin M., Fitting H.-J. Electron beam charging of insulators with surface layer and leakage currents // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103, Iss. 6. P. 064110. DOI: 10.1063/1.2890427
- Fitting H.-J., Meyza X., Guerret-Piécourt C., Dutriez C., Touzin M., Goeriot D., Tréheux D. Selfconsistent electrical charging in insulators // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2005. V. 25, Iss. 12. P. 2799—2803. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.143
- Belhaj M., Jbara O., Filippov M. N., Rau E. I., Andrianov M. V. Analysis of two methods of measurements of surface potential of insulators in SEM: electron spectroscopy and X-ray spectroscopy methods // *Appl. Surf. Sci.* 2001. V. 177, Iss. 1-2. P. 58—65. DOI: 10.1016/S0169-4332(01)00209-4
- Рау Э. И., Татаринцев А. А., Купреенко С. Ю., Зайцев С. В., Подбучный Н. Г. Сравнительный анализ методов измерения потенциалов зарядки диэлектриков при электронном облучении в сканирующем электронном микроскопе // *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования.* 2017. № 10. С. 69—76. DOI: 10.7868/S0207352817100110
- Рау Э. И., Татаринцев А. А., Зыкова Е. Ю., Иваненко И. П., Купреенко С. Ю., Миннебаев К. Ф., Хайдаров А. А. Электронно-лучевая зарядка диэлектриков, предварительно облученных ионами и электронами средних энергий // *ФТТ.* 2017. Т. 59, Вып. 8. С. 1504—1513. DOI: 10.21883/ФТТ.2017.08.44749.460
- Рау Э. И., Евстафьева Е. Н., Андрианов М. В. Механизмы зарядки диэлектриков при их облучении электронными пучками средних энергий // *ФТТ.* 2008. Т. 50, № 4. С. 599—607.
- Oldham T. R., McLean F. B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2003. V. 50, Iss. 3. P. 483—499. DOI: 10.1109/TNS.2003.812927
- Schwank J. R., Shaneyfelt M. R., Fleetwood D. M., Felix J. A., Dodd P. E., Paillet P., Ferlet-Cavrois V. Radiation effects in MOS oxides // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2008. V. 55, Iss. 4. P. 1833—1853. DOI: 10.1109/TNS.2008.2001040
- Schroder D. K. Semiconductor materials and device characterization. Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons, Inc., 2006. 781 p.
- Борисов С. С., Вергелес П. С., Якимов Е. Б. Исследование индуцированной электронным пучком проводимости в тонких пленках окиси кремния // *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования.* 2010. № 9. С. 62—66.
- Glavatskikh I. A., Kortov V. S., Fitting H.-J. Self-consistent electrical charging of insulating layers and metal-insulator-semiconductor structures // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89, Iss. 1. P. 440—448. DOI: 10.1063/1.1330242
- Groeseneken G., Bellens R., Van den Bosch G., Maes H. E. Hot-carrier degradation in submicrometre MOSFETs: from uniform injection towards the real operating conditions // *Semicond. Sci. Technol.* 1995. V. 10, N 9. P. 1208—1220. DOI: 10.1088/0268-1242/10/9/002
- Acovic A., La Rosa G., Sun Y.-C. A review of hot-carrier degradation mechanisms in MOSFETs // *Microelectr. Reliab.* 1996. V. 36, Iss. 7-8. P. 845—869. DOI: 10.1016/0026-2714(96)00022-4
- Vuillaume D., Bravaix A., Goguenheim D. Hot-carrier injections in SiO₂ // *Microel. Reliab.* 1998. V. 38, Iss. 1. P. 7—22. DOI: 10.1016/S0026-2714(97)00179-0
- Cho M., Roussel P., Kaczer B., Degraeve R., Franco J., Aoulaiche M., Chiarella T., Kauerauf T., Horiguchi N., Groeseneken G. Channel hot carrier degradation mechanism in long/short channel n-FinFETs // *IEEE Trans. Electron Dev.* 2013. V. 60, Iss. 12. P. 4002—4007. DOI: 10.1109/TED.2013.2285245
- Leis A. J., Oldham T. R., Boesch H. E., McLean F. B. The nature of the trapped hole annealing process // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1989. V. 36, Iss. 6. P. 1808—1815. DOI: 10.1109/23.45373
- Schmidt M., Köster (Jr) H. Hole trap analysis in SiO₂/Si structures by electron tunneling // *Phys. Stat. Sol. (b).* 1992. V. 174. P. 53—66. DOI: 10.1002/pssb.2221740106

Работа П. С. Вергелеса и Ю. О. Куланчикова была поддержана грантом РФФИ №18-32-00323.

Статья поступила в редакцию 29 октября 2019 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering.* 2019, vol. 22, no. 2, pp. 112—117. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-2-112-117

Low-energy electron beam irradiation effect on Al/SiO₂/Si structure voltage–farad characteristics

Yu. O. Kulanchikov¹, P. S. Vergeles^{1,§}, E. B. Yakimov¹

*Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the Russian Academy of Sciences,
6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka 142432, Russia*

Annotation. The effect of electron irradiation with energy of 2.5 keV on the MOS structure Al/SiO₂/Si capacitance–voltage (C–V) characteristics have been studied. At chosen beam energy the electron penetration depth is lower than the dielectric

thickness that allows to reveal the contribution of excess carrier transport to the trap formation on the SiO₂/Si interface. It was established that the electron beam irradiation leads to a significant change in the C–V characteristics slope, i.e. to the trap formation at the interface. A study of effect of bias applied to the investigated structure before and during the electron beam irradiation was carried out. It was established that while the bias applied before irradiation practically did not affect the C–V characteristics of the investigated MOS structure, the positive voltage applied to metallization during irradiation produced a pronounced effect on the C–V curve changes. At the same time the C–V characteristics after irradiation with zero and negative voltage were very similar. The investigation of stability of changes produced by the electron beam irradiation showed that the C–V curves are slowly restored even at room temperature. An applied negative bias was found to slow down the charge relaxation process.

Keyword: silicon oxide, low energy electronic beam, MOS structure, C–V characteristics

References

1. Jbara O., Belhaj M., Odof S., K. Msellak, Rau E. I., Andrianov M. V. Surface potential measurements of electron-irradiated insulators using backscattered and secondary electron spectra from an electrostatic toroidal spectrometer adapted for scanning electron microscope applications. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, vol. 72, no. 3, pp. 1788–1795. DOI: 10.1063/1.1344596
2. Cazaux J. Scenario for time evolution of insulator charging under various focused electron irradiations. *J. Appl. Phys.*, 2004, vol. 95, no. 2, pp. 731–742. DOI: 10.1063/1.1632015
3. Di Santo G., Coluzza C., Flammini R., Zannoni R., Decker F. Spatial, energy, and time-dependent study of surface charging using spectroscopy and microscopy techniques. *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 102, no. 11, pp. 114505. DOI: 10.1063/1.2817915
4. Jbara O., Fakhfakh S., Belhaj M., Rondot S., Hadjadj A., Patat J. M. Charging effects of PET under electron beam irradiation in a SEM. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, vol. 41, no. 21, pp. 245504. DOI: 10.1088/0022-3727/41/24/245504
5. Cornet N., Goeuriot D., Guerret-Piécourt C., Juvé D., Tréheux D., Touzin M., Fitting H.–J. Electron beam charging of insulators with surface layer and leakage currents. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 103, no. 6, pp. 064110. DOI: 10.1063/1.2890427
6. Fitting H.–J., Meyza X., Guerret-Piécourt C., Dutriez C., Touzin M., Goeuriot D., Tréheux D. Selfconsistent electrical charging in insulators. *J. Europ. Ceramic Soc.*, 2005, vol. 25, no. 12, pp. 2799–2803. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.143
7. Belhaj M., Jbara O., Filippov M. N., Rau E. I., Andrianov M. V. Analysis of two methods of measurements of surface potential of insulators in SEM: electron spectroscopy and X-ray spectroscopy methods. *Appl. Surf. Sci.*, 2001, vol. 177, no. 1–2, pp. 58–65. DOI: 10.1016/S0169-4332(01)00209-4
8. Rau E. I., Tatarintsev A. A., Kupreenko S. Y., Zaitsev S. V., Podbutsky N. G. Comparative analysis of methods for surface potential measurement of dielectrics charging under electron beam irradiation in scanning electron microscope. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhronnye i neitronnye issledovaniya*, 2017, no. 10, pp. 69–76. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0207352817100110
9. Rau E. I., Tatarintsev A. A., Zykova E. Y., Ivanenko I. P., Kupreenko S. Y., Minnebaev K. F., Khaidarov A. A. Electron-beam charging of dielectrics preirradiated with moderate-energy ions and electrons. *Phys. Solid State*, 2017, vol. 59, no. 8, pp. 1526–1535. DOI: 10.1134/S1063783417080212

Information about authors:

Yuriy O. Kulanchikov¹: Student, Research Assistant (Kul_ura@mail.ru); **Pavel S. Vergeles**^{1,§}: Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher (vergelesp@gmail.com); **Eugene B. Yakimov**¹: Dr. Sci. (Phys.–Math.), Chief Researcher (yakimov@iptm.ru)

[§] Corresponding author

10. Rau E. I., Evstafyeva E. N., Andrianov M. V. Mechanisms of charging dielectrics when they are irradiated with medium-energy electron beams. *Fizika tverdogo tela*, 2008, vol. 50, no. 4, pp. 599–607. (In Russ.)
11. Oldham T. R., McLean F. B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2003, vol. 50, no. 3, pp. 483–499. DOI: 10.1109/TNS.2003.812927
12. Schwank J. R., Shaneyfelt M. R., Fleetwood D. M., Felix J. A., Dodd P. E., Paillet P., Ferlet-Cavrois V. Radiation effects in MOS oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, vol. 55, no. 4, pp. 1833–1853. DOI: 10.1109/TNS.2008.2001040
13. Schroder D. K. Semiconductor materials and device characterization. Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons, Inc., 2006. 781 p.
14. Borisov S. S., Vergeles P. S., Yakimov E. B. Investigations of electron beam induced conductivity in silicon oxide thin films. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhronnye i neitronnye issledovaniya*, 2010, no. 9, pp. 62–66. (In Russ.)
15. Glavatskikh I. A., Kortov V. S., Fitting H.–J. Self-consistent electrical charging of insulating layers and metal-insulator-semiconductor structures. *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 89, no. 1, pp. 440–448. DOI: 10.1063/1.1330242
16. Groeseneken G., Bellens R., Van den Bosch G., Maes H. E. Hot-carrier degradation in submicrometre MOSFETs: from uniform injection towards the real operating conditions. *Semicond. Sci. Technol.*, 1995, vol. 10, no. 9, pp. 1208–1220. DOI: 10.1088/0268-1242/10/9/002
17. Acovic A., La Rosa G., Sun Y.–C. A review of hot-carrier degradation mechanisms in MOSFETs. *Microelectr. Reliab.*, 1996, vol. 36, no. 7–8, pp. 845–869. DOI: 10.1016/0026-2714(96)00022-4
18. Vuillaume D., Bravaix A., Goguenheim D. Hot-carrier injections in SiO₂. *Microel. Reliab.*, 1998, vol. 38, no. 1, pp. 7–22. DOI: 10.1016/S0026-2714(97)00179-0
19. Cho M., Roussel P., Kaczer B., Degraeve R., Franco J., Aoulaiche M., Chiarella T., Kauerauf T., Horiguchi N., Groeseneken G. Channel hot carrier degradation mechanism in long/short channel n-FinFETs. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2013, vol. 60, no. 12, pp. 4002–4007. DOI: 10.1109/TED.2013.2285245
20. Lelis A. J., Oldham T. R., Boesch H. E., McLean F. B. The nature of the trapped hole annealing process. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1989, vol. 36, no. 6, pp. 1808–1815. DOI: 10.1109/23.45373
21. Schmidt M., Köster (Jr) H. Hole trap analysis in SiO₂/Si structures by electron tunneling. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 1992, vol. 174, pp. 53–66. DOI: 10.1002/pssb.2221740106

Acknowledgments.

The work of P. S. Vergeles and Yu. O. Kulanchikov was supported by RFBR grant No. 18–32–00323.

Received October 29, 2019