

УДК 621.382 : 621.383.8 : 539.1.074.5

КРЕМНИЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ 3D-МИКРОДОЗИМЕТРИИ

К. ф.-м. н. В. Л. Перевертайло

НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАН Украины
Украина, г. Киев
detector@carrier.kiev.ua

Разработана конструкция и технология мостикового 3D-КНИ-мезамикродозиметрического ячеистого массива. Изготовлены экспериментальные образцы, исследована структура, электрофизические и спектрометрические характеристики. Эффективность собирания заряда в центральной части ячеек, измеренная методом IBIC, составляет 100%. Однако понижение эффективности собирания заряда в различных частях чувствительного элемента приводит к увеличению низкоэнергетической части спектра сигнала массива. Для устранения этого эффекта намечены изменения в конструкции и технологии. Применение – дозиметрия в смешанных радиационных полях (космос, терапия тяжелыми ионами и др.).

Ключевые слова: кремний-на-изоляторе, 3D-меза, микродозиметр, IBIC-метод, SEM-изображение.

Микродозиметрия используется для получения микроскопической картины поглощения энергии ионизации в чувствительном объеме, размеры которого сравнимы с размерами биологических клеток [1, 2]. Этот метод является чрезвычайно полезным для дозиметрии в неизвестных смешанных радиационных полях, что типично для космоса и авиации, а также в адронной терапии.

Традиционными детекторами, используемыми для микродозиметрии, являются тканезквивалентные пропорциональные счетчики (ТЭПС), преимуществом которых является их сферический чувствительный объем и тканезквивалентность благодаря использованию газа. Однако ТЭПС имеют несколько ограничений, таких как высокое рабочее напряжение, большой размер чувствительного элемента, что снижает пространственное разрешение, непригодность для моделирования нескольких ячеек и др.

Для преодоления указанных недостатков газонаполненных дозиметров было предложено использование твердотельного микродозиметра для измерения поглощенной энергии в массиве микронно-размерных чувствительных объемов (далее – чувствительных элементов, ЧЭ). Кремниевый микродозиметр основан на массиве микронно-размерных ЧЭ, имитирующих массив биологических клеток [1, 2]. Массив кремниевых ЧЭ изготавливали с использованием подложки со структурой КНИ. Первые два поколения образцов были изготовлены по упрощенной технологии с жидкостным травлением при формировании мезаструктуры и диффузионными p^+ - n -переходами. Они показали низкий процент работающих ЧЭ и высокие темновые токи утечки. Поэтому были разработаны КНИ-микродозиметры третьего поколения, изготовленные по технологии p - i - n -диодов с ионноимплантированными p - n -переходами, разработанной в [3, 4] и модифицированной для p -Si КНИ-структур, которые показали 100% работающих ЧЭ [5] и высокий выход годных приборов с низкими темновыми токами утечки (менее 10^{-11} А/мм²). Однако в них наблюдалось собирание заряда из пассивных областей (ограничивающих электродов). Поэтому были разработаны приборы четвертого поколения с разделением ЧЭ с помощью формирования мезаструктуры, которые представлены в данной работе.

КНИ-микродозиметрические массивы третьего и четвертого поколения имели большой размер (4,1×3,6 мм) и разбиение на секции. Планарные ЧЭ цилиндрической и кубической формы с размером 10 мкм, были изготовлены на КНИ-структурах со слоем высокоомного n -кремния с удельным сопротивлением более 3 кОм·см толщиной 10 мкм, расположенным на подложке низкоомного кремния.

На рис. 1, где показаны элементарные ячейки мостикового 3D-микродозиметра (МД) на основе КНИ-мезаструктуры, представлена топология отдельного ЧЭ с p^+ -областью в центре, размером 10×10 мкм, n^+ -областью, размером 5 мкм по краю ячейки и зазором в 5 мкм между p^+ - и n^+ -областями.

Алюминиевая шина шириной 4 мкм (слева) соединяет все n^+ -области, соединение осуществляется через контактные окна 2×2 мкм. Вторая алюминиевая шина шириной 5 мкм (в центре) соединяет p^+ -области в четных или нечетных рядах. На рис. 1, б показано поперечное сечение ячеек микродозиметра с разделением глубокими канавками. Фотографии микродозиметрической структуры, полученные на сканирующем электронном микроскопе, показаны на рис. 2, где хорошо виден рельеф после травления кремния за пределами ЧЭ с оставшейся ячеистой мезаструктурой и отдельные ЧЭ, соединенные Al-шинами, проходящими по узким кремниевым мостикам между ЧЭ.

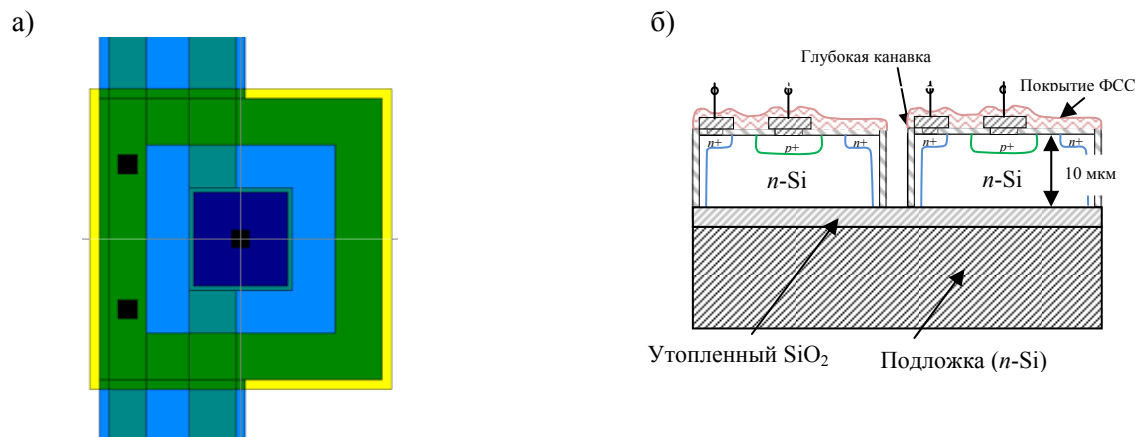


Рис. 1. Топология элементарной ячейки мостикового 3D-микродозиметра на основе КНИ-мезаструктуры (а) и поперечное сечение ячеек (б)

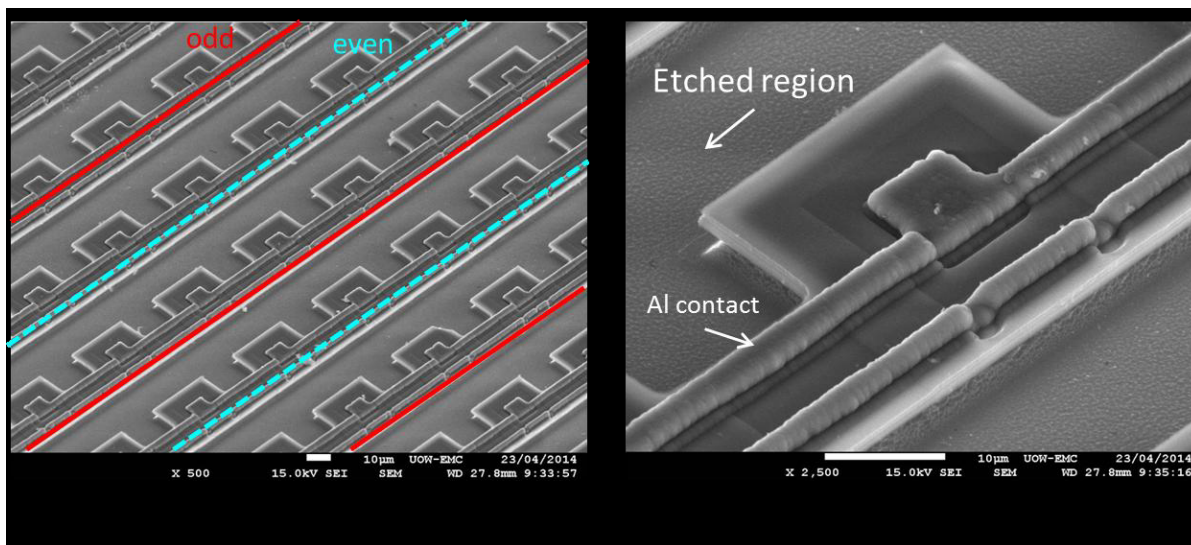


Рис. 2. Микрофотографии массива ячеек мостикового 3D-КНИ-мезамикродозиметра (из [6]): слева — увеличение 500, сплошными линиями обозначены нечетные ряды, пунктирными — четные ряды; справа — с увеличением 2500, видна отдельная элементарная ячейка

Технология изготовления 3D-КНИ-микродозиметра включала этап формирования мезаструктуры плазмохимическим травлением (ПХТ) в ионной плазме. В качестве защитной маски при травлении кремния применялся слой молибдена, сформированный осаждением и фотолитографией «островки Si», который удалялся после травления кремния. ПХТ обеспечило практически вертикальные стенки на всей глубине травления 10 мкм и уход размера не более 1 мкм.

Основной проблемой формирования мезаструктуры в данном случае является относительно большая толщина слоя кремния — 10 мкм, соответственно, наличие ступеньки высотой 10 мкм между соседними элементами приводит к обрывам слоя металла на ступеньках, что не позволяет сформировать металлические шины для соединения отдельных ЧЭ в массив. Поэтому были применены кремниевые «мостики», соединяющие отдельные ЧЭ. Эти мостики планаризуют узкие локальные области между отдельными ЧЭ, где проходят Al-шины, соединяющие p^+ - и n^+ -области отдельных ЧЭ.

Проведены исследования эффективности собирания заряда в ячеистом микродозиметре с помощью методики собирания заряда, индуцированного ионным пучком (IBIC — ion beam induced current) с энергией 2 МэВ (ионы H^+) и с энергией 5,5 МэВ (ионы He^{2+}). Сканирование поверхности микродозиметра проводили сфокусированным (диаметр около 1 мкм) моноэнергетическим пучком ионов. На рис. 3, а показан отклик микродозиметра на облучение пучком ионов H^+ , смещение детектора –10 В (с массива нечетных дорожек заряд не считывался), на рис. 3, б — энергетический спектр сигнала МД.

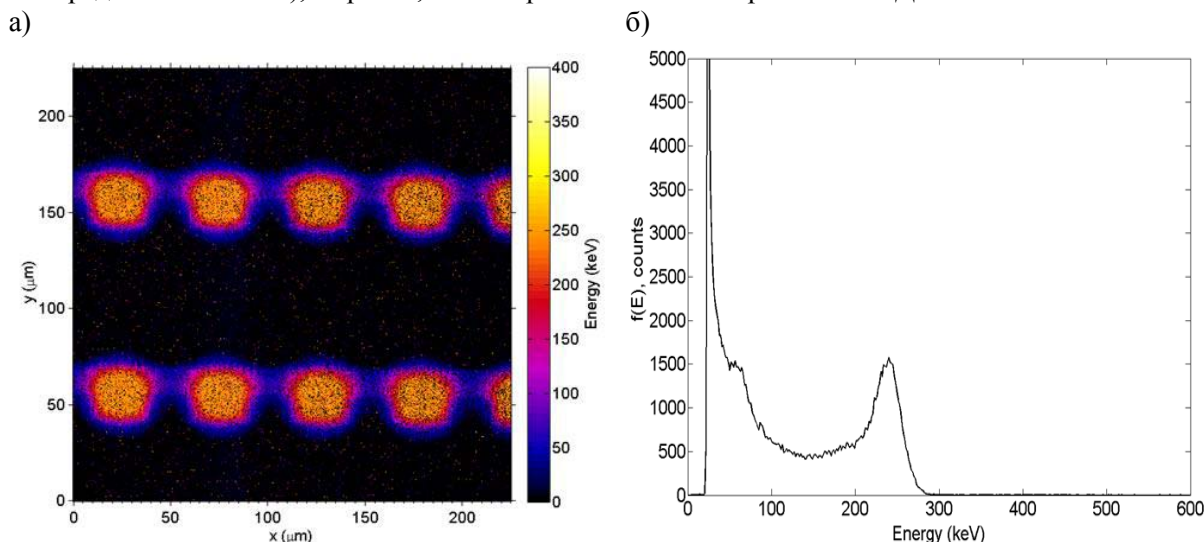


Рис. 3. Отклик КНИ-микродозиметра на облучение ионами H^+ с энергией 2 МэВ: пространственное распределение осажденной энергии в массиве ЧЭ с четных дорожек (а) и энергетический спектр отклика (б)

Эффективность собирания заряда в пределах центральной части ЧЭ размером 20×20 мкм, окружающей n^+ -областью, составляет 100%, в области под n^+ -имплантацией (рис. 1, а) — немного меньше 100%. Результаты исследований КНИ-микродозиметра в смешанных радиационных полях продемонстрировали близкое соответствие микродозиметрическому спектру ТЭПС, тканеэквивалентность дозы и возможность применения в авиации, космосе, адронной лучевой терапии, в т. ч. с ионами ^{12}C [5].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Livingstone J., Prokopovich D. A., Petasecca M. et al. Large area silicon microdosimeter for dosimetry in high let space radiation fields: Charge collection study // IEEE Trans. on Nucl. Sci.— 2012.— Vol. 59.— N 6.— P. 3126–3132.
2. Livingstone J., Prokopovich D.A., Petasecca M. et al. Charge collection in n-soi planar microdosimeters // IEEE Transactions on Nuclear Science.— 2013.— Vol. 60.— N 6.— P. 4289–4296.
3. Перевертайло В. Л. Разработка и характеристики кремниевых координатно-чувствительных детекторов для физики высоких энергий и ядерной физики // Ядерна фізика та енергетика.— 2008.— № 1 (23).— С. 88–95.
4. Перевертайло В. Л. Характеристики і технологія виготовлення кремнієвих планарних $p-i-n$ -фотодіодів для сцинтиляційних детекторів // Електроніка і зв'язь. Тематический выпуск «Проблеми електроніки», Часть 1.— 2007.— С.15–23.
5. Tran L. T., Prokopovich D. A., Petasecca M. et al. 3D-Mesa “bridge” silicon microdosimeter: charge collection study and application to RBE studies in ^{12}C radiation therapy // IEEE Transactions on Nuclear Science.— 2015.— Vol. 62.— N 2. DOI: 10.1109/TNS.2015.2391102.

V. L. Perevertailo

Silicon detectors for 3D microdosimetry.

The paper presents the design and technology of the bridging 3D SOI mesa microdosimetric cellular array. Experimental samples have been made and the structure and electrical and spectrometric characteristics have been studied. Charge collection efficiency in the central part of the cells, measured by IBIC, is 100%. Analysis of the contribution of the various elements of the array in the low-energy part of the spectrum due to the reduced charge collection allowed making structural and technological solutions to improve the charge collection. The device can be applied in dosimetry in mixed radiation fields (space, heavy-ion therapy et al.).

Keywords: *silicon on insulator, 3D mesa microdosimetry, IBIC method, SEM image.*