

06;07;12

©1993 г.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНИЗОТИПНЫХ GaP/Si ГЕТЕРОСТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

*В.В.Евстропов, Ю.В.Жуляев, Н.Назаров,  
Д.В.Сергеев, Л.М.Федоров*

Методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе впервые созданы две анизотипные разновидности GaP/Si гетероструктур (*n*-GaP/*p*-Si, *p*-GaP/*n*-Si). Для получения GaP слоев использовались кремниевые подложки *p*- и *n*-типа проводимости (КЭФ и КДБ-001, ориентированные в плоскости (100), с разориентацией  $4...6^\circ$  в направлении [110]). Оба типа GaP/Si гетероструктур имеют одинаковый излом на  $C^{-2}U$  характеристике при 1.5 В. Этот излом вероятно обусловлен регулярной неровностью слоя объемного заряда, который вызван регулярной неровностью поверхности кремниевой подложки и соответственно гетерограницы, причем при напряжениях смещения  $U \geq 1.5$  В неровность слоя объемного заряда сглажена. Возможно также, что излом обусловлен присутствием переходного слоя. У обоих видов гетероструктур механизм протекания прямого и обратного тока при комнатных температурах носит термический характер, сменяясь туннельным характером при азотных температурах. Спектры fotocувствительности у обоих видов гетероструктур аналогичны, длинноволновый край соответствует области поглощения кремния, а коротковолновое крыло определяется толщиной GaP слоя.

### Введение

В последние годы активизировались работы по эпитаксиальному выращиванию гетерослоев  $A^3B^5$  на кремниевых подложках с целью интеграции микроэлектронных кремниевых приборов с оптоэлектронными приборами на основе  $A^3B^5$ , а также с целью создания функциональных  $A^3B^5$ /Si гетероструктур. Одно из направлений этих работ — получение слоев фосфида галлия на Si подложках и различных структур на их основе.

Сообщалось о получении гетероэпитаксиальных слоев GaP на Si подложках методами молекулярно-лучевой эпитаксии [1,2], эпитаксии с использованием металлоорганических соединений [3-6], газофазной эпитаксии в хлоридно-гидридной системе [7] и газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе [8,9].

О создании GaP *p-n*-гомоструктур на Si подложках сообщалось в [7,9], где гетеропара GaP/Si выполняет пассивную (буферную) роль.

О получении функциональных GaP/Si гетероструктур сообщалось в работах [2,10-12]. Такие функциональные гетероструктуры были получены различными методами эпитаксии: молекулярно-лучевой [2], металлоорганической [10], ионно-жидкостной [11] и жидкостной [12]. Фотоэлектрические свойства GaP/Si гетероструктур, полученных различными методами эпитаксии, также различаются.

В настоящей работе впервые сообщается о создании методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе GaP/Si гетероструктур; причем двух анизотропных разновидностей (*n*-GaP/*p*-Si и *p*-GaP/*n*-Si), и об их электрических и фотоэлектрических свойствах.

Объектами исследования служили гетероструктуры *n*-GaP/*p*-Si и *p*-GaP/*n*-Si с толщиной эпитаксиального слоя фосфида галлия от 2 до 8 мкм.

### 1. Получение *n*-GaP/*p*-Si и *p*-GaP/*n*-Si гетероструктур

Обе разновидности анизотропных гетероструктур *n*-GaP/*p*-Si и *p*-GaP/*n*-Si создавались методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе Ga(GaP)-P<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>.

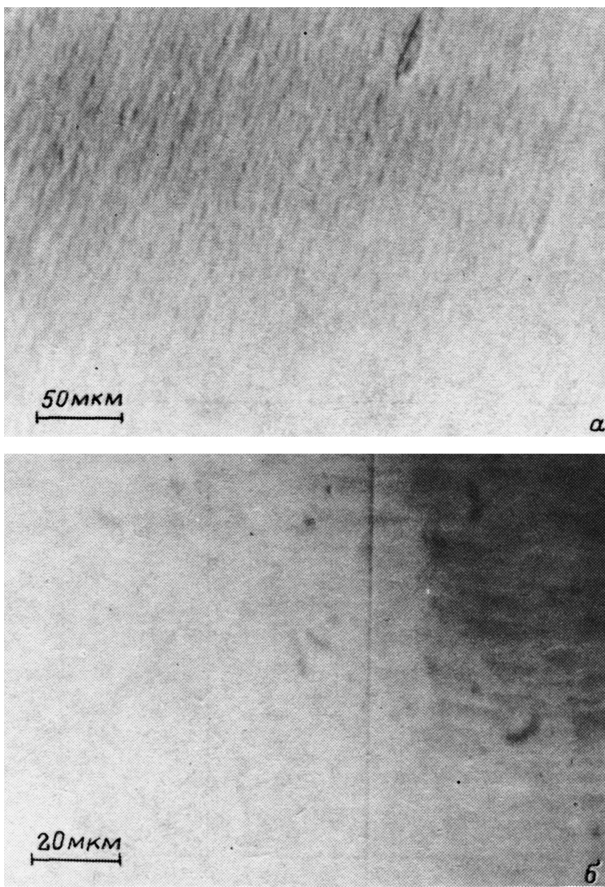
Выращиваемые *n*-GaP слои на *p*-Si подложках для получения *n*-типа легировались теллуром и серой в процессе эпитаксии до концентраций  $n \approx 1-3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , соответственно выращиваемые *p*-GaP слои на *n*-Si подложках легировались цинком до концентраций  $p \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Толщина полученных GaP слоев составляла 2...8 мкм.

Для удаления окисной пленки SiO<sub>2</sub> с поверхности кремниевых пластин непосредственно перед ростом эпитаксиального слоя GaP подложки Si подвергались газовому травлению при температуре 1150° C [8], что привело к регулярной неровности поверхности Si. Поэтому рост эпитаксиальных слоев GaP начинался на заведомо не плоской поверхности Si подложек с заполнения углов ступенек травления. При дальнейшем росте слоя происходило постепенное выравнивание — полностью закрывались неровности поверхности Si слоем GaP. Кроме того, установлено, что при эпитаксиальном наращивании GaP на Si подложку образовался переходной слой  $\sim 0.3-0.4 \text{ мкм}$ .

Подложками для выращивания слоев GaP служили двусторонние полированные пластины *n*-кремния КЭФ-001 и *p*-кремния КДБ-001 толщиной  $\sim 400 \text{ мкм}$ , ориентированные в плоскости (100) с разориентациями на 0,5, 2, 4, 6° в направлении [110].

На подложках Si (100) с разориентациями 4 и 6° получены наиболее структурно-совершенные и менее дефектные слои GaP с плотностью дислокаций  $1-3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$  и полушириной спектра дифракционного отражения рентгеновского излучения 90...130 угл.с. Микрофотография поверхности эпитаксиального слоя GaP на подложках с толщиной 6 мкм (Si (100) с разориентацией 4° в направлении [110]) показана на рис. 1,а.

На более точно ориентированных Si (100) подложках GaP слои получены с плотностью дислокаций  $\sim 10^7 \text{ см}^{-2}$ . Поэтому электрические и фотоэлектрические свойства изучались только на таких *n*-GaP/*p*-Si и *p*-GaP/*n*-Si гетероструктурах, которые были получены на кремниевых подложках Si (100) с разориентацией 4 и 6°.



**Рис. 1.** Микрофотография поверхности эпитаксиальных слоев GaP на Si подложках (Si (100)) с разориентацией  $4^\circ$  в направлении [110] с толщиной слоя GaP  $\sim 6$  (а) и  $\sim 12$  мкм (б).

Выбор максимальной толщины эпитаксиальных слоев фосфида галлия ( $d_{\text{GaP}} \approx 8$  мкм) связан с тем, что слои GaP на Si подложках с большей толщиной ( $d_{\text{GaP}} \gtrsim 10$  мкм) растрескивались из-за большого различия коэффициентов термического расширения подложки кремния  $(2.54 \cdot 10^{-6})^\circ \text{C}^{-1}$  и эпитаксиального слоя фосфида галлия  $(5.9 \cdot 10^{-6})^\circ \text{C}^{-1}$  (рис. 1, б).

Площади исследованных гетероструктур  $n(p)\text{-GaP}/p(n)\text{-Si}$  составляли  $S \approx 4\text{--}6 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

Омические контакты создавались вплавлением в атмосфере очищенного водорода при температуре  $550 \dots 600^\circ \text{C}$ ; причем для  $p\text{-Si}$  и  $p\text{-GaP}$  использовался сплав  $1n + 2\% \text{Zn}$ , для  $n\text{-Si}$  и  $n\text{-GaP}$  сплав  $1n + 2\% \text{Te} + 1\% \text{Ni}$ .

## 2. Характеристика емкость ( $C$ )–напряжение ( $U$ )

Зависимость  $C^{-\gamma} - U$   $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$  и  $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$  структур, измеренная с помощью измерителя емкости Е 7-12 на частоте 1 МГц, квадратичная,  $\gamma = 2$  (рис. 2). Характерная особенность обеих анизотипных разновидности

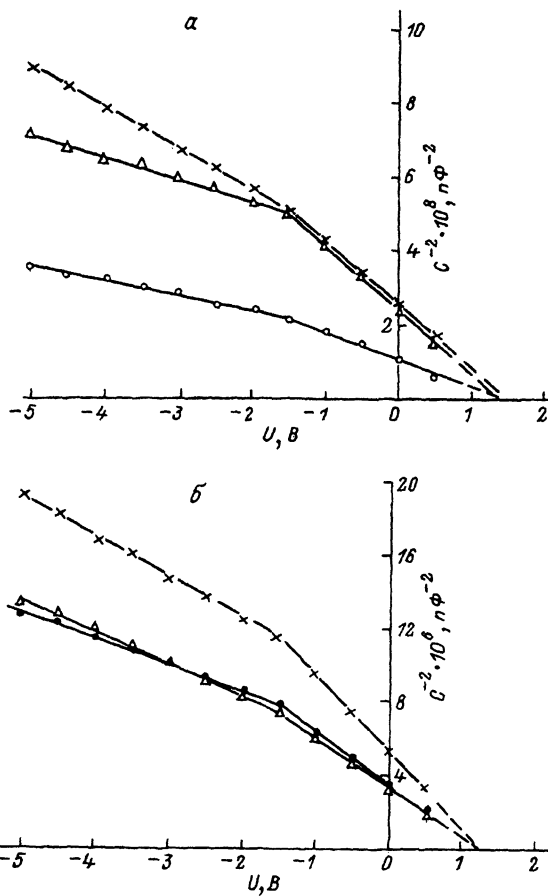


Рис. 2. Типичные  $C-U$ -характеристики  $n\text{GaP}/p\text{-Si}$  (а),  $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$  (б) структур при 300 К.

стей гетероструктур — это излом на  $C^{-2}-U$ -характеристике примерно 1.5 В.

Обычная интерпретация излома как результат некоторого несовпадения плоскости  $p-n$ -перехода с плоскостью гетерограницы представляется недостаточно удовлетворительной, поскольку излом наблюдается в обеих анизотипных разновидностях GaP/Si гетероструктур, причем при одном и том же напряжении смещения. Можно интерпретировать излом как результат отмеченной ранее в разделе 1 регулярной неровности гетерограницы и, следовательно, слоя объемного заряда. Излом, по-видимому, происходит при таком напряжении, когда средняя ширина слоя объемного заряда становится сравнимой с геометрическим (технологическим) размером регулярной неровности, т.е. когда гофрированность слоя объемного заряда сглаживается. Кроме того, этот излом, возможно, обусловлен наличием переходного слоя. Излом происходит при напряжении, когда слой объемного заряда выходит за пределы переходного слоя.

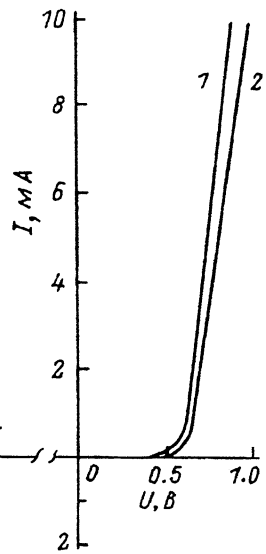


Рис. 3. Типичные  $I-U$ -характеристики  $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$  (1) и  $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$  (2) структур при 300 К.

### 3. $I-U$ -характеристика при больших токах $0.1 \dots 10 \text{ A}/\text{см}^2$ и 300 К

Типичные прямые и обратные ветви  $I-U$ -характеристики  $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$  и  $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$  структур при плотностях тока  $0.1 \dots 1 \text{ A}/\text{см}^2$  приведены на рис. 3. Напряжение пробоя для обоих типов гетероструктур практически одинаково и равно  $\sim 7 \text{ В}$ . При больших значениях тока ( $1 \dots 10 \text{ A}/\text{см}^2$ ) прямая ветвь линейна с дифференциальным сопротивлением  $8 \dots 10 \text{ Ом}$  и токовым напряжением отсечки  $\sim 1.0 \text{ В}$ .

### 4. Малые прямые токи $10^{-7} \dots 10^{-1} \text{ A}/\text{см}^2$ , $77 \dots 300 \text{ К}$

В основном прямые  $I-U$ -характеристики обеих анизотропных разновидностей исследованных GaP/Si гетероструктур аналогичны (рис. 4). Наибольшее сходство имеется при комнатных температурах, когда большой вклад в ток дает термоинжекция в Si из GaP. При азотных температурах появляются существенные признаки туннельно-избыточного тока: горбатость  $I-U$ -характеристики при  $0.2 \text{ В}$ , которая сильнее выражена у  $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ , и малая температурная зависимость напряжения на горбатом участке при  $\sim 10^{-3} \text{ В}/\text{град}$ . Если приближенно представить этот участок некоторой усредненной экспонентой

$$I = I_0 \exp \frac{qU}{\varepsilon},$$

то  $I_0 \simeq 10^{-9} \text{ A}/\text{см}^2$ ,  $\varepsilon = 45 \text{ мэВ}$  (для  $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ ) и  $I_0 = 10^{-7} \text{ A}/\text{см}^2$ ,  $\varepsilon = 85 \text{ мэВ}$  для  $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$ . Туннельно-избыточный ток, вероятно, обусловлен многоступенчатым туннелированием по системе энергетических уровней в запрещенной зоне, которые имеют дислокационное происхождение. Отметим, что в  $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$  структурах туннельно-избыточный ток меньше, чем в  $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$  структурах.

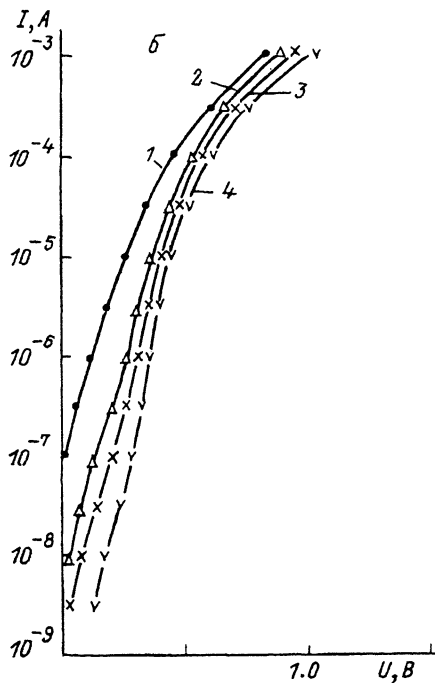
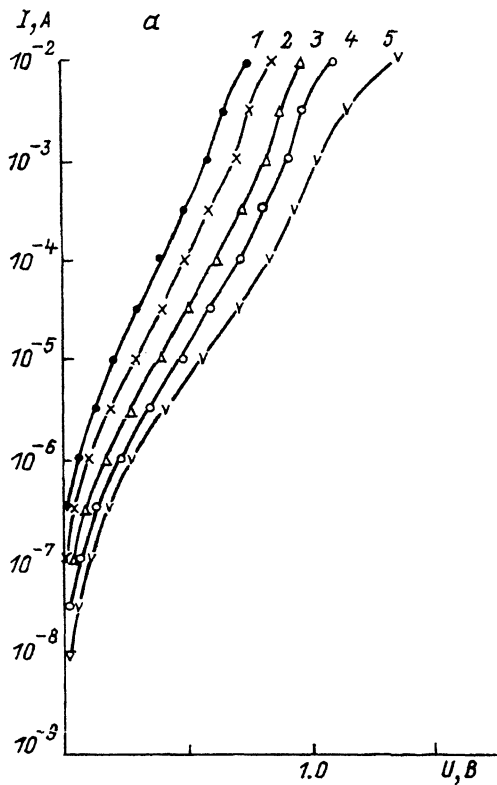


Рис. 4. Типичные прямые  $I-U$ -характеристики GaP/Si структур в области малых токов при различных температурах.

$a$  —  $n$ -GaP/ $p$ -Si;  $T$ , K: 1 — 300, 2 — 230, 3 — 160, 4 — 120, 5 — 77;  
 $b$  —  $p$ -GaP/ $n$ -Si;  $T$ , K: 1 — 300, 2 — 240, 3 — 148, 4 — 77.

## 5. Обратные темновые токи (300 К)

В обеих анизотипных разновидностях GaP/Si гетероструктур обратный ток при комнатных температурах (рис. 5,  $a, b$ ) не имеет сильной степенной зависимости от напряжения, которая является признаком туннельной природы обратного тока и наблюдалась в GaP  $p-n$ -структурах на Si подложках. По-видимому, в обратный ток при 300 К вносит большой вклад термогенерация в Si аналогично тому, как в прямой ток давала вклад термоинжекция в Si при 300 К.

В области малых токов ( $I \leq 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>) и обратный, и прямой токи линейно зависят от напряжения, дифференциально нулевое сопротивление  $\sim 1$  МОм.

## 6. Спектры фоточувствительности $n$ -GaP/ $p$ -Si гетероструктур (300 К)

Спектры фоточувствительности  $n$ -GaP/ $p$ -Si гетероструктур получены освещением широкозонного  $n$ -слоя фосфида галлия различной толщины (1...8 мкм) (рис. 6,  $a$ ).

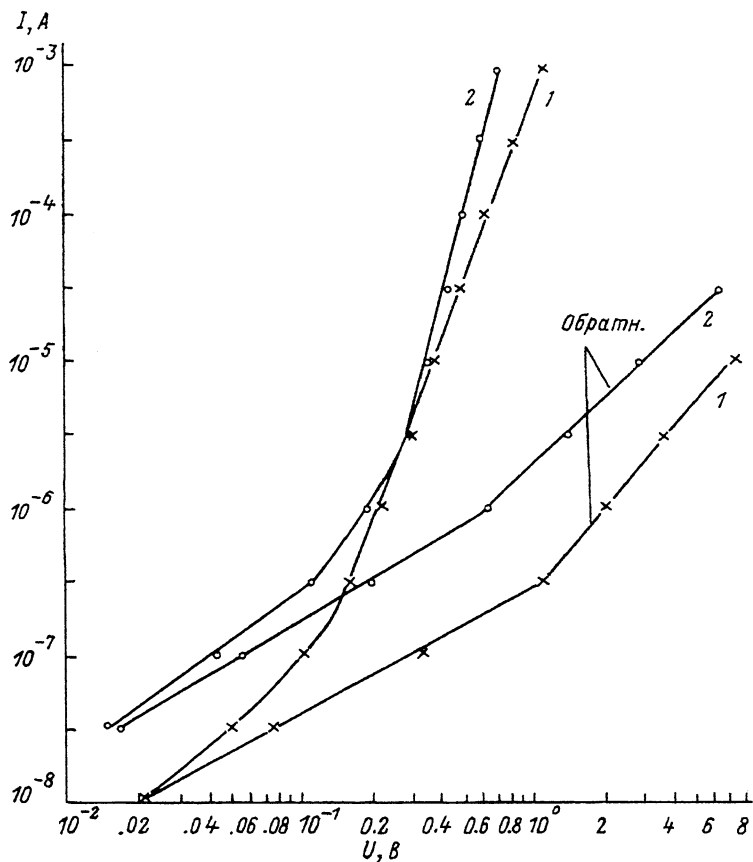


Рис. 5. Типичные обратные  $I-U$ -характеристики  $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$  (1) и  $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$  (2) структур при 300 К.

Красная граница фоточувствительности, определенная по квадратичной зависимости фототока от энергии фотонов, примерно соответствует красной границе фототока  $\text{Si } p\text{-}n$ -гомоструктур и не зависит от толщины  $n\text{-GaP}$  слоя.

Коротковолновое крыло спектра сдвигается в сторону больших энергий фотонов при уменьшении толщины, увеличивая таким образом общую ширину спектра фоточувствительности  $n\text{-GaP}/p\text{-Si}$  гетероструктур. На коротковолновом крыле фототока обозначена структура, соответствующая поглощению фотонов в фосфиде галлия, что лучше заметно при малых толщинах  $n\text{-GaP}$  слоя.

### 7. Спектры фоточувствительности $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ гетероструктур (300 К)

Спектры фоточувствительности получены при освещении широкозонного  $p$ -слоя фосфида галлия при его различной толщине (2...8 мкм) (рис. 6,б).

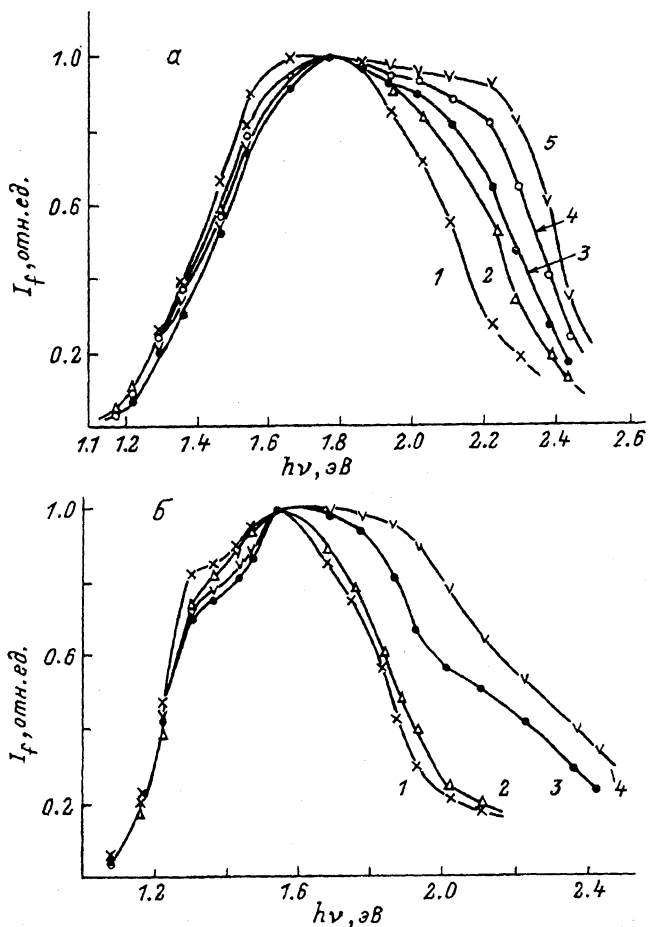


Рис. 6. Спектры фоточувствительности GaP/Si структур с различной толщиной ( $d$ ) GaP слоя.

$a$  —  $n$ -GaP/ $p$ -Si;  $d$ , мкм: 1 — 8, 2,3 — 6, 4 — 4, 5 — 2;

$b$  —  $p$ -GaP/ $n$ -Si;  $d$ , мкм: 1,2 — 8, 3 — 5, 4 — 3.

Красная граница фоточувствительности  $p$ -GaP/ $n$ -Si гетероструктуры соответствует кремнию и не зависит от толщины  $p$ -GaP.

Коротковолновое крыло спектра фоточувствительности сдвигается в сторону больших энергий фотонов при уменьшении толщины  $p$ -GaP, расширяя таким образом ширину спектра фототока. При уменьшении толщины широкозонного  $p$ -GaP слоя до 2...5 мкм на коротковолновом крыле выявляется структура, соответствующая поглощению GaP (рис. 6,б).

### Заключение

1. Оба типа GaP/Si гетероструктур имеют одинаковый излом на  $C^{-2}-U$ -характеристике (при 1.5 В), который, возможно, обусловлен регулярной неровностью (гофрированностью) слоя объемного заряда  $p$ - $n$ -гетероперехода. Эта неровность, как показано в разделах 1,2, вероятно,



обусловлена регулярной неровностью поверхности кремниевой подложки. Возможно также, что излом обусловлен присутствием переходного слоя между подложкой Si и эпитаксиальным слоем GaP.

2. У обоих типов гетероструктур при комнатных температурах существенным является термический механизм протекания прямого и обратного токов, который при азотных температурах сменяется на туннельный. Такая смена механизмов протекания тока при изменении температуры была отмечена для *n*-GaP/*p*-Si гетероструктур, созданных ионно-жидкостной [11] и жидкостной [12] эпитаксией. Было также отмечено [12] (и наша работа это подтвердила), что данный результат не зависит от конкретной технологии получения, а является собственным свойством GaP/Si гетероперехода.

3. В структурах с широкозонным *p*-GaP слоем туннельно-избыточный ток (прямой и обратной) меньше, чем в структурах с *n*-GaP слоем, что, возможно, обусловлено меньшей концентрацией основных носителей в широкозонном *p*-GaP слое.

4. Спектры фоточувствительности в основном аналогичны у обоих типов GaP/Si гетероструктур, и коротковолновое крыло зависит от толщины слоя GaP, сдвигаясь в коротковолновую область при уменьшении толщины.

Итак, впервые методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе созданы две анизотропные разновидности GaP/Si гетероструктур и установлено, что свойства обеих разновидностей GaP/Si гетероструктур в основном аналогичны.

#### Список литературы

- [1] Gonda S., Matsushima Y., Mukai S. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1978. Vol. 17. N 6. P. 1043-1048.
- [2] Kawanami H., Sakamoto T., Takahashi T. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1982. Vol. 21. N 2. P. L68-L70.
- [3] Kawanami H., Ishihara S., Nagai K., Hayashi Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1986. Vol. 25. N 5. P. L419-L420.
- [4] Pogge H.B., Kemlage B.M., Brodie R.W. // J. Crystal Growth. 1977. Vol. 37. P. 13-22.
- [5] Kohama Y., Kadota Y., Ohmachi Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1990. Vol. 29. N 2. P. L229-L232.
- [6] Kohama Y., Uchida T., Soga T. et al. // Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 53. N 10. P. 862-864.
- [7] Mori H., Ogasawara M., Yamamoto M., Tachikawa M. // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 51. N 16. P. 1245-1247.
- [8] Жиляев Ю.В., Криволапчук В.В., Назаров Н. и др. // ФТП. 1990. Т. 24. Вып. 7. С. 1303-1305.
- [9] Евстропов В.В., Жиляев Ю.В., Назаров Н. и др. // ФТП. 1993. Т. 27. Вып. 4. С. 688-694.
- [10] Katoda T., Kishi M. // J. Electron. Mater. 1980. Vol. 9. N 4. P. 783-795.
- [11] Герасименко Н.Н., Лежейко Л.В., Любоньтова Е.В. и др. // ФТП. 1981. Т. 15. Вып. 6. С. 1088-1091.
- [12] Карлина Л.Б., Леонов Е.И., Шаронова Л.В., Шмарцев Ю.В. // ФТП. 1981. Т. 15. Вып. 6. С. 1202-1204.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию  
25 февраля 1993 г.