

## Обеспечение стойкости планарных фотодиодных кристаллов из антимонида индия к коротковолновому облучению

К. С. Андрейчиков, В. П. Астахов, Г. В. Чеканова

*Работа посвящена модернизации топологии планарных фотодиодных кристаллов (ФДК) из антимонида индия с целью обеспечения их стойкости к коротковолновому ( $\lambda \leq 1$  мкм) облучению, а также экспериментальной оценке результатов модернизации. Показано, что стойкими к коротковолновому облучению при рабочих температурах (вблизи 77 К), являются такие ФДК, в контактные системы которых включены экраны, непрозрачные для коротковолнового излучения. Определены и экспериментально подтверждены требования к геометрическим параметрам, местоположению и электрическим связям экранов в контактной системе ФДК.*

*Ключевые слова:* антимонид индия, планарный фотодиод, контактная система.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-440-446

### Введение

Как правило, практически у всех видов выпускаемых производством планарных ФДК отсутствует стойкость к коротковолновому облучению, выражающаяся в деградации их ВАХ и, следовательно, пороговых параметров при даже кратковременном попадании на охлажденный ФДК незначительных потоков подобного излучения. При этом скорость деградации и ее стойкость пропорциональны плотности потока излучения. Результат такого облучения, а именно искажение ВАХ, сохраняется на все время охлаждения ФДК, а в ряде случаев и после его термализации или прогрева.

Обычно стойкость фотодиодов с ФДК к коротковолновому облучению обеспечивают с помощью установки спектроредительного фильтра перед ФДК при сборке фотодиода в

корпус. Однако в процессах сборки и последующих проверок, охлажденные ФДК могут быть подвергнуты неконтролируемым засветкам, способным привести к деградации ВАХ, поэтому целесообразно обеспечить сам ФДК защитой от коротковолнового облучения. Такое обеспечение стойкости ФДК позволяет минимизировать весогабаритные параметры фотодиода за счет отказа от фильтра, а также гарантировать отсутствие деградации ВАХ ФДК при неконтролируемых засветках в процессе сборки и проверки фотодиодов.

Данная работа посвящена определению технических путей обеспечения стойкости ФДК к коротковолновому облучению и проверке эффективности их реализации.

### Техническое обоснование путей обеспечения стойкости планарных ФДК из антимонида индия к коротковолновому облучению

Влияние коротковолнового облучения на ВАХ типовых планарных ФДК из антимонида индия изучалось в работе [1], где была предложена модель деградации ВАХ при облучении охлажденных ФДК. ФДК создаются на пластине InSb  $n$ -типа проводимости или ее фрагменте (база) с планарными  $p^+n$ -пере-

Андрейчиков Кирилл Сергеевич, инженер-технолог.  
E-mail: andreichikoff.kirill@yandex.ru

Астахов Владимир Петрович, гл. специалист, д.т.н.

Чеканова Галина Васильевна, зам. начальника цеха.  
АО «МЗ «Сапфир».

Россия, 117545, Москва, Днепропетровский проезд, 4А,  
стр. 3А.

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2022 г.

© Андрейчиков К. С., Астахов В. П., Чеканова Г. В.,  
2022

ходами – фоточувствительными площадками (ФЧП), окруженными общей или индивидуальными планарными  $p^+$ -областями, закороченными на базу – охранными кольцами (ОК), отстоящими от границ соответствующих площадок не более чем на две диффузионные длины дырок в базе для «гашения» взрывных шумов [2] и уменьшения темновых токов [3, 4]. В основе модели лежит положение о зарядке всех не защищенных от облучения участков поверхности базы по периферии площадок. При облучении эти участки заряжаются за-

хваченными на них электронами, «разогретыми» поглощенными квантами до энергий, достаточных для эмиссии из InSb и закрепления на ловушках границы раздела InSb – защитный слой. Зарядовое состояние поверхности базы между площадкой и охранным кольцом для этого случая иллюстрирует рис. 1, из которого следует, что такая зарядка границы раздела приводит к формированию «наведенного»  $p(p^+)$ -слоя у поверхности базы, замыкающего площадку с охранным кольцом, что и является причиной деградации ВАХ площадки.

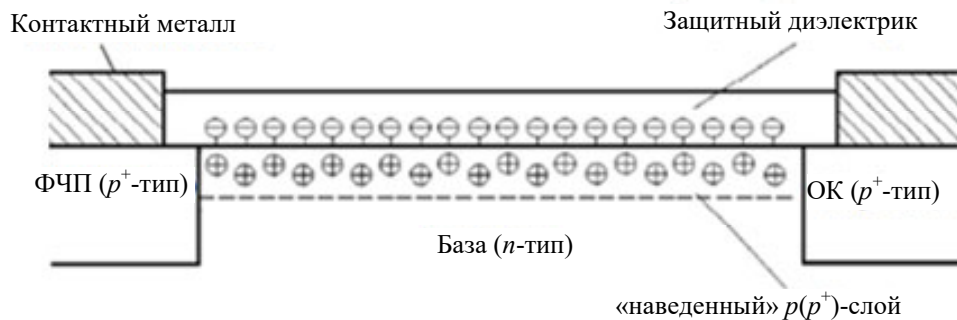


Рис. 1. Зарядка поверхности кристалла InSb при коротковолновом облучении «горячими» электронами, формирующими сплошной наведенный  $p(p^+)$ -слой, замыкающий площадку с охранным кольцом (⊖ – электроны на поверхностных ловушках, ⊕ – свободные дырки)

Из изложенного следует, что обеспечить стойкость ФДК к коротковолновому облучению возможно с помощью создания на поверхности базы вокруг каждой ФЧП экранов, непрозрачных для такого излучения. Экраны должны быть выполнены в виде рамок, полностью закрывающих поверхность базы непосредственно у границ ФЧП, а также не иметь разрывов, на местах которых могут формироваться каналы, способные в той или иной мере электрически соединить площадку с охранным кольцом.

Ширина сторон рамки  $W$  должна перекрывать ширину области пространственного заряда (ОПЗ) площадки при максимальном из напряжений смещения, применяемых при измерениях, испытаниях и эксплуатации ФДК ( $V_{\max}$ ) и дополнительно – ширину экранирования Дебая в базе с тем, чтобы не произошло смыкания канала, образующегося при облучении за пределами рамки, с ОПЗ площадки.

Таким образом, величина  $W$  должна быть не меньше суммы ширины ОПЗ площадки ( $W_{\text{ОПЗ}}$ ), определяемой формулой:

$$W_{\text{ОПЗ}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_{\max}}{eN_{\delta\text{мин}}}}, \quad (1)$$

и ширины экранирования Дебая ( $W_{\text{Д}}$ ), определяемой формулой:

$$W_{\text{Д}} = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{e^2 N_{\delta\text{мин}}}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость InSb,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $e$  – элементарный заряд,  $N_{\delta\text{мин}}$  – минимально возможная концентрация легирующей примеси в базе (фрагменте или пластине),  $V_{\max}$  – максимальное значение напряжения смещения из числа прикладываемых к ФДК при измерениях, испытаниях и эксплуатации,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура ФДК.

При этом использование значения  $N_{\delta\text{мин}}$  гарантирует невозможность образования электрической связи между фоточувствительной площадкой и охранным кольцом при всех возможных уровнях легирования базы.

Суммировав правые части формул (1) и (2) и проведя необходимые преобразования, получаем формулу (3) для требуемого значения ширины экрана:

$$W \geq \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{eN_{\text{б мин}}}} \left( \sqrt{2V_{\text{макс}}} + \sqrt{\frac{kT}{e}} \right). \quad (3)$$

Поскольку рамки не должны иметь разрывов, то это вынуждает электрически и конструктивно соединить их с контактами соответствующих площадок и токоведущими дорожками. Это приводит к возможности формировать экраны в едином процессе со-

здания контактной системы, поскольку применяемый контактный слой металлизации (слой золота толщиной  $\sim 0,8$  мкм с подслоем хрома) не прозрачен для излучения.

Таким образом модернизация планарных ФДК из антимионида индия с целью обеспечения стойкости к коротковолновому облучению сводится к модернизации их топологии в части контактной системы так, как это схематично представлено на рис. 2. Из рисунка следует, что благодаря экрану с шириной  $W$ , соответствующей условию формулы (3), «наведенный»  $p(p^+)$ -слой не замыкает ОПЗ площадки с охранным кольцом.

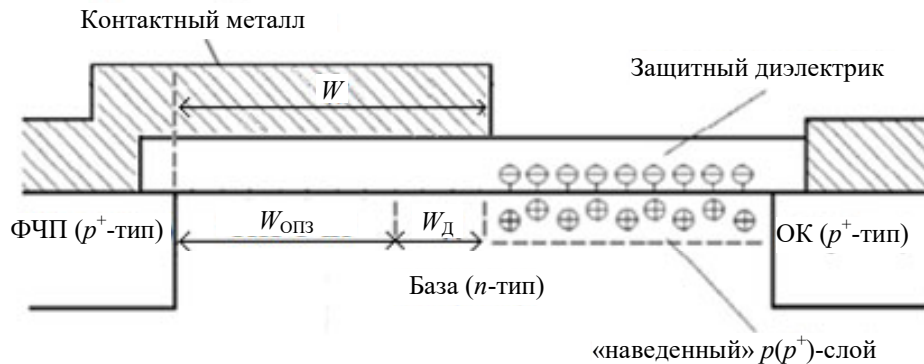


Рис. 2. Фрагмент модернизированной контактной системы ФДК и зарядовое состояние поверхности базы такого ФДК при коротковолновом облучении

### Методики проведения экспериментов и измерений

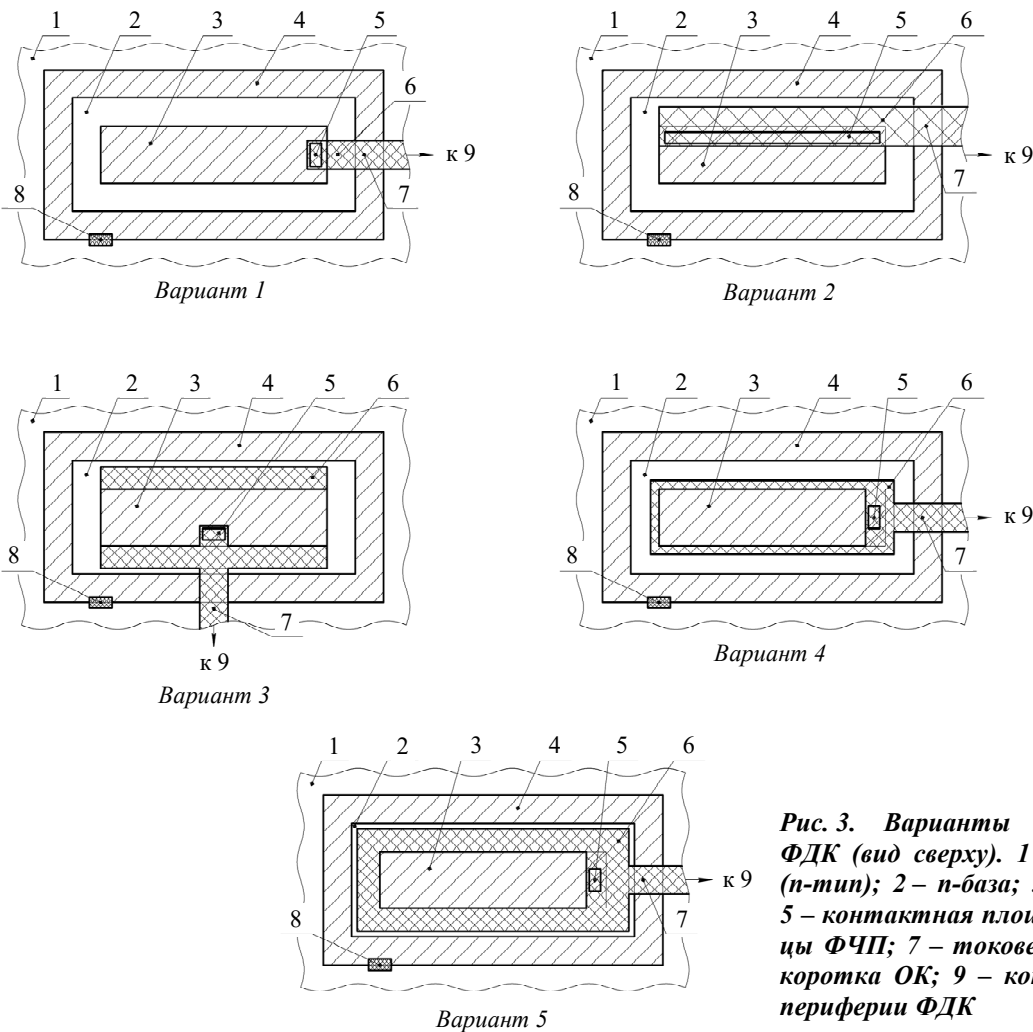
По единой серийной технологии были изготовлены 5 партий 16-площадочных планарных ФДК на основе пластин антимионида индия марки ИСЭ-2 с размером площадок  $50 \times 350$  мкм. Планарные  $p^+n$ -переходы фоточувствительных площадок и окружающие их дополнительные короткозамкнутые  $p^+$ -области охранных колец формировали локальной имплантацией ионов бериллия с последующим термическим отжигом. Защиту поверхности планарных  $p^+n$ -переходов осуществляли анодным окислением антимионида индия с последующим термическим напылением пассивирующего слоя  $\text{SiO}_x$ . Контактную систему, включающую контакты площадок, закоротки охранных колец, экраны коротко-

волнового излучения и токоведущие дорожки формировали в едином процессе с помощью фотолитографии на основе слоя золота толщиной  $\sim 0,8$  мкм с подслоем хрома. Изготовленные партии отличались вариантами контактной системы по виду, расположению и геометрии экранов, содержание которых представлено в таблице и объясняется рис. 3. При этом в вариантах (1–3) использовали топологию контактов серийных приборов в виде незамкнутых одной «короткой», одной или двух «длинных» прямых линий, в разной мере экранирующих поверхность базы у границы с площадкой. В вариантах 4 и 5 экраны площадок имеют вид рамки с шириной сторон 4 и 23 мкм, соответственно, без разрывов закрывающих металлизацией участки поверхности базы, расположенные вплотную к границам площадок.

Таблица

**Особенности геометрии и расположения экранов в выбранных вариантах контактной системы и результаты оценки стойкости ФДК с этими вариантами к коротковолновому облучению (см. рис. 3)**

№№ вариантов	Особенности геометрии и расположения экранов на поверхности ФДК	Стойкость при $V_{\text{макс}} = 2,5 \text{ В}$	Стойкость при $V_{\text{макс}} = 7 \text{ В}$
1	Экран в виде линии шириной 30 мкм (соответствует требованию формулы (3)) расположен над базой только у одной узкой стороны площадки. Остальная часть периметра площадки и прилегающая область базы не имеют экрана (см. вар. 1 рис. 3)	Отсутствует	Отсутствует
2	Экран в виде линии шириной 30 мкм располагается над поверхностью базы вдоль одной длинной стороны площадки по всей её длине. С остальных сторон экран отсутствует (см. вар. 2 рис. 3)	Отсутствует	Отсутствует
3	Экран в виде незамкнутых линий шириной 30 мкм располагается вдоль обеих длинных сторон площадки над поверхностью базы, не замыкаясь по узким сторонам (см. вар. 3 рис. 3)	Отсутствует	Отсутствует
4	Экран в виде рамки без разрывов с шириной сторон 4 мкм (соответствует условию формулы (3) для $V_{\text{макс}} = 2,5 \text{ В}$ ) располагается вдоль всего периметра площадки, закрывая поверхность прилежащей области базы (см. вар. 4 рис. 3)	Стойкость имеет место	Отсутствует
5	Экран в виде рамки без разрывов с шириной сторон $\sim 23 \text{ мкм}$ (соответствует условию формулы (3) для $V_{\text{макс}} = 7 \text{ В}$ ) располагается вдоль всего периметра площадки, закрывая поверхность прилежащей области базы (см. вар. 5 рис. 3)	Стойкость имеет место	Стойкость имеет место



**Рис. 3. Варианты контактной системы ФДК (вид сверху). 1 – фрагмент пластины (n-тип); 2 – n-база; 3 – p<sup>+</sup>-ФЧП; 4 – p<sup>+</sup>-ОК; 5 – контактная площадка; 6 – экран у границы ФЧП; 7 – токоведущая дорожка; 8 – закоротка ОК; 9 – контактная площадка на периферии ФДК**

После разрезания пластин на отдельные ФДК с помощью характеристографа производили контроль прямых и обратных ветвей ВАХ. Все ФДК имели аналогичные ВАХ с напряжением отсечки  $U_{отс} = 0,12$  В и напряжением «загиба»  $U_{заг} = 7$  В. Такие ФДК собирали в корпуса с прозрачными окнами и при охлаждении жидким азотом измеряли и фиксировали их темновые ВАХ до облучения. Далее, не прекращая охлаждения, через входное окно корпуса производили облучение всей площади ФДК как при приложении обратного смещения 100 мВ, так и без него. Облучение производили от осветителя типа ОИ-24 с расстояния  $\sim 10$  см при выбранных токах накала от 0 до 8 А в течение 2÷3 секунд. После завершения облучения, не прекращая охлаждать ФДК, повторно измеряли обратные ветви ВАХ через разные (до 30 минут) промежутки времени.

Вывод о стойкости ФДК к коротковолновому облучению делали исходя из сравнения ВАХ, измеренных в двух диапазонах смещений (до  $V_{\max} = 2,5$  В и до  $V_{\max} = 7$  В) до и после облучения при непрерывном охлаждении. Стойкими считали ФДК, исходные ВАХ которых не изменились после облучения и многократных повторных облучений и измерений при непрерывном охлаждении.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Отметим, что все полученные результаты не имеют зависимости от наличия или отсутствия обратного смещения 100 мВ во время облучения и сводятся к следующему (см. рис. 4 и результаты оценки стойкости в таблице).

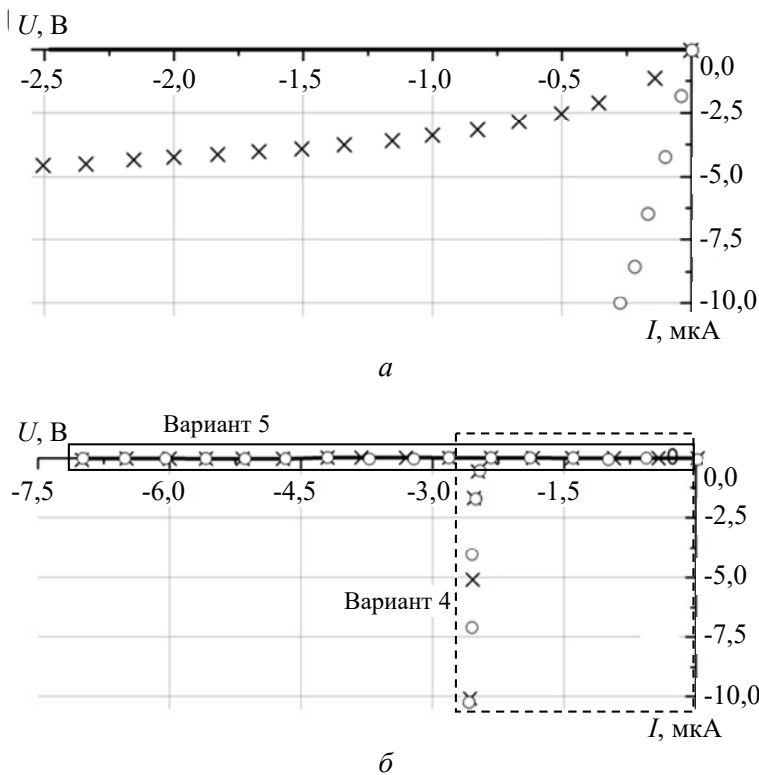


Рис. 4. Начальные участки обратной ветви ВАХ ФДК для вариантов контактной системы 1–3 (а) и 4, 5 (б) до (—) и после облучения при «слабом красном» (xxx) и «сильном белом» (° ° ° °) свечении осветителя

Исходные (до облучения) темновые обратные ветви ВАХ для всех вариантов топологий контактной системы не регистрируют токи утечки. Синхронно с включением осветителя в значительной степени и почти одинаково возрастают токи во всем диапазоне прикладываемых напряжений обратного смещения на ФДК всех вариантов топологии. Это – световые токи, обусловленные наличием в спектре

излучения осветителя участка с  $\lambda \geq 1$  мкм, соответствующего началу поглощения в антимониде индия.

При выключении осветителя результаты с вариантами топологии (1–3) и (4, 5) противоположны. В случае вариантов (1–3), когда экраны не замкнуты вокруг площадок, отключение осветителя лишь частично уменьшает обратные токи на величину светового тока, не

возвращая обратную ветвь ВАХ к исходному виду, демонстрируя ее деградацию в течение всего последующего времени охлаждения в тем бóльшей мере, чем большим был поток квантов при облучении. В условиях наших экспериментов такие деградировавшие ВАХ являются почти линейными с наклоном, соответствующим шунтирующему площадке сопротивлению на уровне от единиц МОм до десятков Ом при увеличении тока накала осветителя (см. рис. 4а). При этом деградировавшие ВАХ для всех  $3^x$  вариантов топологии практически совпадают и свидетельствуют об отсутствии стойкости к облучению в обоих диапазонах напряжений смещения. Исходя из вышеприведенного обоснования данный результат объясняется формированием при облучении охлажденных ФДК из антимонида индия устойчивых при последующем непрерывном охлаждении каналов  $p$ - или  $p^+$ -типа на всех не защищенных металлическим слоем участках поверхности базы между площадкой и охранным кольцом. Сопротивление таких каналов у обсуждаемых вариантов топологии отличается в 2÷4 раза за счет отличия их геометрических параметров.

В случае вариантов топологии (4, 5), когда экраны в виде рамки с разной шириной сторон (4 и 23 мкм) замкнуты вокруг площадки без разрыва, отключение осветителя синхронно возвращает ВАХ к исходному виду на участке до 2,5 В для «узкой» рамки и на участке до 7 В – для «широкой» рамки (см. рис. 4б). При бóльших напряжениях смещения ВАХ деградируют и остаются деградировавшими в течение всего времени охлаждения.

Эти данные показывают, что экраны в виде рамок, окружающих площадку без разрывов, позволяют обеспечить стойкость ФДК к облучению, и при этом увеличение ширины сторон рамки увеличивает диапазон значений обратного смещения, ограниченный величиной  $V_{\text{макс}}$ , в котором эта стойкость имеет место. В наших экспериментах ширина сторон рамки 4 и 23 мкм обеспечивает значения  $V_{\text{макс}}$ , равные соответственно 2,5 В и 7 В, которые получены также из формулы (3) при  $N_{\text{б мин}} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , что свидетельствует о справедливости

исходных положений, принятых при выведении этой формулы.

### Заключение

В работе показано, что планарные ФДК из антимонида индия, имеющие на поверхности участки между границами фоточувствительной площадки и закороченного охранный кольца, не защищенные от коротковолнового облучения, являются нестойкими к такому облучению, кратковременное воздействие которого при рабочей температуре (~80 К) приводит к деградации обратной ветви ВАХ площадки на все время непрерывного охлаждения. Стойкими к коротковолновому облучению являются только такие ФДК, в контактную систему которых включены непрозрачные для коротковолнового излучения экраны. Экраны расположены над поверхностью базы и имеют форму рамки вокруг каждой фоточувствительной площадки, примыкая к ее границам. Рамки не имеют разрывов, электрически и конструктивно соединены с контактами соответствующих площадок и создаются на диэлектрическом слое в едином процессе формирования контактной системы на основе проводящих слоев, непрозрачных для коротковолнового излучения. Ширина сторон рамки определяется условием, установленным в работе на основе заданного значения максимального напряжения обратного смещения на площадке, ограничивающего диапазон смещений, в котором обеспечивается стойкость к облучению.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов В. П., Гиндин П. Д., Чеканова Г. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 131.
2. Астахов В. П., Дудкин В. Ф., Кернер Б. С., Осипов В. В., Смолин О. В., Таубкин И. И. // Микроэлектроника. 1989. Т. 18. Вып. 5. С. 455.
3. Астахов В. П., Гиндин П. Д., Карпов В. В. // Письма в журнал технической физики. 1998. Т. 24. № 2. С. 72.
4. Астахов В. П., Лихачев Г. М. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 83.

## Provide of planar photodiode crystals from indium antimonide resistance to shortwave irradiation

*K. S. Andreichikov, V. P. Astakhov, and G. V. Chekanova*

Moskovsky zavod «SAPFIR». J.S.C.  
Bld. 3A, 4A Dneprohetrovskiy passage, Moscow, 117545, Russia  
E-mail: andreichikoff.kirill@yandex.ru

*Received September 19, 2022*

***The work is devoted to modernization of topology planar photodiode crystals (PDC) from indium antimonide in order to ensure their resistance to shortwave ( $\lambda \leq 1 \mu\text{m}$ ) irradiation as well as experimental assessment of modernization results. It is shown that the PDC with contact systems including screens that are opaque for shortwave radiation are resistant to shortwave irradiation at working temperatures (near 77 K). The requirements to geometric parameters, location and electric relationships of screens in the PDC contact system have been identified and experimentally confirmed.***

*Keywords:* indium antimonide, planar photodiode, contact system.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-440-446

### REFERENCES

1. V. P. Astakhov, P. D. Gindin, and G. V. Chekanova, *Usp. Prikl. Fiz.* **7** (2), 131 (2019).
2. V. P. Astakhov, V. F. Dudkin, B. S. Kerner, and I. I. Taubkin, *Mikroelektronika* **18** (5), 455 (1989).
3. V. P. Astakhov, P. D. Gindin, and V. V. Karpov, *Technical Physics Letter* **24** (2), 72 (1998).
4. V. P. Astakhov and G. M. Lihachev, *Applied Physics*, No. 4, 83 (2012) [in Russian].