

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ GaP *p-n*-СТРУКТУР, ВЫРАЩЕННЫХ НА Si-ПОДЛОЖКАХ

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

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 19.05.1992. Принята к печати 6.11.1992)

Методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе получены эпитаксиальные фосфид-галлиевые *p-n*-структуры на Si-подложках. Исследованы их электрические и электролюминесцентные характеристики.

Характеристика ток—напряжение при малых значениях тока ($6 \cdot 10^{-8} - 6 \cdot 10^{-4}$ А/см⁻²) имеет туннельный характер. При прямых токах она экспоненциальная (с предэкспоненциальным множителем 10^{-8} А/см² и характеристической энергией 75 мэВ), при обратных токах — степенная (с показателем степени 4). Токовое напряжение отсечки ~1.85 В, напряжение пробоя 12—18 В, дифференциальное сопротивление 4.5 Ом.

Характеристика емкость—напряжение имеет квадратичный вид, напряжение отсечки составляет 1.8 В, наклон — $1.75 \cdot 10^{-4}$ пФ⁻²/В · см⁻⁴.

Полученные структуры *p-n*-GaP/*n*-Si излучают при обратном смещении видимый свет. Спектр электролюминесценции широкий, спадающий в сторону больших энергий фотонов в диапазоне 1.6—2.5 эВ, квантовый выход электролюминесценции составляет 10^{-2} % и не зависит от тока.

Совокупность полученных экспериментальных данных соответствует представлению о лавинном пробое (при обратном смещении свыше 12—18 В), который обусловлен ударной ионизацией, генерирующей световое излучение.

Введение. В последние годы заметно активизировались работы по созданию эпитаксиальных слоев GaP на Si-подложках [1-4, 6, 7] и приборных структур на их основе [5]. Это в основном связано с возможностью совмещения в таких структурах фосфида галлия, обладающего уникальными электрическими и электролюминесцентными свойствами, с высококачественными кремниевыми подложками большого размера. Следует также отметить, что при этом заметно снижается стоимость приборов на основе фосфида галлия из-за значительно меньшей стоимости кремниевых пластин.

Имеются сообщения о получении гетероэпитаксиальных слоев GaP на Si-подложках различными методами эпитаксии: молекулярно-лучевой [1, 2] и газофазной — путем разложения металлоорганических соединений [3, 4], а также хлоридно-гидридным [5] и хлоридным [6, 7] методами.

В работе [5] сообщалось о получении светоизлучающей *p-n*-структуры из GaP путем диффузии цинка в эпитаксиальный слой *n*-GaP на Si-подложке, выращенный из газовой фазы хлоридно-гидридным методом.

В настоящей работе впервые сообщается о получении эпитаксиальной *p-n*-структуры из GaP на Si-подложке. Для ее получения сначала на Si-подложке выращивался гетероэпитаксиальный слой *n*-GaP, а затем на него наращивался слой *p*-GaP. Причем на обоих этапах роста для получения как *n*-GaP, так и *p*-GaP применялся один и тот же простой технологический метод газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе Ga (GaP)—PCl₃—H₂ [7].

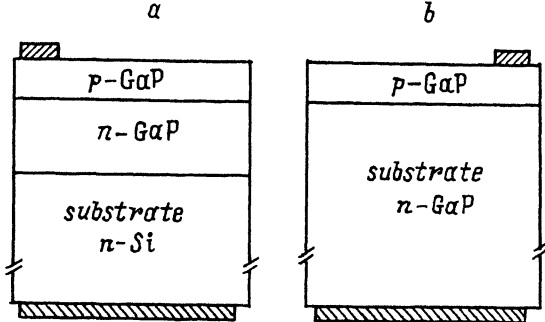


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемых структур: основной — $p-n$ -GaP/ n -Si (a) и контрольной — p -GaP/ n -GaP (b).

Исследовались электрические и электролюминесцентные свойства полученных эпитаксиальных $p-n$ -структур из GaP на Si-подложках. Их электрические и электролюминесцентные характеристики сравнивались с соответствующими характеристиками контрольных $p-n$ -гомоструктур из GaP, которые создавались одноступенчатым наращиванием эпитаксиального p -слоя на подложку n -GaP. Для лучшего выявления роли подложки Si наращивание слоев p -GaP у основных и у контрольных $p-n$ -структур производилось одновременно, в одном технологическом процессе.

1. Создание эпитаксиальных структур $p-n$ -GaP/ n -Si

Эпитаксиальный слой n -GaP на Si-подложке выращивался методом газовой эпитаксии в открытой хлоридной системе. Толщина слоя составляла 3—6 мкм. В процессе эпитаксии слой n -GaP легировался теллуром и серой до концентраций $n = (1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Эпитаксиальный слой p -GaP выращивался с использованием вышеупомянутого способа одновременно на структуре n -GaP/ n -Si (основной вариант) и на подложке n -GaP (контрольный вариант), причем обе пластины располагались в кварцевом реакторе рядом для обеспечения одинаковых условий роста p -GaP. Выращенный слой p -GaP легировался цинком до концентраций $p = (0.5-1.0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и имел толщину 2—4 мкм.

Для выращивания эпитаксиальных слоев n -GaP были использованы Si-подложки различной ориентации: Si(100) с разориентациями 0,5, 2, 4—6° в направлении [110] и Si(111). На подложках Si(100) с разориентацией 4—6° получены наименее дефектные слои n -GaP с плотностью дислокаций $(1-2) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ и полушириной спектра дифракционного отражения рентгеновского излучения, равной 90—130". На более точно ориентированных подложках Si(100) и Si(111) получены слои n -GaP с плотностью дислокаций $\sim 10^7 \text{ см}^{-2}$. Поэтому кремниевыми подложками, предназначенными для получения структур $p-n$ -GaP/ n -Si, были двухсторонне полированные пластины Si КЭФ-0.01 толщиной 400 мкм, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией 4—6° в направлении [110]. Для того чтобы добиться дальнейшего уменьшения плотности дислокаций в эпитаксиальных слоях GaP на Si-подложках, по-видимому, целесообразно создавать согласующий переходный слой. Подложками, предназначенными для создания контрольных $p-n$ -структур из GaP, были пластины n -GaP, легированные либо теллуром, либо оловом до концентрации $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщиной ~ 400 мкм, ориентированные в плоскости (100) с разориентацией 3—4° в направлении [110].

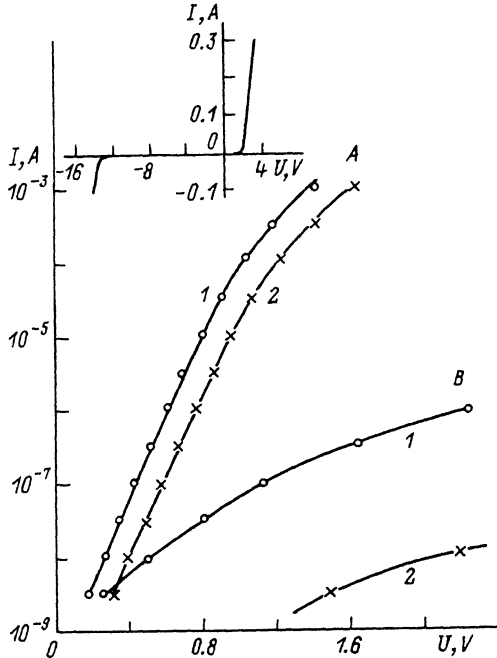


Рис. 2. $I-U$ -характеристики основной (1) и контрольной (2) структур. $T = 300$ К. Площадь основной структуры — 1.7 мм^2 , контрольной — 2.4 мм^2 . Смещения: А — прямые, В — обратные. Параметры $I-U$ -характеристик при прямых смещениях (А): 1 — $I_0 = 3 \cdot 10^{-10} \text{ А}$, $\epsilon = 75 \text{ мэВ}$; 2 — $I_0 = 7 \cdot 10^{-11} \text{ А}$, $\epsilon = 80 \text{ мэВ}$. На вставке — характеристики в области больших токов.

Площади исследованных структур $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ и $p\text{-GaP}/n\text{-GaP}$ были практически одинаковыми и составляли $S = (1.0-2.5) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Омические контакты создавались сплавлением в атмосфере очищенного водорода при температуре $550-600^\circ\text{C}$: для эпитаксиального слоя $p\text{-GaP}$ использовался сплав $\text{In} + 2\% \text{ Zn}$, для подложки $n\text{-Si}$ и $n\text{-GaP}$ — $\text{In} + 2\% \text{ Te} + 1\% \text{ Ni}$.

Схематическое изображение полученных структур, основной — $p\text{-GaP}/n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ и контрольной — $p\text{-GaP}/n\text{-GaP}$, а также расположение омических контактов к ним даны на рис. 1.

2. Характеристика ток—напряжение ($I-U$)

Прямая $I-U$ -характеристика исследованных структур $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ линейна при плотностях тока $6-18 \text{ А/см}^2$, токовое напряжение отсечки — 1.85 В , дифференциальное сопротивление — 4.5 Ом (рис. 2). При малых токах порядка $6 \times 10^{-8}-6 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$ $I-U$ -характеристика экспоненциальна — $I = I_0 \exp qU/\epsilon$ (рис. 2), где предэкспоненциальный множитель $I_0 = 10^{-8} \text{ А/см}^2$. Характеристическая энергия составляет $\epsilon = 75 \text{ мэВ}$, что указывает на туннельный характер прямого тока.

У контрольных $p-n$ -структур из GaP прямая $I-U$ -характеристика обладает теми же свойствами, что и у основных (рис. 2).

Обратная $I-U$ -характеристика исследованных структур $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ имеет напряжение пробоя $12-18 \text{ В}$ при 300 К и оно увеличивается с ростом температуры. Температурный коэффициент напряжения пробоя положителен и равен $(3-5) \cdot 10^{-3} \text{ В/град}$, что указывает на механизм ударной ионизации и, следовательно, на лавинный характер пробоя. При малых обратных токах ($6 \cdot 10^{-8}-$

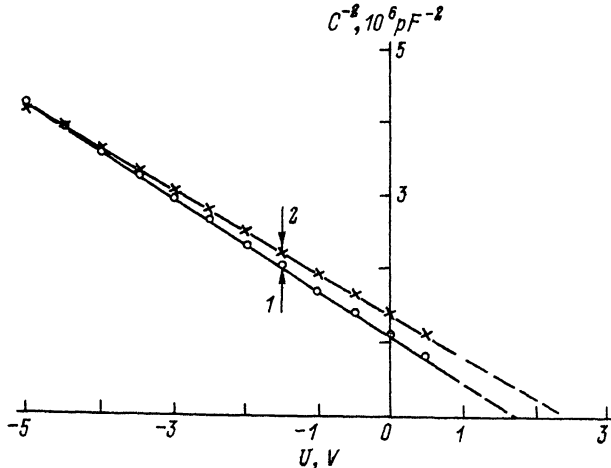


Рис. 3. Квадратичная $C-U$ -характеристика основной (1) и контрольной (2) структур. $T = 300$ К. Площадь основной структуры — 1.7 мм^2 , контрольной — 2.4 мм^2 . $1 - N_A - N_D = 0.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $2 - N_A - N_D = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

10^{-5}) А/см^2 $I-U$ -характеристика имеет степенной вид $I \sim U^n$, где $n = 4$, что указывает на туннельный механизм обратного тока.

У контрольных $p-n$ -структур из GaP обратные $I-U$ -характеристики в общих чертах имеют такие же свойства, как и основные (рис. 2).

3. Характеристика емкость—напряжение ($C-U$)

Зависимость $C^{-\gamma}-U$ в структурах $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$, полученная с помощью измерителя емкости Е7-12 на частоте 1 МГц, имеет квадратичный вид, $\gamma = 2$ (рис. 3). В исследованных структурах $p-n$ -переход резко асимметричный, с концентрацией дырок в p -слое, определенной по $C^{-2}-U$ -характеристике, $N_A - N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Емкостное напряжение отсечки в исследованных структурах $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ $U_c = 1.8$ В, т. е. несколько ниже, чем токовое (рис. 3), что достаточно типично для $p-n$ -структур из фосфида галлия [8].

У контрольных $p-n$ -структур из GaP $C-U$ -характеристика в общих чертах такая же, как у основных (рис. 3).

4. Электролюминесценция

Спектр электролюминесценции снимался при комнатной температуре на монохроматоре МДР-2, в качестве приемника использовался фотоумножитель ФЭУ-79 (спектральная характеристика С-11).

Излучение в видимой области спектра на структуре $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ наблюдалось при обратном смещении выше напряжения пробоя (12—18 В). Оно состояло из отдельных ярких точек (свечение микроплазм), кроме того, наблюдался светящийся оранжевый фон.

Спектр электролюминесценции — широкий, бесструктурный (рис. 4). Интенсивность электролюминесцентного излучения спадает в сторону больших энергий фотонов в диапазоне 1.6—2.5 эВ. Квантовый выход электролюминесценции составляет $10^{-3}\%$ и не зависит от величины тока, быстродействие ~ 1 нс. Спектр электролюминесценции структур $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ достаточно типичен для обратно смещенных $p-n$ -структур из GaP [9].

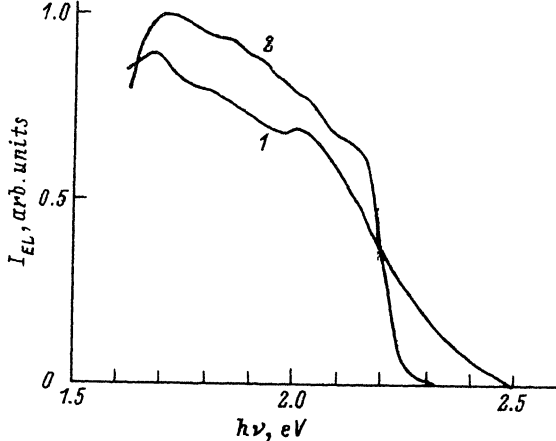


Рис. 4. Спектры электролюминесценции при обратном смещении основной (1) и контрольной (2) структур. $T = 300$ К. I_{EL} — интенсивность излучения.

Зависимость интенсивности электролюминесценции от обратного тока (оптическая ватт-амперная характеристика) линейная, т. е. квантовый выход не зависит от тока, что также характерно для электролюминесценции обычных обратно смещенных $p-n$ -структур из GaP [8].

У контрольных образцов p -GaP/ n -GaP спектр электролюминесценции при обратном смещении в общих чертах такой же, как у основных (рис. 4); имеющиеся отличия, вероятно, обусловлены различием в плотности дислокаций.

Заключительные замечания. Вид спектра электролюминесценции в коротковолновой области, линейность оптической ватт-амперной характеристики, температурная зависимость напряжения пробоя (положительный температурный коэффициент напряжения пробоя) и наличие микроплазм в исследованных структурах $p-n$ -GaP/ n -Si — все это вместе позволяет сделать вывод об ударной ионизации и, следовательно, о лавинном характере пробоя при обратном смещении свыше 12—18 В при 300 К.

Полученные фосфид-галлиевые $p-n$ -структуры на кремниевых подложках не излучают при прямом смещении, что, очевидно, вызвано существенной долей туннельного безызлучательного тока. Это существенно отличает их от обычных $p-n$ -структур из GaP [8, 10], но зато роднит их с поверхностно-барьерными GaP-структурами.

Следует отметить, что такие особенности, как отсутствие инерционной инжекционной люминесценции, квантовый выход, совершенно не зависящий от тока и слабо зависящий от температуры, позволяют предложить данные структуры для калибровки быстродействующих (с постоянной времени < 1 нс) фотоприемников. При этом они обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными обратно смещенными $p-n$ - и $m-s$ -структурами на GaP.

Итак, впервые методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе Ga(GaP)—PCl₃—H₂ получены эпитаксиальные $p-n$ -структуры из GaP на Si-подложках, излучающие видимый свет при обратном смещении с быстродействием ~ 1 нс.

Авторы выражают глубокую благодарность Б. В. Царенкову за стимулирующее обсуждение работы и конструктивные рекомендации и А. Э. Юновичу за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S. Gonda, Y. Matsushima, S. 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. B. Pogge, B. M. Kemlage, R. W. Broagie. J. Cryst. Growth, 37, 13 (1977).
- [4] Y. Kohama, K. Uchida, T. Soga, T. Jimbo, M. Umemo. Appl. Phys. Lett., 53, 862 (1988).
- [5] H. Mori, M. Ogasawara, M. Yamamoto, M. Tachikawa. Appl. Phys. Lett., 51, 1245 (1987).
- [6] H. Huber, G. H. Winstel. Siemens Farsch. Entwickl., 2, 171 (1973).
- [7] Ю. В. Жиляев, В. В. Криволапчук, Н. Назаров, И. П. Никитина, Н. К. Полетаев, Д. В. Сергеев, В. В. Травников, Л. М. Федоров. ФТП, 24, 1303 (1990).
- [8] Л. М. Коган. Полупроводниковые светоизлучающие диоды, 208. М. (1983).
- [9] Б. С. Верман, В. В. Евстропов, Б. В. Царенков. ФТП, 5, 134 (1971).
- [10] А. Берг, П. Дин. Светодиоды, 686. М. (1979).

Редактор Л. В. Шаронова
