

## Пеленгационные инфракрасные системы

*П. С. Кривошеев<sup>1\*</sup>, Т. Н. Хацевич<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: pavelks@inbox.ru

**Аннотация.** Приведен обзор пеленгационных ИК-систем кругового обзора. Описаны основные проблемы, возникающие при разработке данного типа систем. Целью статьи является анализ возможности применения широкоугольных инфракрасных объективов для задач пеленгации объектов. Определены принципы построения широкоугольного пеленгационного модуля. Приведены результаты расчета дальности обнаружения объектов по критерию Джонсона для объективов с различными угловыми полями. Найдены принципиальные схемные решения ИК объектива с угловым полем до 150°. Намечены пути создания на его основе объектива для сопряжения с охлаждаемым приемником излучения, работающим в спектральном диапазоне 3-5 мкм. Показана перспективность применения оптических методов смены полей зрения для решения пеленгационных задач.

**Ключевые слова:** тепловизионная система, дальность, обнаружение, распознавание, идентификация, ИК-объектив, широкоугольный ИК-объектив

## Direction finder infrared systems

*P. S. Krivosheev<sup>1\*</sup>, T. N. Khatsevish<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: pavelks@inbox.ru

**Abstract.** The review of direction-finding IR-systems of circular view is given. The main problems arising in the design of this type of systems are described. The purpose of the article is to analyze the possibility of using wide-angle infrared lenses for object direction finding. The principles of constructing a wide-angle direction-finding module are determined. The results of calculating the detection range of objects by the Johnson criterion for lenses with different angular fields are presented. Fundamental circuit solutions of an IR lens with an angular field of up to 150° have been found. Ways are founded on creating an objective on its basis for connecting with a cooled IR-detector spectral range of 3-5 μm. The prospects of using optical methods for changing fields of vision for solving direction-finding problems are shown.

**Keywords:** infrared imaging system, range, detection, recognition, identification, infrared lens, infrared zoom lens

### *Введение*

В настоящее время значительно возрастает актуальность пассивных панорамных оптико-электронных пеленгационных систем с повышенной вероятностью обнаружения и распознавания целей.

В литературе [1-4] описаны конструкции сканирующих систем, принцип построения которых основан на механической развертке оптического мгновенного поля зрения в пространстве предметов. Однако такие системы имеют ряд недостатков: значительные габаритные размеры, низкую надежность и невозможность одновременного наблюдения за всем пространством предметов. Одним из

основных недостатков таких систем являются малые углы полей зрения и необходимость кругового вращения оптико-электронного модуля вокруг вертикальной оси. При таком построении возникает коническая «слепая» зона, требующая использования дополнительных пеленгационных модулей.

Благодаря появлению высокочувствительных матричных фотоприемных устройств (ФПУ) высокого разрешения появилась возможность создания несканирующих оптико-электронных систем секторного обзора специального назначения, исходя из функционального назначения прибора и условий его эксплуатации [5, 6]. Целью статьи является анализ возможности применения широкоугольных инфракрасных модулей для пеленгации объектов.

Методы исследования: методы геометрической оптики и теории оптико-электронных приборов.

### *Методы и материалы*

Архитектурно система состоит из следующих частей: тепlopеленгаторная камера, включающая в себя оптическую систему формирования изображения, ФПУ, электронные модули первичной обработки и аппаратура целевой обработки изображений, выполняющая задачи обнаружения и распознавания объектов, отслеживание траекторий с выдачей координат, улучшения изображения для наблюдения оператором и др.

Отличительной особенностью ФПУ инфракрасного (ИК) диапазона спектра, является то, что внутри охлаждаемой зоны установлена физическая диафрагма для уменьшения фоновой засветки (рис. 1). Параметры и характеристики серийного ИК ФПУ представлены в табл. 1.

Таким образом, оптическую систему необходимо рассчитывать так, чтобы эта диафрагма выполняла роль апертурной. Несимметричность расположения линз объектива относительно плоскости апертурной диафрагмы требует тщательной коррекции таких аберраций, как хроматизм увеличения и кома. Анализируя предложенную в [7] классификацию объективов с вынесенным выходным зрачком для тепловизионных приборов можно принять, что для создания широкоугольного ИК объектива предпочтительной будет схема типа «б». Данная схема показана на рис. 2.

*Таблица 1*

Параметры и характеристики ИК ФПУ

Наименование характеристики	Значение характеристики
Разрешение, пиксель	1280×1024
Материал детектора	КРТ / либо InSb
Размер пикселя, мкм	10×10
Диафрагменное число	1 : 4
Спектральный диапазон, мкм	3,7±0.2 ... 4,8±0.2
Эквивалентная шуму разность температур, мК	не более 25
Количество работоспособных пикселей, %	не более 99,5
Рабочая температура ФПУ, К	менее 80
Тип микрокриогенной системы	холодильник Стирлинга
Масса, г	не более 720

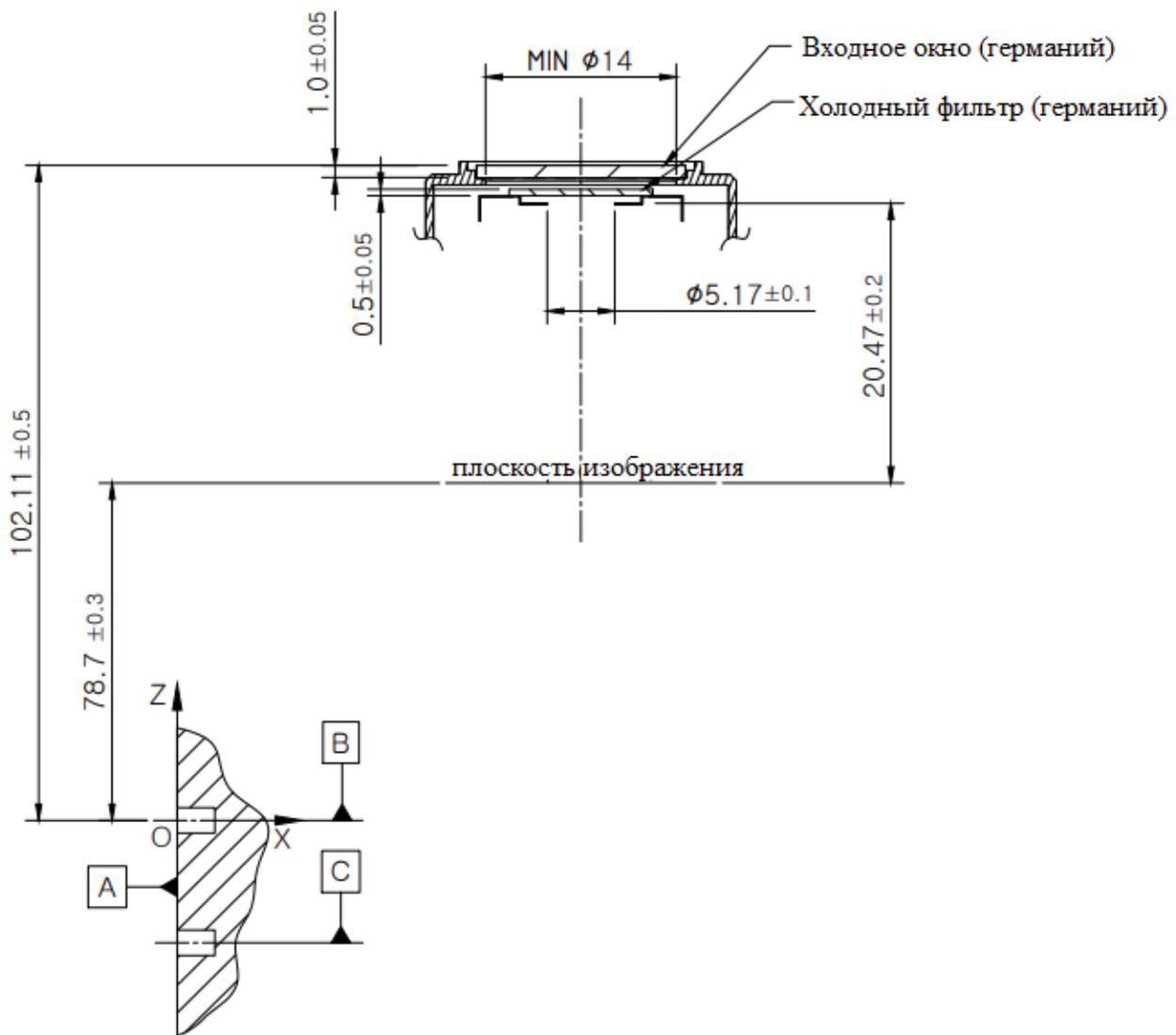


Рис. 1. Оптическая схема ФПУ

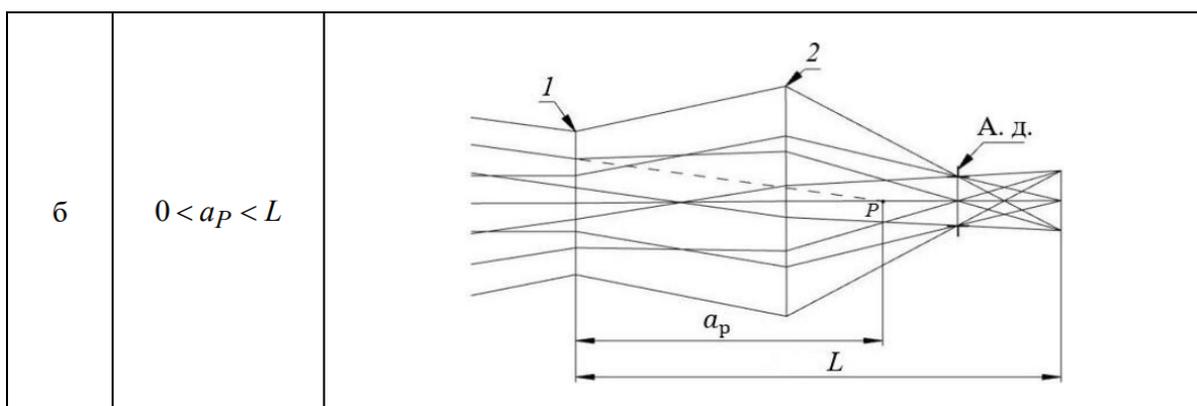


Рис. 2.  $P$  – центр входного зрачка;  $a_p$  – расстояние вдоль оптической оси от первого компонента объектива до входного зрачка; А. д. – охлаждаемая диафрагма приемника;  $L$  – расстояние от первого компонента до плоскости изображения; 1 – первый компонент системы; 2 – второй компонент системы

Не менее важным вопросом при проектировании широкоугольного ИК объектива является вопрос о дисторсии. Наличие дисторсии приводит к искажению пространственного расположения объектов в изображении. Для пеленгационной системы важным является возможность простого аналитического описания зависимости координат изображения от углового положения объекта в пространстве предметов. Такой зависимостью может выступать линейная зависимость радиальной координаты изображения от угла в пространстве предметов. Как показано в [8], такой характер дисторсии в отличие от ортоскопического позволяет повысить светораспределение по полю, что улучшает возможность пеленгации объектов, находящихся на периферии поля зрения.

Перспективным приемом структурного синтеза широкоугольной системы инфракрасного объектива может служить схемное решение, использованное при построении сверхширокоугольного объектива видимого диапазона [8, 9] основанное на сочетании афокальной системы и фокусирующего оптического компонента. Поиск области решений такого схемного решения требуется осуществлять для спектрального диапазона, соответствующего рабочему спектральному диапазону чувствительности приемника излучений.

Для спектральной ахроматизации объектива существенное значение имеет спектральная чувствительность ФПУ и спектральные характеристики пропускания материалов линз. Спектральная характеристика ИК ФПУ представлена на рис. 3.

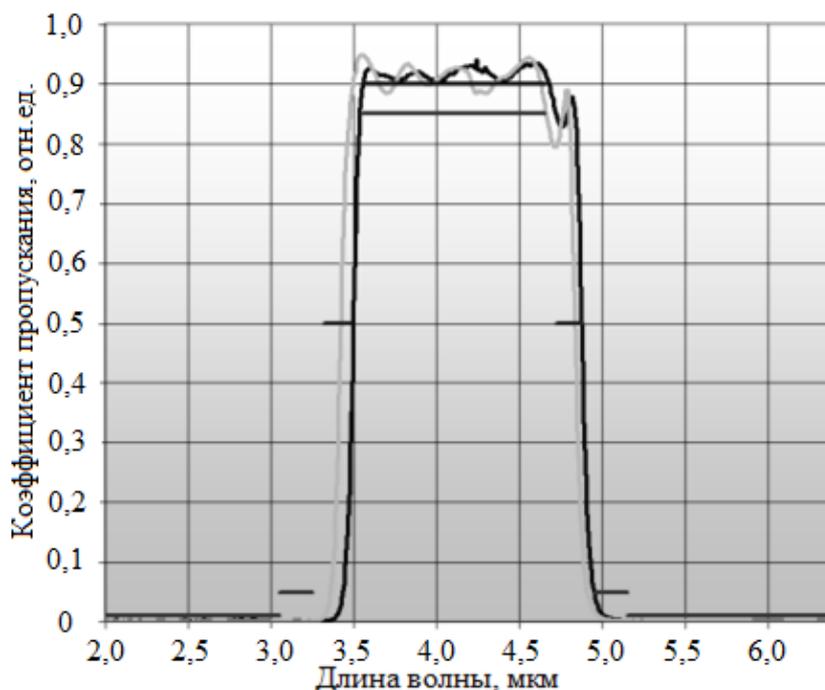


Рис. 3. Спектральная чувствительность ИК ФПУ

Поскольку для решения пеленгационных задач важным является обнаружение точечного объекта в кадре, то критерием качества оптической системы

может выступать значение доли энергии, сконцентрированной оптической системой на площадке, размер которой соответствует размеру пикселя приемника.

### **Результаты и обсуждение**

Были рассчитаны дальность обнаружения различных типичных объектов, интересных для пеленгации в верхней полусфере.

Критерий Джонсона [7, 10] представляет собой зависимость между вероятностью решения задачи наблюдения, количеством разрешаемых штрихов эквивалентной миры  $N$ , уложенных на критическом размере наблюдаемого объекта.

Пространственная частота системы  $\nu$  в плоскости изображения, обеспечивающая требуемое для обнаружения объекта число  $N$ , может быть рассчитана по формуле (1), приведенной в [2]:

$$\nu = \frac{N \cdot l}{f' \cdot h_{кр}}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – пространственная частота оптической системы в плоскости изображения, л/мм;  $N$  – число периодов эквивалентной миры, укладываемых в критическом размере объекта;  $l$  – расстояние от оптической системы до объекта наблюдения, м;  $f'$  – фокусное расстояние оптической системы, мм;  $h_{кр}$  – критический размер наблюдаемого объекта, м.

Считая, что ИК объектив при высоком относительном отверстии имеет дифракционное качество изображения, можно принять  $N$  равным частоте Найквиста, определяемой по следующей формуле:

$$\nu = \frac{1}{2a}, \quad (2)$$

где  $a$  – размер фоточувствительного элемента ФПУ, мм.

С учетом формул (1) – (2) расстояние до объекта определится как:

$$l = \nu \cdot \frac{f' \cdot h_{кр}}{N}. \quad (3)$$

В качестве объектов рассмотрены три летательных аппарата, габаритные характеристики которых близки к следующим моделям: объект 1 – Bayraktar TB2 [11], объект 2 – С70 «Охотник» [12], объект 3 – F15 «Eagle» [13]. Для пеленгационной системы, параметры приемника излучений которой соответствует приведенным в табл. 1 и на рис. 1, 3, в табл. 2 представлены результаты оценки дальности обнаружения, полученные по формулам (1) – (3) для объективов с различными полями зрения в пространстве предметов.

Дальность обнаружения летательных аппаратов

Модель летательного аппарата	Размер проекции, м	Дальность обнаружения, км при угле поля зрения объектива		
		90°	120°	150°
Объект 1	12,0 × 6,5	2,7	1,5	0,7
Объект 2	19,0 × 14,0	5,7	3,3	1,5
Объект 3	13,0 × 19,4	5,3	3,1	1,4

В результате расчета следует, что даже применение ФПУ с размером пикселя 10 мкм недостаточно для уверенной пеленгации таких крупных объектов, как истребитель или тяжелый БПЛА при поле зрения системы до 150°. Тем не менее из [14, 15] следует, что возможна пеленгация объектов геометрическим размером менее одного пикселя ФПУ при достаточном тепловом потоке от объекта.

Найдено наиболее близкое схемное решение широкоугольного объектива с угловым полем 150° и относительным отверстием 1 : 1,2 [16]. Объектив содержит отрицательный мениск 1, обращенный выпуклой поверхностью к пространству предметов, положительную линзу 2, отрицательный мениск 3, обращенный вогнутой поверхностью к пространству предметов, положительную линзу 4 и положительный мениск 5, обращенный вогнутой поверхностью к плоскости изображений, и апертурную диафрагму 6, входное окно фотоприемника 7. Апертурная диафрагма расположена между пятым мениском и плоскостью изображений, вторая линза – мениск, обращенный вогнутой поверхностью к плоскости изображений, четвертая – двояковыпуклая. Расстояние между первой и второй линзами не превышает 12 фокусных расстояний объектива. Оптическая схема объектива показана на рис. 4.

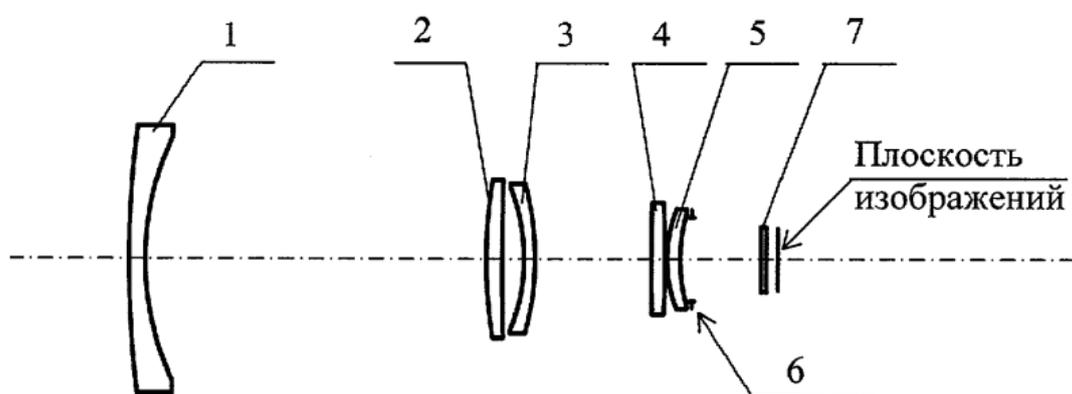


Рис. 4. Оптическая схема широкопольного объектива

Так как в объективе все линзы выполнены из германия, то это затрудняет прямой пересчет объектива на спектральный диапазон от 3 до 5 мкм, так как ко-

эффиценты средней дисперсии германия в спектральных диапазонах 8-12 и 3-5 мкм отличаются примерно на порядок. Для успешной разработки объектива необходимо применить материалы, обеспечивающие коррекцию хроматизма в спектральном рабочем диапазоне от 3 до 5 мкм.

### *Заключение*

Включение широкоугольного пеленгационного модуля в пеленгационную систему приведет к повышению эффективности при решении различных задач специального применения. Для возможности реального применения в изделиях необходимо в широкоугольной инфракрасной системе дополнительно обеспечить пассивную термокомпенсацию и максимально снизить влияние эффекта Нарцисса. Перспективным направлением для решения пеленгационных задач представляется применение ИК объективов, в которых реализуется высокоскоростная перестройка угла поля зрения. Поскольку повышение дальности пеленгации объектов напрямую связано с увеличением фокусного расстояния и относительным отверстием оптической системы, то изменение угла поля зрения должно осуществляться оптическим методом.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. – Казань : Издательство Казанского университета, 2000. – 252 с.
2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография, основы, техника, применение / под ред. чл.-корр. АН СССР Л.Н. Курбатова. – Москва : Мир, 1988. – 381 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – Москва : Логос, 2004. – 443 с.
4. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Логос, 2004. – 472 с.
5. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань : Образовательные технологии, 2006. – 596 с.
6. Филачев А.М., Пономаренко В.П., Горелик Л.И., Куликов К.М. Разработанные в НПО «Орион» фотоприемники и фотоприемные устройства для приема лазерного излучения в спектральном диапазоне 0,3-11 мкм. / Лазер-Информ, 2003, № 7(262), С.14–19.
7. Греченевский А.С., Хацевич Т. Н. Исследование схем объективов с вынесенным выходным зрачком для тепловизионных приборов. – Новосибирск : Вестник СГУГиТ, Том 25, № 2, 2020. – С.259-275.
8. Деева Д.Е., Хацевич Т.Н. Светораспределение в широкоугольных объективах. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. Т. 6. – С. 70–77.
9. Пат. 2767011 Российская Федерация МПК G02В 9/64, G02В 9/04; Особоширокоугольный объектив. № 2021113828; заявл. 17.05.2021; опубл. 16.03.2022 – Бюл. № 9. / Деева Д.Е., Хацевич Т.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий».
10. Johnson J. H. Analysis of Image Forming Systems. Image Intensifier Symposium, AD 220160 (Warfare Electrical Engineering Department, U.S. Army Research and Development Laboratories, Ft. Belvoir, Va., 1958), pp. 244–273.

11. Турецкий ударный БПЛА «Bayraktar TB2» // Большая военная энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: [http://zonwar.ru/news3/news\\_569\\_Bayraktar\\_TB2.html](http://zonwar.ru/news3/news_569_Bayraktar_TB2.html) (дата доступа 15.05.2022).
12. Российский «Охотник» окажется сверхзвуковым // Lenta.ru [Электронный ресурс]. – URL: <https://lenta.ru/news/2019/02/13/okh/> (дата доступа 15.05.2022).
13. F-15A/B Eagle // Уголок неба. Большая авиационная энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.airwar.ru/enc/fighter/f15.html#LTH> (дата доступа 15.05.2022).
14. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Фесько Ю.А., Поликанин А.Н. Дальность действия тепловизионных систем. Ч.І. Методика расчета. Автометрия. 2014. Т.50, №4. С.96–101.
15. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Лаптев Е.В., Исаев М.П., Крапивко Е.А., Фесько Ю.А., Поликанин А.Н. Дальность действия тепловизионных систем. Ч.ІІ. Алгоритм, исходные данные и результаты расчетов. : Автометрия. 2015. Т.51, №2. С.49–53.
16. Пат. 2385475 Российская Федерация МПК G02В 9/60; Светосильный широкоугольный объектив для инфракрасной области спектра (варианты). № 2008132637/28; заявл. 07.08.2008; опубл. 27.03.2010 – Бюл. № 9. / Хацевич Т.Н., Терешин Е.А.; заявитель и патентообладатель Институт физики полупроводников СО РАН.

© П. С. Кривошеев, Т. Н. Хацевич, 2022