

К. т. н. В. А. КРАСНОВ, д. ф.-м. н. Ю. М. ШВАРЦ,  
к. ф.-м. н. М. М. ШВАРЦ, Д. П. КОПКО, С. Ю. ЕРОХИН,  
А. М. ФОНКИЧ, к. т. н. С. В. ШУТОВ, Н. И. СЫПКО

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарёва  
E-mail: shwarts@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию  
21.05 2008 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. В. РЫБКА  
(ННЦ ХФТИ, г. Харьков)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК GaP-ДИОДОВ $p^+-n$ -ТИПА

*Разработана методика получения диодных эпитаксиальных структур фосфида галлия ( $p^+-n$ -типа), изготовлены опытные образцы сенсоров температуры и определены их технические параметры, показана перспективность применения.*

Необходимость создания нового поколения высокоточных и взаимозаменяемых датчиков температуры на основе широкозонных диодов обусловлена требованиями экстремальной высокотемпературной электроники. Ведутся поиски материалов, перспективных для этой цели [1, 2]. Фосфид галлия известен как полупроводниковый материал для создания светодиодов, работающих в видимой области спектра, в частности красного и зеленого свечения. Вместе с тем, диодные структуры из широкозонного GaP ( $E_g \approx 2,25$  эВ при 300 К) перспективны для создания чувствительных элементов высокотемпературных сенсоров [3—5].

Целью настоящей работы является разработка и апробирование методики изготовления диодов на основе эпитаксиальных структур фосфида галлия  $p^+-n$ -типа с конструктивно-технологическими параметрами, обеспечивающими их применение в высокотемпературной термометрии.

### Методика изготовления диодов

Для получения эпитаксиальных  $p^+-n$ -структур GaP был выбран метод жидкофазной эпитаксии, перспективный для получения тонких, однородных и совершенных по структуре  $p^+$ - и  $n$ -слоев эмиттера и базы диода, соответственно. Подложками служили промышленные, легированные теллуром, пластины  $n^+$ -GaP с концентрацией свободных электронов  $n^+ \approx (1—5) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Подложки были выращены из расплава по методу Чохральского и ориентированы в плоскости (100).

Эпитаксиальное наращивание  $n$ -слоев базы диодов проводили при температуре подложки около 820°C в потоке высокочистого водорода с точкой росы -70°C методом зонной перекристаллизации с градиентом температуры [6]. В процессе роста слоя применяли фоновое легирование азотом по методу [7]. Легирование слоя мелкими донорными примесями не использовалось. Эмиттерный  $p^+$ -слой GaP

наращивали методом принудительного охлаждения раствора-расплава Ga-GaP с добавками легирующих примесей цинка и магния при температуре начала кристаллизации (900±5)°C.

Контактные слои из сплава Ni наносили методом термического распыления с последующим их золочением или серебрением. Планарные операции завершались формированием мезоструктуры с использованием метода маскирования, операций фотолитографии и селективного травления. После разделения приборных пластин на чипы, используя стандартные технологические методы создания полупроводниковых приборов, осуществляли операции термокомпрессии чипов на коваровый держатель, разварку выводов и герметизацию диодов в корпусе из терморезистивной пластмассы.

Толщина эпитаксиальных слоев контролировалась с помощью микроскопа МИИ-4 на сколе структур или путем изготовления шар-шлифов. Точность измерения толщины пленок составляла около 0,3 мкм.

Для определения концентрации носителей заряда и характера ее распределения по толщине пленки проводили послойное травление, а затем измерение вольт-фарадных характеристик структур с помощью измерителя емкости Л2-7.

Контроль однородности легирования по площади эпитаксиальных структур GaP осуществляли по разбросу величины пробивного напряжения  $U_b$  тестовых диодов с барьером Шоттки. Для исследования тонкопленочных  $p^+-n$ -структур GaP отбирались образцы с неоднородностью легирования, не превышающей 5%.

Для оценки плотности дислокаций  $N_D$  в  $n$ - и  $p^+$ -слоях GaP применялся металлографический метод. Распределение дислокаций по диаметру и толщине эпитаксиальной пленки определялось при послойном травлении слоев GaP в полирующем травителе с последующим избирательным травлением слоя и выявлением дислокаций методом декорирования. Затем подсчитывалось число фигур травления в поле зрения микроскопа МИМ-8М при увеличении  $\times 200$  в 40—50 участках. Полученное число усреднялось и делилось на площадь поля зрения, равную примерно  $3 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>. Для исследованных пленок  $N_D \approx (1—5) \cdot 10^4$  см<sup>-2</sup>.

Концентрацию и подвижность носителей заряда в  $n$ - и  $p^+$ -слоях эпитаксиальной структуры GaP определяли по эффекту Холла при двух температурах (77,4

Параметры исследуемых  $p^+n$ -структур GaP

Слой	Толщина слоя, мкм	Концентрация носителей заряда, $\text{см}^{-3}$	Холловская подвижность носителей заряда, $\mu, \text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$		Плотность дислокаций, $\text{см}^{-2}$
			77,4 К	300 К	
$n$ -GaP	$d_n \approx 3-7$	$n \approx (5-20) \cdot 10^{14}$	1100—1220	230—270	$N_{dn} \leq 3 \cdot 10^4$
$p^+$ -GaP	$d_{p^+} \approx 10-15$	$p^+ \approx (2-3) \cdot 10^{18}$	—	—	$N_{dp^+} \leq 3 \cdot 10^4$

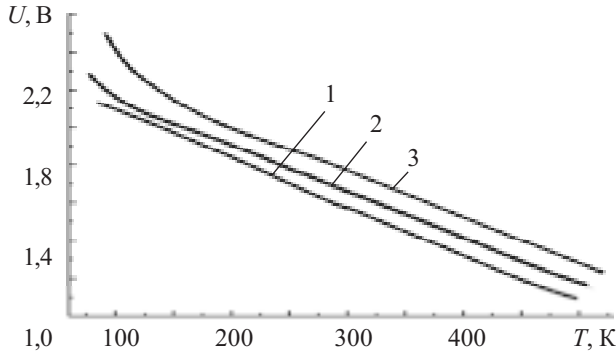


Рис. 1. Термометрические характеристики  $p^+n$ -GaP-диодов при трех значениях рабочего тока (в мкА): 1 — 1; 2 — 10; 3 — 100

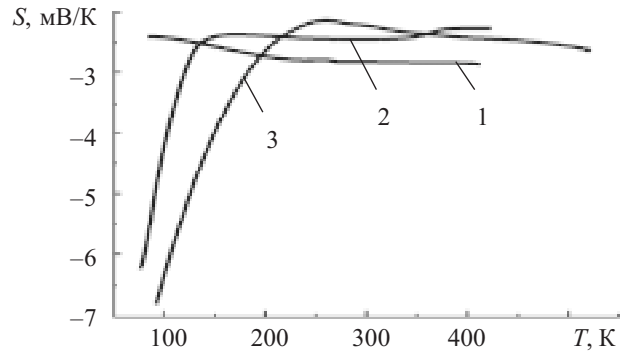


Рис. 2. Чувствительность  $p^+n$ -GaP-диодов при трех значениях рабочего тока (в мкА): 1 — 1; 2 — 10; 3 — 100

и 300 К) с использованием технологических пластин-спутников.

Термометрические характеристики (ТМХ) диодов при трех значениях рабочего тока (1, 10 и 100 мкА) измерены на метрологическом стенде УГТ-А в диапазоне 78—520 К. Точность поддержания рабочего тока была не ниже  $\pm 0,1\%$ . Основная абсолютная погрешность измерения температуры не превышала  $\pm 0,03$  К.

Прямые вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов измерены на автоматизированной установке в интервале токов  $10^{-11}$ — $10^{-2}$  А и диапазоне температуры 77,3—473 К. Погрешность поддержания температуры не превышала  $\pm 0,1$  К.

Результаты измерений электрофизических и структурных характеристик эпитаксиальных слоев  $p^+n$ -структур GaP, выращенных методом жидкостной эпитаксии, представлены в **таблице**.

Для проведения исследований была сформирована партия из десяти образцов фосфид-галлиевых диодов со следующими параметрами:  $d_n \approx (5 \pm 1)$  мкм,

$d_{p^+} \approx (12 \pm 2)$  мкм,  $n \approx (5-8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $p^+ \approx (2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu (300 \text{ К}) \approx 250 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $N_{dn} \approx 8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ ,  $N_{dp^+} \approx 1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ .

При комнатной температуре отклонение величины прямого напряжения экспериментальных образцов термодиодов от номинального значения лежит в пределах  $\pm 4$  мВ. Зная величину чувствительности термодиодов при данной температуре, можно определить меру их идентичности как отношение  $U/S$ , которая в исследованной партии образцов лежит в пределах  $\pm 1,2$  К.

Типичные ТМХ и температурные зависимости чувствительности опытных диодов представлены на **рис. 1 и 2**. Следует отметить, что при температуре 500 К падение напряжения на структуре в зависимости от величины тока составляет 1,05—1,3 В. Исследования стабильности свойств диодов показали, что в течение 5 месяцев отклонения температурных характеристик диодов составляют  $\pm 2\%$ .

Как видно из рис. 2, для тока 1 мкА ТМХ в температурном диапазоне 78—520 К отличается высокой линейностью с чувствительностью  $-2,5$  мВ/К. Для

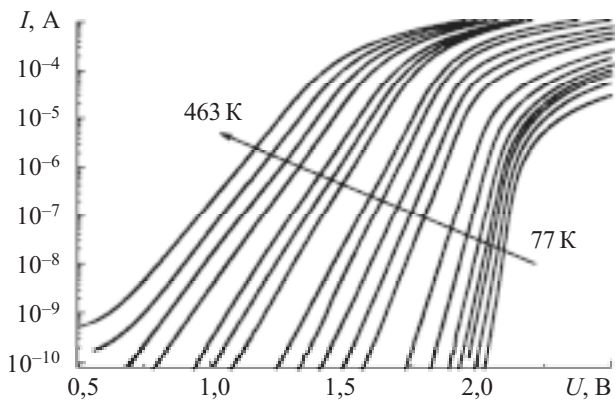


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики GaP-диодов, измеренные в диапазоне температуры 77—463 К

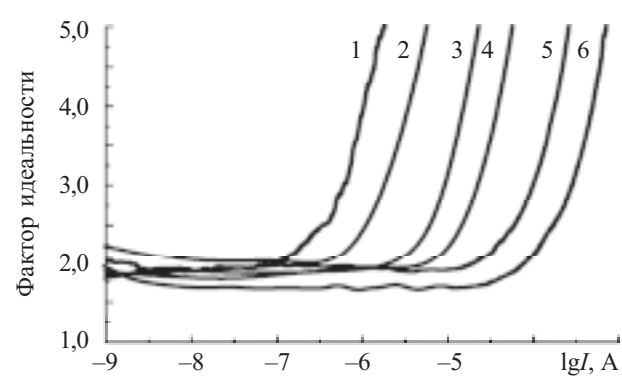


Рис. 4. Токвые зависимости фактора идеальности для GaP-диодов при разной температуре (в К): 1 — 77; 2 — 129; 3 — 160; 4 — 208; 5 — 250; 6 — 471

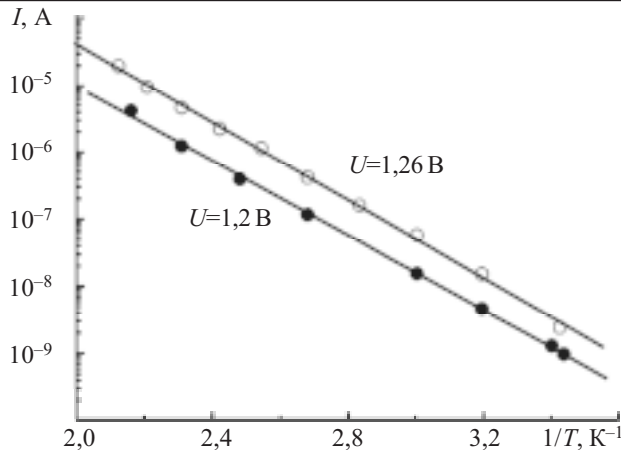


Рис. 5. Зависимость тока GaP-диода от  $1/T$  при разных значениях напряжения  $U$  на диоде

тока 10 мкА отклонение от линейности ТМХ и последующее возрастание чувствительности наблюдается при температурах до 170 К, а для 100 мкА — до 250 К.

На рис. 3 показаны ВАХ диодов, измеренные в диапазоне 77—463 К. Из анализа ВАХ определены токовые зависимости фактора идеальности диодов (рис. 4). Видно, что для тока 1 мкА во всем исследованном диапазоне температуры доминирующим является рекомбинационный механизм токопереноса с фактором идеальности, близким к двум. Для токов 10 и 100 мкА преобладание рекомбинационного механизма сохраняется при температуре выше 160 и 250 К, соответственно. Величина энергии активации, найденная из зависимостей  $I(T)$  при постоянной величине напряжения на диоде (рис. 5), равна 1,2 эВ, что соответствует половине ширины запрещенной зоны GaP.

\*\*\*

Таким образом, разработана методика получения эпитаксиальных  $p^+n$ -структур на основе GaP с повышенной надежностью и минимальным разбросом падения прямого напряжения. Определены термометрические характеристики разработанных GaP-диодов  $p^+n$ -типа и показана перспективность их применения в качестве чувствительных элементов высокотемпературных сенсоров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шварц Ю. М. Фізичні основи напівпровідникових приладів екстремальної електроніки / Дис....-ра фіз.-мат. наук.— Киев: ІФН ім. В. Є. Лашкарьова, 2004.
2. Беляев А. Е., Болтовцев Н. С., Иванов В. Н. и др. Термостойкий диод Шоттки  $TiB_x-n-GaP$ // ФТП.— 2008.— Т. 42, №4.— С. 463—467.
3. Griffing B. F., Shivashankar S. A. Use of light-emitting diodes as temperature sensors // Rev.Sci.Instrument.— 1977.— Vol. 48, N 9.— P. 1225—1226.
4. Acharya Y. B., Vyavahare P. D. Study on the temperature sensing capability of a light-emitting diode // Rev.Sci.Instrument.— 1997.— Vol. 68, N 12.— P. 4465—4467.
5. Соболев М. М., Никитин В. Г. Высокотемпературный диод на основе эпитаксиальных слоев GaP // Письма в ЖТФ.— 1998.— Т. 24, № 9.— С. 1—7.
6. Краснов В. А., Шварц Ю. М. Жидкофазная эпитаксия слоев GaP(N) для высокотемпературных диодных сенсоров // Тез. докл. X нац. конф. по росту кристаллов «НКРК-2002».— Россия, г. Москва.— 2002.— С. 525.
7. Василенко Н. Д., Краснов В. А., Крыжановский А. Н., Чернер В. М. Процессы дефектообразования и их влияние на механические напряжения в структурах фосфида галлия зеленого свечения // Известия высших учебных заведений. Физика.— 1991.— № 1.— С. 23—27.

в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Инфракрасные отрезающие фильтры для оптофотоэлектронных устройств на основе монокристаллов CdSb, ZnSb для оптофотоэлектронных устройств. (Украина, г. Черновцы)
- Электроосаждение конформных электродов для получения туннельного перехода с вакуумным нанозазором. (Грузия, г. Тбилиси)
- Микропроцессор звездообразной структуры. (Украина, г. Одесса)
- Алгоритмическая фильтрация помех методом  $\alpha$ -усеченного среднего в устройствах преобразования угол — код. (Украина, г. Черкассы)
- Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной электроники. (Россия, г. Фрязино, г. Москва)
- Универсальная матрица структурно-логических преобразований  $n$ -мерного куба  $E_n$  единого кодируемого формата. (Украина, г. Одесса)
- Связь параметров спектральной плотности фликкер-шума с особенностями внутренней структуры системы. (Украина, г. Львов)



- Расчет нормальных допусков с учетом отклонений коэффициентов внешних воздействий. (Украина, г. Запорожье)
- О возможности бесконтактного определения эффективности термоэлектрических материалов. (Украина, г. Черновцы)
- Измерения температуры с использованием оптических датчиков на основе двупреломляющих кристаллов лейкосапфира и ниобата лития. (Украина, г. Львов)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции