

## ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНЫХ ДВУХКООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОБЪЕМНЫХ, ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ И КНИ-ПОДЛОЖКАХ

К. ф.-м. н. В. Л. Перевертайло, А. С. Крюков, А. В. Перевертайло

НПП «БИТ»  
Украина, г. Киев  
detector@carrier.kiev.ua

*Разработана технология, изготовлены и исследованы экспериментальные образцы двухкоординатных монокристаллических диодных массивов на основе кремниевых подложек: объемных, эпитаксиальных и КНИ. Представлены результаты технологического моделирования. Детекторы предназначены для измерения распределения дозы в высокоэнергетических пучках при лучевой терапии. Данные дозиметрии на пучках показали расхождение с данными, полученными на дозиметрических пленках и с ионизационными камерами, в пределах 1–1,5 %, что позволяет применять детекторы для оценки качества радиационных обработок в радиотерапии.*

*Ключевые слова: монокристаллический диодный массив, планарная технология, объемные Si-подложки, эпитаксиальные и КНИ-детекторы, дозиметрия, радиационная терапия.*

Эксперименты и исследования в области физики высоких энергий (ФВЭ) привели к разработке полупроводниковых многоэлементных координатно-чувствительных детекторов, в частности трековых вершинных детекторов высокоэнергетических (ВЭ) частиц и излучений с высоким пространственным разрешением и соответствующих многоканальных систем электроники, для регистрации сигналов и сбора данных, способных проводить измерения с высоким временным разрешением. В последнее время многие исследователи работают над тем, чтобы перенести достижения технологий полупроводниковых детекторов из ФВЭ в радиационную медицину (РМ) для дозиметрии пучков ВЭ частиц и излучений в лучевой терапии. Отметим, что в радиационной медицине в настоящее время доминируют газоразрядные ионизационные камеры, в том числе и многоэлементные.

Полупроводниковые детекторы имеют ряд преимуществ, таких как высокое пространственное разрешение (десять доли миллиметра), постоянство отношения тормозной способности электронов в кремнии относительно воды в широком диапазоне энергий (тканеэквивалентность), высокую эффективность регистрации, считывание в реальном времени и др. Однако для их использования в медицине требуется проведение исследований, связанных с точностью измерения дозы (в пределах 1%), стабильностью параметров в процессе облучения, независимостью чувствительности от скорости набора дозы, независимостью отклика от направления излучения.

В [1] описан кремниевый микростриповый детектор с высоким пространственным разрешением (шаг 0,2 мм), изготовленный на монокристаллической подложке высокоомного кремния, подобного тому, что используется в ФВЭ. Полученные данные близки к описанным выше требованиям к детектору.

В ФВЭ объемные подложки из высокоомного кремния зонной плавки (FZ) наилучшим образом удовлетворяют требованиям полного сбора заряда, созданного в материале подложки на протяжении трека ВЭ частицы (рис. 1, а), чтобы как можно точнее определить энергию частицы, как правило, в режиме регистрации одиночных событий. При этом область пространственного заряда (ОПЗ) распространяется на всю толщину пластины (обычно  $\approx 300$  мкм и более), т. е. реализуется режим полного обеднения, когда во всем объеме подложки существует электрическое поле, растягивающее электронно-дырочные пары в противоположные стороны.

В радиационной медицине необходимо измерять локальную дозу, которая связана с зарядом, выделенным в определенном объеме, а в случае объемной подложки, как на рис. 1, а, сложно точно определить объем, в котором выделился заряд в треке частицы. Поэтому были предложены различные варианты конструкций, где элементы детектора имеют точно известную геометрию и объем, например, эпитаксиальные детекторы и слои кремний на изоляторе (КНИ), как показано на рис. 1, б, в.

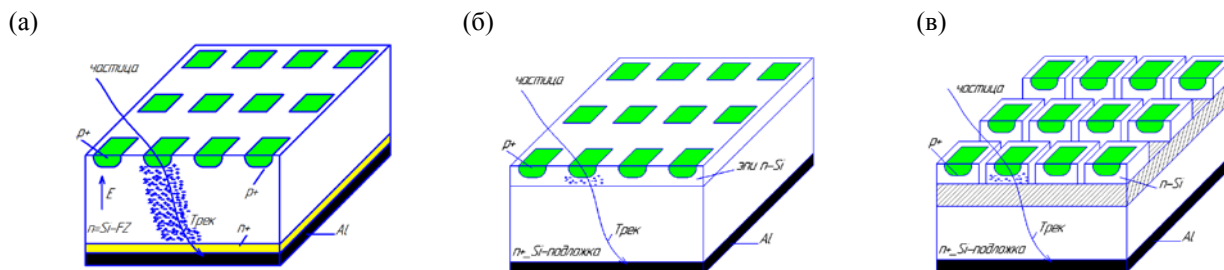


Рис. 1. Конструкция детекторов на объемной (а), эпитаксиальной (б) и КНИ (в) подложках

В последнее время эпитаксиальные и КНИ-структуры активно исследуются в детекторах для мониторинга радиационных пучков в медицине, в том числе для дозиметрии излучений и частиц. Их преимуществом является возможность формирования строго определенной геометрии области собирания заряда, образовавшегося при поглощении энергии частицы или излучения [1, 2], что позволяет повысить точность определения дозы при лучевой терапии в процессе облучения тканей и органов человека ВЭ-пучками. Кроме того, детекторы на основе эпитаксиальной пленки или КНИ на высокоомном кремнии характеризуются низким напряжением полного обеднения, низкими токами утечки, которые пропорциональны толщине пленки, высоким быстродействием, что позволяет применять их при высоких градиентах величины дозы в радиационной терапии с модуляцией интенсивности (IMRT) и повышенных требованиях к точности дозиметрических измерений в условиях двухкоординатного измерения динамически меняющейся мощности облучения.

Одной из основных проблем, препятствующих быстрому внедрению таких твердотельных детекторов в медицине, является зависимость их радиационной чувствительности от эффектов, обусловленных радиационным воздействием. При увеличении дозы облучения эпитаксиальной или КНИ-структур радиационные нарушения приводят к изменению исходных электрофизических параметров структуры (времени жизни неосновных носителей заряда, величины встроенного заряда, эффективности взаимодействия с пучками и др.), что ведет к изменению радиационной чувствительности. Поэтому выбор технологии и конструкции детектора определяется требованием максимальной радиационной стойкости, в данном случае сохранением радиационной чувствительности. В этом отношении предпочтение имеют детекторы на кремнии  $p$ -типа, причем использование предоблучения позволяет сдвинуть характеристики за пределы участка сильной зависимости от дозы.

Данный доклад посвящен разработанной технологии новых детекторов с  $n^+p$ -переходами на основе эпитаксиальных пленок с проводимостью  $p$ -типа и детекторов на структурах КНИ, результаты исследований которых были представлены нами в [2—6] и многих других. Рассмотрены различные варианты конкретных конструкций детекторов и параметры эпитаксиальных структур, оптимальные для их применения в высокоточной дозиметрии ВЭ-излучений и частиц в радиационной медицине. Исследованы электрофизические и радиационные характеристики конкретных приборов — одиночных, линейных и матричных координатно-чувствительных детекторов для дозиметрии.

Результаты исследования чувствительности детекторов с увеличением дозы, в том числе для варианта с предварительным облучением дозой до 50 кГр, показывают достаточно высокую стабильность чувствительности (около 2%), а распределения дозы по глубине в водном фантоме сопоставимы с аналогичными распределениями, измеренными традиционно применяемой для дозиметрии ионизационной камерой в пределах 0,7—1,0%.

Моделирование полного технологического процесса изготовления изделий является сложной и трудоемкой задачей, поэтому в большинстве случаев оправданным является выделение блоков маршрута наиболее критичных и важных для отработки технологии. В отношении кремниевых детекторов с точки зрения организации моделирования технологических процессов нами предложено разбить технологический маршрут изготовления на отдельные функционально оправданные технологические блоки, связанные с формированием ионно-имплантированных слоев  $p$ -типа и  $n$ -типа и проведением связанных с ними высокотемпературных операций:

**блок 1:** формирование  $n^+$ -слоя на подложке  $n$ -типа для создания контактов на лицевой стороне пластины;

**блок 2:** формирование  $p^+$ -слоя на подложке  $n$ -типа для создания  $p^+n$ -перехода на лицевой стороне пластины;

**блок 3:** формирование  $n^+$ -слоя на подложке  $n$ -типа для создания контактов на обратной стороне пластины.

Для подложек  $p$ -типа — те же блоки с инверсией типа слоев  $n$  на  $p$ .

Результаты одномерного моделирования распределения концентрации примесей фосфора и бора при имплантации, активации и разгонке в высокотемпературных процессах с использованием программы SUPREM II (IV) представлены на рис. 2 (по оси абсцисс — глубина в подложку, мкм; по оси ординат — концентрация, атом/см<sup>-3</sup>).

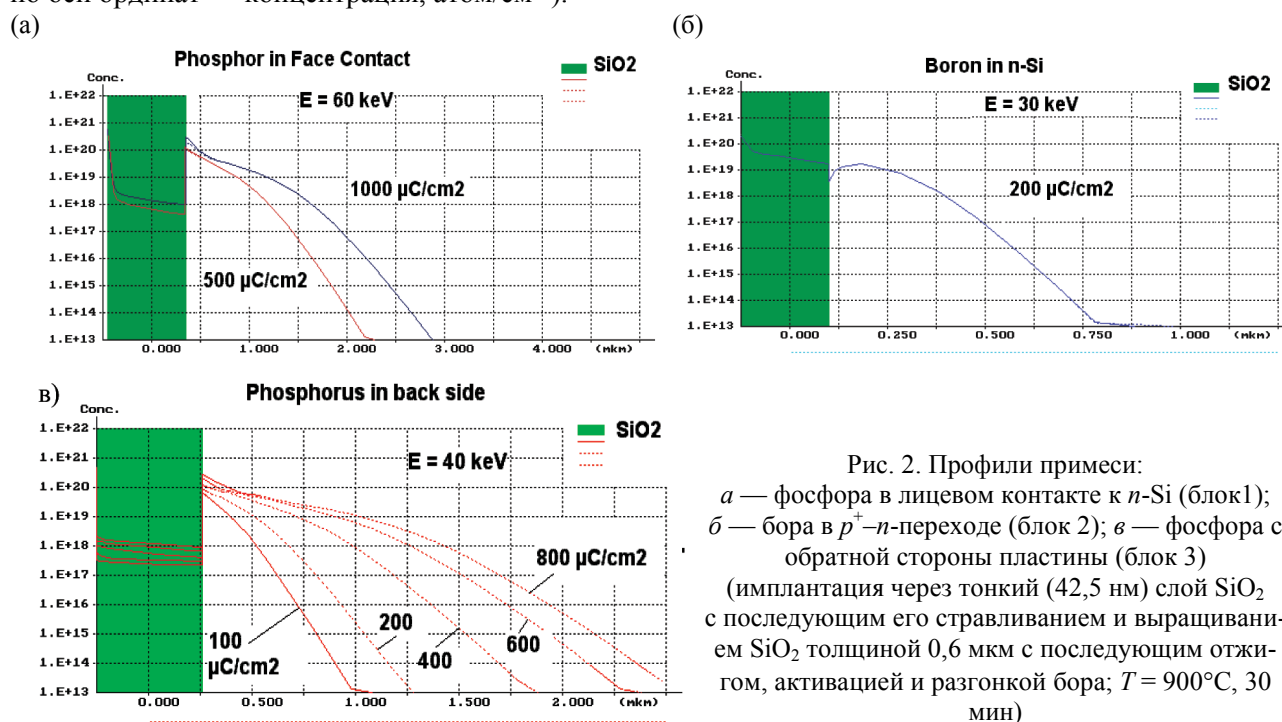


Рис. 2. Профили примеси:  
 а — фосфора в лицевом контакте к *n*-Si (блок 1);  
 б — бора в *p*<sup>+</sup>-*n*-переходе (блок 2); в — фосфора с обратной стороны пластины (блок 3)  
 (имплантация через тонкий (42,5 нм) слой SiO<sub>2</sub> с последующим его стравливанием и выращиванием SiO<sub>2</sub> толщиной 0,6 мкм с последующим отжигом, активацией и разгонкой бора; *T* = 900°C, 30 мин)

Аналогичные результаты моделирования были получены для подложек *p*-Si, а также для эпитаксиальных и КНИ-структур.

Таким образом, технология, разработанная ранее авторами для объемных детекторов в области ФВЭ и затем примененная с соответствующими модификациями для эпитаксиальных и КНИ-детекторов, предназначенных для радиационной медицины, позволила получить дозиметрические приборы, удовлетворяющие требованиям РМ и использовать их для оценки качества радиационных обработок в радиотерапии.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wong J.H.D., Cutajar D., Lerch M.L.F. et al. From HEP to medical radiation dosimetry – The silicon strip detector dose magnifying glass // *Radiation Measurements*.— Vol. 46.— 2011.— P. 1615—1618.
2. Aldosari A. H., Espinoza A., Robinson D. et al. Characterisation of an innovative p-type epitaxial diode for dosimetry in modern external beam radiotherapy // *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*— Vol. 60(6).— 2013.— P. 4705—4712.
3. Biasi G., Davis J., Petasecca M. et al. On monolithic silicon array detectors for small-field photon beam dosimetry // *IEEE Transactions on Nuclear Science*.— Vol. 65.— 2018.— N 9.— P. 2640—2649.
4. Livingstone J., Prokopovich D.A., Petasecca M. et al. Charge Collection in n-SOI planar microdosimeters // *IEEE Trans. on Nuclear Science*.— Vol. 60.— 2013.— N 6.— P. 4289—4296.
5. Wong J. H. D., Lerch M. L. F. et al. Characterization of a novel two dimensional diode array the “magic plate” as a radiation detector for radiation therapy treatment // *Med. Phys.*— Vol. 39(5).— 2012.— P. 2544—2559.
6. Перевертайло В.Л. Диодный массив на *p*-кремнии для мониторинга дозы в радиационной медицине // Труды XVII МНПК «СИЭТ-2016».— Украина, г. Одесса.— 2016.— С. 200—201.

V. L. Perevertailo, A. S. Kryukov, A. V. Perevertailo

#### Technology of monolithic 2-coordinate detectors on bulk, epitaxial and SOI substrates

The authors develop a technology and manufacture and investigate experimental samples of two-coordinate monolithic diode arrays based on bulk, epitaxial and SOI substrates. The paper presents the results of technological modeling. Detectors are designed to measure dose distribution in high-energy beams during radiation therapy. The dosimetry data on the beams shows a discrepancy with the data obtained on dosimetric films and by ionization chambers within 1–1.5%, which allows the use of detectors to assess the quality of radiation treatments in radiotherapy.

*Keywords:* monolithic diode array, planar technology, bulk Si-substrates, epitaxial and SOI detectors, dosimetry, radiation therapy.