

УДК 621.382.001.63

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ  
С ОХРАННЫМИ ОБЛАСТЯМИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ  
МАЛОМОЩНЫХ СВЕТОВЫХ ПОТОКОВ***Корытко Н.Н.,<sup>1</sup> Залесский В.Б.,<sup>2</sup> Малышев В.С.,<sup>3</sup> Хатько В.В.<sup>1</sup>*<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup> Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь<sup>3</sup> НТЦ Белмикросистемы, г. Минск, Республика Беларусь

*Проведено моделирование конструкции охранной области и величины напряжения пробоя лавинного фотодиода со структурой диода Рида. Показано влияние полевой обкладки с системой охранных колец на область пробоя  $n^+$ - $p$  перехода и предложен метод ее реализации. Установлен требуемый профиль примеси в эпитаксиальной пленке при концентрации примеси в подложке  $\sim 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , определены пробивные напряжения диода с охранными кольцами, распределение в нем электрического поля и области пробоя.*

**Введение**

В последние годы в мире вырос интерес к разработке приборов, включающих оптоэлектронные компоненты. В технических приложениях (атомная энергетика, астрономия, оптика и др.) существует необходимость регистрации и детектирования очень слабых световых потоков с мощностью  $\sim 10^{-10}$ – $10^{-11}$  Вт. Поскольку обычные фотодиоды не позволяют решать подобные задачи, возникает необходимость использования других средств. Один из подходов заключается в применении оптических детекторов на эффекте лавинного умножения [1]. Лавинные фотодетекторы или фотодиоды (ЛФД) обеспечивают внутреннее усиление регистрируемого сигнала в объеме полупроводника в 50–1000 раз. Отличительными особенностями приборов данного типа являются компактные размеры, высокая чувствительность, даже к малым световым сигналам, хорошая квантовая эффективность, низкая стоимость, а также возможность использования как в качестве дискретного прибора так и в качестве диодных матриц. Области применения ЛФД – оптическая локация и дальнометрия, регистрация ионизирующих излучений в физике частиц высоких энергий, ядерная физика, дозиметрия.

Использование данных приборов приводит к снижению размеров аппаратуры и улучшению пороговой чувствительности и позволяет

существенно упростить системы регистрации и обработки сигналов. Кроме того, они могут использоваться во всех областях, где требуется регистрация предельно малых световых импульсов в качестве современной альтернативы фотоэлектронным умножителям, имеющим значительные габариты, вес и требующим питание в несколько киловольт.

В настоящей работе предполагается описать алгоритм расчета основных характеристик ЛФД с использованием программ двумерного моделирования полупроводниковых приборов на основе программных пакетов от фирмы Synopsys и показать результаты моделирования и исследования конструкции фотодетекторов с системой охранных областей с целью получения необходимых данных для разработки и производства коммерческих образцов.

**Результаты исследований и их обсуждение**

Для изучения характеристик ЛФД за основу был взят диод Рида с конструкцией охранной области, состоящей из четырех охранных колец и полевой обкладки, позволяющей растягивать эквипотенциальные линии электрического поля его  $n^+$ - $p$  перехода и обеспечивающей, таким образом, увеличение пробивного напряжения диода (рисунок 1). Объектами исследования с помощью моделирования являлись конструкция охранной области и величина напряжения пробоя лавинного диода.

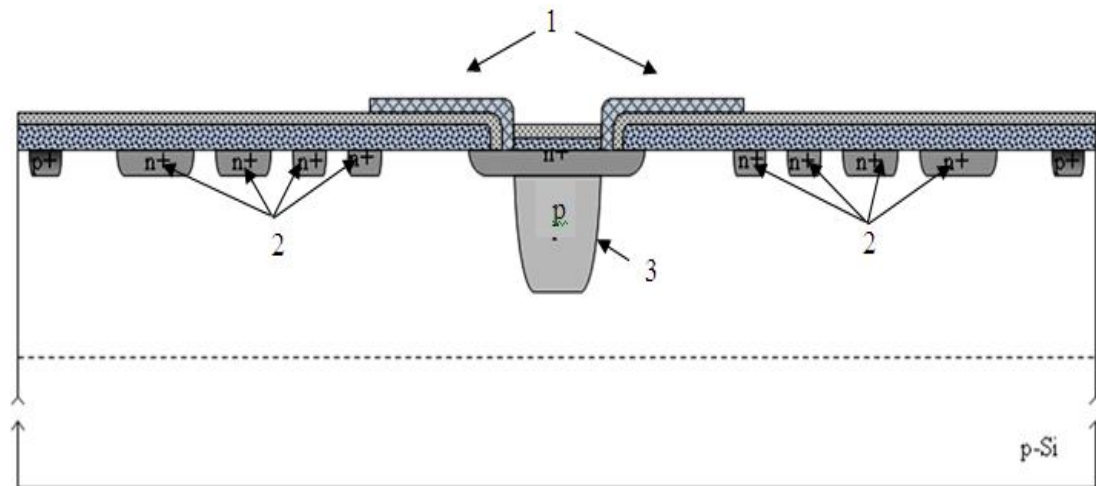


Рисунок 1 – Вертикальный разрез типовой структуры лавинного фотодиода с защитными кольцами ( $n^+ - p - p^- - p^+$ ):  
1 – полевая обкладка; 2 – защитные кольца; 3 – область «кармана»

Моделирование описанной выше структуры производилось с использованием программного пакета от фирмы Synopsys Taurus WorkBench (TWB).

Программный пакет TWB предназначен для моделирования техпроцесса изготовления элементов интегральных схем и расчета профиля распределения примеси.

Входными данными для программного моделирования являются: последовательность технологических операций (технологический маршрут изготовления изделия), включающая операции фотолитографии, диффузии, термические операции со всеми температурно-временными интервалами и расходами газов, эпитаксиальное осаждение кремния, осаждения диэлектрических и поликремневых слоев, травление, ионное легирование, топология элемента, поперечное сечение которого необходимо рассчитать.

Выходными данными программного моделирования являются: профиль распределения примеси в любой указанной точке данного элемента, электрофизические характеристики диэлектрических и кремниевых слоев в данной точке как конечные, так и на любом этапе формирования структуры, а также вольт-амперные характеристики приборов, например транзистора или диода.

Функциональные возможности Taurus-WorkBench отвечают абсолютному большинству потребностей в области моделирования интегральных микросхем (ИМС), современ-

ному развитию технологии полупроводникового производства.

Для инженеров нового поколения главной проблемой производства является решение задачи за кратчайшие сроки и с наименьшими материальными затратами. Данная проблема может быть решена с использованием физико-математического моделирования, которое реализовано в Taurus-WorkBench [2–4].

Для приведения теоретических расчетов в соответствие с экспериментальными значениями на первом этапе была выполнена работа по проверке модели рассчитываемой двумерной вертикальной структуры представленной на рисунке 1, моделей расчета ее пробивного напряжения и вольт-амперной характеристики с подбором основных электрофизических параметров. Для этого было проведено моделирование реального, изготовленного в технологическом процессе,  $p-n-p$  горизонтального транзистора,  $p-n$  переходы которого легли в основу конструкции лавинного фотодиода с известными экспериментальными значениями поверхностного сопротивления ( $\rho_s$ ) слоев разной проводимости, глубины залегания примесей ( $x_j$ ) и величиной пробивного напряжения коллектор-эмиттер  $U_{КЭ} \approx 91-93$  В. При расчете транзистора было получено значение  $U_{КЭ} \approx 90$  В, что хорошо согласовывалось с экспериментальными данными. После проверки вышеперечисленных моделей на примере расчета  $p-n-p$  горизонтального транзистора, на втором этапе работ было проведено моделирование кон-

струкции и основных характеристик лавинного фотодиода.

Чтобы получить величину пробивного напряжения  $U_{КЭ} \approx 90$  В и необходимые значения электрофизических параметров (глубины залегания примесей, удельное сопротивление слоев) лавинного фотодиода были использованы следующие функции модели, заложенной в программный пакет Taurus-WorkBench.

1. Для окисления–диффузии:

- адаптация сетки dif.adap – дает возможность пересчета дифференциальных уравнений распределения примеси в узлах кристаллической решетки;

- активация примеси act.tran – использует кратковременную модель для активации примеси;

- учет дефектов pd.trans – при активации данного параметра выбирается простая модель, включающая в себя полное двумерное решение для дефектов связанных с концентрацией. Рекомендуется для не сложного моделирования, в котором не требуется высокая точность решения. Позволяет значительно ускорить процесс расчета;

- pd.full – при активации данного параметра выбираются все возможные модели диффузии. Использование данной модели рекомендуется для моделирования, где требуется максимальная точность, или где важны эффекты связанные с высокой концентрацией, а также если используется модель для дефектов ионной имплантации.

2. Для ионной имплантации:

- адаптация сетки imp.adap – дает возможность моделировать процесс ионной имплантации с одновременным пересчетом дифференциальных уравнений для узлов сетки непосредственно в момент легирования примеси.

3. Для расчета пробивного напряжения  $U_{пр}$ :

- SRH – показывает, что используется рекомбинация Шокли-Рида-Холла с фиксированным временем жизни;

- ARORA – модель описания подвижности электронов и дырок в кремнии как функции, зависящей от концентрации и температуры [5];

- AUGER – показывает, что в расчетах учитывается Оже-рекомбинация носителей заряда;

- impact.i – показывает, что генерации носителей, происходящая при ионизации носителей, включена в решение независимо;

- параметры на границе раздела кремний-диэлектрик: подвижность электронов 500 см<sup>2</sup>/с; подвижность дырок 500 см<sup>2</sup>/с; заряд на границе раздела диэлектрик-полупроводник  $1 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup>; заряд в диэлектрике  $5 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>;

- параметры кремния: время жизни электронов  $2 \times 10^{-6}$  с; время жизни дырок  $2 \times 10^{-6}$  с.

4. Для расчета напряжения отсечки были использованы те же параметры модели, что и для расчета пробивного напряжения.

Все исследованные лавинные фотодиоды имели один тип конструкции охранной области, состоящей из четырех охранных колец и полевой обкладки. Алюминиевый электрод (обкладка) формировался между  $n^+$ -областью диода и  $n^+$ -областью первого охранного кольца, одного из четырех, расстояние между которыми варьировалось от 6 мкм и более.

Данная конструкция охранной области ЛФД была предназначена для растягивания электрического поля вдоль боковой поверхности  $n^+$ - $p$  перехода (рисунок 1) таким образом, чтобы максимальная напряженность поля создавалась только в вертикальном направлении перпендикулярном плоской части диода, где формируется более высокая концентрация примеси.

Более наглядно распределение потенциалов электрического поля показано на рисунке 2, из которого видно, что наилучший результат получается при топологическом расстоянии между охранными кольцами в 6-8-10 мкм (рисунок 2б), т.к. в этом случае эквипотенциальные линии электрического поля захватывают все охранные кольца и их распределение происходит равномерно вдоль поверхности. Данный вывод также подтверждается данными приведенными на рисунке 3, на котором изображены области пробоя (белый цвет) в зависимости от расстояния между охранными кольцами.

Видно, что наилучшие результаты по пробую, представленные на рисунке 3б соответствуют результатам рисунка 2б. Это полностью подтверждает выдвинутое ранее предположение о наилучшем распределении эквипотенциальных линий электрического поля. Для лавинного фотодиода с высокой чувствительностью должно соблюдаться условие, по которому коэффициент ионизации электронов должен быть значительно больше, чем для дырок.

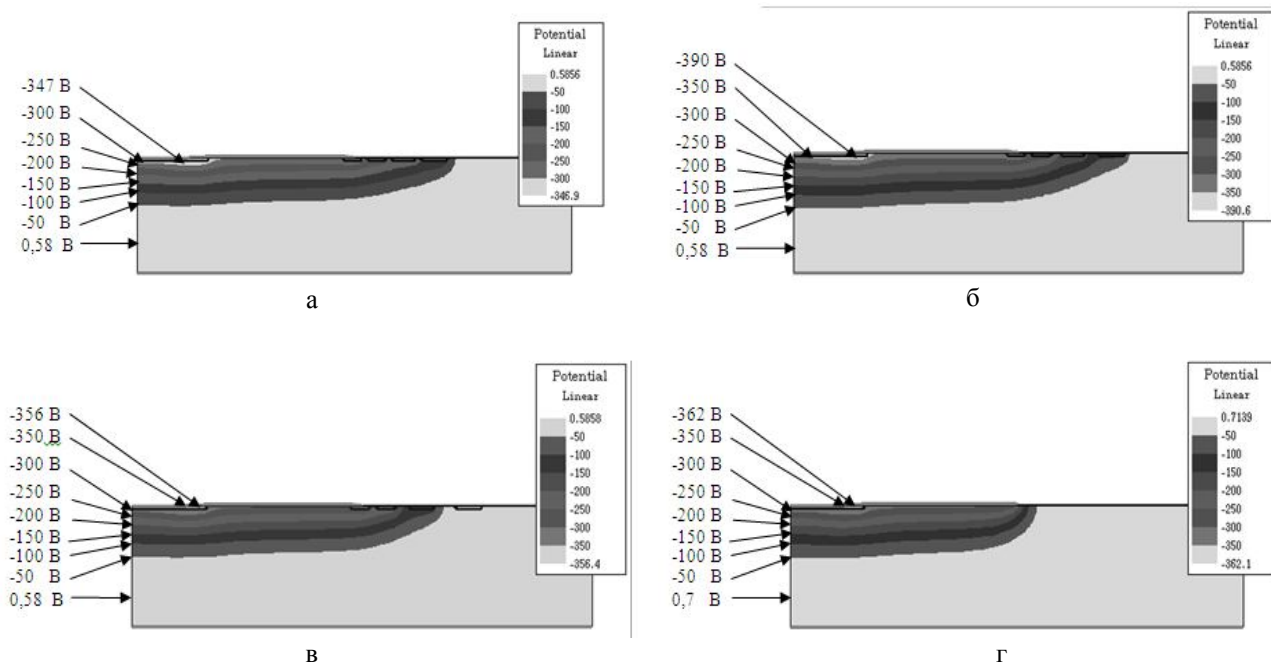


Рисунок 2 – Распределение потенциала в зависимости от расстояния между охранными областями: а, б, в, г – топологическое расстояние между охранными областями 6-6-6, 6-8-10, 6-10-14 мкм и без охранных областей, соответственно

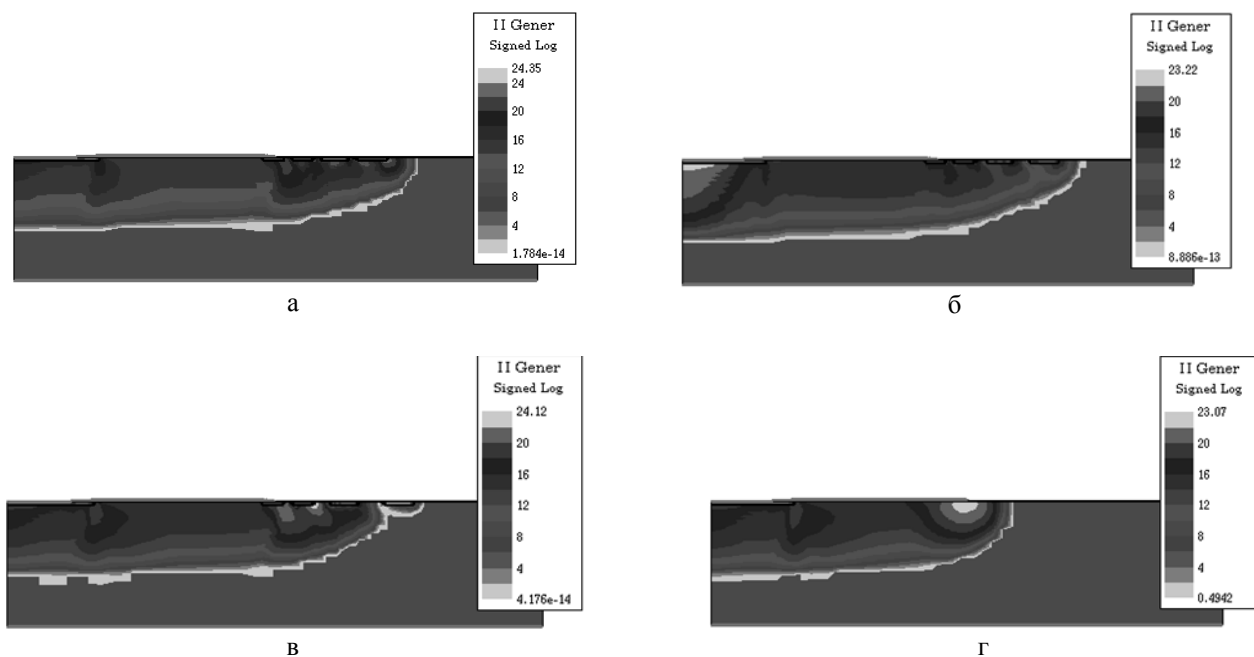


Рисунок 3 – Область пробоя (белый цвет) в зависимости от расстояния между охранными областями: а, б, в, г – топологическое расстояние между охранными областями 6-6-6, 6-8-10, 6-10-14 мкм и без охранных областей, соответственно

Это достигается созданием электрического поля с напряжённостью  $E=(1\div 2)\cdot 10^5$  В/см [6]. Такая величина поля в области пространственного заряда создаётся соответствующим профилем примеси в структуре типа  $n^+-p-p^+$

(рисунок 1). Аналогичный подход применим и к структуре типа  $p^+-n-n^+$ , изготовленной на эпитаксиальной плёнке  $n$ -типа. Для регистрации света с длиной волны 0,4–1,0 мкм необходимо обеспечить толщину области про-

странственного заряда толщиной 50–100 мкм, в которой и поглощается падающий свет.

При этих условиях концентрация примеси в подложке должна составлять  $\sim 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

В результате моделирования процесса изготовления ЛФД был найден требуемый профиль примеси «кармана» (рисунок 1), области эпитаксиальной пленки в которой производится дополнительное подлегирование примеси с дальнейшим ее разгоном по глубине, с целью создания наилучших условий для лавинного умножения носителей заряда.

Определены пробивные напряжения диодов, области пробоя и величины электрического поля. Рассчитанная величина концентрации примеси в кармане составила  $\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (рисунок 4).

Требуемый профиль примеси получался в результате разгонки кармана при  $T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 360 минут после ионной имплантации

сюда бора с дозой  $\sim 2,6 \cdot 10^{12} \text{ ион/см}^2$  при энергии  $E=40 \text{ КэВ}$  [7].

Из рисунка 5 видно, что электрическое поле с напряженностью  $\sim 3,3 \cdot 10^5 \text{ В/см}$  в области пробоя ЛФД, уменьшаясь по величине, имеет довольно широкую пространственную составляющую в направлении вдоль поверхности диода. Такое распределение электрического поля должно обеспечить довольно низкое значение шума ЛФД и, как следствие, его высокую чувствительность, поскольку отсутствуют скачки потенциала на дефектах кристаллической решетки.

Благодаря увеличению концентрации примеси в центральной области  $n^+ - p$  перехода, вследствие создания здесь «кармана» (рисунок 1), а также наличию охранных колец и обкладки металла между  $n^+$ -областью диода и  $n^+$  областью первого охранного кольца, электрический пробой проходит в донной части диода по всей его площади, как это видно из рисунка 6.

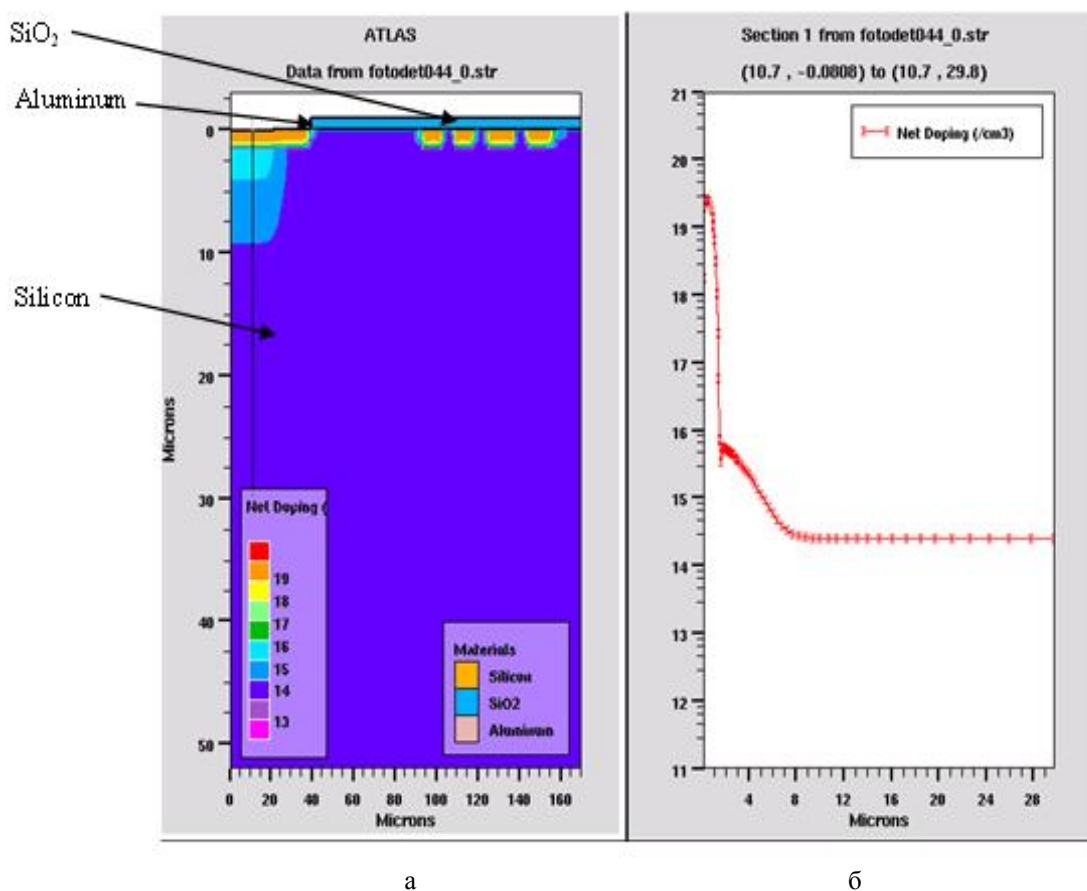


Рисунок 4 – Типовая структура лавинного фотодиода с охранными кольцами (а) и профиль распределения примеси (б) в эпитаксиальной структуре с концентрацией примеси  $2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  ( $n^+ - p - p^+ - p^+$ )

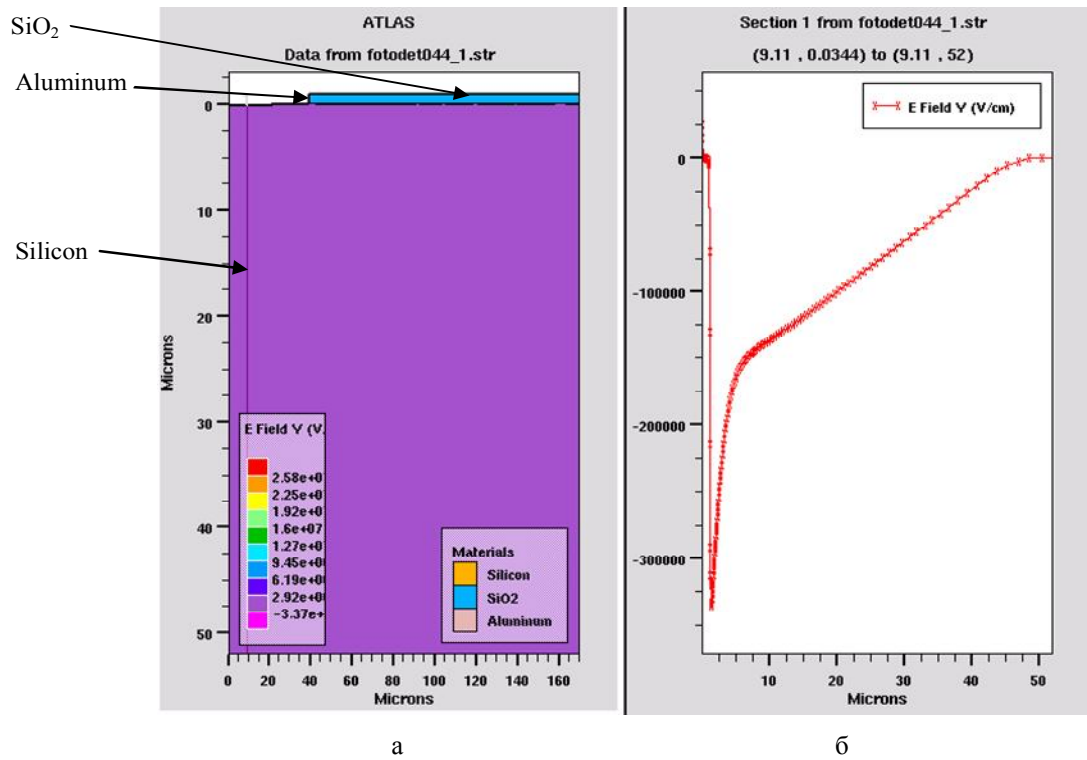


Рисунок 5 – Схема типовой структуры (а), показанной на рисунке 1, и электрическое поле в ней

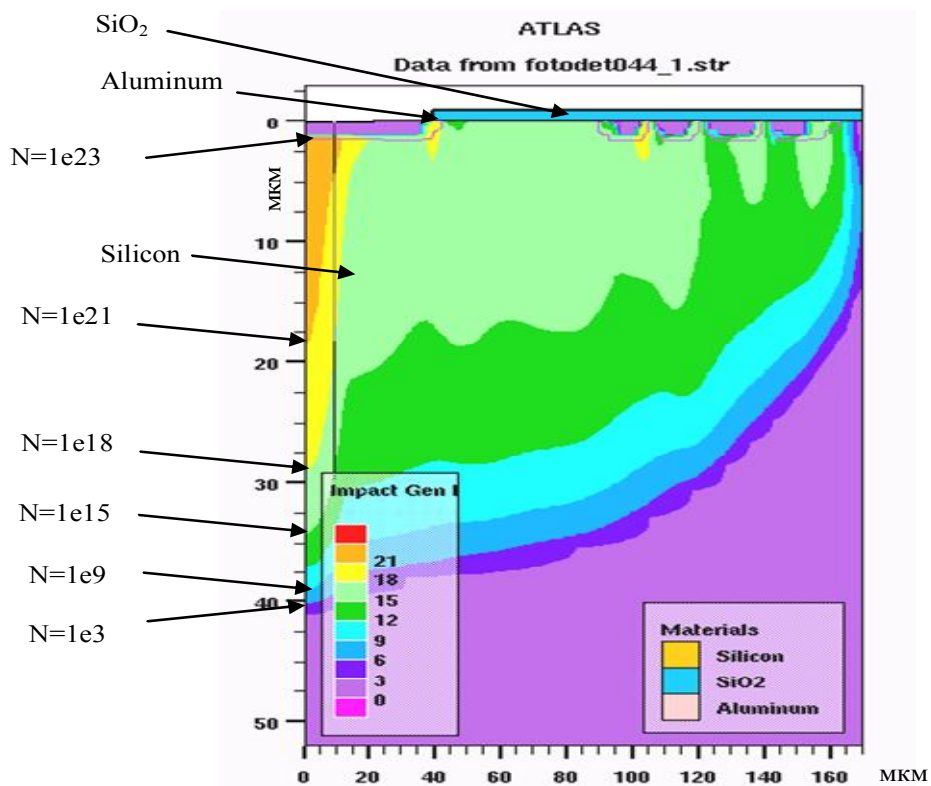


Рисунок 6 – Вид области пробоя при высокой концентрации примеси в донной части фотодиода. Показаны концентрации носителей заряда, созданных, при вторичной генерации, во время пробоя p-n перехода



Полевая обкладка передает потенциальный заряд от  $n^+p$  перехода фотодиода на первое охранное кольцо. Расположенные друг за другом остальные охранные кольца этот заряд растягивают за счет потенциальных ям, чем предотвращается пробой указанного  $n^+p$  перехода в боковой части диода, где

напряженность электрического поля максимальна.

На рисунке 7 показана ВАХ фотодиода для этого случая, вид которой подтверждает функциональные возможности предложенной конструкции охранной области лавинного фотодиода.

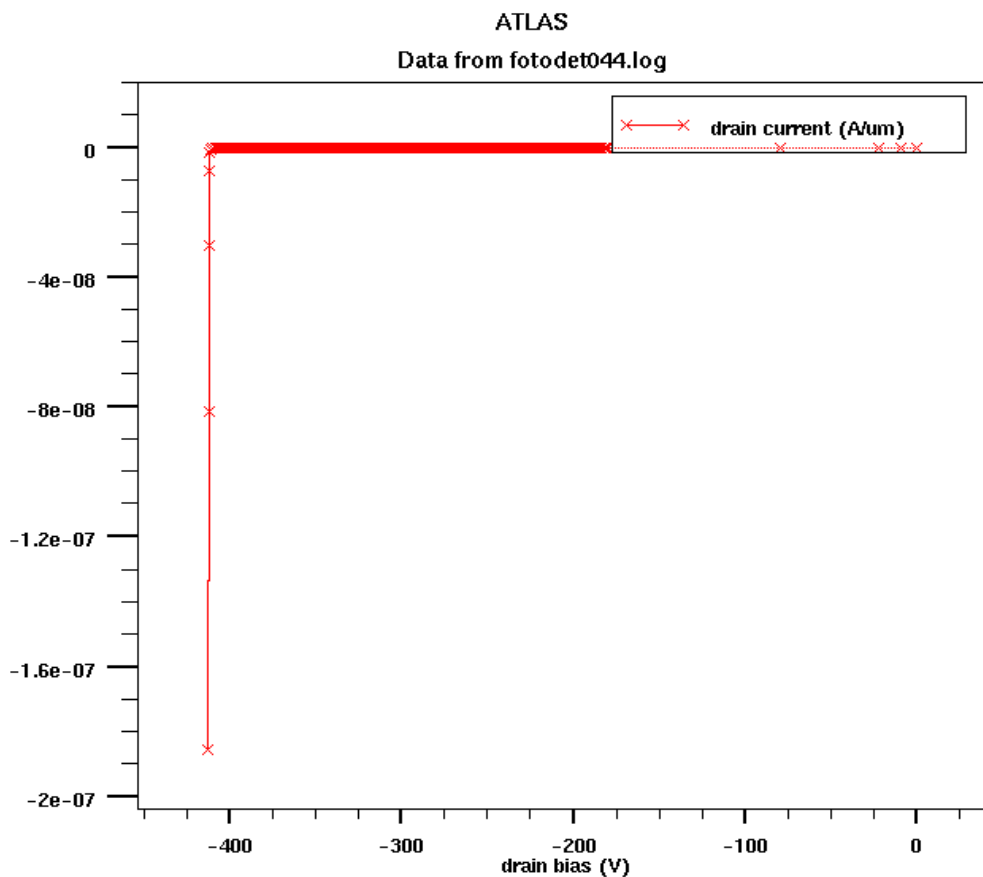


Рисунок 7 – Вид ВАХ лавинного фотодиода

### Заключение

1. Проведено моделирование конструкции охранной области и величины напряжения пробоя лавинного фотодиода со структурой диода Рида. Показано влияние полевой обкладки с системой охранных колец на область пробоя  $n^+p$  перехода и предложен метод ее реализации. Оптимальными топологическими размерами между охранными кольцами является расстояния в 6-8-10 мкм соответственно, которые позволяют перевести область пробоя в донную часть фотодиода, для достижения наилучшей эффективности функционирования фотодиода.

2. В результате моделирования процесса изготовления ЛФД найден требуемый профиль примеси в эпитаксиальной пленке при концентрации примеси в подложке  $\sim 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , определены пробивные напряжения диодов с охранными кольцами, области пробоя и величины электрического поля.

3. Ожидается, что разработанные ЛФД позволят регистрировать световые потоки с мощностью излучения  $\sim 10^{-10} - 10^{-11} \text{ Вт}$ .

### Список использованных источников

1. Розеншер, Э. Оптоэлектроника / Э. Розеншер, Б. Винтер. – М. : Техносфера, 2004. – 416 с.

2. Taurus -WorkBench. User manual. – Synopsys, 2003.
3. Taurus - TSUPREM4. User manual. – Synopsys, 2003.
4. Taurus - Medici. User manual. – Synopsys, 2003.
5. *Arora, N. D.* Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature / N. D. Arora, J. R. Hauser, D. J. Rolston // IEEE Trans. Electron Devices. –1982. – Vol. ED–29, № 2. – P. 292–295.
6. *Зи, С.* Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – Т.2. – 456 с.
7. *Корытко, Н.Н.* Оптимизация конструкции лавинных фотодиодов с охранными областями / Н.Н. Корытко [и др.]// Материалы 2-й Международной конференции «Приборостроение-2009», Минск, Республика Беларусь, 11–13 ноября 2009 г. – С. 287–288.

---

Koritko N.N., Zaleskij V.B., Malishev V.S., Khatko V.V.

**Simulation of avalanche photodiode construction with guard areas**

Construction and breakdown voltage of avalanche photodiode with Read diode structure was simulated by computer. It was shown that the guard area construction composed of the metal electrode and guard rings influences on the electrical quantities of  $n^+ - p$  junction breakdown region.

*Поступила в редакцию 07.04.2011.*