

## Pin-фотодетектор с управляемой чувствительностью

И.А. Толкачев<sup>1</sup>, Н.И. Михайлов<sup>1</sup>, В.В. Перепеловский<sup>1</sup>, В.В. Марочкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Pixpolar Oy, Otakaari 5, 02150, Espoo, Finland

**Аннотация:** в данной работе приводятся результаты моделирования фотодетектора с управляемой чувствительностью на основе кремниевого pin-диода. Устройство состоит из pin-диода и МДП затворов с двух сторон i-области, которая разделена на два низколегированных слоя с разным типом электропроводности. Моделирование выполнено в среде Synopsys Sentaurus TCAD. В результате моделирования получены зависимости токов pin-фотодетектора от длины волны падающего облучения.

**Ключевые слова:** PIN диод, фотодетектор, разделенная i-область, Synopsys Sentaurus TCAD

### 1. Введение

Проблема увеличения чувствительности pin-фотодетекторов является актуальной [1 – 2]. Опубликовано несколько работ [3 – 5], в которых исследовалось влияние металлических электродов, находящихся на поверхности i-области, на свойства pin-диода. Данная статья посвящена вопросу увеличения чувствительности фотодетектора на основе кремниевого pin-диода. Представлены результаты моделирования четырех различных структур pin-фотодетекторов. Моделирование производилось в среде Synopsys Sentaurus TCAD [6 – 8].

### 2. Модели фотодетекторов. Результаты численного моделирования

Световой поток (поток фотонов) попадает на i-область с нижней стороны фотодетектора (рисунки 1 – 4). Затворы являются прозрачными для исследуемого диапазона длин волн (200 ÷ 1000 нм). В отличие от исследований влияния зарядов на плавающих затворах на чувствительность pin-фотодетектора приведенных в работе [9], в данной работе плавающие затворы заменены на МДП затворы (рисунки 2 – 4). В работе рассматривается четыре варианта фотодетекторов, отличающихся как формой и количеством управляющих затворов, так и структурой i-области. Для увеличения чувствительности в третьей структуре (рисунок 3) низколегированная i-область делится на две низколегированные области, где верхний слой легируется бором (P тип), а нижний фосфором (N тип). В четвертой структуре (рисунок 4) помимо разделения i-области используются сплошные затворы. Структуры показаны на рисунках 1–4 и включают в себя следующие области:

1 – *p+* – область, легированная бором с концентрацией  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>;

2 – *i-n* – область, легированная фосфором с концентрацией  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>;

3 – *n+* – область, легированная фосфором с концентрацией  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>;

4 – *p*gate – левый затвор возле области *p+*

5 – *n*gate – правый затвор возле области *n+*

6 – поликремний (4 нм)

7 – диэлектрик SiO<sub>2</sub> (1.8 нм)

8 – *i-p* – область, легированная бором с концентрацией  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>;

9 – *gate1* – верхний затвор над областью *i-p*

10 – *gate2* – нижний затвор под областью *i-n*

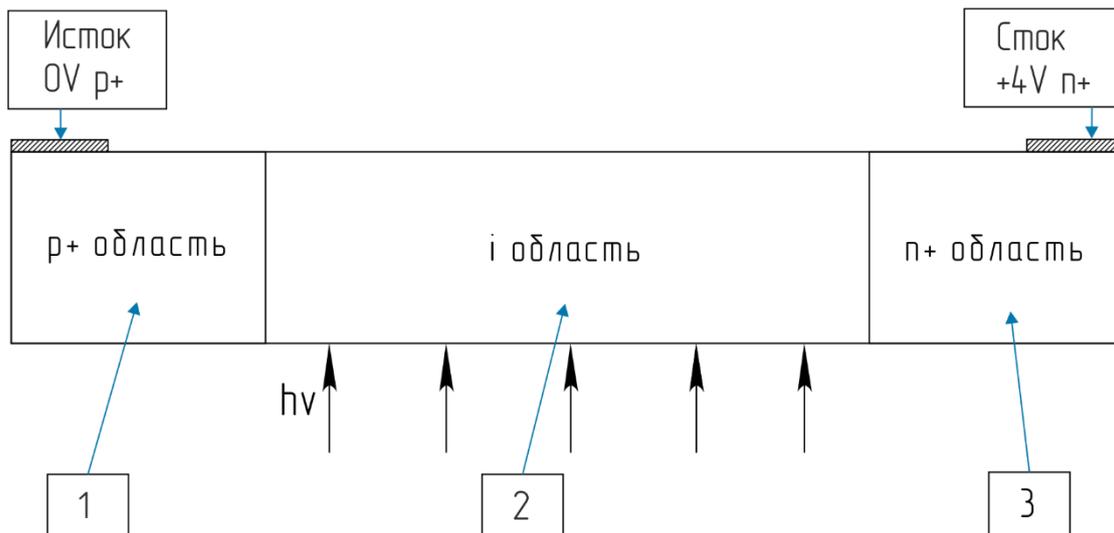


Рисунок 1. Топология базового p-i-n-фотодетектора.

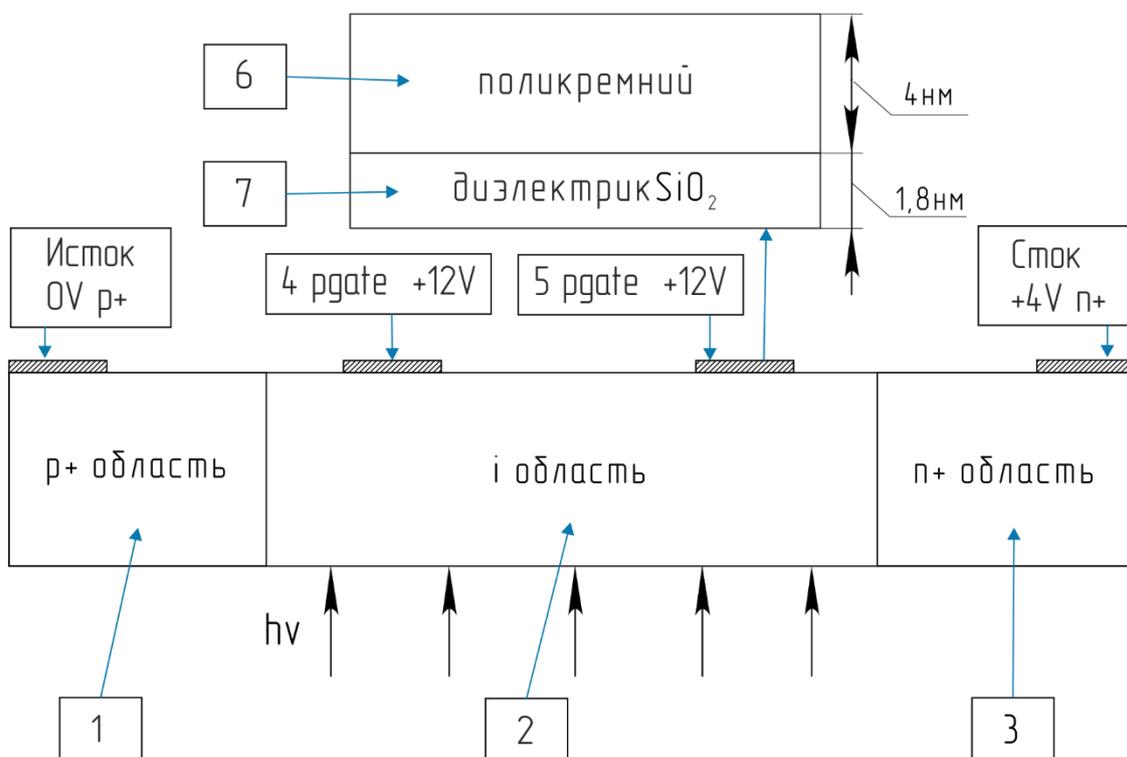
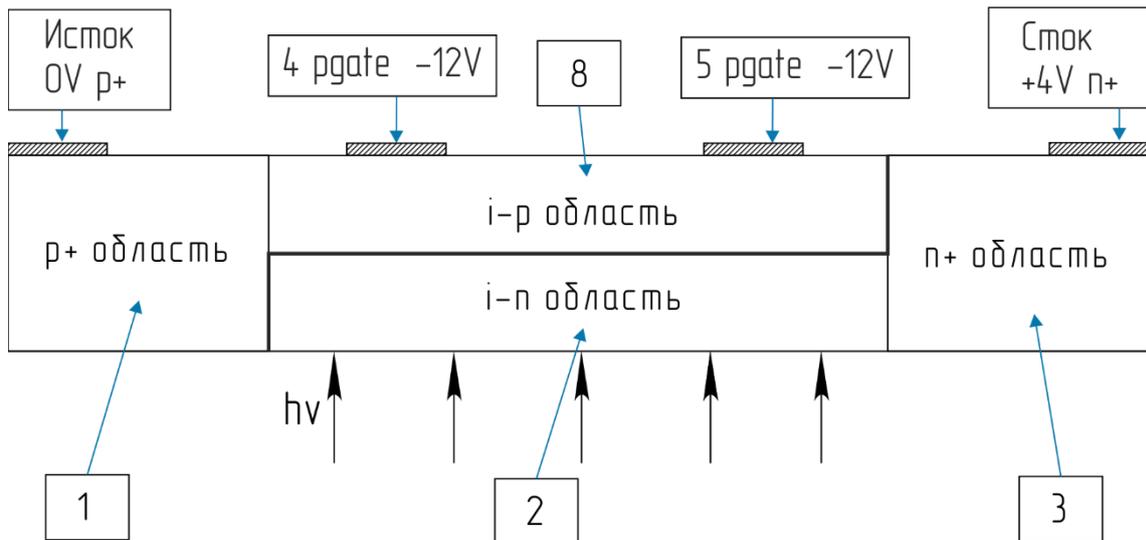
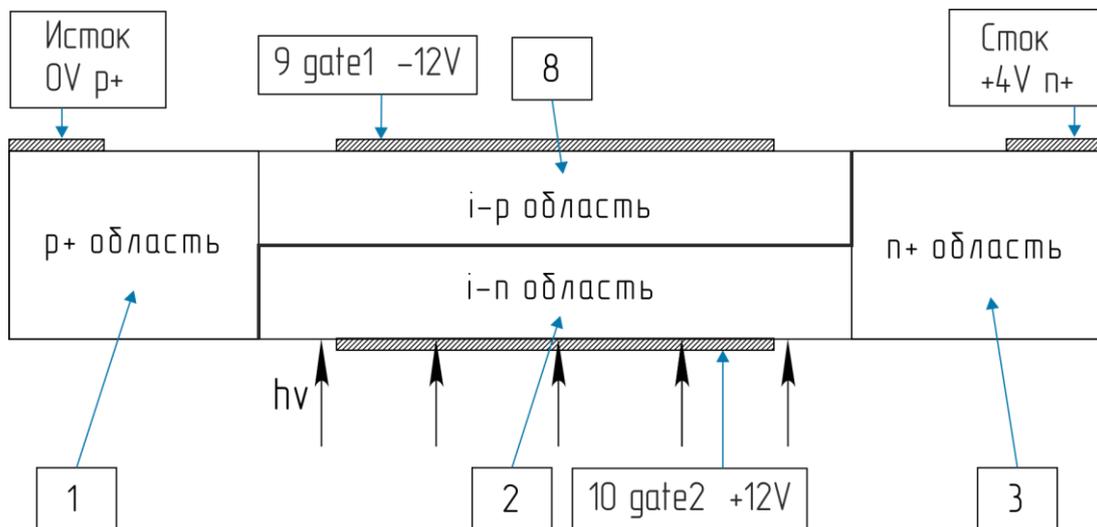


Рисунок 2. Топология базового p-i-n-фотодетектора с затворами.



**Рисунок 3.** Топология pin-фотодетектора с затворами и комбинированной i областью.



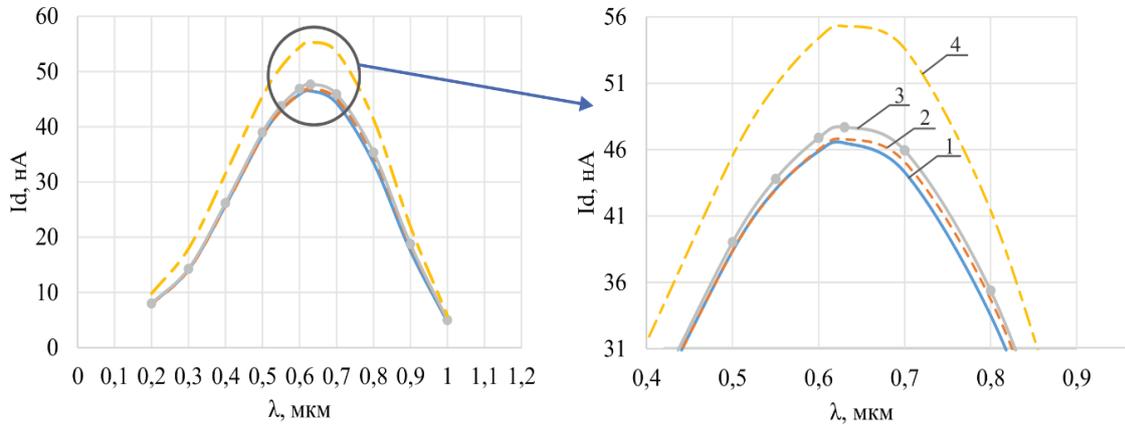
**Рисунок 4.** Топология pin-фотодетектора с двумя областями разного типа проводимости и с непрерывными затворами с двух сторон структуры.

Основным параметром, по которому проводилось сравнение различных видов pin-фотодетекторов, была выбрана зависимость тока pin-фотодетектора от длины волны облучения. В процессе моделирования на затворы подавались соответствующие потенциалы с целью управления потоками носителей заряда. Для структуры, показанной на рисунке 2, на МДП затворы (pgate, ngate) подавалось напряжение +12В, в результате электроны и дырки смещались в различных направлениях, что приводило к уменьшению рекомбинационных токов. Для структуры на рисунке 3, на затворы (pgate, ngate) подавалось напряжение -12В, в результате электроны и дырки смещались в стороны слоев соответствующей проводимости, что приводило к дополнительному уменьшению рекомбинационных токов. Для структуры, показанной на рисунке 4, на верхний затвор (gate1) над i-p областью подавалось напряжение -12В, а на нижний затвор (gate2) под i-n областью подавалось напряжение +12В, что приводило к эффективному смещению электронов и дырок в стороны слоев соответствующей проводимости (электроны к n+ слою, дырки к p+ слою).

Для исследования зависимости тока от длины волны облучения подавалось

напряжение +4В на сток (n+ область) и регистрировался ток через p-n-диод при различных длинах волн облучения.

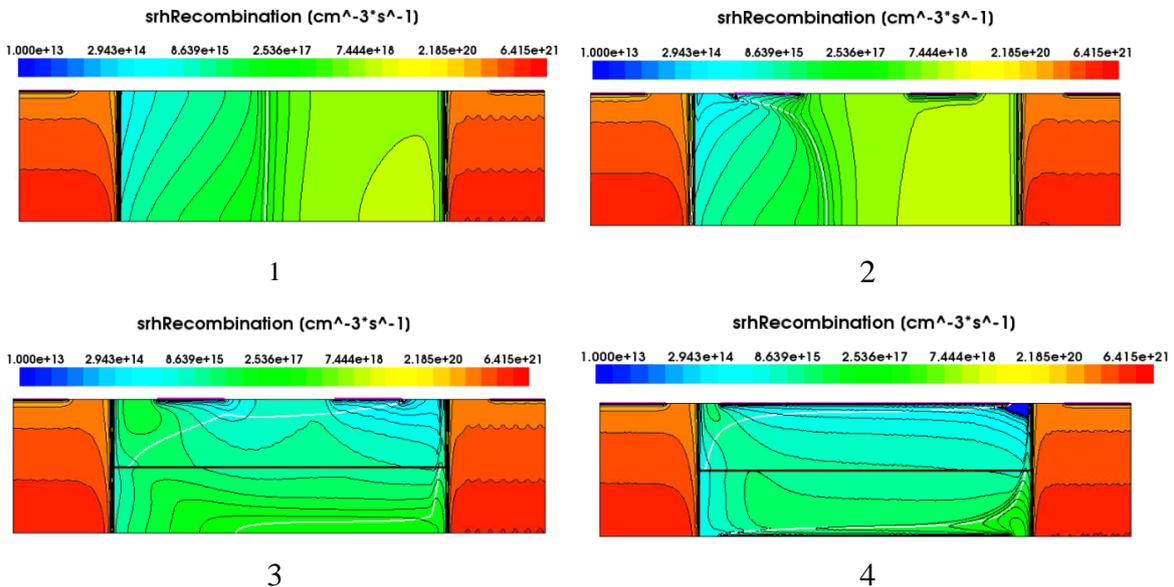
На рисунке 5 приведена зависимость фототока от длины волны облучения.



**Рисунок 5.** Зависимость тока p-n-фотодетектора от длины волны облучения для четырех видов p-n-фотодетекторов: 1 – базового (рисунок 1); 2 – базового с затворами (рисунок 2); 3 – с комбинированной i областью и с затворами (рисунок 3); 4 – с двумя областями разного типа проводимости и с непрерывными затворами с двух сторон структуры (рисунок 4).

Из результатов, приведенных на рисунке 5 видно, что максимальный ток зарегистрирован ( $\approx 19\%$  относительно структуры базового p-n-фотодетектора) для структуры с непрерывными затворами, и двухслойной i-областью.

На рисунке 6 приведена рекомбинация Шокли-Рида-Холла для четырех топологий p-n-фотодетекторов.



**Рисунок 6.** Рекомбинация Шокли-Рида-Холла для топологий p-n-фотодетектора: 1 – базового (рисунок 1); 2 – базового с затворами (рисунок 2); 3 – с комбинированной i областью и с затворами (рисунок 3); 4 – с двумя областями разного типа проводимости и с непрерывными затворами с двух сторон структуры (рисунок 4).

На рисунке 6 представлены распределения рекомбинации Шокли-Рида-Холла (ШРХ) для четырех видов p-n-фотодетекторов, где красный цвет означает, что электроны и дырки рекомбинируют в большом количестве, а синий цвет означает, что электроны и дырки рекомбинируют в меньшем количестве. Мы видим, что для

четырёх конструкций pin-фотодетекторов в i-области рекомбинация ШРХ изменяется, а именно наблюдается увеличение голубого цвета от структуры базового pin-фотодетектора до структуры pin-фотодетектора с непрерывными затворами с двух сторон и с комбинированной i областью, что говорит об уменьшении рекомбинации. Уменьшение рекомбинации достигается вертикальным полем с помощью двух затворов, а также разделенной i-областью на две области с разными типами электропроводности.

### 3. Заключение

Анализ результатов моделирования позволил установить, что введение слоев разного типа проводимости в i-область pin-фотодетектора и применение непрерывных затворов с двух сторон структуры позволяет управлять чувствительностью pin-фотодетектора, достигая большей чувствительности в сравнении со структурами, не имеющими комбинированной i-области и непрерывных затворов.

#### Список литературы

1. Аверин, С. В. Многоцветный фотодетектор на основе гетероструктуры ZnSe/ZnTe/GaAs / С. В. Аверин, [и др.] // Квантовая электроника. — 2018. — №48. — С. 675—678.
2. Романов, А. И. Принцип построения беспроводной сети li-fi и пути практической реализации / А. И. Романов, [и др.] // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах». — 2018. — №3-8. — С. 223—225.
3. Ichiro Omura. Ultra Low Loss Trench Gate PCI-PiN Diode with  $V_F < 350\text{mV}$  // Department of Electrical Engineering and Electronics Kyushu Institute of Technology 1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, — P. 804—855.
4. Carla Novo, Rudolf Bühler, Renato Zapata, Renato Giacomini / Responsivity Improvement for Short Wavelengths Using Full-Gated PIN Lateral SiGe Diode // IEEE Xplore Digital Library. — 2016. — P. 978.
5. Xin-Yan Liu, JunWu, Xiao-Yong Liu, Shuai Zhang. Characterization and Optimization of a Single-Transistor Active Pixel Image Sensor with Floating Junction Connected to Floating Gate // Hindawi Publishing Corporation. — 2015. — P. 5—9.
6. Перепеловский, В. В. Введение в приборно-технологическое моделирование устройств микроэлектроники: лаб. практикум / В. В. Перепеловский, [и др.] // Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2011. — С. 47.
7. Перепеловский, В. В. Разработка электронных устройств в среде Synopsys Sentaurus TCAD: лаб. практикум / В. В. Перепеловский, [и др.] // Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2011. — С. 44.
8. Щукин, Д. В. Программирование однозатворного PIN диода / Д. В. Щукин, [и др.] // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — 2017. — № 3-4. — С. 475—477.
9. Дунаев, Д. Д. Моделирование PIN фотодетектора с программируемой чувствительностью / Д. Д. Дунаев, [и др.] // Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — 2018. — № 1-4. — С. 368—370.