

## Влияние толщины контактного слоя алюминия на шумовые параметры планарных кремниевых фотодиодов

В. П. Астахов, П. Д. Гиндин, В. В. Карпов, К. А. Кузьмина,  
С. А. Леготин, Г. В. Чеканова

*В работе рассмотрены пути снижения уровней шумовых токов и напряжения планарных кремниевых фотодиодов, работающих в фотовольтаическом режиме. Экспериментально получены и обсуждаются зависимости шумовых параметров таких фотодиодов от толщины слоя Al контактной системы. Показана возможность улучшения шумовых свойств фотодиодов за счёт увеличения толщины слоя выше критического значения, определяемого глубиной контактного окна.*

*Ключевые слова:* планарный фотодиод, контактная система, контактное окно, шумовое напряжение.

### Введение

В ряде важных применений кремниевых фотодиодов (ФД), например, в системах отображения рельефа поверхности при низких уровнях засветки, ФД включаются в фотовольтаическом режиме. В этом случае к ним предъявляются требования по квантовой эффективности не ниже значения (60÷70) %, по достаточно низкому уровню темнового тока  $I_T$  при рабочем смещении 10–20 мВ (например,  $10^{-12}$  А), определяющего, в конечном итоге, предельный шумовой ток [1], который рассчитывается по формуле:

$$I_{ш} = \sqrt{2eI_T}, \quad (1)$$

где  $e$  – элементарный заряд, а также необходимо обеспечить низкий уровень шумового напряжения  $U_{ш}$  при фотовольтаическом включении.

К малошумящим ФД предъявляются также требования работоспособности в нормальных условиях, а также при повышенной, например, до 70 °С, температуре среды с небольшим ухудшением параметров в последнем случае. Для многоплощадочных ФД одним из важнейших требований является крайне незначительный разброс по площадкам значений шумовых параметров при заданных температурах среды.

Для достижения минимальных значений  $I_T$  малошумящие планарные ФД должны иметь минимальные уровни дефектности исходных пластин и металлургической границы  $p$ – $n$ -перехода, а также поверхностных токов утечки.

На практике наименьший уровень токов утечки удается получать в случае планарных  $p^+$ – $n$ -переходов, которые и принимают за основу малошумящих фотодиодов. Для таких фотодиодов может быть применен топологический прием, заключающийся в окаймлении фоточувствительной площадки близкорасположенным короткозамкнутым планарным  $p^+$ – $n$ -переходом, уменьшающим генерационную составляющую  $I_T$  периферии площадки [2]. Аналогичный прием в случае планарных  $n^+$ – $p$ -переходов приводит к их полной или частичной закоротке [3]. Дополнительным средством уменьшения токов утечки является имплантация области планарной границы  $p^+$ – $n$ -перехода ионами  $N_2^+$  с дозой (флюенсом)  $\sim 10^{16}$  см<sup>-2</sup> [4].

Уменьшение степени дефектности исходных пластин при их обработке может быть достигнуто применением корундовых микропорошков (при отказе от алмазных материалов и химико-механической полировки) с завершающей химико-динамической полировкой [5].

Астахов Владимир Петрович<sup>1</sup>, главный специалист.  
Гиндин Павел Дмитриевич<sup>1</sup>, генеральный директор.  
Карпов Владимир Владимирович<sup>1</sup>, заместитель генерального директора.

Кузьмина Ксения Андреевна<sup>1</sup>, инженер.  
Леготин Сергей Александрович<sup>2</sup>, доцент.  
Чеканова Галина Васильевна<sup>1</sup>, заместитель начальника цеха.

<sup>1</sup> ОАО «Швабе-Фотосистемы».  
Россия, 117545, Москва, Днепропетровский проезд, 4А, стр. 3А.  
Тел. 8 (495) 315-73-68. E-mail: ko-ckb@mail.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».  
Россия, 119049, Москва, Ленинский проспект, 4.

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2017 г.

© Астахов В. П., Гиндин П. Д., Карпов В. В., Кузьмина К. А., Леготин С. А., Чеканова Г. В., 2017

Для улучшения структурных свойств металлургической границы по всей площади планарного  $p^+-n$ -перехода и соответствующего уменьшения генерационной составляющей  $I_T$  может быть применен способ создания  $p^+$ -области по патенту [6], заключающийся в последовательной имплантации больших доз ионов  $Si^+$  и  $B^+$ .

Необходимость обеспечения работы ФД при повышенных температурах требует оптимизации степени легирования исходных кристаллов, поскольку на «высокоомных» кристаллах проще обеспечить требования по  $I_T$  в нормальных условиях, а на «низкоомных» – при повышенных температурах (см. [7]). Такая оптимизация может быть реализована на основе применения патента [8].

Получение наименьших значений шумового напряжения при фотовольтаическом включении требует получения прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФД с коэффициентом неидеальности  $\beta = 1$ . Этому способствует применение упоминавшегося топологического приема, уменьшающего также и  $I_T$  [2], подлегирование подконтактных областей до уровня не менее  $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и эффективное вжигание в них контактных площадок из алюминия, применяемого для создания контактной системы ФД [9].

При достижении заданных минимальных значений  $I_T$  важно максимально ограничить шумовое напряжение  $U_{ш}$ , которое при фотовольтаическом включении и наличии заметного сопротивления контактной системы  $R_k$ , включенного последовательно с ФД, можно представить в виде соотношения Найквиста [1]:

$$U_{ш} = \sqrt{4kTR_k \Delta f} \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $\Delta f$  – полоса частот измерения.

При этом значения  $I_T$  и  $U_{ш}$  не должны превышать уровней, определяемых флуктуациями потока излучения, падающего на ФД.

Причиной повышенных значений  $R_k$  в планарных структурах, изготавливаемых с применением методов термического окисления, диффузии и ионной имплантации, помимо несовершенства контакта «Al–кристалл», может быть многоуровневость близкорасположенных участков поверхности защитной плёнки  $SiO_2$  и контактных окон омических и выпрямляющих контактов, а также толщина металла контактной системы если она меньше или сравнима с глубиной контактного окна. Эта причина устраняется на основе применения патента [10] за счет обеспечения толщины металла, превышающей глубину контактного окна.

Целью данной работы является изучение влияния соотношения между глубиной контактно-

го окна и толщиной металла контактной системы на шумовые параметры многоплощадочных планарных кремниевых ФД в интересах поиска оптимального пути для снижения уровней шумовых тока и напряжения планарных кремниевых фотодиодов.

### Методики проведения экспериментов и измерений

При подготовке к экспериментальным исследованиям были изготовлены 16-площадочные кремниевые ФД с площадками размером  $1,4 \times 1,4$  мм, расположенными в линию, причем с зазором между площадками 0,15 мм. Изготовлена партия из 30 шт. пластин  $n$ -Si толщиной  $\sim 0,4$  мм с удельным сопротивлением 4,5 Ом см по следующей последовательности процессов:

1 – окисление при температуре 1150 °С (сухой-влажный-сухой кислород) до толщины плёнки  $SiO_2 \sim 0,6$  мкм;

2 – вскрытие контактных окон; загонка-разгонка атомов бора с окислением для создания  $p^+$ -областей площадок толщиной  $\sim 1,0$  мкм и поверхностной окисной плёнки толщиной  $\sim 0,3$  мкм;

3 – вскрытие контактных окон, имплантация ионов фосфора с энергией 60 кэВ и дозой  $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с последующим отжигом в атмосфере азота при  $T_1 = 600$  °С (1 час) и  $T_2 = 900$  °С (1 час) для создания  $n^+$ -области вокруг каждой площадки и на обратной стороне пластины;

4 – вскрытие контактных окон в областях толстой (0,6 мкм) и тонкой (0,3 мкм) окисной плёнки, нанесение слоя Al толщиной 0,15, 0,35 или 0,75 мкм термическим распылением и толщиной 2,5 или 2,9 мкм магнетронным распылением по 5 пластин каждого варианта исполнения (толщины Al) и формирование контактной системы с применением контактной фотолитографии, причем при нанесении Al во всех случаях образцы закрепляли на вращающемся держателе.

После изготовления и разрезания пластин на ЧИПы (16 площадок с двумя планарными омическими контактами) последние приклеивали на стальной растр, на который разваривали все планарные контакты кристалла.

Кристаллы на растре последовательно стыковали с одной и той же группой усилителей с полосой частот  $\Delta f = 70$  Гц, и на них вольтметром ВЗ-54 измеряли значения напряжения шума при температурах  $(20 \pm 2)$  °С и  $(70 \pm 2)$  °С, а затем рассчитывали их средние значения, обозначенные соответственно как  $U_{ш}^{20}$  и  $U_{ш}^{70}$ .

По измеренным значениям каждого параметра  $\Pi$  рассчитывали их неравномерность (т. е.  $\Delta U_{ш}^{20}$  и  $\Delta U_{ш}^{70}$ ) по формуле:

$$\Delta \Pi = \frac{\Pi_{\max} - \Pi_{\min}}{2\bar{\Pi}} \times 100 \%, \quad (3)$$

где  $\Pi_{\max}$ ,  $\Pi_{\min}$ ,  $\bar{\Pi}$  – соответственно максимальное, минимальное и среднее значение рассматриваемого параметра по данному варианту исполнения.

Определяли также количество дефектных площадок  $N_{д}^{20}$ ,  $N_{д}^{70}$  по каждому из параметров  $U_{ш}^{20}$  и  $U_{ш}^{70}$  соответственно. Дефектными считали площадки со значениями  $U_{ш}^{20}$  и  $U_{ш}^{70}$ , превышаю-

щими допустимые значения и обозначаемые как  $N_{20}$  и  $N_{70}$ .

Проводили также измерения темновых токов площадок при смещении 20 мВ. Для измерения шумовых параметров отбирали ФД с темновым током не более  $10^{-12}$  А, считая их годными по  $I_{ш}$ .

### Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены зависимости параметров  $U_{ш}^{20}$ ,  $U_{ш}^{70}$ ,  $\Delta U_{ш}^{20}$ ,  $\Delta U_{ш}^{70}$ ,  $N_{д}^{20}$ ,  $N_{д}^{70}$  от толщины слоя Al контактной системы (или от разности толщины слоя Al и глубины контактного окна).

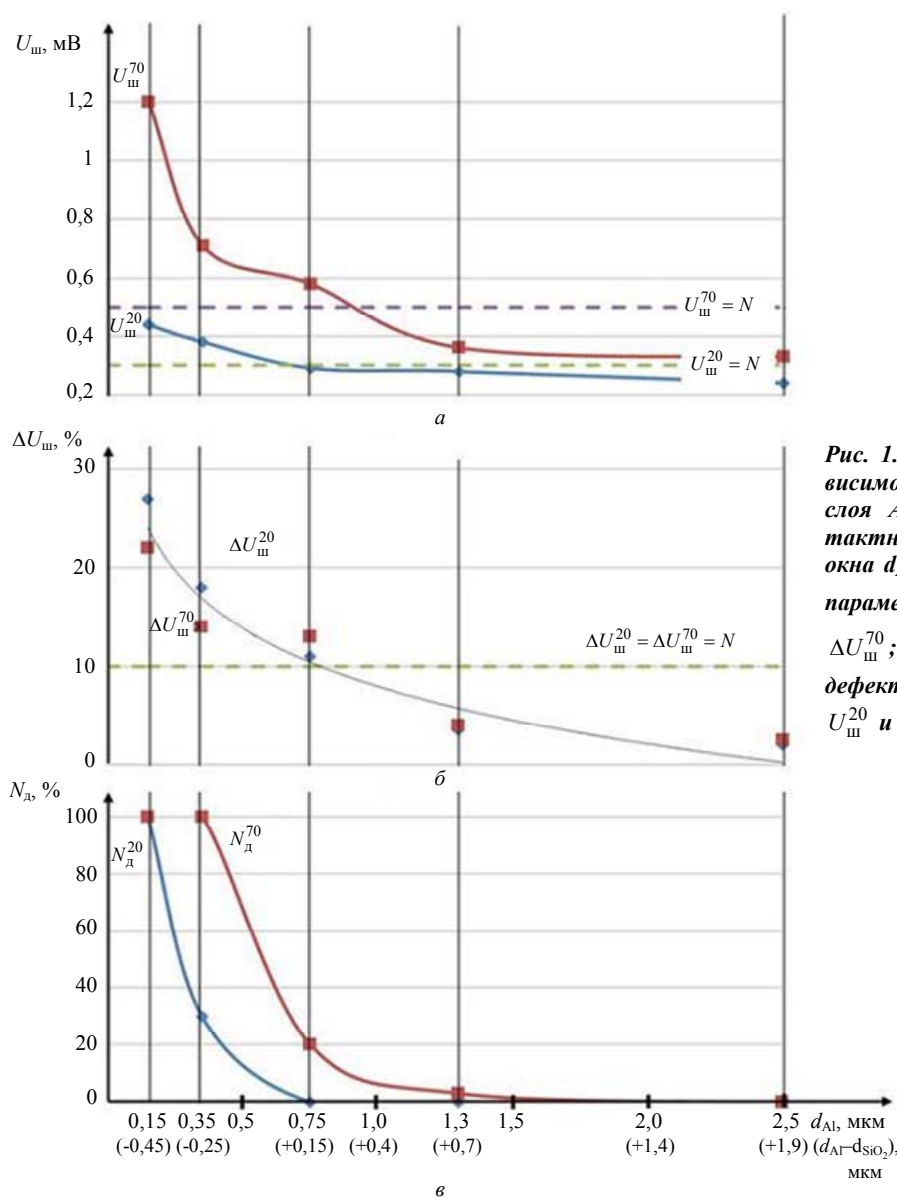


Рис. 1. Экспериментальные результаты: зависимость от толщины  $d_{Al}$  контактного слоя Al (или от разности толщины контактного слоя Al и глубины контактного окна  $d_{Al} - d_{SiO_2}$ ) соответственно а) шумовых параметров  $U_{ш}^{20}$ ,  $U_{ш}^{70}$ ; б) величин  $\Delta U_{ш}^{20}$ ,  $\Delta U_{ш}^{70}$ ; в) количества площадок  $N_{д}^{20}$ ,  $N_{д}^{70}$ , дефектных по параметрам соответственно  $U_{ш}^{20}$  и  $U_{ш}^{70}$ .

Из этих данных следует, что с увеличением толщины слоя Al все шумовые параметры улучшаются, а именно, уменьшаются напряжения шума и в нормальных условиях (НУ) и при  $T = 70^\circ\text{C}$ , а также снижается неравномерность распределения этих параметров по площадкам. Уменьшается также число дефектных площадок. Характерно, что по мере увеличения толщины Al сначала нормализуется параметр  $U_{\text{ш}}^{20}$ , а затем –  $U_{\text{ш}}^{70}$ . Аналогично исчезают дефектные площадки, т. е. сначала по параметру  $U_{\text{ш}}^{20}$ , затем по параметру  $U_{\text{ш}}^{70}$ . Характерно также, что при одинаковых значениях толщины слоя Al  $U_{\text{ш}}^{70}$  во всех случаях больше

$U_{\text{ш}}^{20}$ , что соответствует увеличению  $R_k$  за счёт увеличения удельного сопротивления Al при повышении температуры.

На рис. 2 представлена зависимость отношения параметра  $\frac{U_{\text{ш}}^{70}}{U_{\text{ш}}^{20}}$  от толщины слоя алюминия. Для этой зависимости характерно уменьшение данного параметра с увеличением толщины слоя и его стремление к величине, соответствующей отношению величин удельного сопротивления объёмного алюминия при  $T = 70^\circ\text{C}$  и  $T = 20^\circ\text{C}$ , составляющему  $\sim 1,2$ .

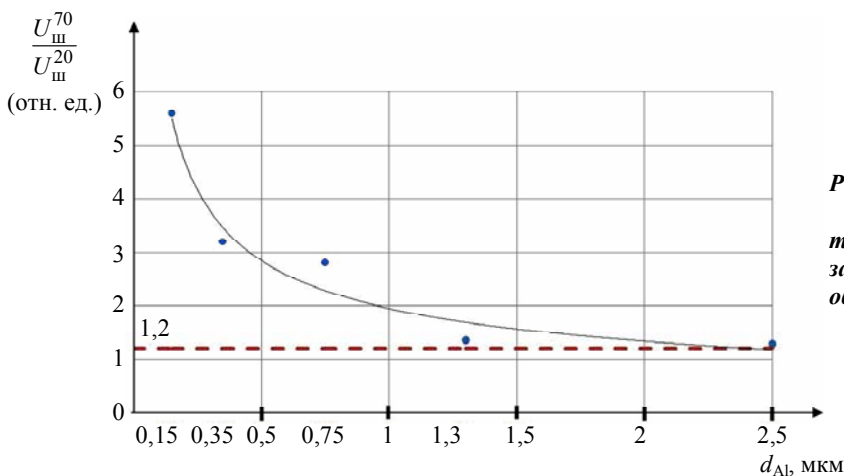


Рис. 2. Зависимость параметра  $\frac{U_{\text{ш}}^{70}}{U_{\text{ш}}^{20}}$  от толщины слоя алюминия. Пунктиром показано отношение удельных сопротивлений объёмного Al при температуре  $70^\circ\text{C}$  и  $20^\circ\text{C}$ .

### Обсуждение результатов

Экспериментальные данные, представленные на рис. 1 и 2, свидетельствуют о том, что при толщине слоя Al, существенно меньшего глубины контактного окна, значение  $R_k$  является наибольшим, обеспечивая, следовательно, наибольшие значения всех шумовых параметров. Значение  $R_k$  уменьшается при увеличении толщины слоя. Эти данные подтверждаются результатами параллельных экспериментов со сравнением слоёв Al и напылением более толстых.

Качественно этот результат объясняется с помощью рис. 3, на котором видно, что на краях контактных окон имеются перешейки 5 между участком Al, расположенным в глубине окна, и участком, расположенным на граничной области  $\text{SiO}_2$ . При одной и той же толщине слоя Al наиболее тонкий перешеек имеет место на границах именно наиболее глубокого контактного окна. В случае, когда толщина слоя Al ( $d_{\text{Al}}$ ) и толщина плёнки  $\text{SiO}_2$  ( $d_{\text{SiO}_2}$ ) находятся в соотношении  $d_{\text{Al}} < d_{\text{SiO}_2}$  (см. рис. 3, а), перешеек 5 является наи-

более тонким, и он образован подпылением за счёт отклонения подложки от нормального положения относительно пучка расплываемых атомов алюминия или за счёт миграции этих атомов при подогреве подложки. За счёт механических напряжений на краях окна, показанных на рисунке, которые вызваны различием температурных коэффициентов линейного расширения Al и  $\text{SiO}_2$ , перешеек 5 в этом случае пронизан трещинами 6, являющимися источниками генерации шумового напряжения при флуктуациях температуры.

При значении  $(d_{\text{Al}} - d_{\text{SiO}_2}) < 0,5$  мкм (см. рис. 3, б) трещины 6 также могут играть заметную роль в модуляции сопротивления перешейка и генерации шумов, что подтверждают данные рис. 1. При условии  $(d_{\text{Al}} - d_{\text{SiO}_2}) > 0,5$  мкм (рис. 3, в) шумовое напряжение, обусловленное флуктуациями сопротивления трещин перешейка, эффективно шумитруется достаточно толстым верхним слоем структурно совершенного алюминия, который «гасит» шумовые проявления в перешейке и в контакте в целом, что также подтверждается данными рис. 1.

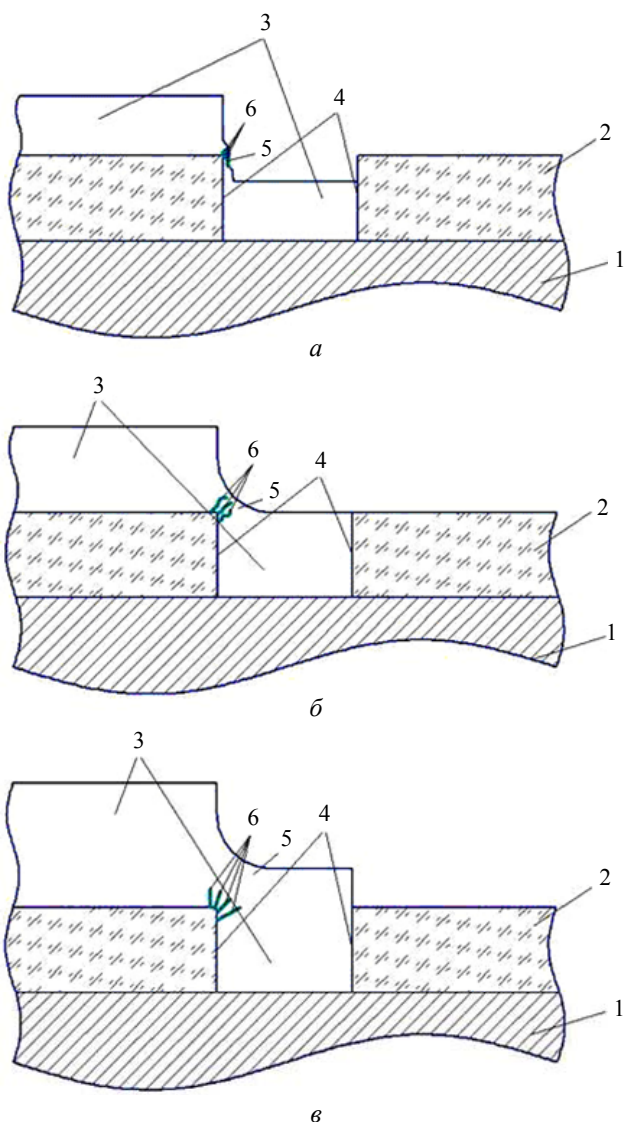


Рис. 3. Качественные изменения структуры контактного слоя Al в контактном окне при последовательном увеличении толщины слоя (позиции а, б, в). Обозначения на всех позициях: 1 – пластина кремния; 2 – слой SiO<sub>2</sub>; 3 – слой Al; 4 – контактное окно; 5 – перешеек; 6 – трещины.

Таким образом, при фотовольтаическом включении планарного ФД в отсутствие засветки происходит генерация шумового напряжения на периферии контактных окон. Это напряжение может быть кардинально уменьшено за счёт применения контактных слоёв Al с толщиной, превосходящей не менее, чем на 0,5 мкм, толщину защитной плёнки SiO<sub>2</sub> в месте наиболее глубокого контактного окна.

Следует отметить, что качественное объяснение на основе рис. 3 зависимостей шумовых параметров от толщины слоя Al, представленных на рис. 1, согласуется также с данными рис. 2, из которого следует, что уменьшение толщины слоя Al до 0,15 мкм увеличивает R<sub>к</sub> при повышенных температурах в ~25 раз, поскольку  $U_{ш} \sim R_k^{1/2}$ .

Вместе все эти данные свидетельствуют о том, что при малых толщинах ( $d_{Al} < d_{SiO_2}$ ) структурные и электрические свойства Al на периферии контактных окон заметно отличаются от свойств объёмного Al в худшую сторону, приводя к увеличению R<sub>к</sub>. При увеличении толщины слоёв и выполнении условия  $d_{Al} > d_{SiO_2}$  их свойства всё в большей мере приближаются к свойствам объёмного Al. Эти слои шунтируют сопротивление нижележащих слоёв, гася избыточные шумы последних, приводя также к уменьшению разброса шумового напряжения в многоплощадочном фотодиоде.

Следует подчеркнуть, что измеренные в работе значения  $U_{ш}^{20}$  и  $U_{ш}^{70}$  не являются непосредственными шумами ФД, но пропорциональны им, что обеспечивается широким динамическим диапазоном усилителей. Поэтому все качественные выводы, сделанные в работе на основе обсуждения приведенных экспериментальных данных, безусловно, относятся к самим ФД и их шумовым свойствам.

### Заключение

Из представленных данных следует, что при разработке мал шумящих планарных ФД на кремнии, помимо обеспечения требования по темновым токам ниже заданного расчётного уровня, следует иметь в виду необходимость создания контактной системы с толщиной металла, превышающей глубину наиболее глубокого контактного окна на величину, обеспечивающую эффективное шунтирование нижележащего слоя металла, дефектного в области его выхода из контактного окна на поверхность защитной плёнки, слоем металла, находящимся над поверхностью защитной плёнки. При этом, как показывает эксперимент, кардинально снижаются уровни шумовых параметров и их разброс в многоплощадочных фотодиодах.

Очевидно, что результаты данной работы следует принимать во внимание при создании мал шумящих планарных ФД и на других полупроводниковых материалах.

Авторы признательны Е. Ф. Карпенко за всестороннюю помощь при проведении работы и В. Ф. Чишко за полезное обсуждение.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов / Под редакцией Р. Дж. Кисса. Перевод с английского под редакцией В. И. Стафеева. – Москва. Радио и связь. 1985.

2. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 6. С. 72.
3. Астахов В. П., Лихачёв Г. М. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 83.
4. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Сорочкин К. В. // Прикладная физика. 2000. № 3. С. 115.
5. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1999. Вып. 11. С. 91.
6. Мустафаев Г. А. и др. Способ изготовления полупроводниковой структуры. Патент РФ 2515335 С2. 2012.

7. Шокли В., Нойс Р., Саа К. // Успехи физических наук. 1962. Т. 77. Вып. 3. С. 327.
8. Астахов В. П., Гиндин П. Д., Евстафьева Н. И., Карпенко Е. Ф., Карпов В. В., Лихачёв Г. М., Чеканова Г. В., Шаевич В. И. Планарный многоплощадочный кремниевый фотодиод. Патент РФ на полезную модель № 158474. 2015.
9. Астахов В. П., Болесов И. А., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Сорочкин К. В. // Прикладная физика. 2002. № 1. С. 48.
10. Астахов В. П., Евстафьева Н. И., Карпенко Е. Ф., Карпов В. В., Лихачёв Г. М. Планарный многоплощадочный кремниевый фотодиод. Патент РФ на полезную модель № 160523. 2016 г.

PACS: 85-60-q.

## Effect of the aluminum contact layer thickness on planar silicon photodiodes noise parameters

V. P. Astakhov<sup>1</sup>, P. D. Gindin<sup>1</sup>, V. V. Karpov<sup>1</sup>, K. A. Kuzmina<sup>1</sup>,  
S. A. Legotin<sup>2</sup>, and G. V. Chekanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shvabe-Photosystems, a Joint Stock Company  
4A/3A Dnepropetrovskiy passage, Moscow, 117545, Russia  
E-mail: ko-ckb@mail.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Steel and Alloys, a National Research Technological University  
4 Leninskii av., Moscow, 119049, Russia

Received February 28, 2017

***Were examined the means of a noise current and a strain level reduction for planar silicon photodiodes to be applied in the photovoltaic regime. The planar photodiodes noise parameters were experimentally obtained on dependence of the contact system Al-layer thickness. This dependence has been discussed. It is shown that the photodiodes noise properties may be improved by increasing the layer thickness above the critical value conditioned by the contact window depth.***

**Keywords:** planar photodiode, contact system, the contact hole, noise voltage.

### REFERENCES

1. *Photodetectors of Vision and IR Ranges*. Ed. by R. J. Kies (Radio Svyaz', Moscow, 1985) [in Russian].
2. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, and V. V. Karpov, *Tech. Phys. Lett.* **24** (6), 72 (1998).
3. V. P. Astakhov and G. M. Likhachev, *Prikl. Phys.*, No. 4, 83 (2012).
4. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, V. V. Karpov, and K. V. Sorokin, *Prikl. Phys.*, No. 3, 115 (2000).
5. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, and V. V. Karpov, *Surface. X-ray, Synchrotron and Neutron Researches*, No. 11, 91 (1999).
6. G. A. Mustafaev et al., RF Patent 2515335 C2. (2012).
7. V. Shokly, R. Noice, and K. Saa, *Sov. UFN* **77**, 327 (1962).
8. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, N. I. Evstaf'eva, et al., RF Patent No. 158474. (2015).
9. V. P. Astakhov, I. A. Bolesov, D. A. Gindin, V. V. Karpov, and K. V. Sorokin, *Prikl. Phys.*, No. 1, 48 (2002).
10. V. P. Astakhov, N. I. Evstaf'eva, E. F. Karpenko, et al., RF Patent No. 160523 (2016).