

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ $p-n$ -СТРУКТУР ИЗ GaP НА Si-ПОДЛОЖКАХ

В. В. Евстропов, Ю. В. Жиляев, Н. Назаров, Д. В. Сергеев,
Л. М. Федоров, Ю. М. Шерняков

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 14 января 1993 г. Принята к печати 10 марта 1993 г.)

Сообщается об особенностях электрических свойств структур $p-n$ -GaP/ n -Si, которые были получены методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе Ga (GaP)—PCl₃—H₂.

Впервые установлено значительное уменьшение последовательного сопротивления созданных структур $p-n$ -GaP/ n -Si по сравнению с сопротивлением обычных $p-n$ -структур из GaP (на GaP-подложках) при азотных температурах, хотя при комнатной температуре их сопротивления практически одинаковы.

Сравнительно малое последовательное сопротивление в $p-n$ -структурах из GaP на Si-подложках открывает возможность исследования механизма протекания тока при 77 К путем непосредственного измерения $I-U_j$ -характеристики (U_j — напряжение на слое объемного заряда $p-n$ -перехода). Температурная зависимость $I-U_j$ -характеристики дает основание предположить туннельно-избыточный механизм тока в исследованных $p-n$ -структурах из GaP на Si-подложках, который, по-видимому, имеет дислокационное происхождение.

Благодаря уменьшенному (при 77 К) последовательному сопротивлению выращенные структуры $p-n$ -GaP/ n -Si отодвигают нижнюю границу температурного диапазона работы $p-n$ -структур из GaP до азотных температур, сохраняя неизменной верхнюю границу ~ 400 °С и расширяя тем самым весь температурный диапазон.

Введение. В последние годы активизировались работы по получению эпитаксиальных слоев GaP на Si-подложках [1-6], а также по созданию $p-n$ -структур из GaP на Si-подложках [7, 8]. Ожидается, что такие структуры позволят совместить достоинства обычных $p-n$ -структур из GaP (на GaP-подложках), например сохранение функциональных свойств при высоких температурах, с преимуществами высококачественных кремниевых пластин.

Можно также предполагать, что $p-n$ -структуры из GaP на Si-подложках могут по некоторым характеристикам превзойти обычные $p-n$ -структуры из GaP.

Как уже сообщалось [7], нами были созданы эпитаксиальные $p-n$ -структуры из GaP на Si-подложках методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе. Эти структуры по сравнению с обычными $p-n$ -структурами из GaP обладают рядом особенностей, которые связаны с заменой подложки GaP на подложку Si. Так, например, в электролюминесценции отсутствует инжекционная люминесценция при сохранении люминесценции в режиме пробоя [7].

В данной работе сообщается об особенностях электрических свойств выращенных структур $p-n$ -GaP/ n -Si. В частности, значительно меньше последовательное сопротивление структур $p-n$ -GaP/ n -Si по сравнению с сопротивлением обычных $p-n$ -структур из GaP при азотных температурах, хотя при комнатной температуре в структурах обоих типов оно практически одинаковое. Эта первая ожидаемая и полезная особенность обусловлена малостью удельного сопротивления Si-подложки по сравнению с GaP-подложкой при азотных тем-

пературах. Вторая ожидаемая и реализовавшаяся особенность — увеличение туннельно-избыточной компоненты тока из-за рассогласования постоянных решеток GaP и Si.

1. Объекты исследования

Объектами исследования служили p — n -структуры из GaP на Si-подложках, полученные методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе Ga (GaP)— PCl_3 — H_2 [6, 7]. Для получения структуры p — n -GaP/ n -Si на Si-подложке выращивался сначала гетероэпитаксиальный слой n -GaP, а затем поверх него выращивался слой p -GaP. Толщина эпитаксиального слоя n -GaP составляла 3÷6 мкм. В процессе эпитаксии слои n -GaP легировались теллуром и серой до концентраций носителей $n \approx (1\div3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Эпитаксиальные слои p -GaP выращивались тем же самым методом, причем одновременно выращивались слои на структуре n -GaP/ n -Si (основной вариант) и на подложке n -GaP (контрольный вариант). Получаемые слои p -GaP в процессе эпитаксии легировались цинком до концентраций носителей заряда $p = (0.5\div1.0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и имели толщину 2÷4 мкм.

Для лучшего выявления влияния Si-подложки производилось сравнение электрических свойств основных и контрольных p — n -структур из GaP.

Подложками, предназначенными для получения основных структур p — n -GaP/ n -Si, были полированные пластины Si марки КЭФ-001, толщиной ~400 мкм, с разориентацией относительно плоскости (100) под углом 4—6° в направлении [110].

При выращивании контрольных p — n -структур из GaP в качестве подложек использовались пластины n -GaP, легированные теллуром или оловом до концентраций электронов $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщиной ~400 мкм, с разориентацией относительно плоскости (100) под углом 3—4° в направлении [110].

Площади исследованных структур p — n -GaP/ n -Si и p -GaP/ n -GaP составляли $S = (1.0\div3.6) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Омические контакты создавались вжиганием в атмосфере очищенного водорода при температуре 550÷600 °С для эпитаксиального слоя p -GaP сплава In + 2% Zn, для подложек n -Si и n -GaP сплава In + 2% Te + 1% Ni.

2. Характеристика емкость—напряжение (C — U -характеристика)

Зависимость $C = f(U)$ структур p — n -GaP/ n -Si и p -GaP/ n -GaP, снятая с помощью измерителя емкости Е7-12 на частоте 1 МГц, имеет вид $C^{-2} \sim U$ (рис. 1). Из зависимости $C^{-2} = f(U)$ найдено, что в исследованных структурах p — n -переход резкий, с концентрацией дырок в p -слое $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и шириной слоя объемного заряда ~0.5 мкм. Зависимость $C^{-2} = f(U)$ для основных и контрольных структур не имеет излома, что указывает на отсутствие каких-либо дополнительных барьеров в объеме исследованных структур.

Емкостные напряжения отсечки в исследованных структурах p — n -GaP/ n -Si и p -GaP/ n -GaP отличаются незначительно и составляют соответственно 1.90 и 1.95 В.

3. Характеристика ток—напряжение (I — U -характеристика) в области влияния последовательного сопротивления: большие токи, плотность тока $t \geq 10^{-2} \text{ А/см}^2$

3.1. О влиянии последовательного сопротивления. Определяющий вклад в последовательное сопротивление p — n -структур из GaP обычно дает материал подложки (рис. 2).

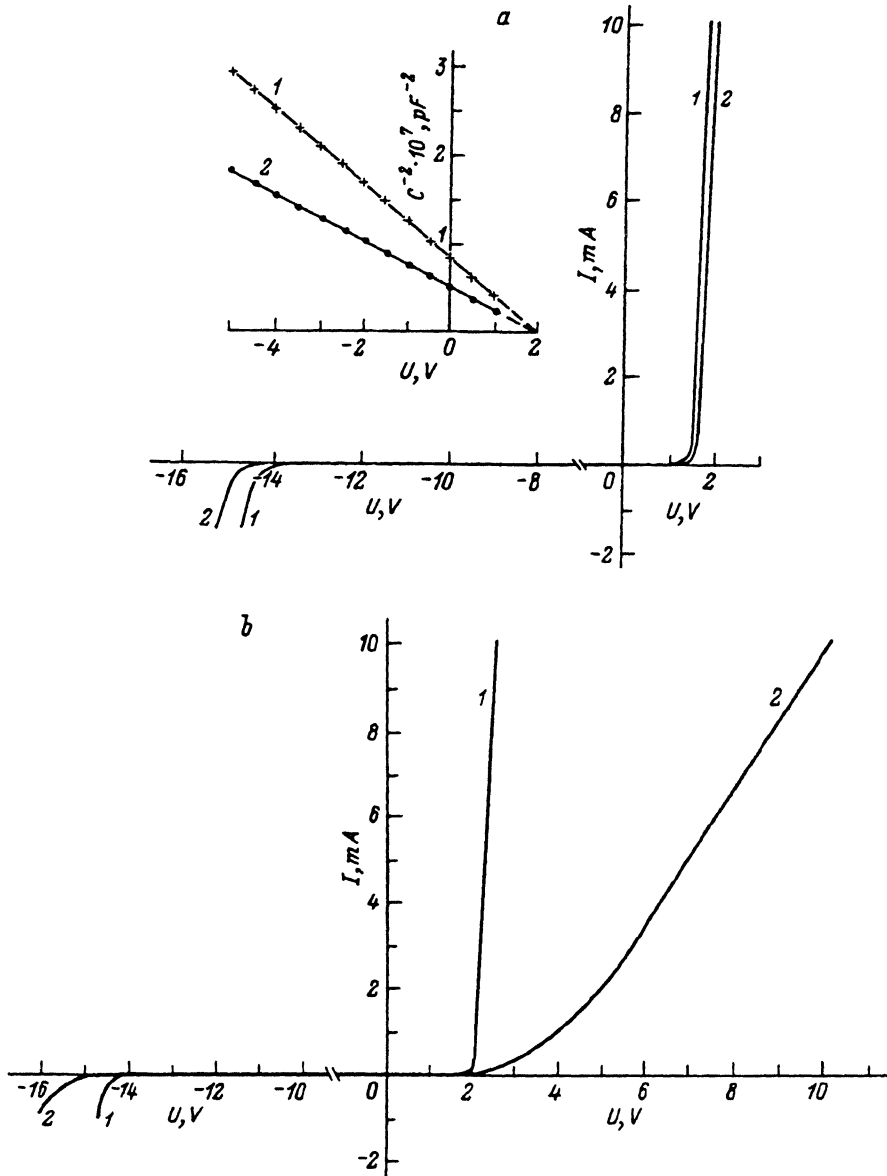


Рис. 1. Характеристики ток-напряжение в области больших токов ($i \geq 10^{-3}$ А/см²), T , К: a — 300, b — 77. На вставке (a) — C — U -характеристики. Структуры: 1 — основная, $S = 3.3$ мм²; 2 — контрольная, $S = 2.6$ мм².

Поскольку в настоящей работе использовались обычные подложки — электронные кремний и фосфид галлия с концентрацией носителей $\sim 10^{17}$ см⁻³ (300 К), замена подложки GaP на подложку из Si не существенно (на полпорядка) уменьшает последовательное сопротивление при комнатных температурах.

При азотных температурах последовательное сопротивление должно уменьшиться существенно (до двух порядков) из-за разной температурной зависимости концентраций электронов в использованных подложках из кремния и фосфида галлия [9, 10].

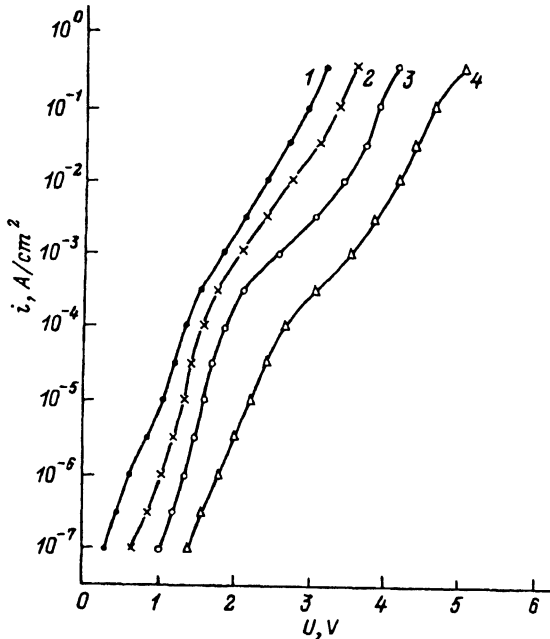


Рис. 2. Характеристика ток—напряжение для основной структуры при различных температурах. T , К: 1 — 373, 2 — 273, 3 — 165, 4 — 77.

3.2. *Характеристика ток—напряжение при 300 и 77 К, прямые смещения.* Общий вид характеристики ток—напряжение структур $p-n$ -GaP/ n -Si и p -GaP/ n -GaP при двух температурах (300 и 77 К) приведен на рис. 1а, б. Видно, что при прямых смещениях сопротивление в области быстрого роста тока основной структуры при 77 К значительно меньше, чем контрольной, тогда как при комнатной температуре они примерно одинаковы.

При больших плотностях тока в области $6 \div 18 \text{ A/cm}^2$ (на рис. 1, а, б не показано) прямые $I-U$ -характеристики основной и контрольной структур линейны при обеих температурах (300 и 77 К). При комнатной температуре в этом диапазоне токов значения последовательного сопротивления в основной и контрольной структурах отличаются незначительно и соответственно равны $1.5 \div 4$ и 10 Ом (см. таблицу).

При переходе от комнатной температуры к азотной последовательное сопротивление основной структуры $p-n$ -GaP/ n -Si в этом диапазоне токов

Последовательное сопротивление основных и контрольных структур при 300 и 77 К при плотностях тока $6 \div 18 \text{ A/cm}^2$

Номер структуры	Тип структуры	Последовательное сопротивление R , Ом		$K = \frac{R(77)}{R(300)}$
		300 К	77 К	
1	Контрольная p -GaP/ n -GaP	10	720	72
2	Тот же	10	1000	100
3	Основная $p-n$ -GaP/ n -Si	4	25	6.2
4	Тот же	3	10	3.3
5	"	2.5	20	8
6	"	1.5	6	6

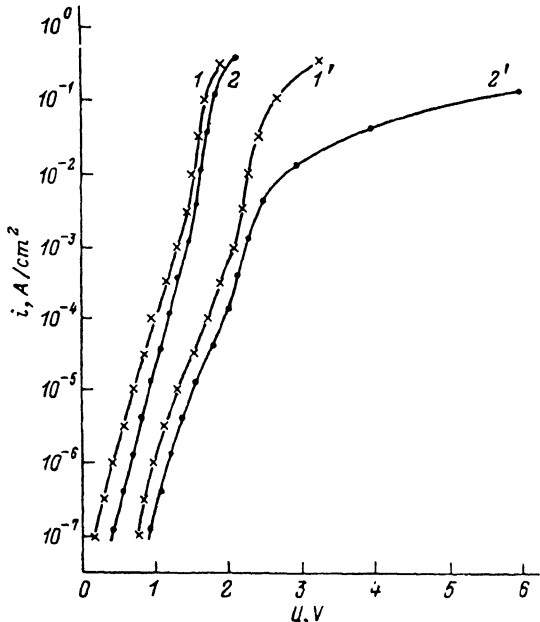


Рис. 3. Сопоставление характеристики ток—напряжение для основной (1, 1') и контрольной (2, 2') структур. Т, К: 1, 2 — 300, 1', 2' — 77.

увеличивается менее чем на порядок, тогда как для контрольной структуры p -GaP/ n -GaP увеличивается примерно на два порядка.

Для диапазона токов $6 \div 18$ А/см² значения последовательного сопротивления R для четырех основных и двух контрольных структур при 300 и 77 К, а также кратность увеличения последовательного сопротивления $K = R(77)/R(300)$ при охлаждении от комнатной до азотной температуры приведены в таблице. Из таблицы видно, что K для основных структур на порядок меньше, чем для контрольных структур, что вызвано заменой подложки GaP на подложку Si.

4. Характеристика ток—падение напряжения на слое объемного заряда p - n -перехода ($I-U_j$ -характеристика): малые токи, $j < 10^{-2}$ А/см²

4.1. $I-U_j$ -характеристика при 77 К, предварительные замечания. Как показано в разделе 3, основные структуры p - n -GaP/ n -Si при 77 К имеют значительно меньшее последовательное сопротивление (10—20 Ом) по сравнению с контрольными структурами p -GaP/ n -GaP (720—1000 Ом). Благодаря малому последовательному сопротивлению открылась возможность исследовать механизм протекания тока через p - n -переход в GaP при азотных температурах, получая $I-U_j$ -характеристики непосредственно из измерений (U_j — падение напряжения на слое объемного заряда) вплоть до плотностей тока $\sim 10^{-1}$ А/см² (рис. 3, кривая 1'). В обычных p - n -структурах из GaP, исследовавшихся ранее, такие измерения возможны только до плотностей тока 10^{-3} А/см² (рис. 3, кривая 2') из-за большого последовательного сопротивления.

4.2. $I-U_j$ -характеристика при 77 К, эксперимент. Измеренную при азотной температуре $I-U_j$ -характеристику основной структуры, представленную в полударифмическом масштабе, можно условно разделить на три участка (рис. 2). На первом (нижнем) участке ($i < 10^{-3}$ А/см²) характеристика неэкспоненциальна. Представляя этот участок приблизительно в виде некоторой усредняющей экспо-

ненты $i = i_0 \exp\left(\frac{qU}{\varepsilon}\right)$ имеем среднее значение характеристической энергии на этом участке $\varepsilon \approx 120$ мэВ, среднее значение предэкспоненциального множителя $i_0 \approx 10^{-10}$ А/см².

На втором (среднем) участке (от 10^{-2} до 10^{-1} А/см²) характеристика предположительно экспоненциальна, но параметры трудно определить, так как этот участок короткий.

На третьем участке ($i > 10^{-1}$ А/см²) сказывается влияние последовательного сопротивления.

4.3. *I—U_f-характеристика при 300 К, эксперимент.* При комнатных температурах указанные три участка не так четко выражены, как при азотных температурах (рис. 3). Тем не менее их существование можно с большой степенью уверенности предполагать на основании сопоставления вида *I—U*-характеристик при комнатной и азотной температурах. На первом участке, представляемом в виде экспоненты, имеем средние значения $\varepsilon = 100$ мэВ и $i_0 \approx 10^{-9}$ А/см². Для контрольной структуры параметры, входящие в усредняющую экспоненту, примерно такие же.

Отметим, что у основных и контрольных структур наблюдается при 300 К некоторая связь между i_0 и обратным напряжением пробоя U_b : с уменьшением на порядок величины i_0 увеличивается на 2—3 В напряжение пробоя. Отмеченная связь указывает на одинаковую природу дефектов, ответственных за эти два параметра — i_0 и U_b .

4.4. *Механизм протекания тока.* Первый участок *I—U*-характеристики, наблюдаемый при обеих температурах, можно характеризовать температурным коэффициентом напряжения $(2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ В/град при плотности тока $\sim 10^{-6}$ А/см². Такое значение температурного коэффициента напряжения дает основание предположить наличие вклада туннельного тока, т. е. ток является туннельно-избыточным.

Температурные и вольтовые зависимости тока в основной и контрольной структурах примерно одинаковы, что говорит в пользу одинаковой природы дефектов, ответственных за туннельный механизм тока.

Таковыми дефектами, по-видимому, являются дислокации, поскольку они способны обеспечить туннельное прохождение тока сквозь широкий (~ 0.5 мкм) барьер за счет многоступенчатого прыжкового туннелирования по системе дислокационных уровней.

Заключение. 1. Методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе созданы *p—n*-структуры из GaP на Si-подложках, которые по сравнению с обычными структурами (на GaP-подложках) имеют две особенности: уменьшенное (на два порядка при 77 К) последовательное сопротивление и увеличенную компоненту туннельно-избыточного тока.

2. Сравнительно малое при азотной температуре последовательное сопротивление создает возможность исследования механизма протекания тока через *p—n*-переход в GaP путем непосредственного измерения *I—U_f*-характеристики (U_f — напряжение на слое объемного заряда *p—n*-перехода).

Большая компонента туннельно-избыточного тока, ее воспроизводимость в разных структурах и связь с дислокациями создают возможность исследования механизма токопрохождения, обусловленного туннелированием по дислокационной структуре, и, следовательно, возможность изучить свойства самой этой структуры, в частности ее систему энергетических уровней.

3. Благодаря тому, что при 77 К получено сравнительно малое последовательное сопротивление в выращенных структурах *p—n-GaP/n-Si*, отодвигается нижняя граница температурного диапазона работы *p—n*-структур из GaP до азотных температур, и при этом сохраняется неизменной верхняя граница ~ 400 °С. Таким образом, расширяется весь температурный диапазон.

В частности, открывається такая новая возможная область применения разрабатанных структур, как низкотемпературные выпрямительные диоды, которые сохраняют способность работать и при высоких (до 400 °C) температурах.

4. Отметим, что напряжение пробоя U_b связано с таким параметром туннельно-избыточного тока, как средний предэкспоненциальный множитель i_0 . Структуры с меньшим i_0 имеют большее U_b . Это соответствует предположению о том, что туннельно-избыточный механизм тока (при малых прямых токах) обусловлен дефектами в p - n -переходе той же природы, что и лавинный пробой (при больших обратных токах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S. Gonda, Y. Matsushima, S. Mukai, Y. Makita, O. Igarashi. Japan. J. Appl. Phys., 17, 1043 (1978).
- [2] H. Kawanami, S. Ishihara, K. Nagai, Y. Hayashi. Japan. J. Appl. Phys., 25, L419 (1986).
- [3] H. V. Pogge, B. V. Kemlage, R. W. Broadie. J. Cryst. Growth, 37, 13 (1977).
- [4] Y. Kohama, Y. Kadota, Y. Ohmachi. Japan. J. Appl. Phys., 29, L299 (1990).
- [5] H. Huber, G. H. Winstel. Siemens Forsch. Entwickl. Bericht, 2, 171 (1973).
- [6] Ю. В. Жилев, В. В. Криволапчук, Н. Назаров, И. П. Никитина, Н. К. Полетаев, Д. В. Сергеев, В. В. Травников, Л. М. Федоров. ФТП, 24, 1303 (1990).
- [7] В. В. Евстропов, Ю. В. Жилев, Н. Назаров, Д. В. Сергеев, Л. М. Федоров. ФТП, 27, 668 (1993).
- [8] H. Mori, M. Ogasawara, M. Yamamoto, M. Tachikawa. Appl. Phys. Lett., 51, 1245 (1987).
- [9] Ф. Морин, Дж. Миата. В кн.: Проблемы физики полупроводников, 96. М. (1957).
- [10] H. C. Casey, F. Ermanis, K. B. Wolfstirn. J. Appl. Phys., 4, 2945 (1969).

Редактор Л. В. Шаронова
