

К. т. н. М. М. ВАКИВ, д. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ,
д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, Р. С. КРУКОВСКИЙ,
В. Р. ТИМЧИШИН, Н. Я. СЫВОРОТКА

Украина, г. Львов, НПП «Карат»;
г. Киев, Минпромполитики Украины
E-mail: carat207@i.ua

Дата поступления в редакцию
22.12.2009 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

МОДУЛЬ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ A_3B_5 С КОНЦЕНТРАТОРАМИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И СИСТЕМОЙ ТЕПЛООТВОДА

Разработана новая конструкция и технология изготовления модуля солнечных батарей с КПД 27–28% на основе эпитаксиальных структур $GaAs(AlGaAs)/InGaP$ с концентраторами солнечной энергии и теплоотводом.

Солнечная фотоэнергетика является одной из наиболее быстроразвивающихся отраслей мировой экономики. Среднегодовой прирост объема производства энергии в этой отрасли в 2005–2010 гг. оценивается в 30%. Сдерживающим фактором быстрого развития фотоэнергосистем является их высокая стоимость. Перспективным путем снижения стоимости солнечной электроэнергии является использование фотоэнергосистем с концентраторами солнечного излучения.

Стоимость электроэнергии, производимой концентраторными фотоэлектрическими системами, может быть уменьшена более чем в 2 раза благодаря снижению площади солнечных элементов в 500–1000 раз. При этом удельная вырабатываемая энергия в таких солнечных батареях может быть увеличена в 3 раза за счет большего КПД и обеспечения точной ориентации на Солнце.

Применение солнечных элементов с концентраторами излучения позволяет резко снизить их стоимость за счет уменьшения площади используемых дорогих полупроводниковых материалов, а уровень развития технологии изготовления таких элементов дает возможность использовать ее для целей солнечной энергетики в широком масштабе. Причем эта сложная и, в общем, дорогая технология принципиально открывает возможность получения самой дешевой электроэнергии из всех известных методов преобразования солнечной энергии.

В настоящей работе ставилась задача разработать промышленнопригодную недорогую технологию изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии и создать на их основе конструкцию модуля солнечных батарей.

Для выбора технологического варианта получения сложных двухпереходных фотоэлектрических преобразователей были рассмотрены разные относительно дешевые способы. Одним из таких способов является низкотемпературная жидкофазная эпитаксия соединений A_3B_5 . Хотя этот метод и имеет ограниченные возможности при получении наноразмерных

структур, но он вполне может быть пригоден для получения субмикронных слоев с разным уровнем легирования.

При разработке технологии получения высококачественных эпитаксиальных структур с двумя и больше $p-n$ -переходами, способными работать при концентрированных потоках солнечной энергии, возникает много проблем. В частности, известно, что параметры большинства полупроводниковых приборов зависят от дефектности гетероперехода, уровня легирования слоев (в том числе неконтролируемыми примесями), диффузионной длины неосновных носителей. Концентрация фоновых примесей в активных слоях фотогенерирующих структур не должна превышать $2 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а диффузионная длина носителей должна достигать максимальных значений, которые можно получить в данных технологических условиях. Потому на первом этапе отработки технологического процесса изготовления любой гетероструктуры, в том числе и для фотоэлектрического преобразователя, необходимо решить задачу уменьшения концентрации неконтролируемых примесей в активных слоях.

Для использования в составе концентраторных солнечных батарей был выбран фотоэлектрический преобразователь на основе гетероструктуры с двумя рабочими $p-n$ -переходами на основе $GaAs(AlGaAs)/InGaP$.

Воспроизводимость параметров эпитаксиальных слоев в каждой серии технологических экспериментов зависит от концентрации фоновых доноров и акцепторов, которые попадают в расплав из основных источников загрязнений. Существует несколько способов, которые позволяют уменьшить фоновый уровень легирования, однако наиболее эффективным оказалось применение редкоземельных элементов (РЗЭ) и алюминия в жидкофазной эпитаксии материалов A_3B_5 [1–6].

Добавление РЗЭ в расплав способствует уменьшению концентрации электронов в слоях вплоть до инверсии типа проводимости из электронного в дырочный при определенных критических концентрациях. Критическое значение атомной доли редкоземельных элементов в A_3B_5 -материалах может изменяться от $5 \cdot 10^{-3}$ до $10^{-2}\%$. Авторами в предыдущих работах [7, 8] были проведены исследования влияния комплексного легирования разными редкоземельными и изовалентными элементами на электрофизические

свойства слоев GaAs, InGaAs и определены оптимальные соотношения этих элементов, при которых обеспечивается воспроизводимое получение планарных бездефектных слоев.

Для отработки технологии наращивания слоев InGaP, которые образуют верхнюю фотоэлектрическую ячейку фотопреобразователя, был использован тот же подход — комплексное легирование расплавов редкоземельными и изовалентными элементами.

Проанализируем подробнее этот способ на примере воспроизводимого получения n -слоев $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, которые используются в составе tandem-ных гетероструктур для фотопреобразователей.

Особенности технологии изготовления фотопреобразователей

Зависимость концентрации основных носителей N_n в слоях $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, легированных иттербием, и в слоях, комплексно легированных алюминием и иттербием, от количества иттербия в жидкой фазе X_{Yb}^L , приведена на рис. 1.

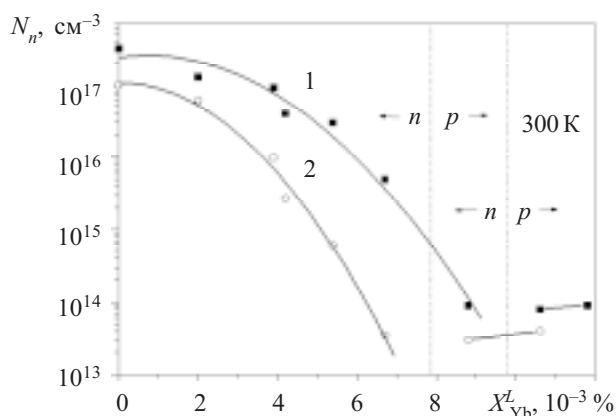


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда в эпитаксиальных слоях $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ от атомной доли Yb в расплаве индия:

1 — слой, легированный Yb; 2 — слой, комплексно легированный Yb и Al при атомной доле алюминия $N_{\text{Al}}^L = 1 \cdot 10^{-3} \%$

Как видно из рисунка, введение в расплав иттербия сопровождается уменьшением концентрации носителей. При значении атомной доли иттербия в расплаве $9,8 \cdot 10^{-3} \%$ происходит инверсия проводимости с n -типа на p . Однако при получении слоев n -типа существуют проблемы, предопределенные тем, что точка инверсии зависит от исходной концентрации неконтролируемых примесей в расплаве. Концентрация же этих примесей в каждой серии экспериментов может быть разной, а следовательно, и концентрация носителей заряда будет иметь значительный разброс, по крайней мере в слоях, полученных в разных сериях экспериментов. Во избежание этого необходимо предварительно ввести в расплав донорную примесь в количестве, которое стабилизирует уровень концентрации фоновых примесей на минимально возможном уровне, мало зависящем от концентрации РЗЭ в расплаве. Этого можно достичь, если ввести в расплав столько редкоземельного элемента, чтобы полученные слои имели p -тип проводимости. Поскольку для p -слоев зависимость концентрации дырок от концентрации РЗЭ в расплаве является мо-

нотонной, этим приемом добиваются желаемой стабилизации концентрации носителей заряда. Однако может оказаться, что при таких концентрациях РЗЭ морфология эпитаксиальных слоев ухудшится настолько, что они станут непригодными для фотолитографических процессов. Выход из этой ситуации обеспечивается использованием комплексного легирования расплавов РЗЭ и алюминием.

Добавление в расплав алюминия с атомной долей $1 \cdot 10^{-3} \%$ не изменяет характера поведения концентрации основных носителей, но существенно смещает точку инверсии в сторону меньших концентраций иттербия в расплаве раствора. Алюминий в таких количествах не изменяет ширину запрещенной зоны $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$. Слои p -типа, как видно из рис. 1, можно получить при значительно меньших концентрациях иттербия в расплаве. Потому влияние РЗЭ на морфологию слоев уменьшается, а захвата микровключений РЗЭ эпитаксиальным слоем, который кристаллизуется, не происходит. Поскольку при добавлении алюминия в расплав инверсия типа проводимости происходит при значительно меньших концентрациях РЗЭ, морфология поверхности слоя не ухудшится.

Для наращивания контактного слоя $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ p -типа проводимости использовался магний. Зависимость концентрации дырок N_p в слоях $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, полученных из галлиевых расплавов и легированных одновременно иттербием и магнием, от количества магния в жидкой фазе X_{Mg}^L приведена на рис. 2.

Описанные экспериментальные результаты по легированию слоев были использованы при наращивании tandemной гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP. Процесс наращивания был разбит на два этапа. На первом этапе методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии в интервале температур $650\text{—}550^\circ\text{C}$ на подложке n -GaAs наращивался первый рабочий p - n -переход $n\text{-GaAs-}p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,1$) и туннельный диод $n\text{-GaAs-}p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0,2\text{—}0,3$) с концентрацией основных носителей $(3\text{—}5) \cdot 10^{17}$ и $(1\text{—}2) \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$, соответственно. На втором этапе в интервале температур $750\text{—}680^\circ\text{C}$ проводилось наращивание широкозонного p - n -перехода, образованного слоями $n\text{-In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ и $p\text{-In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ с концентрацией основных

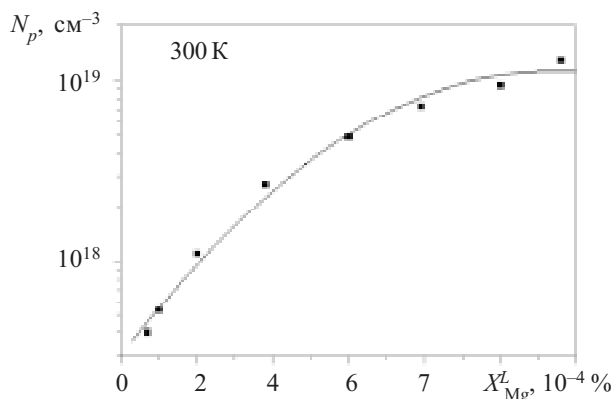


Рис. 2. Зависимость концентрации дырок в эпитаксиальных слоях $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ от атомной доли Mg в растворе-расплаве галлия при фиксированных оптимальных концентрациях $N_{\text{Yb}}^L = 9 \cdot 10^{-3} \%$ и $N_{\text{Al}}^L = 1 \cdot 10^{-3} \%$

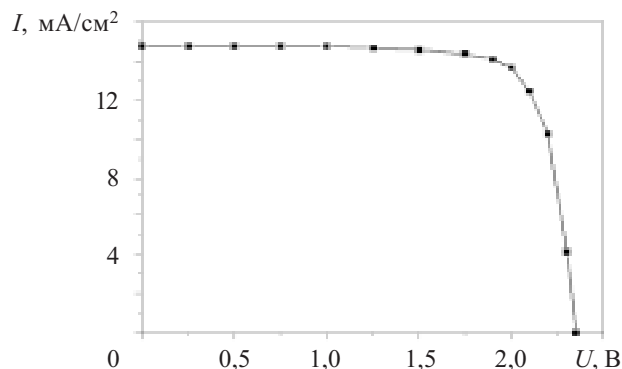


Рис. 3. Типичная вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя на основе тандемной гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP при спектральных условиях AM 1,5

носителей $(2-4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а также контактного слоя $p^+ \text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$. Контакты к фронтальной поверхности гетероструктуры изготавливались из сплава Au-Ge-Ni, а к тыльной — на основе сплава Au-Zn-Ni.

Параметры фотоэлектрических преобразователей с активной площадью $0,98 \text{ см}^2$, изготовленных на основе вышеописанной структуры, исследовались при спектральных условиях AM1,5 и разных степенях концентрации солнечного света. Вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя на основе тандемной гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP, измеренная без концентрации солнечного излучения, приведена на рис. 3.

Конструкция модуля с теплоотводом

Для изготовления модуля были отобраны фотопреобразователи с КПД от 27 до 28%. При изготовлении модуля использовалось последовательно-параллельное соединение шести фотопреобразователей. Важнейшей задачей при конструировании модулей солнечных батарей с концентраторами солнечной энергии является отвод тепла от кристалла фотопреобразователя. Для этого авторами была использована тепловая труба из алюминиевого сплава АД 31, изготовленная в Лаборатории тепловых труб НТУУ «КПИ». В качестве теплоносителя использовали ацетон. Монтаж кристалла на тепловой трубе схематически показан на рис. 4.

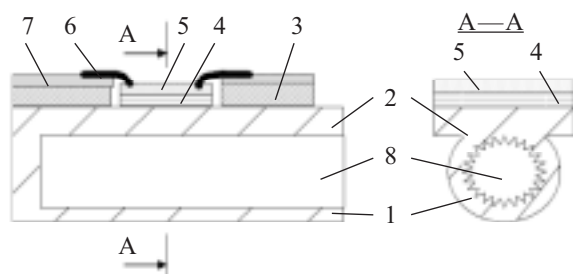


Рис. 4. Схема монтажа кристалла фотоэлектрического преобразователя на тепловой трубе:

1 — тепловая труба; 2 — несущее ребро тепловой трубы; 3 — стеклотекстолит; 4 — индиевая фольга; 5 — кристалл фотоэлектрического преобразователя; 6 — прижимной пружинный контакт; 7 — медная фольга; 8 — паровое пространство тепловой трубы

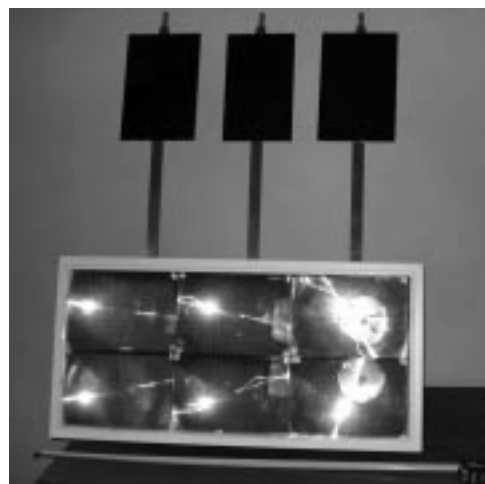


Рис. 5. Модуль солнечной батареи с концентратором на основе линз Френеля и теплоотводом на основе тепловых труб, снабженных радиаторными пластинами

Кристалл фотоэлектрического преобразователя с помощью прижимного пружинного контакта фиксировался на тепловой трубе. Для обеспечения надежного электрического и теплового контакта тыльной стороны кристалла с тепловой трубой он был помещен на тонкую ($100-150 \text{ мкм}$) индиевую фольгу, к свободному концу которой механически прикреплялся электрический проводник. Электрический контакт к фронтальной поверхности кристалла фотоэлектрического преобразователя обеспечивался несколькими золотыми проводниками.

Конструкция модуля солнечной батареи с концентратором и теплоотводом на основе тепловых труб показана на рис. 5. В качестве концентратора солнечного света использовано шесть линз Френеля размером $260 \times 180 \text{ мм}$ с фокусным расстоянием 180 мм . На электроизолированном днище корпуса модуля закреплены три тепловые трубы длиной по 1000 мм . На каждой тепловой трубе в фокусах линз с обеспечением теплового контакта (см. рис. 4) было размещено по два фотоэлектрических преобразователя. Тепловая труба эффективно отводила тепло от фотопреобразователя к радиатору. Радиатор выполнен в виде пластины размером $200 \times 300 \text{ мм}$ из алюминиевого сплава, окрашен в черный цвет и прикреплен к тепловой трубе с помощью винтов. Контактные поверхности тепловой трубы и радиатора смазаны теплопроводной пастой КПТ-8. Электрическая коммутация кристаллов преобразователя осуществляется медными проводниками. Конструкция модуля обеспечивает возможность установки его под необходимым углом наклона к горизонту.

Для отработки оптимальных тепловых режимов модуля солнечной батареи с концентратором были проведены исследования динамических режимов работы тепловой трубы в условиях воздействия концентрированного солнечного света на фотопреобразователи. Измерения проводились с помощью термоэлектрических преобразователей ТХА, которые закреплялись на обратной стороне несущего ребра тепловой трубы согласно рис. 6 (номера точек измерения обведены квадратами).

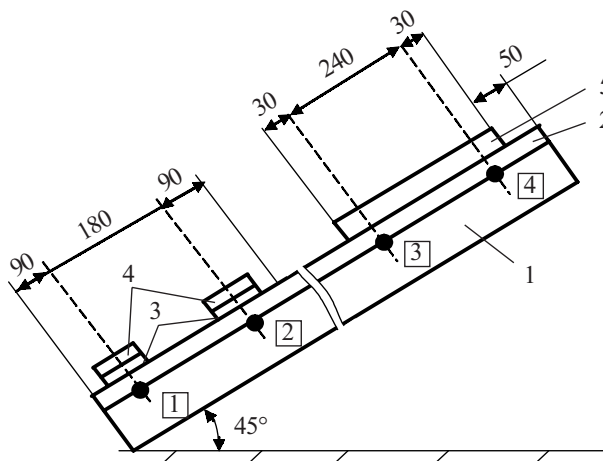


Рис. 6. Схема расположения точек измерения температуры на тепловой трубе:

1 — тепловая труба; 2 — несущее ребро тепловой трубы; 3 — индеевая прокладка; 4 — фотоэлектрический преобразователь на основе гетероструктуры GaAs(AlGaAs)/InGaP; 5 — радиаторная пластина

Световой поток, сфокусированный каждой линзой Френеля, падал на соответствующий фотоэлектрический преобразователь. Максимальная плотность мощности солнечного излучения при спектральных условиях AM1,5 составляет около 50 Вт/см². При КПД фотопреобразователя 27—28% тепловая мощность, отводимая тепловой трубой от двух установленных на ней фотопреобразователей, составляет 73—72 Вт. Результаты измерений температурного профиля по тепловой трубе в динамическом режиме без радиатора и с радиатором приведены на рис. 7.

Как видно из рисунка, система теплоотвода на основе тепловой трубы обеспечивает высокую равномерность температуры в местах установки фотопреобразователей: разность температуры в точках 1 и 2 не превышала 2°C. Максимальное значение температуры в зоне размещения фотопреобразователей на тепловой трубе без радиатора составило 102°C, в то время как допустимое из соображений надежности значение температуры в точках 1 и 2 составляет 120°C.

Установка радиатора в зоне конденсации тепловой трубы значительно снижает температуру в месте размещения фотопреобразователей. В установившемся тепловом режиме (при $\tau=300$ с) значение температуры в зоне установки фотопреобразователей снизилось со 101 до 82 и со 102,4 до 82,2°C соответственно в точках 1 и 2. Термическое сопротивление тепловой трубы при этом составило 0,27 °C/Вт. Достигнутое снижение температуры фотопреобразователей на 19—20°C за счет использования радиатора обеспечивает повышение надежности работы фотопреобразователей и возможность эксплуатации солнечной батареи в жарких районах.

Натурные испытания опытного образца модуля проводились в естественных условиях в летнее время при световом потоке около 55000 лк, что соответствовало спектральным условиям AM1,5. Результаты испытаний показали, что коэффициент полезного действия модуля при 500-кратной концентрации солнечного света достигает 27,8%, а генерируемая элек-

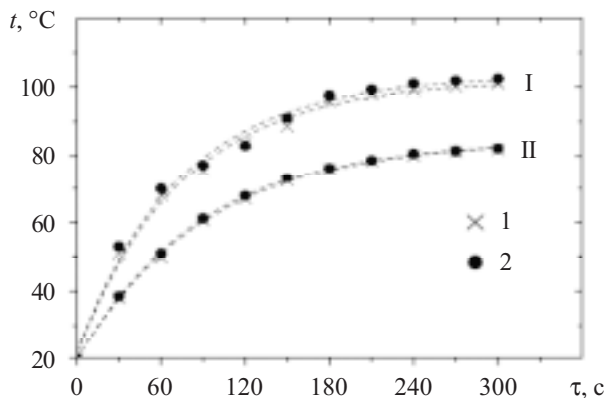


Рис. 7. Изменение во времени τ температуры t на тепловой трубе без радиатора (I) и с радиатором (II) в зоне размещения фотопреобразователей (точки 1 и 2 на рис. 6)

трическая мощность — 78 Вт при активной площади модуля 0,98 см².

Таким образом, использование в качестве теплоотвода алюминиевой трубы, заполненной ацетоном, с радиаторной пластиной обеспечивает нормальный тепловой режим и надежную работу фотопреобразователей в модулях солнечных батарей с концентраторами солнечной энергии.

Выводы

Разработана новая промышленнопригодная технология изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе эпитаксиальных структур GaAs(AlGaAs)/InGaP с двумя рабочими p - n -переходами и создана конструкция модуля солнечных батарей с КПД 27—28% с концентраторами солнечной энергии в виде линз Френеля и теплоотводом на основе тепловой трубы, снабженной радиаторной пластиной.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мастеров В. Ф., Захаренков Л. Ф. Редкоземельные элементы в полупроводниках A^3B^5 // ФТП.— 1990.— Т. 21, вып. 4.— С. 610—630.
2. Гореленок А. Т., Каманин А. В., Шмидт Н. М. Редкоземельные элементы в технологии соединений A^3B^5 и приборов на их основе // ФТП.— 2003.— Т. 37, вып. 8.— С. 922—940.
3. Prochazkova O., Zavadil J., Zdansky K. Effect of holmium addition during LPE growth on the properties of InP and GaInAsP layers // Czechoslovak Journal of Physics.— 1997.— Vol. 47, N 7.— P. 685—691.
4. Ларионов В. Р., Минтаиров А. М., Смекалин К. Е., Хвостиков В. В. Кристаллизация и легирование квантово-размерных слоев AlGaAs // Тез. докл. V Всесоюз. Конф. по физическим процессам в полупроводниковых гетероструктурах.— Россия, г. Калуга.— 1990.— С. 11—12.
5. Milanova M., Khvostikov V. Growth and doping of GaAs and AlGaAs layers by low-temperature liquid-phase epitaxy // Journal of Crystal Growth.— 2000.— Vol. 219.— P. 193—198.
6. Акчурун Р. Х., Донская И. О., Дулин С. И., Уфимцев В. Б. Расчет изменения концентрации собственных дефектов в арсенидах галлия и индия при изовалентном легировании висмутом // Кристаллография.— 1988.— Т. 33, вып. 2.— С. 464—470.
7. Николаенко Ю. Е., Круковский С. И., Завербный И. Р. и др. Получение тандемных гетероструктур GaAs-InGaAs-AlGaAs для фотопреобразователей солнечной энергии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 3.— С. 27—29.
8. Круковский С. И., Николаенко Ю. Е. Модули солнечных элементов на основе тандемных гетероструктур GaAs-InGaAs-AlGaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 6.— С. 23—26.