

УДК 621.315.592

©1995 г.

**ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ p - n -СТРУКТУРЫ
ИЗ GaAs НА Si-ПОДЛОЖКАХ:
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА**

*В.В.Евстропов, Ю.В.Жиляев, Н.Назаров, Ю.Г.Садофьев,
А.Н.Топчий, Н.Н.Фалеев, Л.М.Федоров, Ю.М.Шерняков*

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

Физико-технический институт Академии наук Туркменистана,
744000, Ашгабад, Туркменистан

(Получена 11 июля 1994 г. Принята к печати 12 июля 1994 г.)

Созданы эпитаксиальные p - n -структуры из GaAs на Si-подложках с использованием комбинированного метода эпитаксии, т.е. последовательным выращиванием слоев GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе. Результаты исследования характеристики ток (J) — напряжение (U) p - n -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур показывают, что в диапазоне температур 77-300 К и плотностей тока 10^{-8} - 10^{-2} А/см² механизм токопрохождения в прямом направлении туннельно-избыточный. Обратный ток также имеет признаки туннельно-избыточного тока. Спектры фоточувствительности и электролюминесценции p - n -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур имеют типичный для обычных p - n -структур из GaAs (без Si-подложки) вид. Инжекционная электролюминесценция в исследованных структурах также типичная и, по-видимому, обусловлена зона-зонной излучательной рекомбинацией носителей заряда.

В последние годы активизировались работы по эпитаксиальному выращиванию слоев GaAs и GaP на Si-подложках с целью создания микро- и оптоэлектронных приборов на их основе [1-4]. Такие гетероструктуры позволяют совместить уникальные электрические, фотоэлектрические и люминесцентные свойства GaAs и GaP с преимуществами высококачественных кремниевых пластин в одной монокристаллической структуре.

Нами ранее сообщалось о получении эпитаксиальных p - n -структур из GaP и GaAs на Si-подложках методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе (ГФЭ-ХС) и о результатах исследования их основных свойств [5-8].

В настоящей работе также сообщается о создании p - n -структур из GaAs на Si-подложках, но в отличие от предыдущей работы [6]

структуры создавались с использованием комбинированного метода, т.е. последовательно методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и ГФЭ-ХС. Приведены предварительные результаты исследования электрических, фотоэлектрических и электролюминесцентных свойств, созданных на Si-подложках GaAs $p-n$ -структур.

1. Объекты исследований

Для получения $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур на первом этапе роста на Si-подложках выращивался гетероэпитаксиальный буферный слой n -GaAs(b) с использованием метода МЛЭ. Буферный эпитаксиальный слой n -GaAs(b) в процессе эпитаксии легировался теллуром до концентрации носителей $N_D - N_A = (0.5 - 1.0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и имел толщину ~ 1.5 мкм. На втором этапе эпитаксиального роста на этом буферном эпитаксиальном слое n -GaAs(b) методом ГФЭ-ХС выращивался сначала n -GaAs, а затем слой p -GaAs. Эпитаксиальный слой n -GaAs в процессе газофазной эпитаксии легировался теллуром и серой до концентрации носителей $N_D - N_A = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и имел толщину $\sim 5 - 6$ мкм, а эпитаксиальный слой p -GaAs в процессе газофазной эпитаксии легировался цинком до концентрации дырок $N_A - N_D = (0.5 - 1.0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и имел толщину $\sim (2.5 - 3.0)$ мкм.

Для оценки качества получаемых эпитаксиальных слоев GaAs на Si-подложках их структурное совершенство оценивалось по кривой дифракционного отражения рентгеновского излучения (КДО) и по морфологии поверхности на электронном и оптическом микроскопах после каждого этапа роста слоя GaAs. Например, для первичного (буферного) слоя GaAs, полученного методом МЛЭ, полуширина КДО $\Delta\theta_{1/2} \simeq 180$ угл.с и плотность дислокации $N_d \simeq 2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, а для верхнего слоя p -GaAs, полученного методом ГФЭ-ХС, $\Delta\theta_{1/2} \simeq 140$ угл.с и $N_d \simeq (4 - 5) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. Как видно из результатов вышеприведенных исследований, на верхнем слое GaAs (полученном методом ГФЭ-ХС) значительно сужается кривая дифракционного отражения и уменьшается плотность дислокаций по сравнению с буферным эпитаксиальным слоем n -GaAs (полученным МЛЭ).

Подложками для получения $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур служили полированные пластины кремния n -типа марки КЭФ-001 толщиной ~ 400 мкм, диаметром 40 мм, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией $4 - 6^\circ$ в направлении [110].

Омические контакты создавались сплавлением в атмосфере очищенного водорода при температуре $520 - 550^\circ\text{C}$, для эпитаксиального слоя p -GaAs использовался сплав $\text{In} + 2.5\% \text{Zn}$, а для подложки n -Si — сплав $\text{In} + 2\% \text{Te}$. Площадь исследованных структур составила $S \simeq (1 - 6) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

2. Электрические свойства

а. Характеристика емкость (C)-напряжение (U). Зависимость обратной емкости ($C^{-\gamma}$) от напряжения (U) исследованных $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур квадратичная ($C^{-2} - U$) (рис. 1, вставка). Из зависимости $C^{-2} - U$ следует, что в исследованных структурах

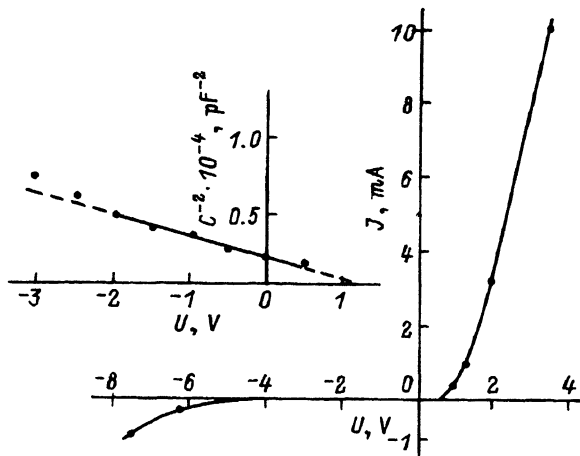


Рис. 1. Типичная вольт (U)-амперная (J) характеристика структуры p - n -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si (300 K). Площадь структуры $S \approx 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

На вставке — характеристика емкости (C)-напряжение (U) — $C^{-2}-U$.

p - n -переход резкий, концентрация дырок в p -GaAs-области структуры $(5-8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и ширина слоя объемного заряда при $U_b = 0 \text{ В}$ составляет $W \approx 0.65 \text{ мкм}$.

Зависимость $C^{-2}-U$ при напряжении смещения более $\sim 2 \text{ В}$ отклоняется от линейной зависимости, что может быть связано со значительной величиной тока утечки или присутствием дополнительного концентрационного перехода в объеме, т.е. перехода слоев n -GaAs(b) (МЛЭ) и n -GaAs (ГФЭ-ХС).

б. Характеристика ток (J)-напряжение (U) при больших плотностях тока ($J \geq 10^{-2} \text{ А/см}^2$). Прямая характеристика $J-U$ исследованных p - n -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур линейна при больших плотностях тока $(1-10) \text{ А/см}^2$, токовое напряжение отсечки $(1.3-1.4) \text{ В}$ (рис. 1). Напряжение пробоя для исследованных структур составляло $U_B = 6 \text{ В}$.

в. Характеристика ток-напряжение при малых прямых токах ($J \approx 10^{-8}-10^{-2} \text{ А/см}^2$). Характеристика ток-напряжение p - n -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структуры в области малых прямых токов $(10^{-8}-10^{-2}) \text{ А/см}^2$ в диапазоне температур $77-300 \text{ К}$ имеет вид, характерный для туннельно-избыточного тока (рис. 2). Зависимость тока от напряжения экспоненциальна при температурах от азотной до комнатной, $J = J_0 \exp \frac{qU}{\epsilon}$, причем наклон $(q\Delta U / \Delta \ln J)$, определяемый характеристической энергией ϵ , примерно одинаков при всех температурах и равен $\sim 80 \text{ мэВ}$. Предэкспоненциальный множитель, β , порядка $\sim 10^{-9} \text{ А/см}^2$ при 77 К и слабо (на 2 порядка) возрастает с увеличением температуры до 300 К . Температурный коэффициент напряжения мал ($\sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ В/град}$).

При комнатных температурах на прямой характеристике $J-U$ слегка обозначен горб, который является также признаком туннельно-избыточного тока.

г. Обратный темновой ток в предпробойной области. Обратный допробойный ток p - n -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур описывается степенной зависимостью от обратного напряжения, $J = J_0 \left(\frac{qU}{\epsilon} \right)^m$, где

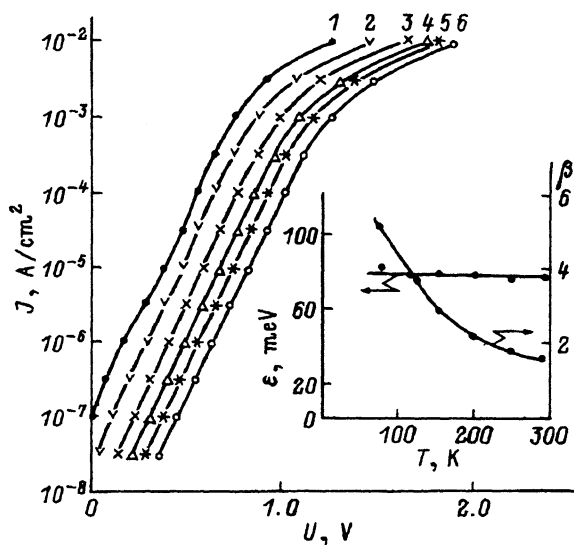


Рис. 2. Характеристики ток (J)-напряжение (U) структуры $p-n\text{-GaAs}-n\text{-GaAs}(b)/n\text{-Si}$ при различных температурах. T , К: 1 — 300, 2 — 250, 4 — 155, 5 — 120, 6 — 77. Площадь структуры $S \approx 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. На вставке — температурная зависимость средней характеристической энергии, ϵ , и характеристического коэффициента, β .

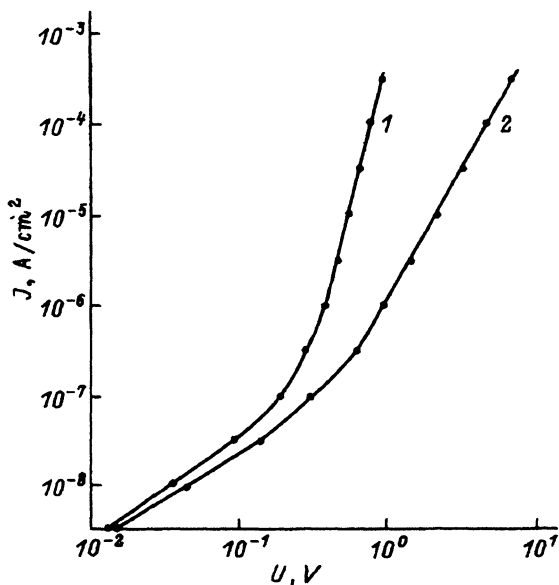


Рис. 3. Характеристики ток (J)-напряжение (U) структуры $p-n\text{-GaAs}-n\text{-GaAs}(b)/n\text{-Si}$ при 300 К. Площадь структуры $S \approx 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. 1 — прямые токи, 2 — обратные токи.

$m \approx 2.70$ при напряжениях больше, чем ε/q , и линейной (омической) зависимостью от напряжения, $J = J_0 \left(\frac{qU}{\varepsilon} \right)$, при меньших, чем ε/q , напряжениях (рис. 3, кривая 2).

Отметим, что два параметра J_0 , ε , описывающие обратную характеристику $J-U$, имеют те же самые значения, что у соответствующей прямой характеристики $J-U$, $J = J_0 \exp \frac{qU}{\varepsilon}$; (например, на рис. 3, кривая 2 и на рис. 2, кривая 1 — $J_0 = 10^{-8}$ А/см², $\varepsilon = 80$ мэВ).

Одинаковое значение параметров, описывающих прямую и обратную характеристику $J-U$, указывает на одни и те же дефекты, обуславливающие прямую и обратный туннельно-избыточный ток.

3. Фотоэлектрические свойства

Спектр fotocувствительности $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структуры получен при освещении слоя p -GaAs. Фоточувствительность при комнатной температуре имеет длинноволновую границу при ~ 1.4 эВ, что соответствует краю поглощения арсенида галлия и генерации фотовозбужденных носителей в нем (рис. 4). Максимум fotocувствительности расположен при $h\nu_m \approx 1.43$ эВ.

В спектре fotocувствительности $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур имеется высокоэнергетическое крыло, спадающее в диапазоне энергии фотонов, 1.43–2.1 эВ. Следует отметить, что на высокоэнергетическом крыле спектра fotocувствительности при 1.5 и 1.75 эВ наблюдается структура (типа плеча) (рис. 4). Спад fotocувствительности при энергиях фотонов $h\nu > 1.43$ эВ связан с потерями при объемной и поверхностной рекомбинации фотогенерированных носителей. По-видимому, объемная рекомбинация фотогенерированных носителей вызвана достаточно глубинным расположением плоскости $p-n$ -перехода (толщина освещаемой поверхностной p -GaAs-области структуры — 2.5–3.0 мкм), что приводит к рекомбинации значительной части фотогенерированных носителей в объеме слоя p -GaAs.

Более плавный спад fotocувствительности при энергиях падающих фотонов $h\nu \geq 1.5$ эВ, по-видимому, в основном связан с поверхностной рекомбинацией фотогенерированных носителей из-за очень высокой скорости поверхностной рекомбинации в арсениде галлия.

Итак, полученные $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структуры по спектру fotocувствительности практически не отличаются от обычных (без Si-подложки) арсенид-галлиевых структур.

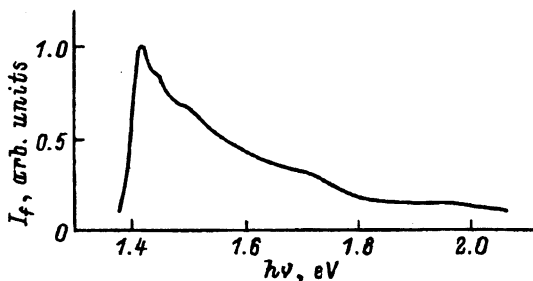


Рис. 4. Спектр fotocувствительности структуры $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si (300 К).

4. Инжекционная электролюминесценция

Спектры электролюминесценции $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур снимались при комнатной (~ 300 К) и азотной (77 К) температурах на монохроматоре МДР-2. В качестве приемника использовался фотомножитель ФЭУ-62.

Спектр электролюминесценции при 300 К состоит из одной полосы, и форма спектра не зависит от плотности тока через структуры (рис. 5, *a*). Максимум спектра электролюминесценции с увеличением плотности тока от 0.6 до 2.3 А/см² смещался в более длинноволновую область от 1.395 до 1.370 эВ, что, по-видимому, обусловлено разогревом структуры вследствие протекания тока. При этом полуширина спектра электролюминесценции практически не изменяется и составляет $\delta_{1/2} \simeq 36$ мэВ. Зависимость интенсивности электролюминесценции от плотности тока при 300 К практически линейная.

Спектр электролюминесценции $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структуры при азотной температуре (рис. 5, *b*) имеют максимум при энергиях фотонов $h\nu_m \simeq 1.48$ эВ и не зависят от плотности тока через структуру.

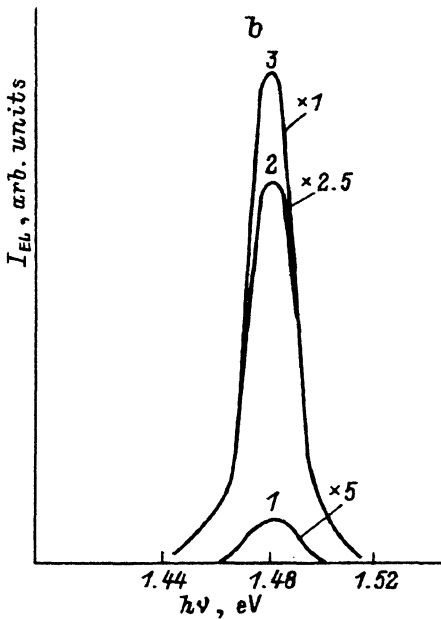
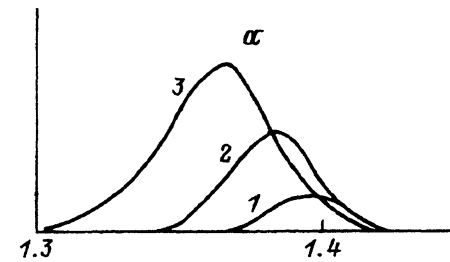


Рис. 5. Спектры инжекционной электролюминесценции структуры $p-n$ -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si при различных плотностях прямого тока.

a — J , А/см²: 1 — 0.6, 2 — 1.3, 3 — 2.3. $T = 300$ К. *b* — J , А/см²: 1 — 0.8, 2 — 1.4, 3 — 2.1. $T = 77$ К.

При этом полуширина спектра электролюминесценции практически не изменяется от плотности тока и составляет $\delta_{1/2} \simeq 28$ мэВ.

Интенсивность электролюминесценции с ростом плотности тока значительно (в ~ 70 раз) увеличивается, тогда как плотность тока увеличивается всего в 3 раза (от 0.8 до 2.1 А/см²). Настолько сильная сверхлинейная (степенная с показателем степени $n \simeq 5$) зависимость интенсивности электролюминесценции от плотности тока говорит о большой роли безызлучательного туннельно-избыточного тока. Это предположение согласуется с результатами, полученными из анализа характеристики ток-напряжение при малых прямых токах (рис. 2).

Сильный рост интенсивности электролюминесценции при азотных температурах с увеличением плотности тока (рис. 5, б), по-видимому, связан со значительным снижением доли безызлучательной рекомбинации при больших плотностях тока. Квантовый выход электролюминесценции p - n -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур при плотностях тока ~ 2.0 – 2.5 А/см² при комнатной температуре составляет 1–2%, а при азотной температуре — 5%.

5. Выводы

1. С использованием комбинированного метода (последовательно метода молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе) получены эпитаксиальные p - n -структуры из GaAs на Si-подложках.

2. Результаты исследования электрических свойств p - n -GaAs- n -GaAs(b)/ n -Si-структур в интервале температур от 77 до 300 К показывают, что механизм токопрохождения в прямом и обратном направлении является туннельно-избыточным.

3. Спектры фоточувствительности и инжекционной электролюминесценции имеют типичный для обычных GaAs p - n -структур (без Si-подложки) вид.

4. Таким образом, использование комбинированного метода, т.е. методов МЛЭ и ГФЭ-ХС, позволило получить структурно-совершенные эпитаксиальные слои GaAs на Si-подложках, в принципе пригодные для создания различных приборных структур. Однако сравнение результатов исследования эпитаксиальных p - n -структур из GaAs на Si-подложках, полученных комбинированным методом, с результатами исследования p - n -структур из GaAs на Si-подложках с буферным слоем GaP-GaAsP, полученными ГФЭ-ХС [6], показывает, что одним из наиболее важных факторов, определяющих обратные туннельно-избыточные токи, является правильное согласование параметров решетки эпитаксиального слоя (GaAs) и подложки кремния в процессе выращивания слоя. Например, в созданных комбинированным методом p - n -структурах из GaAs на Si-подложках уменьшения роли обратного туннельно-избыточного механизма токопрохождения не наблюдается.

- [1] H. Mori, M. Ogasawara, M. Yamamoto, M. Tachikawa. Appl. Phys. Lett. **51**, 1245 (1987).
- [2] Y. Itoh, T. Nishioka, A. Yamamoto, M. Yamaguchi, Appl. Phys. Lett., **52**, 1617 (1988).
- [3] D.G. Deppe, D.C. Holl, N. Holonjak, R.I. Matji, H. Shihijo, J.E. Epler. Appl. Phys. Lett., **53**, 874 (1988).
- [4] В.М. Андреев, В.Г. Антипов, В.С. Калиновский, Р.В. Каллион, С.А. Никишин, С.С. Рувимов, М.В. Степанов, Е.М. Танклевская, В.П. Хвостиков. ФТП, **27**, 141 (1993).
- [5] В.В. Евстропов, Ю.В. Жиляев, Н. Назаров, Д.В. Сергеев, Л.М. Федоров. ФТП. **27**, 668 (1993).
- [6] Ю.В. Жиляев, А.Л. Липко, М.Г. Мынбаева, Н. Назаров, Л.М. Федоров. Письма ЖТФ, **19**, 30 (1993).
- [7] В.В. Евстропов, Ю.В. Жиляев, Н. Назаров, Д.В. Сергеев, Л.М. Федоров, Ю.М. Шерняков, ФТП, **27**, 1319 (1993).
- [8] В.В. Евстропов, Ю.В. Жиляев, Н. Назаров, В.В. Россин, Л.М. Федоров, Ю.М. Шерняков. Письма ЖТФ, **19**, 61 (1993).

Редактор В.В. Чалдышев

Epitaxial $p-n$ structures of GaAs on Si substrates: electrical, photoelectrical and electroluminescent properties

V. V. Yevstropov, Yu. V. Zhilayev, N. Nazarov, Yu. G. Sadofyev, A. N. Topchy, N. N. Faleev, L. M. Fedorov, Yu. M. Shernyakov

A.F.Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021, St.Petersburg, Russia

