

УДК 621.384

## Приемные устройства оптического диапазона на основе антенных решеток

А. Н. Свиридов, В. П. Бабенко

*Быстрый прогресс нанотехнологий позволяет полагать, что в ближайшем будущем будут разработаны эффективные приемные устройства инфракрасного (ИК) и видимого диапазонов на основе антенных решеток. Обсуждены возможные принципы построения подобных устройств.*

PACS: 85.60.Gz

*Ключевые слова:* нанотехнология, приемные устройства, ИК-диапазон, видимый диапазон.

### Введение

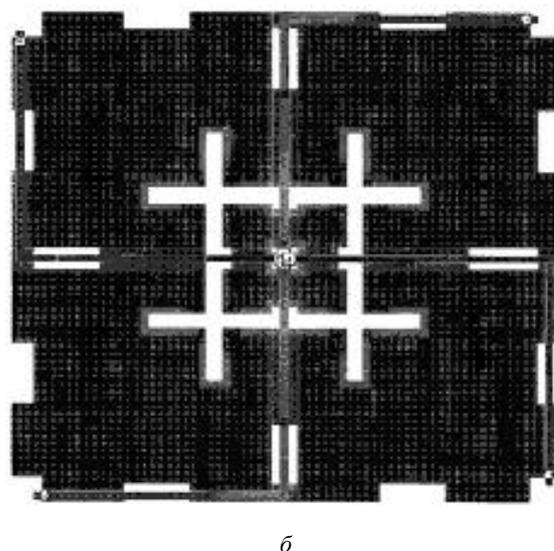
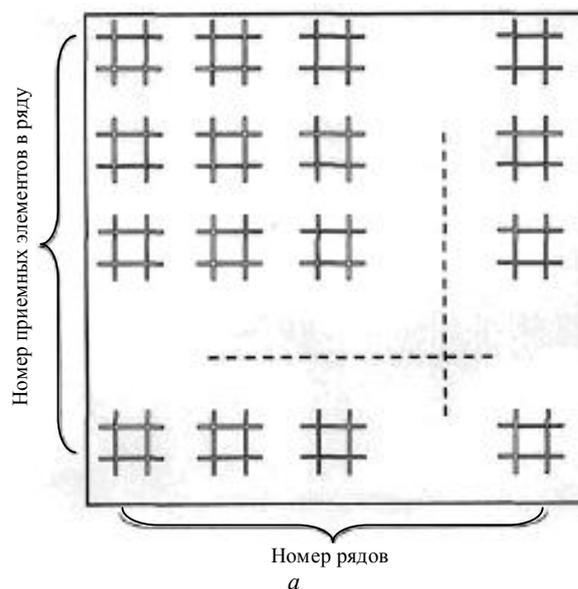
Развитие нанотехнологий позволяет полагать, что в ближайшем будущем будут разработаны эффективные приемные устройства ИК- и видимого диапазонов на основе антенных решеток. В настоящее время на базе приемных устройств с антенными решетками созданы высокочувствительные отображающие спектрометры (работающие в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах), которые используются в радиоастрономии, для дистанционного мониторинга атмосферы, в медицине, в системах безопасности, для обнаружения скрытого (например, под одеждой) оружия или взрывных устройств.

Основным отличительным элементом подобных матричных приемных устройств является антенная матрица, обладающая возможностью приема обеих поляризаций. Нагрузкой каждой антенны матрицы может быть нелинейный элемент, выполняющий роль смесителя высокочастотного тока, возбуждаемого в антенне принимаемым излучением, и высокочастотного тока гетеродина (в гетеродинных антенных приемниках), или сверхпроводящий болометр, сопротивление которого меняется в результате поглощения энергии высокочастотного тока, возбуждаемого принимаемым излучением в антенне (при прямом преобразовании энергии принимаемого излучения).

### Принципы построения

На рис. 1, а показана топология матричного приемника терагерцового излучения на основе антен-

ных решеток [1]. Нагрузкой каждой антенны является сверхпроводниковый болометр.



**Рис. 1. Матричный приемник:**  
а — топология приемника терагерцового излучения на основе антенных решеток; б — антенный элемент матричного приемника с двумя болометрами

**Свиридов Анатолий Николаевич**, начальник НТЦ ФГУП «НПО "Орион"».

Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. (495) 374-94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru

**Бабенко Валерий Павлович**, доцент.

МИРЭА.

Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2008 г.

Антенная матрица состоит из отдельных крестообразно пересекающихся двух пар щелевых антенн, что обеспечивает прием обеих поляризаций излучения, и выполнена в виде интегральной микросхемы.

На рис. 1, б изображен антенный элемент этой интегральной микросхемы с двумя болометрами [1], каждая из двух взаимно перпендикулярных микрополосковых линий согласована с соответствующими щелями антенны.

На рис. 2 представлен результат расчета потерь на отражение (на один элемент приемной матрицы для одной поляризации) от частоты падающего излучения, характеризующий спектральную чувствительность [1]. В центре полосы потери на отражение составляют 5 %, что соответствует 95%-му прохождению мощности излучения в болометр.

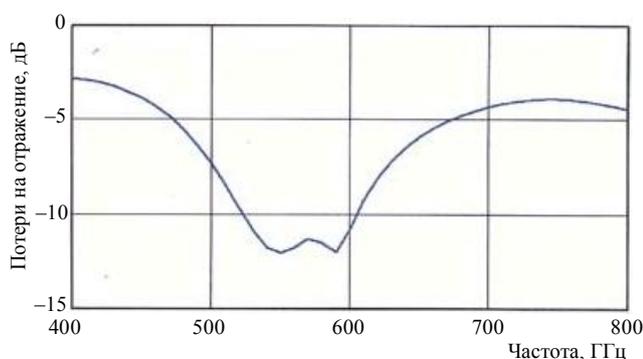


Рис. 2. Результат расчета потерь на отражение от частоты падающего излучения

Как следует из приведенной зависимости потерь на отражение от частоты принимаемого излучения, относительная ширина полосы описываемого антенного приемника  $\Delta f/f$  приблизительно равна 0,1—0,2. Порог чувствительности этого матричного устройства равен  $4 \cdot 10^{-19}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> (при температуре края сверхпроводящего перехода  $T = 0,4$  К) и  $4 \cdot 10^{-21}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> (при температуре края сверхпроводящего перехода  $T = 0,08$  К).

В антенных приемниках гигагерцового и терагерцового диапазонов в качестве смесителей (при гетеродинном приеме) могут быть использованы смесители типа СИС (сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник), сверхпроводящие болометры на горячих электронах, плазмонные устройства и диоды с барьером Шоттки. Последние также используются в гигагерцовых антенных приемниках прямого детектирования.

Переход к приему излучений ИК- и видимого диапазонов возможен только при соответствующем уменьшении размеров (площади) антенн (площади антенн должны быть соизмеримы с квадратом длины принимаемой волны), увеличении частоты гетеродинов (при гетеродинном прие-

ме) и увеличении быстродействия смесителей и детекторов.

Особенности гетеродинных антенных приемников, работающих в терагерцовом диапазоне (по сравнению с оптическими гетеродинными фотоприемниками, работающими в ИК-области спектра), заключаются в том, что в первых преобразование излучения в высокочастотный ток происходит в антенне, представляющей собой избирательный колебательный контур, а смещение частот тока сигнала и тока гетеродина и детектирование — в нелинейном смесителе и детекторе. Последнее весьма важно, так как подобное разделение функций приема и преобразования позволяет уменьшать геометрические размеры смесителя и детектора, делая их много меньшими длины волны, принимаемой антенной, и, следовательно, в принципе открывает путь для увеличения их быстродействия, возможно, вплоть до ИК- и оптических частот.

В гетеродинных фотоприемных устройствах ИК-диапазона фотоприемник выполняет (помимо функции смесителя и детектора) функцию антенны, вследствие чего его площадь должна быть соизмерима с квадратом длины волны принимаемого излучения. Это накладывает практически непреодолимые ограничения на возможность уменьшения его размеров и емкости (например, емкость фотодиода  $C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot A/w$ , где  $A$  — площадь,  $\varepsilon \cdot \varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость,  $w$  — толщина области объемного заряда) и, следовательно, на его граничную частоту  $f_0$ . Эти же ограничения остаются в силе и для фотоприемников (и оптических приемников других видов, в которых приемный элемент совмещает функции антенны и смесителя или детектора), работающих в режиме прямого детектирования. Поэтому верхние границы частотных характеристик современных фотоприемников ИК-излучения не превосходят 1 ГГц. (Например, граничная частота КРТ-фотодиода с площадкой  $200 \times 200$  мкм, работающего в спектральном диапазоне 8—12 мкм, не превышает 100 мГц (при  $C = 3$  пФ и  $w = 2$  мкм) [2].

Разделение функций приема и преобразования (смещения и/или детектирования) в антенных приемниках на основе резонирующих структур (в том числе наноструктур с локализованными плазмонными резонансами) открывает путь для резкого уменьшения размеров смесителей и детекторов высокочастотных токов и позволяет предполагать возможность гетеродинного и прямого детектирования антенных токов на частотах вплоть до  $10^{13}$ — $10^{14}$  Гц.

В настоящее время в качестве нелинейного элемента в гармоничных смесителях гигагерцового диапазона применяются планарные полупро-

водниковые диоды с барьером Шоттки. На рис. 3 показана фотография подобного диода [3]. Однако применение диодов с барьером Шоттки в терагерцовом диапазоне требует увеличения предельной частоты работы диода  $f_0$ , что затруднено по причине ряда ограничений.

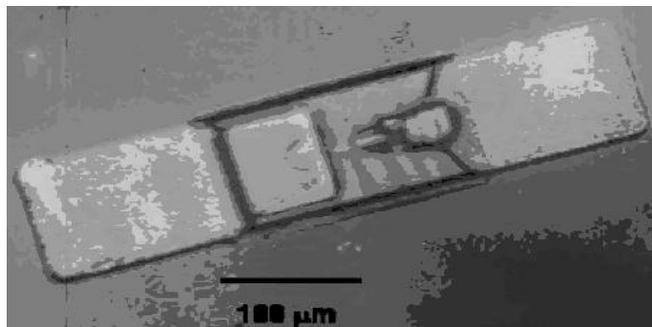


Рис. 3. Фотография планарного диода с барьером Шоттки

С одной стороны, предельная частота определяется особенностями физических процессов, протекающих в полупроводниковой структуре, в частности, для диодов с барьером Шоттки с площадью активной области в единицы квадратных микрон инерционностью пролета электронами активной области, так, время пролета для подобных диодов порядка 1 пс. С другой стороны, предельная частота в большей мере обусловлена влиянием паразитной емкости диода  $C$  и величиной последовательного сопротивления  $R$  ( $f_0 = 1/2 \cdot \pi \cdot R \cdot C$ ), состоящего из сопротивления толщи полупроводника, контактных соединений и выводов диода. Емкость диода с барьером Шоттки с площадью активной области в единицы микрон составляет несколько фемтофард (фФ) и может быть уменьшена при уменьшении активной области диода, а уменьшение последовательного сопротивления диода путем увеличения легирования полупроводника ограничено значением концентрации  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , но может быть уменьшено при уменьшении его размеров.

Более короткие времена отклика и меньшие величины значений емкостей были достигнуты путем создания планарных диодов на основе полупроводниковых наноструктурированных сверхрешеток (ППСР), например на GaAs/AlAs. Сверхрешетки обладают также отрицательной дифференциальной проводимостью, которая сохраняется вплоть до частот свыше 1 ТГц. Совокупность этих свойств делает сверхрешетки весьма перспективными для построения детекторов и смесителей терагерцового диапазона на частоты свыше 3 ТГц.

Как было отмечено выше, дальнейшее увеличение рабочих частот диодов можно ожидать при дальнейшем уменьшении размеров активной области диодов, например, в 50—200 раз, что мо-

жет быть достаточным для снятия емкостного ограничения на предельные частоты вплоть до  $10^{13}$ — $10^{14}$  Гц.

Можно предположить два наиболее вероятных пути построения антенных приемников для работы в ИК- и видимом диапазонах спектра:

*первый путь* — это прямое детектирование антенных токов с помощью детекторов, работающих в области частот  $10^{13}$ — $10^{14}$  Гц. Создание таких детекторов возможно при дальнейшем уменьшении их размеров;

• *второй предполагаемый путь* — это детектирование разностных частот (частот биений) токов, наведенных в антенне (или в различных антеннах) спектральными составляющими принимаемого излучения, разность несущих частот которых не превосходит предельной частоты смесителя и детектора. Этот путь представляется наиболее близким к реализации, так как предельные частоты современных смесителей и детекторов уже достигли терагерцового диапазона. В этом случае токи, наведенные в антенне (антеннах) излучениями с длинами волн, лежащими в диапазоне  $\lambda \pm (0,1—0,01) \cdot \lambda$ , дадут в нелинейном смесителе биения, которые могут быть преобразованы в постоянный ток с помощью уже существующих детекторов.

Нам представляется, что при построении подобных антенных матричных приемников наряду с обычными (антеннами, аналогичными по принципу действия антеннам, применяемым в радиодиапазоне) весьма перспективным окажется использование в качестве антенн металлических пленочных наноструктур, обеспечивающих полное поглощение света на частоте плазмонного резонанса.

Такие наноантенны, настроенные на поглощение излучений с близкими длинами волн ( $\Delta\lambda/\lambda < 0,1—0,01$ ), одновременно могут выполнять роль нелинейных смесителей.

Отметим ожидаемые достоинства будущих матричных антенных (наноантенных) приемников ИК- и видимого диапазонов. Это прежде всего чрезвычайно высокие граничные частоты, определяемые граничными частотами смесителей и детекторов (что очень важно для их использования в лазерных гетеродинных системах), высокая спектральная избирательность и возможность изготавливать на одной матрице элементы, настроенные на прием различных длин волн (мультиспектральный прием), менее энергоемкое охлаждение детекторов и смесителей вследствие их малых размеров.

Кроме того, следует учитывать, что антенные приемники могут быть выполнены по современной нанолитографической планарной технологии

и не требуют (в отличие от фотоприемников) использования дорогих полупроводниковых материалов (например таких как КРТ). Однако следует отметить, что в отличие от полупроводниковых приемников антенные приемники имеют много меньшую полосу относительной спектральной чувствительности, что является их существенным недостатком.

В Интернете появились сообщения о исследованиях, направленных на разработку антенных приемников оптического диапазона. Например, в [4] предлагается дизайн солнечной батареи с предполагаемым рекордным КПД. Конструкция должна обеспечивать (с помощью наноантенн) широкополосный прием всего спектра солнечного излучения с КПД, близким к 100 %, как первичного излучения (в том числе как прямого, так и рассеянного) в солнечные часы, так и вторичного излучения (т. е. от близлежащих нагретых солнцем поверхностей, например земли, крыши и т. п., причем не только в солнечное время, но и ночью).

Антенная решетка может быть выполнена по нанолитографической планарной технологии, под каждой наноантенной предполагается размещение конденсатора и диодов схемы выпрямления наведенного солнечным излучением переменного тока.

Исследователи INL (Idaho National Laboratory) изучают различные возможности преобразования высокочастотного тока, наведенного солнечным излучением в антенне в постоянный ток.

Несколько групп исследователей объявили о возможности создания антенн для приема электромагнитного излучения видимого и ИК-диапазонов [5]. Экспериментаторы из национальной лаборатории Айдахо (INL) в сотрудничестве со специалистами из американской компании MicroContinuum и университета Миссури (University of Missouri) реализовали спиральные наноантенны на гибкой полиэтиленовой подложке (рис. 4 и 5). Материал — полиэтиленовая пленка с золоченым покрытием. Система реагирует на свет примерно так же, как радиоантенны реагируют на радиоволны. В трубках и их соединениях свет возбуждает электрические токи. Ожидаются коэффициент преобразования в ИК-диапазоне до 80 %, дешевое производство, большая площадь преобразователя. Основное назначение — преобразователь для солнечной энергетики.

Исследователи из Бостона (Boston College) в качестве антенн предлагают использовать множество углеродных нанотрубок диаметром 2—4 нм, установленных вертикально (рис. 6). Предполагается, что эти трубки будут работать как четверть-волновые диполи в видимом диапазоне [6].

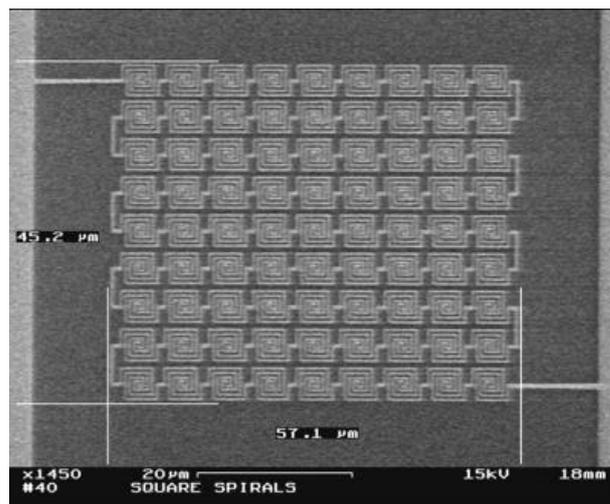


Рис. 4. Топология спиральных антенн



Рис. 5. Спиральные антенны на гибкой полиэтиленовой пленке

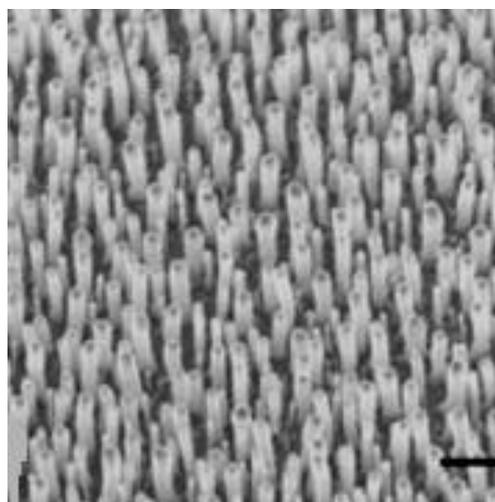
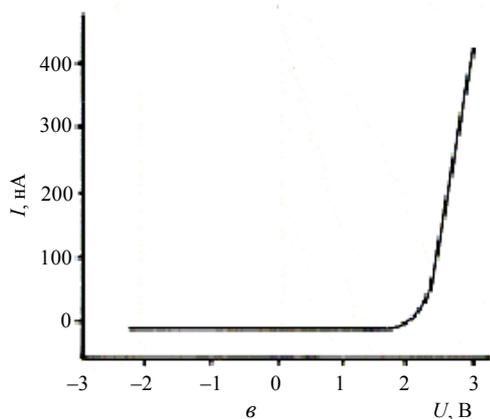
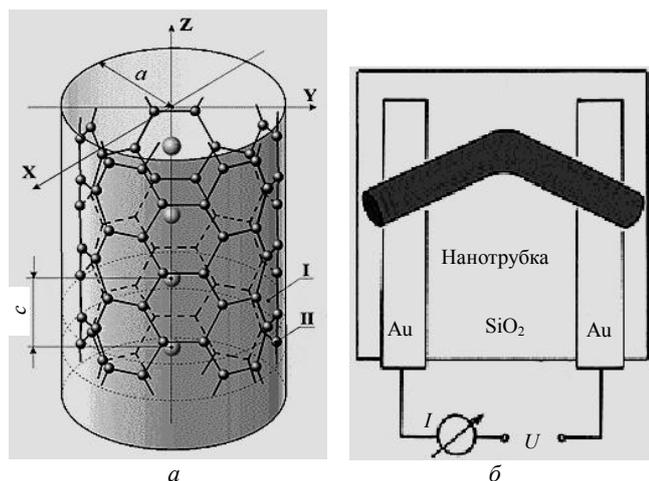


Рис. 6. Нанотрубки, работающие как четверть-волновые диполи

Эти исследования выполнялись в программе создания эффективной солнечной батареи. К настоящему времени предложено несколько способов реализации выпрямительных нанодиодов за счет:

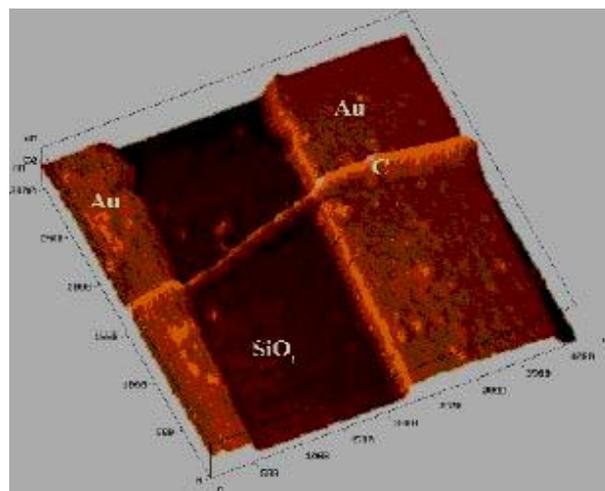
- химической модификации нанотрубок путем введения внутрь трубки с полупроводниковой проводимостью атомов металла, вследствие чего реализуется гетеропереход металл—полупроводник с выпрямительными свойствами (рис. 7);
- изгиба нанотрубки (см. рис. 7, б, в);



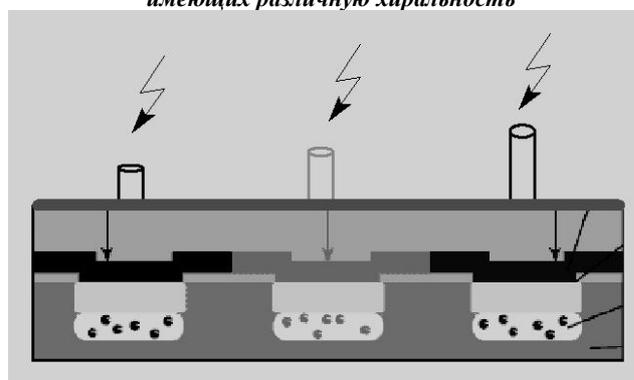
**Рис. 7. Схема нанодиода, полученного за счет:**  
 а — химической модификации нанотрубок введением внутрь трубки с полупроводниковой проводимостью атомов металла;  
 б — изгиба нанотрубки; в — ВАХ изогнутой нанотрубки

- введения атома примеси (дефекта) при выращивании трубки, в результате образуется изогнутая трубка с различной хиральностью участков. Соединение двух участков, имеющих различную хиральность, а следовательно, отличающихся электронными характеристиками, представляет собой *p-n*-переход размером в несколько нанометров (рис. 8).

В Интернете появились также сообщения о возможности создания ПЗС-матрицы с нанодиагностиками. На рис. 9 показана предполагаемая схема такой матрицы [7].



**Рис. 8. Соединение двух нанотрубок, имеющих различную хиральность**



**Рис. 9. Схема ПЗС-матрицы с нанодиагностиками**

Предполагаются следующие достоинства предложенного устройства:

- хорошая спектральная избирательность без потерь в фильтрах;
- отработанная кремниевая технология изготовления ПЗС;
- хорошая повторяемость и воспроизводимость параметров;
- современная технология, позволяющая создавать дешевые многопиксельные матрицы;
- кремниевая технология, позволяющая совместить ПЗС-преобразователь и схемы электронной обвязки устройства на одном чипе;
- более низкий уровень шумов при комнатной температуре за счет баллистической проводимости нанодиагностик.

### Заключение

Представленные в работе примеры быстрого прогресса нанотехнологий позволяют полагать, что в ближайшем будущем будут разработаны на основе антенных решеток эффективные устройства инфракрасного и видимого диапазонов.

## Литература

1. *Выставкин А. Н., Шитов С. В., Коваленко А. Н., Ковтанюк С. А., Пестряков А. В., Вдовин В. Ф., Перминов В. Г.* Субмиллиметровый матричный радиометр на высокочувствительных болометрах: Отчет РАН за 2005 г. Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 29 "Электромагнитные волны терагерцового диапазона". — Новосибирск, 2005.
2. *Kingston R. H.* Detection of optical and infrared radiation//Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 1979.
3. *Вакс В. Л., Востоков Н. В., Гапонов С. В., Данильцев В. М. и др.* Генерация терагерцового излучения путем умножения на полупроводниковых структурах: Отчет РАН за 2005 г. Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 29 "Электромагнитные волны терагерцового диапазона". — Новосибирск, 2005.
4. Copyright © 2008 Idaho National Laboratory // January 02, 2008 Nicole Stricker, (208) 526-5955, Send E-mail]
5. Idaho National Laboratory. <http://www.membrana.ru/lenta/?3705>
6. Boston College. <http://www.membrana.ru/lenta/?370>
7. <http://www.tcen.ru/cgi-bin/lenta/view.pl?type=3#news949>

## Receiving device optical range on base of array antenna

*A. N. Sviridov*

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia  
E-mail: [orion@orion.ru](mailto:orion@orion.ru)

*V. P. Babenko*

Moscow State Institute of Radioengineering, Electronics und Automation (Technical University),  
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

***Rapid progress a nanotechnology allows to suppose that will in the near future is designed the efficient receiving device infrared and visible ranges on base of array antenna. In work are discussed the possible principle of construction similar device.***

PACS: 85.60.Gz

*Keywords:* nanotechnology, JR range, visible range, receivers.

Bibliography — 7 references.

*Received 11 December 2009*