ДИАГНОСТИКА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ МДП-СТРУКТУР

В.В. Андреев[1], Г.Г. Бондаренко[2,3], А.А.Столяров[1], М.С. Васютин[1], С.И. Коротков[1]

[1] Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал; [2] Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского государственного института электроники и математики (технического университета; [3]Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)

E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru

Одним из путей снижения энергетического порога чувствительности сенсоров заряженных частиц на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) является использование не только ионизационных процессов в полупроводнике, но и процессов генерации носителей в диэлектрических слоях на поверхности полупроводникового сенсора. Следует отметить, что ионизационно-генерационные процессы, происходящие в диэлектрических слоях, находящихся в специальных токополевых режимах, исследованы в настоящее время недостаточно. В большинстве работ, посвященных данной тематике, в диэлектрических слоях действуют электрические поля, далекие от пробивных и исключающие возможность переноса заряда [1-3].

В данной работе с использованием специального разработанного активного чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур, совместимого с изделиями микросистемной техники, проведено изучение возможности регистрации α-частиц и нейтронов на основе анализа ионизационных процессов, протекающих в тонких диэлектрических слоях.

Для контроля ионизирующих излучений использовался активный элемент сенсора заряженных частиц, выполненный по технологии, совместимой с изделиями микросистемной техники, на кремниевой полупроводниковой пластине диаметром 100 мм, кристалл которого имел размеры 4х4 мм [4]. На поверхности кристалла сформированы шестнадцать МДП-структур различной площади, имеющие выводы на контактные площадки, позволяющие проводить их электрическую коммутацию. К контактным площадкам подключается оборудование измерения параметров, позволяющее задавать электрический режим работы сенсора и регистрировать параметры и характеристики радиационных излучений. Исследуемые МДП-конденсаторы формировались на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией <100>.

Низкоомный полупроводник был специально выбран для удобства создания сильнополевых инжекционных режимов при изучении ионизационных процессов, протекающих под действием облучения, в диэлектрических пленках. Двуокись кремния толщиной 20÷100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl. Верхние электроды формировались с использованием фотолитографии по алюминиевой пленке, напыленной магнетронным методом. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °С. Для удобства контактирования и использования полученные кристаллы можно разваривать в корпуса интегральных микросхем, с этой целью все контактные площадки сформированы на толстой пленке SiO_2, а также имеются планарные контакты к подложке.

В процессе контроля радиационных излучений к МДП-структуре прикладывается импульс постоянного тока, обеспечивающий заряд емкости структуры и установление режима сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик [5,6]. Амплитуда импульса тока выбирается, исходя из условия незначительной зарядовой деградации МДП-структуры, обусловленной инжекцией электронов в течение всего измерительного цикла, а также получением необходимой чувствительности сенсора. Мониторинг радиационного излучения проводится по изменению временной зависимости напряжения на структуре в режимах заряда и разряда емкости, а также режиме протекания постоянного сильнополевого инжекционного тока через диэлектрическую пленку [5-9].

Для исследования влияния α-частиц на МДП-структуры находящиеся в режиме сильнополевой инжекции носителей в диэлектрик сенсоры на основе МДП-структур подвергались воздействию излучения источника ^{239}Pu. Мощность потока α-частиц составляла 10^{10} $с^{-1}\cdot см^{-2}$. Плотность инжекционного тока, пропускаемого через МДП-структуру во время регистрации облучения, составляла $7\cdot10^{-9} \div 10^{-6}$ $А/см^{-2}$. МДП-структуры располагались на расстоянии нескольких миллиметров от источника облучения.

На рисунке 1 показаны типичные временные зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния, при протекании через диэлектрик постоянного тока, иллюстрирующие воздействие α-частиц. Участки 1 и 5 соответствуют режиму протекания постоянного инжекционного тока, участки 2 и 3 характеризуют ионизационные процессы, протекающие в диэлектрической пленке МДП-структуры при воздействии α- частиц, участок 4 соответствует заряду емкости МДП-структуры при восстановлении режима сильнополевой инжекции электронов постоянным током после прекращения действия излучения. Как

видно из рис. 1 (a) при плотности инжекционного тока $7\cdot10^{-9}$ А/см$^{-2}$ воздействие α- излучения приводит к прекращению режима инжекции и снижению напряжения, падающего на МДП-структуре практически до нулевых значений (участок 3). Такой эффект наблюдается если ионизационный ток, обусловленный воздействием излучения, превышает инжекционный ток. Величина ионизационного тока в этом случае может быть определена из скорости разряда емкости МДП-структуры на участке 2. При плотности инжекционного тока 10^{-6} А/см$^{-2}$ воздействие α- излучения приводит к снижению напряжения, падающего на образце (рис. 1, b), при сохранении режима инжекции. В этом случае амплитуда ионизационного тока меньше амплитуды тока, прикладываемого к МДП-структуре, и величина ионизационного тока может быть определена как разница между значениями прикладываемого и инжекционного тока на участке 3 (рис. 1 b). Таким образом, плотности ионизационного тока, найденные из скорости разряда емкости МДП-структуры на участке 2 (рис. 1, a) и снижения напряжения падающего на образце на участке 3 (рис. 1, b), имели одинаковое значение и составляли $3\cdot10^{-7}$ А/см$^{-2}$.

После прекращения действия α-облучения напряжение на МДП-структуре возвращается к значениям, наблюдавшимся до облучения (рис. 1), что свидетельствует об отсутствии заметных деградационных процессов в диэлектрической пленке [4,5,9]. Для снижения деградационных процессов и увеличения срока службы сенсоров при регистрации радиационных излучений целесообразно использовать небольшие плотности инжекционного тока, соизмеримые с плотностью тока ионизации.

При исследовании влияния нейтронного излучения на МДП-структуры, находящиеся в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов, экспериментальные образцы подвергались воздействию излучения радионуклидного источника ^{238}Pu-Be со спектром нейтронов гомогенного типа (плавно изменяющийся спектр с энергией до 11 МэВ).

Мощность потока нейтронов составляла $4\cdot10^{8}$ с$^{-1}\cdot$см$^{-2}$. Плотность инжекционного тока, пропускаемого через диэлектрическую пленку МДП-структуры во время регистрации излучения, составляла $7\cdot10^{-9}$ А/см$^{-2}$.

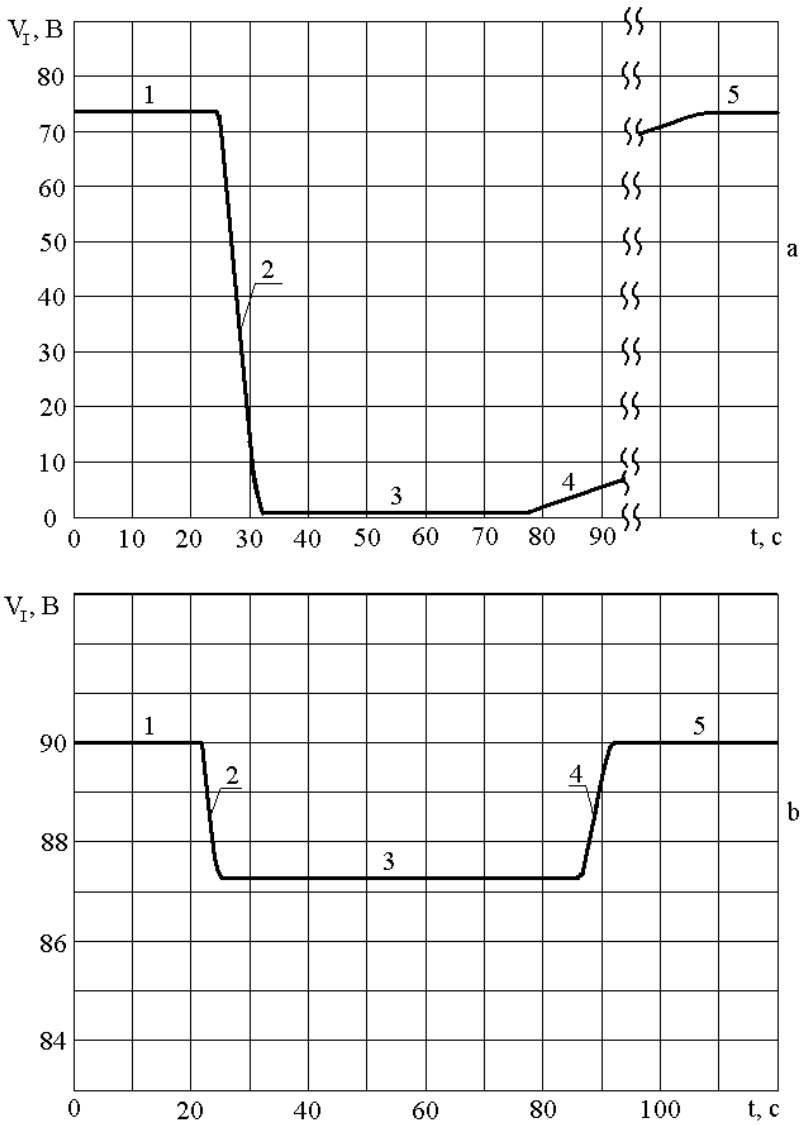

Рис.1. Временные зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния, при протекании через диэлектрик постоянного тока плотностью: a – $7\cdot10^{-9}$ А/см^2; b – 10^{-6} А/см^2. Участки 2,3 соответствуют облучению α-частицами.

На рисунке 2 показаны типичные временные зависимости изменения напряжения на МДП-структуре в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов в режиме протекания постоянного тока, характеризующие воздействие нейтронного излучения. Как видно из рисунка 2, при облучении нейтронами наблюдается уменьшение величины напряжения, падающего на МДП-структуре в режиме протекания постоянного тока. Такое уменьшение напряжения связано в основном с ионизационными процессами, протекающими в диэлектрической пленке МДП-структуры под действием облучения. При положительной полярности металлического электрода, соответствующей инжекции электронов из кремния, уменьшение напряжения составляло около 5 В (рис.2, а). Однако такое изменение

напряжения было обусловлено не только ионизационными процессами, но и накоплением в диэлектрике МДП-структур под действием облучения положительного заряда, на что указывает уменьшение напряжения на МДП-структуре после прекращения действия нейтронного излучения. Накопление положительного заряда под действием нейтронного облучения, по-видимому, было обусловлено генерацией дырок и их последующим захватом на ловушки в диэлектрической пленке МДП-структур [9]. Таким образом, оценка характеристик нейтронного излучения по уменьшению напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из кремния требует учета процесса накопления положительного заряда.

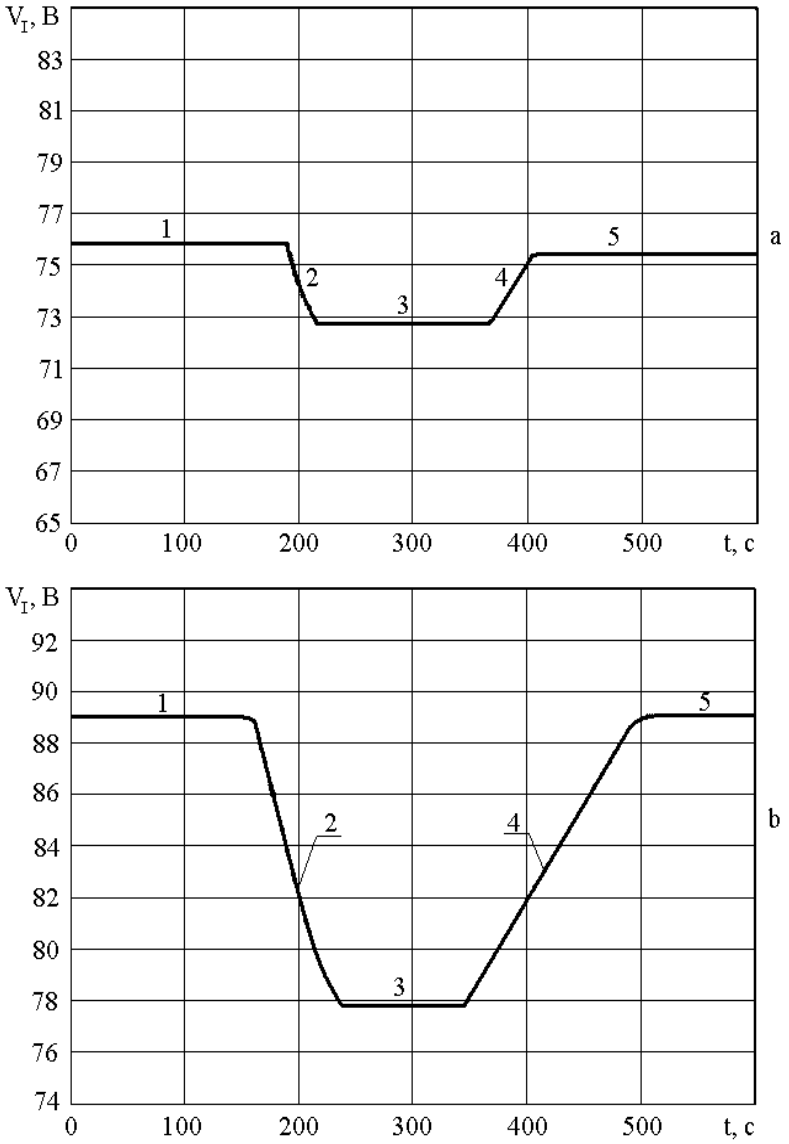

Рис.2. Высоковольтные участки временной зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния (a) и инжекции электронов из алюминия (b), при протекании через диэлектрическую пленку постоянного тока плотностью $7 \cdot 10^{-9}$ А/см^2. Участки 2 и 3 соответствуют облучению нейтронами.

При отрицательном напряжении на металлическом электроде, соответствующем инжекции электронов из металла, характер воздействия нейтронов на диэлектрическую пленку МДП-структур был иным. Нейтронное облучение не сопровождалось накоплением положительного заряда в пленке двуокиси кремния. Напряжение на МДП-структуре до и после нейтронного облучения оставалось неизменным, участки 1 и 5 (рис. 2, b).

Уменьшение напряжения на МДП-структуре в режиме постоянного тока существенно превышало его изменение при положительной полярности и составляло около 9,5 В. При отрицательной полярности на металлическом электроде МДП-структура находилась в неравновесном режиме, соответствующем образованию в кремнии области пространственного заряда (ОПЗ). Напряжение на МДП-структуре при этом на 10-15 В превышало напряжение в равновесном состоянии. Дополнительное напряжение падало на ОПЗ полупроводника. Поэтому уменьшение напряжения на МДП-структуре под действием нейтронного облучения, равное 9,5 В, определялось не только увеличением тока, протекающего через диэлектрик за счет тока ионизации, но и снижением падения напряжения на области пространственного заряда полупроводника вследствие уменьшения ее толщины. Следовательно, определить точное значение тока ионизации в диэлектрике МДП-структуры не представлялось возможным.

Однако следует ожидать, что ток ионизации при отрицательной полярности близок к величине тока ионизации при положительной полярности метали-ческого электрода. Толщина области пространственного заряда в полупровод-нике при падении напряжения на ней в 10-15 В составляет около 1 мкм, следовательно ионизационные потери в области пространственного заряда полупроводника будут значительно превышать ионизационные потери в диэлектрике, а, следовательно, и количество носителей, появившихся в полупроводнике под действием нейтронного излучения, будет значительно превышать количество генерированных в диэлектрике. Однако ток, протекающий через структуру, будет определяться проводимостью диэлектрической пленки.

Выводы

Показано, что ионизационные процессы, протекающие в диэлектрических пленках МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов, можно использовать для оценки характеристик радиационных излучений. Наиболее эффективно эти процессы проявляются при воздействии заряженных частиц (α-частицы). Сенсоры заряженных частиц на основе МДП-структур могут найти применение для регистрации

низкоэнергетических частиц, которые не регистрируются полупроводниковыми детекторами.

1. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике // Под ред. Ю.К. Акимова. - М.: Энергоатомиздат, 1989, 433 с.
2. В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. - М.: Энергоатомиздат, 1988, 256 с.
3. T.R. Oldhem, J.M. McGarrity. Ionization of SiO_2 by Heavy Charged Particles/ IEEE Transaction on Nuclear Science, 1981, vol. NS-28, No. 6, pp.3975-3980.
4. В.В. Андреев, Г.Г. Бондаренко, А.А. Столяров, М.С. Васютин, Д.С. Васютин. Активный чувствительный элемент детектора заряженных частиц на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник // Труды XVII Международного совещания "Радиационная физика твёрдого тела" (под ред. Г.Г. Бондаренко), М. 2007, с.406-409.
5. В.В.Андреев, В.Г.Барышев, А.А.Столяров. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник: Монография// М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, 256 с.
6. В.В.Андреев, В.Г.Барышев, Г.Г.Бондаренко, А.А.Столяров. Метод многоуровневой токовой нагрузки для исследования генерации и релаксации положительного заряда в МДП-структурах // Микроэлектроника, 2003, т.32, № 2, с.152-158.
7. В.В. Андреев, Г.Г. Бондаренко, А.А. Лычагин, А.А. Столяров, С.Е. Ульяненко. Радиационная ионизация в структурах металл-диэлектрик-полупроводник в режиме сильнополевой инжекции электронов// Физика и химия обработки материалов, 2006, № 5, с. 19-23.
8. В.В. Андреев, А.А. Бедняков, Г.Г. Бондаренко, Н.В. Кузнецов, Л.С. Новиков, Г.Г. Соловьев, А.А. Столяров, С.А. Лоскутов // Физика и химия обработки материалов, 2001, № 3, с.5-11.
9. D. Arnold, E. Cartier, D.J. DiMaria. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide // Phys. Rev. B, 1994, vol.49, No.15, pp.10278-10297.

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ФЦП «НАУЧНЫЕ И НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ КАДРЫ ИННОВАЦИОННОЙ РОССИИ» НА 2009 – 2013 ГОДЫ ГК №П470.