

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МДП-СТРУКТУР

К. ф.-м. н. В. М. Попов

Научно-исследовательский институт микроприборов
НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины
Украина, г. Киев
microic@voliacable.com

Методами растровой электронной микроскопии и электрофизических измерений впервые исследовано распределение локальных пороговых напряжений в МДП управляемых $p-n$ -переходах на кремнии, облученных электронами с энергиями 5—30 кэВ. Установлено, что характер распределения пороговых напряжений под электродами коррелирует с внутренними механическими напряжениями в МДП-структурах.

Ключевые слова: МДП-структуры, электронная микроскопия, механические напряжения.

Влияние ионизирующей радиации на свойства элементов интегральных схем является одним из актуальных направлений исследований в микроэлектронике. Вследствие постоянного роста степени интеграции полупроводниковых приборов представляет большой практический интерес изучение радиационных эффектов в пределах малых участков структур «металл — диэлектрик — полупроводник» (МДП), соизмеримых с размерами отдельных активных элементов интегральных схем. В большинстве случаев геометрические размеры исследуемых тестовых структур значительно превосходят размеры локальных неоднородностей их электрофизических свойств. В результате определяемые параметры носят интегральный (усредняющий) характер и не отражают их истинного распределения в пределах геометрических размеров исследуемых образцов. Поэтому для повышения информативности и точности исследования материалов и слоев в технологии микроэлектроники необходимо использовать методы анализа, позволяющие определять локальные электрофизические свойства и их пространственное распределение в контролируемых МДП-структурах. Сказанное справедливо и по отношению к изучению радиационных эффектов в полупроводниковых приборах.

Известно, что результаты исследований влияния ионизирующего излучения на электрофизические свойства МДП-структур на кремнии в определенной степени зависят от размеров и формы электродов [1]. Данный эффект наблюдался при воздействии рентгеновского излучения и был связан с неоднородным распределением внутренних механических напряжений в системе Si-SiO₂ под электродом. Однако распределение электрофизических свойств МДП-структур, облученных другими источниками радиации, в частности низкоэнергетическими электронами, остается невыясненным. Изучение влияния электронов низких энергий представляет особый интерес в связи с перспективами применения электронной литографии в производстве современных изделий микроэлектроники. В настоящее время не определены количественные характеристики локальных электрофизических параметров облученных МДП-структур, отсутствуют данные о динамике пространственного изменения их свойств в процессе облучения.

Целью работы являлось исследование распределения локальных электрофизических свойств МДП-структур при облучении электронами с энергией 5—30 кэВ в диапазоне доз 10^{12} — 10^{16} 1/см² и определение локальных значений их пороговых напряжений V_T в зависимости от координат под электродом.

Эффективным и экономичным средством анализа влияния ионизирующего излучения на локальные электрофизические свойства МДП структур является растровая электронная микроскопия

(РЭМ) в режиме токов, индуцированных электронным лучом (ТИЭЛ). Наиболее информативными тестовыми структурами для исследования свойств поверхности полупроводника и границы раздела «диэлектрик — полупроводник» (ДП) с помощью РЭМ служат МДП управляемые $p-n$ -переходы [2, 3]. Ранее был предложен метод визуализации пространственного распределения порогового напряжения V_T в МДП управляемых $p-n$ -переходах в режиме ТИЭЛ РЭМ [4]. В условиях полного неравновесного обеднения поверхности полупроводника под электродом указанных структур величина ТИЭЛ в цепи стока определяется шириной области пространственного заряда на поверхности полупроводника и зависит от локальных значений V_T . Поэтому контраст изображения, формируемого в режиме ТИЭЛ, по крайней мере, качественно отражает распределение пороговых напряжений под электродом.

Для количественных исследований локальных значений V_T в различных областях под электродом облученных образцов были разработаны и изготовлены специальные тестовые структуры. Они представляли собой МДП управляемые $p-n$ -переходы с двумя отдельными стоками, расположенными в центре и на периферии квадратных электродов размером 1×1 мм. Причем область стока на периферии таких структур располагалась на расстоянии всего 10 мкм от края электрода. Сток в центральной области был удален от края на 350 мкм. Изучались зависимости тока стока от напряжения на подложке при заземленном управляющем электроде. При раздельном измерении указанных вольт-амперных характеристик (ВАХ) МДП управляемых $p-n$ -переходов с различным расположением стоков обеспечивалась возможность определения пороговых напряжений в центральной части и на краю исследуемых структур. Кроме визуального анализа распределения ТИЭЛ под электродом облученных структур изучалась динамика его изменения непосредственно в процессе облучения электронами. С этой целью регистрировались зависимости ТИЭЛ от координаты под электродом при медленном сканировании структуры электронным лучом.

Исследованы МДП управляемые $p-n$ -переходы (Al — SiO₂ — Si) с толщиной термически выращенного оксида 1000—1400 Å, изготовленные на кремнии КЭФ-4,5 по технологии интегральных схем. Площадь электродов различной конфигурации составляла от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ см².

Впервые визуализированы картины распределения ТИЭЛ в кремнии под электродами МДП управляемых $p-n$ -переходов при облучении электронами с энергией 25 кэВ (рис. 1).

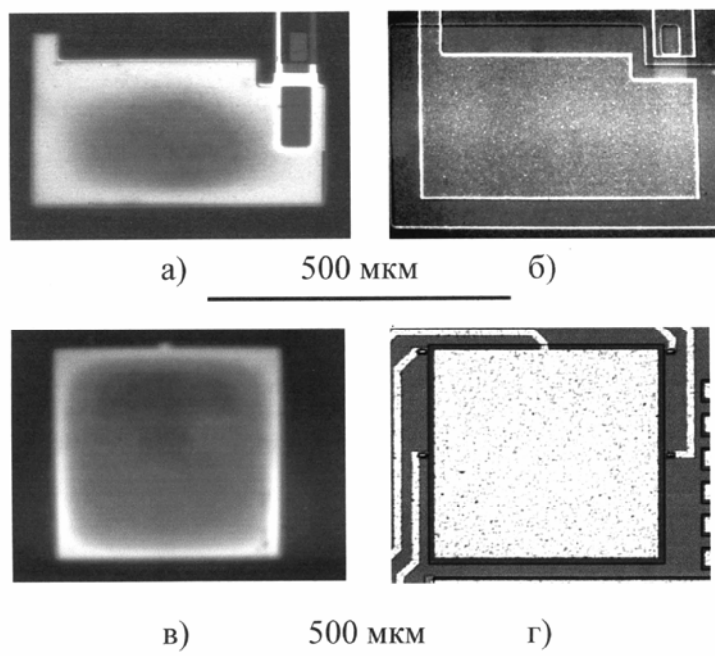


Рис. 1. Примеры наблюдения неоднородного распределения ТИЭЛ под электродами МДП управляемых $p-n$ -переходов после облучения низкоэнергетическими электронами (а, в), а также топология тестовых структур, полученная в РЭМ в режиме вторичных электронов (б) и в оптическом микроскопе (г)

Усиление ТИЭЛ на краях электродов (более светлые участки) указывает на расширение области пространственного заряда в кремнии, в которой отсутствуют рекомбинационные потери гене-

рируемых лучом неосновных носителей заряда. Отсюда следует, что в процессе облучения встраивание фиксированного заряда в оксиде и образование поверхностных состояний на границе раздела Si — SiO₂, определяющих значения пороговых напряжений в МДП-структурах, происходит неравномерно. В центральной части электродов радиационные эффекты выражены наиболее значительно, т. е. возрастание V_T максимально, на периферии оно меньше. Эти выводы подтверждены результатами измерения ТИЭЛ при медленном линейном сканировании электронным лучом МДП-структур после различных доз облучения электронами с энергией 25 кэВ (рис. 2). При этом по мере накопления дозы различия в пороговых напряжениях в центре и вблизи краев электродов увеличиваются. Следует сказать, что наблюдаемые профили распределения ТИЭЛ по площади МДП управляемых $p-n$ -переходов не всегда симметричны. В некоторых случаях под электродами наблюдаются отдельные области с повышенной скоростью образования зарядов в системе Si — SiO₂, что обусловлено, по-видимому, неоднородностью электрофизических свойств исходных структур. В целом, области с повышенной радиационной стойкостью в МДП-структурах зависели от геометрии электродов, технологии формирования МДП-структур и располагались на расстоянии от 10 до 200 мкм от края.

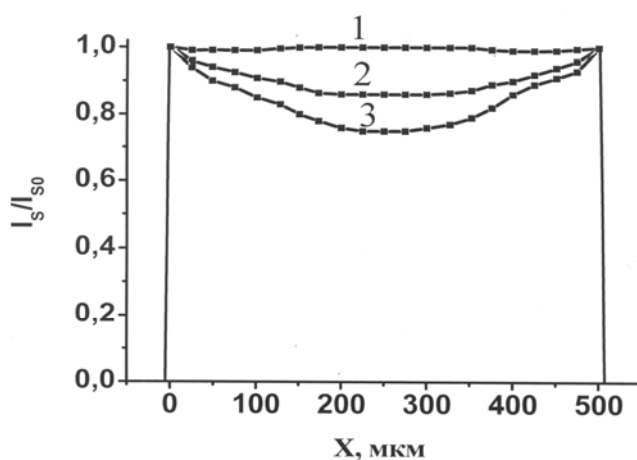


Рис. 2. Распределение нормированных значений ТИЭЛ под электродом МДП управляемого $p-n$ -перехода в процессе облучения низкоэнергетическими электронами:
1 — до облучения; 2, 3 — после облучения дозами $1 \cdot 10^{14}$ и $2 \cdot 10^{15}$ $1/\text{см}^2$ соответственно

Изучение ВАХ МДП управляемых $p-n$ -переходов с двумя отдельными стоками показало, что после облучения электронами с энергией 25 кэВ в диапазоне доз $(1-5) \cdot 10^{12}$ $1/\text{см}^2$ пороговое напряжение на периферии структур может быть на 1,5—2 В меньше, чем в центре (рис. 3).

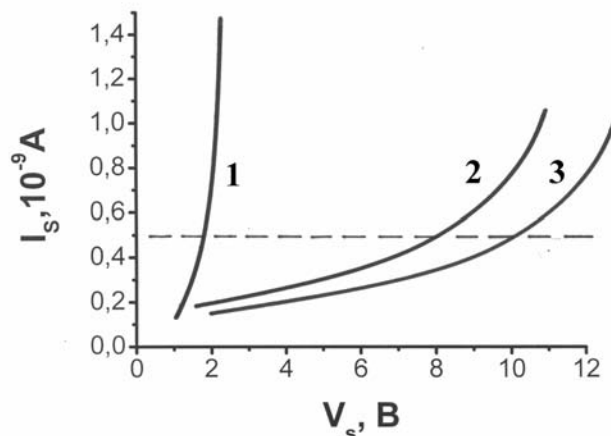


Рис. 3. ВАХ МДП управляемых $p-n$ -переходов до (1) и после облучения низкоэнергетическими электронами на его периферии (2) и в центральной области (3)

Определено, что флуктуация порогового напряжения под электродами облученных структур может достигать 20%. В результате более детального анализа установлено, что основной вклад в пороговое напряжение облученных структур вносит заряд на поверхностных состояниях.

В целом, обнаруженный характер поведения локальных значений V_T в облученных образцах соответствует распределению внутренних механических напряжений на границе раздела Si — SiO₂. Известно, что в МДП-структурах механические напряжения зависят от ширины электродов по гиперболическому закону и вблизи краев металлизации резко возрастают [5]. В соответствии с [6], сжимающие механические напряжения на границе раздела Si — SiO₂ снижают образование поверхностных состояний при облучении. Поэтому на периферии электродов радиационная устойчивость МДП-структур выше, чем в центре.

Отмечено, что на степень неоднородности распределения V_T под электродами влияет технология получения SiO₂. Так, в частности, добавление трихлорэтилена в окислительную среду при выращивании SiO₂ дает более равномерные значения пороговых напряжений под электродами облученных МДП-структур.

В работе получено аналитическое выражение, описывающее величину ТИЭЛ в МДП управляемых $p-n$ -переходах при полном неравновесном обеднении поверхности в зависимости от локальных значений пороговых напряжений (фиксированного заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях).

Таким образом, впервые визуализировано неоднородное распределение локальных пороговых напряжений под электродами МДП-структур при их облучении электронами низких энергий, показано их изменение в процессе накопления дозы облучения, определены локальные пороговые напряжения в центре и на периферии электродов облученных МДП-структур

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Zekeriya V., Wong A., Ma T.-P. Spatial distribution of radiation induced interface traps under the gate of an Al/SiO₂/Si capacitor // Appl. Phys. Lett. — 1985. — N 1. — P. 80 – 82.
2. Денисюк В. А., Попов В. М. Локализация рекомбинационно - активных приповерхностных дефектов в полупроводнике МДП структур при помощи растрового электронного микроскопа // Радиотехника и электроника.— 1982.— № 7. — С. 1443—1445.
3. Popov V.M., Klimentko A. S., Pokanevich A. P. Investigation of electrically active defects in Si – based semiconductor structures // Mater. Science and Engineering.— 2002.— B91—92.— P. 248—252.
4. Попов В. М. Исследование неоднородного распределения локальной радиационной стойкости по площади МДП-структур методом растровой электронной микроскопии // Труды XII междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ–2011».— Украина, г. Одесса.— 2011.— С. 284.
5. Wonsievicz B.C., McCaughan V. Electrical properties of metal - SiO₂ –silicon structures under mechanical stress // J. Appl. Phys. — 1973. — N 12. — P. 5476 — 5479.
6. Zekeriya V., Ma T.-P. Effect of stress relaxation on the generation of radiation-induced interface traps in post-metal-annealed Al - SiO₂ – Si devices // Appl. Phys. Lett. — 1984. — N 3. — P. 249 – 251.

Popov V.M.

The effect of low-energy electron irradiation on the spatial distribution of the local electrophysical properties of MIS structures.

The distribution of the local threshold voltages in silicon-based MIS controlled $p-n$ -junctions irradiated by electrons in the energy range 5—30 keV has been investigated for the first time using the methods of scanning electron microscopy and electrophysical measurements. It has been found that the distribution of threshold voltages below the electrodes correlates with the internal mechanical stresses in MIS structures.

Keywords: *MIS structures, electron microscopy, mechanical stress.*