

УДК 621.315.59

## **ВЛИЯНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ФОТОРЕЗИСТОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

*В. А. Мокрицкий<sup>1</sup>, Я. И. Лепих<sup>2</sup>, Е. М. Курицын<sup>1</sup>, О. В. Банзак<sup>1</sup>*

1 — Одесский национальный политехнический университет

2 — Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова

E-mail: mokrickiy@mail.ru

### **Аннотация**

#### **ВЛИЯНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ФОТОРЕЗИСТОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

*В. А. Мокрицкий, Я. И. Лепих, Е. М. Курицын, О. В. Банзак*

Исследована радиационная стойкость параметров датчиков ИК-излучения к облучению электронами с энергией 2,3 и 3,0 МэВ.

На основе известной теории работы фоторезисторов показана связь радиационной стойкости их параметров с электрофизическими свойствами эпитаксиальных слоев кремния, используемых для изготовления таких приборов. Исследованы изменения концентрации и подвижности носителей заряда в условиях облучения разных систем “слой-подложка”. Предлагается объяснение причин таких изменений и условия проектирования радиационно стойких приборов.

**Ключевые слова:** радиация, электрон, эпитаксиальный слой, фотоответ, радиационная стойкость

### **Анотація**

#### **ВПЛИВ ШВИДКИХ ЕЛЕКТРОНІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ЕПІТАКСІАЛЬНИХ ШАРІВ КРЕМНІЮ ТА ПАРАМЕТРИ ФОТОРЕЗИСТОРІВ НА ЇХ ОСНОВІ**

*В. А. Мокрицький, Я. І. Лепих, Є. М. Куріцин, О. В. Банзак*

Досліджено радіаційну стійкість параметрів датчиків ІЧ- випромінювання до опромінення електронами з енергією 2,3 й 3,0 Мев.

На основі відомої теорії роботи фоторезисторів показаний зв'язок радіаційної стійкості їхніх параметрів з електрофізичними властивостями епітаксиальних шарів кремнію, що використовуються для виготовлення таких приладів. Досліджено зміни концентрації й рухливості носіїв заряду в умовах опромінення різних систем “шар-підкладка”. Пропонується пояснення причин таких змін й умови проектування радіаційно стійких приладів.

**Ключові слова:** радіація, электрон, епітаксійний шар, фотовідгук, радіаційна стійкість

**Abstract**

**EFFECT OF FAST-MOVING ELECTRONS ON THE PROPERTIES OF THE EPITAXIAL LAYERS OF SILICON AND THE PARAMETERS OF PHOTORESISTORS BASED ON THEM**

*V.A. Mokritsky, Ya.I. Lepikh, E.M. Kuritsyn, O.V. Banzak*

Radiating stability of parameters gauges of IR-radiation an irradiation electrons with energy 2,3 and 3,0 MeV is investigated.

On the basis of the known theory work of photoresistors communication of radiating stability of their parameters with electrophysical properties epetacselition the layers of silicon used for manufacturing of such devices is shown. Changes of concentration and mobility of carriers a charge in conditions of an irradiation different systems “layer-substrate” are investigated. The explanation of the reasons of such changes and conditions of designing radiation proof devices is offered.

**Keywords:** radiation, electron, epetacselition layer, photoanswer, radiating stability

**Вступление**

Датчиком ИК-излучения служил фоторезистор, созданный на основе эпитаксиальных слоев (ЭС) кремния, образующих с монокрис-

таллической подложкой р-п-переход. Использовались серийно выпускаемые ЭС кремния. В связи с этим сохранены условные обозначения их параметров, например:

25КЭФ0,1 = ЭС, h=25 мкм, кремний, легирован фосфором, ρ = 0,1 Ом·см  
 400КДБ10 подложка, h=400 мкм, кремний, легирован бором, ρ = 10 Ом·см

КЭС 0,1 — эпитаксиальный слой кремния, легирован сурьмой, ρ = 0,1 Ом·см

Стойкость параметров датчиков к воздействию радиационного облучения обычно оценивают степенью его влияния на электрофизические свойства используемого в них материала. Подобную взаимосвязь можно объяснить следующим образом.

Результаты радиационного воздействия на фоточувствительные элементы можно оценить по изменениям сигнала фототовета [1]. Для фоторезистора в режиме холостого хода, когда сопротивление нагрузки намного больше сопротивления фоторезистора, и малых сигналов в полупроводнике с электронным типом проводимости фототовет определяется формулой:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_T} = \frac{G(\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p)}{n_T \mu_n}, \quad (1)$$

где  $U$  — смещение на фотоприемнике;  $\Delta U$  — изменение напряжения на фотоприемнике при его освещении;  $\sigma_T$  — темновая электропроводность полупроводника;  $\Delta \sigma$  — фотопроводимость;  $G$  — скорость генерации носителей заряда;  $n_T$  — темновая концентрация электронов;  $\tau_n, \tau_p, \mu_n, \mu_p$  — время жизни и подвижность электронов и дырок, соответственно.

С учетом  $\mu_n \gg \mu_p$  (1) примет вид:

$$\Delta U = \frac{G \tau U}{n_T}. \quad (2)$$

Время жизни носителей заряда определяется механизмом рекомбинации и зависит от концентрации носителей. В данном случае время жизни равно:

$$\tau_{A_0} = 4 \tau_i \left( \frac{n_i}{n} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\tau_i, n_i$  — время жизни и концентрация носителей заряда в собственном материале;  $n$  — фактическое значение концентрации.

В облученном материале время жизни изменяется:

$$\tau_A = 4 \tau_i n_i^2 \left( n_0 + \frac{dn}{dF} F \right)^{-2}, \quad (4)$$

где  $n_0$  — начальное значение концентрации носителей в образце;  $\frac{dn}{dF}$  — средняя скорость введения носителей при облучении;  $F$  — интегральный поток ионизирующего излучения.

Относительное изменение времени жизни будет равно:

$$\frac{\tau_A}{\tau_{A_0}} = n_0^2 \left( n_0 + \frac{dn}{dF} F \right)^{-2}. \quad (5)$$

Таким образом, для решения задачи о радиационной стойкости фоторезистора необходимо исследовать влияние облучения на свойства используемых в нем слоев кремния.

### Эксперимент

Для измерения электрофизических параметров ЭС использовались известные методы. Удельное сопротивление по глубине слоев измеряли четырехзондовым методом при удалении частей ЭС химическим травлением. Концентрация и подвижность носителей заряда измерялись по методу Ван-дер-Пау.

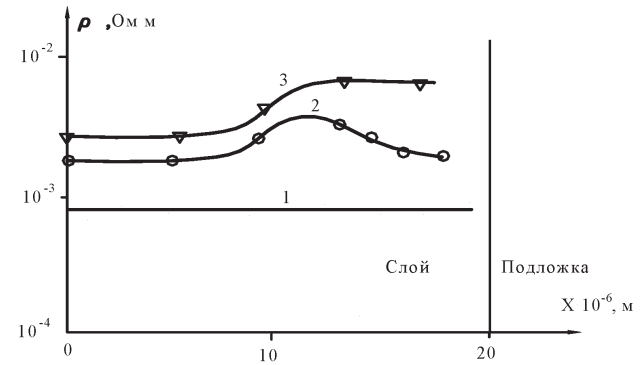
Образцы ЭС кремния облучались электронами с энергией 2,3 и 3,0 МэВ дозами от  $10^{15}$  до  $10^{20}$  м<sup>-2</sup>. Использовался ускоритель типа ЭЛУ-4.

Профиль распределения удельного сопротивления по глубине слоя исследован для системы типа  $\frac{КЭФ0,1}{КДБ10}$  (рис. 1). Обнаружено, что

облучение увеличивает удельное сопротивление на поверхности слоя. Это происходит за счет образования радиационных дефектов, приводящих к компенсации основных носителей и уменьшению их концентрации и подвижности. Кроме того, облучение в объеме слоя образует высокоомный участок. Его протяженность и положение зависят от дозы облучения. Появление такого участка обусловлено образованием в локальной области слоя повышенной концентрации радиационных дефектов. Взаимодействуя с атомами примеси они образуют комплексы, компенсирующие материал. Границы слоя служат стоками для радиационных дефектов, поэтому эффект компенсации вблизи них не возникает. Влияние электронов с энергией 3 МэВ на плотность дислокаций в слоях и положение границ с подложкой определялось металлографическими методами с применением селективных травителей: для ориентации (111) — MS; для ориентации (100) — Sessco. В системах с *p-n*-переходами плотность дислокаций на поверхности слоя существенно зависит от дозы облучения, начиная с величины  $1 \cdot 10^{19}$  м<sup>-2</sup> (рис. 2).

Такой эффект можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, взаимодействие радиационных дефектов с дислокациями может понизить их барьер “переползания” и вывести на боковую грань. Во-вторых, в объеме

слоя могут создаваться условия “захлопывания” дислокаций на радиационных дефектах. В-третьих, облучение создает комплексы атомов примеси с вакансиями, что должно изменять долю дислокаций несоответствия в общем числе дефектов [2].



**Рис. 1.** Распределение удельного сопротивления по глубине эпитаксиального слоя кремния КЭФ 0,1: 1 — без облучения; 2 — доза  $1 \cdot 10^{20}$ ; 3 — доза  $6,5 \cdot 10^{20}$  м<sup>-2</sup>

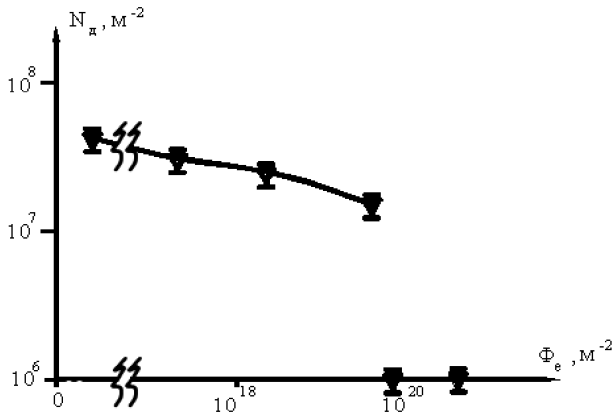
Граница эпитаксиального слоя с подложкой в различных системах определялась с помощью окрашивания “косого клина” в травителях. Такой метод позволяет определить положение электрической границы. Для большинства систем не наблюдается изменений этого параметра с ростом дозы облучения (рис. 3). Это позволяет утверждать, что под действием электронного облучения в большинстве случаев не происходит заметного перераспределения атомов легирующей примеси вблизи границы слой-подложка. Исключение составляет система типа  $\frac{КДБ1,5}{КЭС0,01}$ , для которой, по-видимому, происходит такое перераспределение.

Зависимость скорости удаления носителей заряда от их исходного количества в слоях *n*-типа проводимости при облучении электронами с энергией 2,3 МэВ изучена на примере кремниевых систем четырех типов (табл. 1) [3].

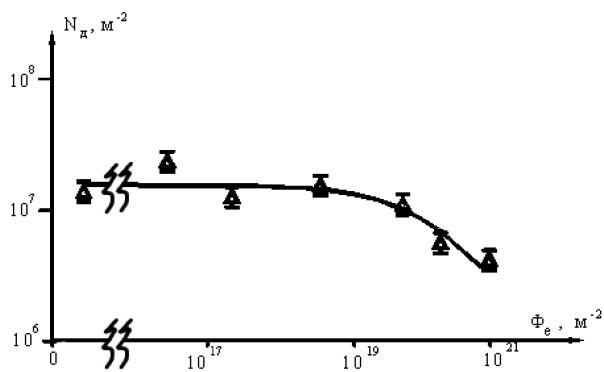
Во всех эпитаксиальных слоях после облучения наблюдается уменьшение концентрации носителей заряда, существенно зависящее от ее исходного значения  $n_0$  (рис. 4).

Влияние облучения в этих условиях можно оценить с помощью коэффициента повреждения материала  $K_n$  по формуле:

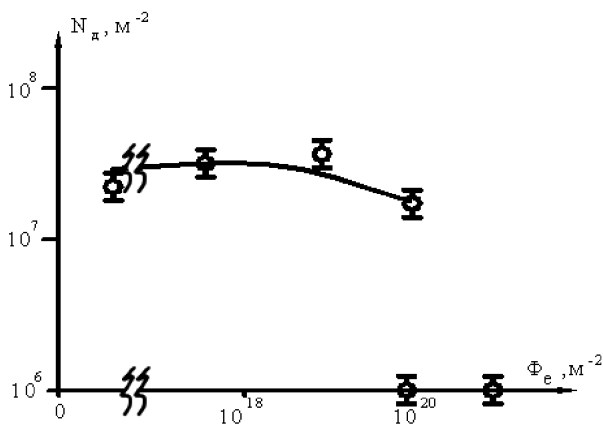
$$n = n_0 \cdot \exp(-K_n \Phi) \quad (6)$$



а



б



в

Рис. 2. Дозовая зависимость плотности дислокаций на поверхности эпитаксиальных слоев кремния. Системы типа: а —  $\frac{KЭФ0,4}{КДБ10}$ ; б —  $\frac{KЭФ0,1}{КДБ10}$ ; в —  $\frac{КДБ1,5}{КЭС0,1}$

и экспериментальным значениям изменения концентрации носителей заряда в слоях. Кроме того, использование слоев с различным значением исходной концентрации носителей заряда позволило с помощью формул

$$-\frac{dn}{d\Phi} = K_n \cdot n_0 = \frac{n_0^{1-\gamma}}{C_0},$$

$$-\frac{dp}{d\Phi} = K_p \cdot p_0 = \frac{p_0^{1-\gamma}}{C_0}, \quad (7)$$

определить коэффициенты  $C_0$  и  $\gamma$ , зависящие от энергии электронов:  $C_0 = 1,45 \cdot 10^{11}$  и  $\gamma = 0,337$ . На рисунке 4 сплошные кривые построены с использованием этих значений. Видно, что практически все экспериментальные точки для различных слоев кремния хорошо совпадают с расчетными кривыми. Это говорит о возможности применения приведенных коэффициентов для оценки изменений под облучением концентрации носителей заряда в слоях, если ее исходные значения лежат в пределах от  $7,5 \cdot 10^{20}$  до  $1,2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ .

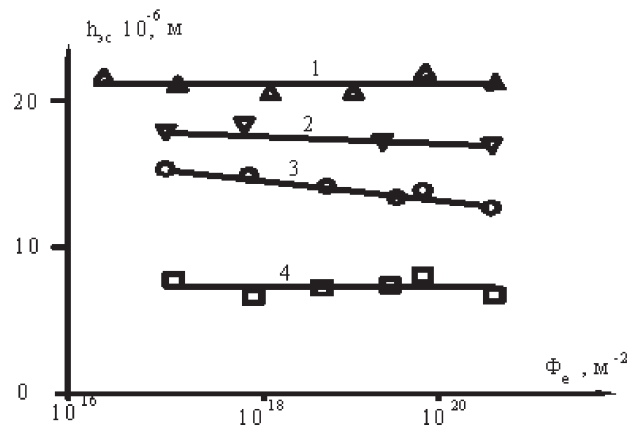


Рис. 3. Дозовая зависимость положения электрической границы слоев с подложками при облучении электронами с энергией 3,0 МэВ.

Системы типа: 1 —  $\frac{22КЭФ0,1}{400КДБ10}$ ; 2 —  $\frac{15КЭФ0,4}{250КДБ10}$ ; 3 —  $\frac{11КДБ1,5}{250КЭС0,01}$ ; 4 —  $\frac{7КДБ0,5}{250КДБ0,005}$

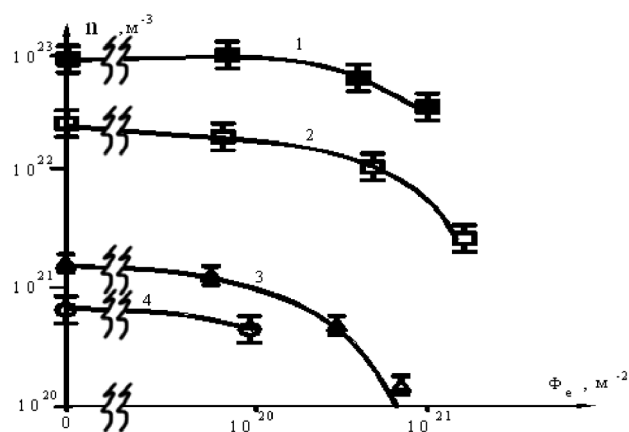
Таблица 1

Исходные параметры кремниевых систем, подвергнутых облучению электронами с энергией 2,3 МэВ. Подложка КДБ 10

Слой	$K_n \cdot 10^{-21}, \text{ м}^{-2}$	$dn/d\Phi, \text{ м}^{-1}$	$h_c \cdot 10^{-6}, \text{ м}$	$n_0, \text{ м}^{-3}$	$\mu_n^0, \text{ м}^2/\text{Вс}$
КЭФ 7,0	6,3	4,7	16	$7,5 \cdot 10^{20}$	0,1200
КЭФ 4,0	4,2	6,3	16	$1,5 \cdot 10^{21}$	0,1100
КЭФ 0,3	2,7	67,5	16	$2,5 \cdot 10^{22}$	0,0990
КЭФ 0,08	2,5	300	16	$1,2 \cdot 10^{23}$	0,0960

Сравним полученные значения коэффициентов с их величинами для объемных мо-

нокристаллов кремния, полученных методом Чохральского и облученных в аналогичных условиях. Для интервала исходных концентраций носителей заряда ( $6 \cdot 10^{18}$  ч  $1 \cdot 10^{23}$ )  $\text{м}^{-3}$  получено:  $C_0 = 1,6 \cdot 10^5$  и  $\gamma = 0,75$  [3]. Различие этих величин от приведенных выше определяет отличие коэффициента  $K_n$  для слоев и объемных монокристаллов: при концентрации носителей заряда порядка  $1 \cdot 10^{21} \text{м}^{-3}$  значения  $K_n$  практически совпадают, а для концентрации  $1 \cdot 10^{23} \text{м}^{-3}$  его величина для слоев почти на порядок больше. Это говорит о том, что в нашем случае с повышением исходной концентрации носителей заряда изменяется роль радиационного облучения в образовании дефектов и компенсации носителей заряда вводимыми комплексами “дефект — атом примеси”.



**Рис. 4.** Дозовая зависимость концентрации носителей заряда в слоях кремния при облучении электронами с энергией 2,3 МэВ.

Исходная концентрация носителей заряда в слоях до облучения:

1 —  $1,2 \cdot 10^{23}$ ; 2 —  $2,5 \cdot 10^{22}$ ; 3 —  $1,5 \cdot 10^{21}$ ; 4 —  $7,5 \cdot 10^{20} \text{м}^{-3}$ ; линии — расчет; точки — эксперимент

Зависимость начальной скорости удаления носителей зарядов от их исходной концентрации для эпитаксиальных слоев более резкая, чем для объемных монокристаллов (рис. 5) [4].

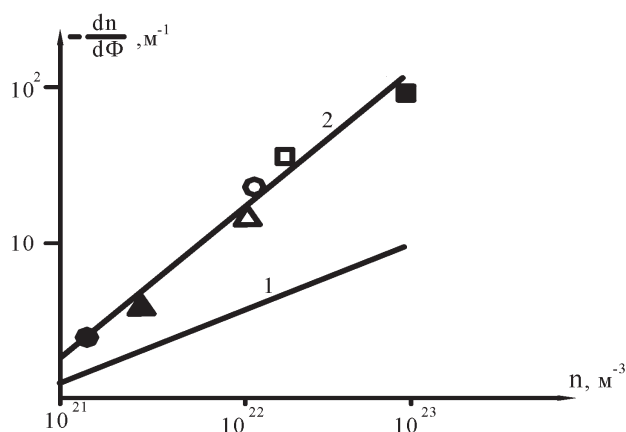
Влияние толщины слоя на скорость удаления носителей заряда исследовалось путем сравнения результатов, полученных для образцов, представленных в таблицах 1 и 2. Результаты достаточно хорошо описываются одной зависимостью для эпитаксиальных слоев с различной толщиной (рис. 5). Это позволяет сделать вывод, что толщина слоев не влияет на изменение концентрации носителей заряда при облучении электронами с энергией 2,3 МэВ.

Таблица 2

Исходные параметры слоев кремния до облучения электронами с энергией 2,3 МэВ. Подложка — кремний КДБ-10

Слой	$h_c \cdot 10^{-6}$ , м	$n_0$ , $\text{м}^{-3}$	$\frac{\mu_n^0}{\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}}$
КЭФ 1,0	7,0	$8 \cdot 10^{21}$	0,0950
КЭФ 1,0	12,0	$6,6 \cdot 10^{21}$	0,1000
КЭФ 0,1	22,0	$1 \cdot 10^{23}$	0,0560

Исследована зависимость холловской подвижности и исходной концентрации носителей заряда в слоях кремния от дозы облучения. Зависимость слабая для слоев с исходной концентрацией носителей заряда  $1,2 \cdot 10^{23} \text{м}^{-3}$  и значительно сильнее при  $7,5 \cdot 10^{20} \text{м}^{-3}$  (рис. 6). Это подтверждает известный факт: изменение под облучением подвижности носителей заряда, как и их концентрации, преобладает у менее легированных слоев [5].



**Рис. 5.** Зависимость скорости удаления носителей заряда от их исходной концентрации: 1 — по данным работы [4]; 2 — экспериментальные значения для слоев ( $\Phi = 7,5 \cdot 10^{19} \text{м}^{-2}$ ):

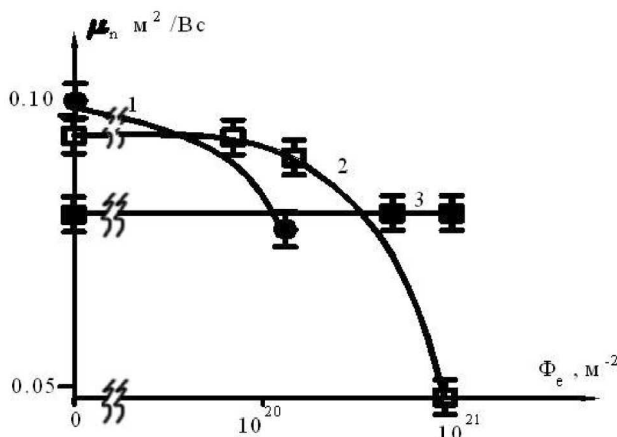
● — КЭФ 7,0  $h_{zc} = 16 \cdot 10^{-6}$  м;  
 ▲ — КЭФ 4,0  $h_{zc} = 16 \cdot 10^{-6}$  м;  
 △ — КЭФ 1,0  $h_{zc} = 12 \cdot 10^{-6}$  м;  
 ○ — КЭФ 1,0  $h_{zc} = 7 \cdot 10^{-6}$  м;  
 □ — КЭФ 0,3  $h_{zc} = 16 \cdot 10^{-6}$  м;  
 × — КЭФ 0,1  $h_{zc} = 22 \cdot 10^{-6}$  м;  
 ■ — КЭФ 0,08  $h_{zc} = 16 \cdot 10^{-6}$  м

Представленные выше результаты позволяют оценить стойкость параметров датчиков ИК-излучения на основе ЭС кремния к облучению электронами. Сопоставление формул (1)-(5) показывает, что с точки зрения радиационной стойкости таких приборов, предпочтителен режим их работы с пролетом неосновных носителей заряда при малом уровне внешнего смещения. В этом случае относительное изменение

фотоответа на фоторезисторе под действием облучения можно описать отношением [1]:

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_0} = n_0^3 \left( n_0 + \frac{dn}{dF} F \right)^{-3}, \quad (8)$$

где  $\Delta U_0$  — фотоответ до облучения.



**Рис. 6.** Дозовая зависимость подвижности носителей заряда в слоях кремния при облучении электронами с энергией 2,3 МэВ: 1 — слой КЭФ 7,0; 2 — КЭФ 0,3; 3 — КЭФ 0,08

Для энергии электронов 3,0 МэВ и дозе облучения  $\Phi = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$  скорость введения носителей заряда составит  $6,3 \text{ см}^{-1}$ . Из (8) получим, что  $\Delta U / \Delta U_0 \approx 0,15$ : облучение уменьшает чувствительность исследуемых приборов в заданных условиях на 15%. Причина этого — деградация под облучением свойств эпитаксиальных слоев, исследованных выше.

### Выводы

Облучение эпитаксиальных слоев кремния электронами с энергиями 2,3 и 3,0 МэВ дозами до  $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$  незначительно увеличивает концентрацию носителей заряда может быть как за счет перевода атомов примеси в активное состояние, так и за счет уменьшения концентрации компенсирующих центров. После дозы  $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$  наблюдается уменьшение концентрации носителей заряда. Скорость их выведения в слоях зависит от ее исходного значения вида легирующей примеси, типа подложки. Она больше, чем у объемных монокристаллов кремния [5].

Облучение электронами, начиная с дозы  $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$ , уменьшает подвижность носителей заряда. Относительные изменения этого па-

раметра по абсолютной величине меньше, чем изменения их концентрации.

В системах *n-p*-типа при облучении электронами в объеме слоя на определенной глубине возникает высокоомный участок, размеры и положение которого зависят от дозы облучения.

Облучение электронами дозами выше  $1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  уменьшает плотность дислокаций на поверхности слоя. Это можно объяснить их взаимодействием с радиационными дефектами и изменением параметров кристаллической решетки при образовании комплексов “радиационный дефект — атом примеси”.

Для большинства эпитаксиальных слоев не обнаружено смещения их границы с подложкой при облучении электронами.

При заданных в данной работе условиях изготовления (концентрация и подвижность носителей заряда), конструкции (толщина ЭС, размер рабочей области) и облучения электронами изменения параметров датчиков ИК-излучения происходят в допустимых пределах [3]. Увеличение радиационной стойкости при проектировании датчика может быть достигнуто путем оптимального сочетания его заданных параметров (фотоответ, разрешающая способность) и конструкции с максимально возможными для них значениями концентрации ( $1 \cdot 10^{20} - 1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ), подвижности носителей заряда и толщины эпитаксиального слоя кремния.

### Литература

1. Радиационная стойкость в оптоэлектронике / Ф.А. Заитов, Н.Н. Литвинова, В.Г. Савицкий, В.Г. Середин / Под ред. В.Г. Середина. — М.: Воениздат, 1987. — 166 с.
2. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников / М.: Металлургия, 1984. — 256 с.
3. Кулаков В.М., Курицын Е.М., Мокрицкий В.А. Деградация эпитаксиальных слоев кремния при облучении электронами // Всесоюзная конференция “Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов”. Тезисы докладов, ч. 1. — Кишинев, 1982. — С. 85.
4. Козлов И.Б., Логвиненко Т.А., Лугаков П.Ф., Ткачев В.Д. Изменение концентрации носителей тока в кремнии при облучении быстрыми электронами // Физ. и техн. полупр., 1974, т. 8, вып. 8. — С. 1431-1435.
5. Вавилов В.С., Кекелидзе К.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники / М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 192 с.