

## ДИАГНОСТИКА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ GaAs, ВЫРАЩЕННЫХ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ, МЕТОДАМИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ЕМКОСТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Кольченко Т. И., Ломако В. М., Мороз С. Е.,  
Пономарева О. А., Сергеева В. В., Цыпленков И. Н.

С помощью измерений фотолюминесценции ( $T=4.5$  К) и нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней проведены исследования специально не легированных и легированных кремнием слоев GaAs, выращенных по двухступенчатой технологии на кремниевых подложках. Полученные результаты сравниваются с соответствующими данными для гомоэпитаксиальных структур. Проведенный анализ позволил идентифицировать основные полосы ФЛ активных слоев гомо- и гетероэпитаксиальных структур и определить природу основного мелкого акцептора. Оценены также величина термических напряжений и содержание глубоких центров в слоях GaAs/Si.

В последние годы возник большой интерес к гетероэпитаксиальным слоям GaAs и InP, осажденным на Si-подложках, что связано с потенциальной возможностью применения таких структур в быстродействующих и оптоэлектронных приборах. Предполагается, что использование подложек из Si, обладающих высокой механической прочностью и теплопроводностью, позволит не только существенно снизить стоимость приборов и ИС на основе соединений  $A^{III}B^V$ , но и добиться повышения их мощности и уровня интеграции. Имеющаяся в литературе информация касается в основном свойств специально не легированных слоев GaAs/Si [1-8]. В настоящей работе проведена диагностика как нелегированных, так и легированных кремнием слоев этого типа.

Эпитаксиальные слои арсенида галлия толщиной  $d \leq 3$  мкм выращивались на подложках кремния, ориентированных в направлении (100) с разориентацией на  $2^\circ$  в направлении (011). Собственный окисел с поверхности кремния удалялся погружением в разбавленную плавиковую кислоту непосредственно перед помещением в реактор. Нарастивание проводилось на стандартном МОС гибридном оборудовании по двухступенчатой технологии, использованной ранее авторами [9, 10].

Диагностика качества гетероэпитаксиальных структур арсенида галлия на кремнии проводилась методами низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) и нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ). Спектры ФЛ снимались при температуре 4.5 К, возбуждение осуществлялось крпштоновым лазером. Измерения ФЛ проводились в диапазоне 800—960 нм (1.55—1.29 эВ). Для НЕСГУ измерений на поверхности эпитаксиальных слоев формировались диоды Шоттки. Спектры ФЛ и НЕСГУ слоев арсенида галлия на кремнии анализировались в сравнении со спектрами гомоэпитаксиальных слоев GaAs/GaAs, выращенных в тех же технологических процессах.

### Экспериментальные результаты и их анализ

а) Особенности ФЛ активного слоя гомоэпитаксиальных структур GaAs/GaAs. Из рис. 1 видно, что спектры ФЛ слоев GaAs/GaAs включают две основные полосы — краевую А и акцепторную В. Структура А-полосы для нелегирован-

ного слоя GaAs/GaAs представлена более детально на вставке к рисунку. Установлено, что обе составляющие указанной полосы обусловлены экситонными переходами. Пик  $A1$  (1.5153 эВ), по-видимому, соответствует свободному экситону (верхняя ветвь поляритона), а пик  $A2$  (1.5128 эВ) — экситону, локализованному на нейтральном акцепторе [11]. Высокая интенсивность полосы свободного экситона и отсутствие в спектре экситонных пиков, связанных с мелкими донорными примесями, свидетельствуют о низкой концентрации мелких доноров, относительной чистоте и слабой компенсации активного слоя, который, вероятно, обладает дырочной проводимостью. Последнее в дальнейшем было подтверждено результатами электрических измерений.

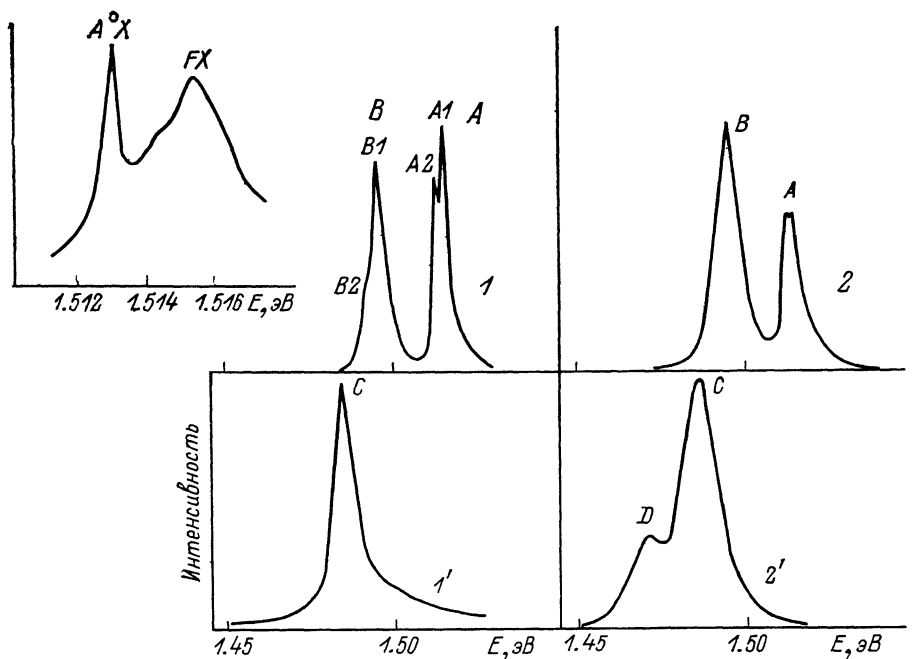


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) при  $T=4.5$  К нелегированных (1, 1') и легированных кремнием (2, 2') слоев арсенида галлия, выращенных на подложках из  $n^+$ -GaAs: Te (1), полуизолирующего GaAs: Cr (2) и кремния (1', 2').

На вставке — спектр экситонной полосы ФЛ нелегированного слоя GaAs/GaAs при  $T=4.5$  К.

В спектре  $B$ -полосы нелегированного слоя GaAs/GaAs наблюдались две основные составляющие  $B1$  (1.494 эВ) и  $B2$  (1.491 эВ), обусловленные зонно-акцепторными  $e$ -,  $A$ - и донорно-акцепторными  $D$ -,  $A$ -переходами с участием углерода.

Для легированных кремнием образцов GaAs/GaAs обе основные полосы ФЛ практически не разделялись на составляющие (кривая 2), что, по-видимому, обусловлено их расширением из-за более высокого уровня легирования ( $n_0 \geq 10^{17}$  см $^{-3}$ ). Энергетическое положение  $A$ -полосы (1.5137 эВ) и ее полуширина ( $\sim 5.8$  мэВ) позволяют связать эту полосу с переходами типа мелкий донор—валентная зона ( $D, h$ ). На основании энергетического положения  $B$ -полосы можно заключить, что природа мелких акцепторов в легированных кремнием слоях GaAs/GaAs та же, что и в нелегированных.

б) Спектры ФЛ активного слоя гетероструктур GaAs/Si. Представленные на рис. 1 данные свидетельствуют о значительных различиях в спектрах ФЛ слоев гомо- и гетерозитаксиальных структур. Так, в спектрах нелегированных слоев GaAs/Si наблюдается одна основная  $C$ -полоса (1.484 эВ). Ее энергетическое положение совпадает с положением наиболее интенсивной полосы ФЛ, наблюдаемой авторами [3] в случае нелегированных слоев GaAs/Si, а полуширина полосы в лучших слоях составляет  $\sim 6$  мэВ. Для легированных крем-

нием слоев  $C$ -полоса несколько смещается в область высоких энергий (1.485—1.487 эВ), кроме того, в спектре дополнительно наблюдается  $D$ -полоса (1.4705 эВ).

Наблюдаемые изменения спектра ФЛ при переходе к гетероэпитаксиальным структурам в литературе в основном связываются с эффектами двухосного растягивающего напряжения в плоскости пленки, обусловленного различием коэффициентов термического расширения арсенида галлия и кремния [12]. К указанным эффектам относят снятие вырождения валентной зоны GaAs с  $j=3/2$  ( $m_j = \pm 1/2; \pm 3/2$ ) и уменьшение ширины запрещенной зоны. По заключению авторов [1-3] величина термических напряжений в слоях GaAs/Si может меняться от 1.5 кбар при  $T=300$  К до 2.5 кбар при  $T=4.2$  К.

В соответствии с развитыми в литературе представлениями [1-3, 13]  $C$ - и  $D$ -полосы, наблюдаемые в спектрах ФЛ гетероструктур, можно отнести к краевой и акцепторной полосам ФЛ GaAs, соответствующим состоянию валентной зоны с  $m_j = \pm 1/2$ , смещенным в низкоэнергетическую сторону вследствие упругих напряжений. Некоторое смещение пиков ФЛ в GaAs с  $n_0 \geq 10^{17}$  см<sup>-3</sup> может происходить также в результате эффекта Бурштейна—Мосса. Вместе с тем на основании электрических измерений было установлено, что концентрации носителей заряда в легированных кремнием слоях гетероструктур практически совпадают с соответствующими значениями для гомоэпитаксиальных структур, выращенных в тех же процессах. Это позволило уточнить величину энергетического сдвига ФЛ в гетероструктурах, обусловленного непосредственно упругими напряжениями, и оценить эти напряжения. Было установлено, что в легированных кремнием слоях GaAs/Si при  $T=4.5$  К величина напряжений составляет  $\sim 2.6$  кбар, что хорошо согласуется с данными [3] для нелегированных слоев GaAs/Si. Проведенные оценки напряжений по величине прогиба пластин при  $T=300$  К дали величину  $\sim 1.5-2$  кбар.

Акцепторная полоса ФЛ нелегированных [ $n_0 = (2-3) \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>] слоев GaAs/Si с  $h\nu = 1.464$  эВ авторами [3] связывалась с  $e$ -,  $A$ - или  $D$ -,  $A$ -переходами с участием акцептора углерода, а дополнительная полоса с  $h\nu = 1.457$  эВ — с участием акцептора кремния. В нашем случае с учетом возможного сдвига полос ФЛ из-за увеличения концентрации мелких примесей  $D$ -полосу в спектре легированных кремнием слоев GaAs [ $n_0 = (1-2) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>], по-видимому, можно отнести к межпримесным  $D$ -,  $A$ -переходам, связанным с акцептором углерода. Сравнение кривых  $I'$  и  $I''$  показывает, что в результате легирования кремнием относительный вклад переходов, связанных с акцепторными примесями, заметно возрастает, что свидетельствует о росте степени компенсации эпитаксиальных слоев. Анализ спектров ФЛ структур GaAs/Si, выращенных в идентичных условиях, но с активными слоями различной толщины, показывает, что увеличение толщины активного слоя до 3 мкм способствует росту интенсивности  $C$ -полосы ( $J_C$ ) и снижению отношения  $J_D/J_C$ , в то время как положение полос, а следовательно, и величина упругих напряжений остаются постоянными.

По проведенным оценкам даже в лучших специально не легированных слоях арсенида галлия на кремнии концентрация носителей заряда составляет не менее  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, что лишь в 7—10 раз ниже по отношению к легированным кремнием слоям [ $n_0 \approx (1.5-2) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>]. В то же время интенсивность ФЛ легированных слоев арсенида галлия на кремнии примерно на 2 порядка выше, чем нелегированных, т. е. в результате легирования кремнием улучшается и совершенство слоев GaAs/Si. По величине интенсивности ФЛ такие слои уступают гомоэпитаксиальным слоям арсенида галлия, выращенным на  $n^+$ -подложках, примерно в 40 раз, но сопоставимы и даже несколько превосходят гомоэпитаксиальные слои, выращенные на подложках из полуизолирующего GaAs:Cr.

Одним из наиболее важных применений структур арсенида галлия на кремнии является изготовление на их основе полевых транзисторов (ПТ) и ИС. При создании ПТ толщина соответствующего активного слоя арсенида галлия с  $n_0 \approx 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, изолированного от остальной части структуры, должна составлять  $\sim 0.2$  мкм. Это может быть реализовано путем введения между зародышевым и активными слоями промежуточного слоя, состоящего из тонких чередующихся слоев GaAs—AlAs. Анализ спектров ФЛ активных слоев, выращенных с использованием таких переходных слоев, позволил установить, что введение

промежуточного слоя не вносит дополнительных температурных напряжений, а интенсивность ФЛ активного слоя в этом случае даже несколько увеличивается, т. е. использование таких слоев целесообразно.

в) *Результаты измерений НЕСГУ.* С помощью электрических измерений гомоэпитаксиальных структур GaAs/GaAs было установлено, что нелегированные слои действительно характеризуются дырочной проводимостью с  $p_0 = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а слои, легированные кремнием, — электронной проводимостью ( $n_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Спектры НЕСГУ активных слоев гомоэпитаксиальных структур представлены на рис. 2 (кривые 1 и 2). Видно, что в специально не легированном слое обнаруживаются ловушки  $H1-H3$  с энергиями активации термоэмиссии, равными 0.38, 0.54 и  $\sim 1$  эВ соответственно. Наибольшей концентрацией ( $N_T \approx 3.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) характеризуется ловушка  $H2$ . Оценки показали, что в активном слое легированной кремнием структуры GaAs/GaAs ловушки для основных носителей (электронов) с концентрацией выше  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  отсутствуют (рис. 2, кривая 2).

С целью изучения глубоких центров и оценки возможностей использования гетероструктур для изготовления приборов на них были созданы барьеры Шоттки Al—GaAs. По данным прямой ветви вольт-амперной характеристики

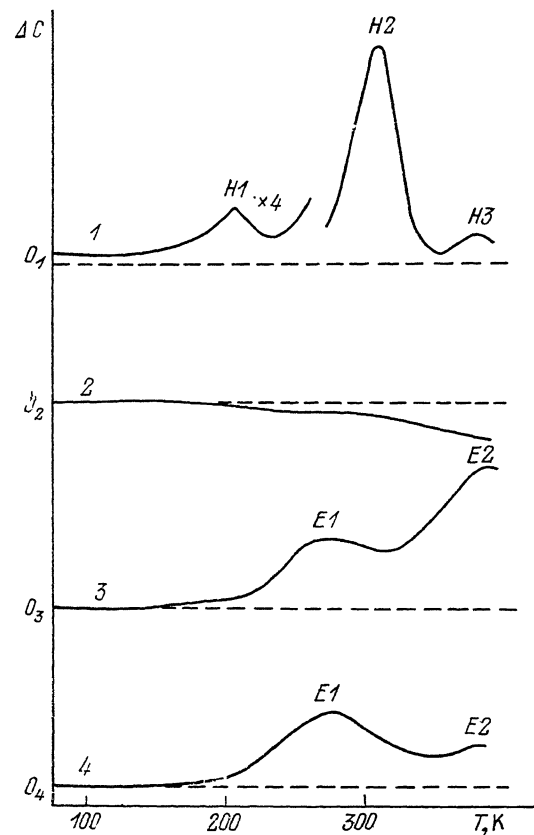


Рис. 2. Спектры НЕСГУ нелегированного (1) и легированного кремнием (2—4) слоев GaAs, выращенного на подложках из арсенида галлия (1, 2) и кремния (3, 4).

Толщина активного слоя, мкм: 1 — 1.5, 2, 3 — 3, 4 — 0.25;  $e_n^{-1} = 1.31 \cdot 10^{-2}$  с.

полученных тестовых структур были определены высота барьера Шоттки  $\varphi_B$  и величина коэффициента неидеальности  $n$ . При эффективной постоянной Рундхардсона  $A^{**} = An^*/m_0 \approx 8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2$  эти значения для структур GaAs/Si составили  $\varphi_B \approx 0.69$  эВ и  $n = 1.4$ . Последовательное сопротивление диодов не превышало 200 Ом. Вольтемкостные характеристики структур GaAs/Si с барьером Шоттки в координатах ( $C^{-2}$ ,  $V$ ) были близки к линейным, величина контактного напряжения  $U_K$  составляла 0.8—0.9 В. Эти величины были близки к данным [14] и свидетельствовали о достаточно хорошем качестве полученных диодов, что позволило использовать их в дальнейшем для проведения измерений НЕСГУ.

Типичный спектр НЕСГУ легированного кремнием эпитаксиального слоя арсенида галлия ( $n_0 \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), выращенного на кремниевой подложке, представлен на рис. 2 (кривая 3). Видно, что в спектре проявляются две основные электронные ловушки  $E1$  и  $E2$ . Анализ кривых Аррениуса позволил определить основные параметры этих ловушек: для  $E1$ :  $E_a \approx 0.37$  эВ,  $\sigma_{n\infty} = 2.5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-2}$ ; для  $E2$ :  $E_a \approx 0.68$  эВ,  $\sigma_{n\infty} \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2}$ .

Подобные спектры наблюдались в [7, 8] для слоев, выращенных как непосредственно на кремниевых подложках, так и при использовании промежуточных сверхрешеточных слоев GaP—GaAs<sub>0.5</sub>P<sub>0.5</sub> и GaAs<sub>0.5</sub>P<sub>0.5</sub>—GaAs. Сравнение кривых Аррениуса показывает, что в нашем случае присутствуют те же ло-

ловушки, что и в [7, 8]. Небольшая разница в значениях  $E_a$ , возможно, связана с более высоким уровнем легирования исследуемых структур и соответствующим увеличением скорости эмиссии вследствие электрополевых эффектов. Центр  $E2$ , по-видимому, представляет собой известную в арсениде галлия ловушку  $EL2$ . Существование ловушки  $E1$  авторы [8] приписывают комплексам кремний—дислокации. Оценки показали, что концентрации  $E1$  и  $E2$  в исследуемых слоях арсенида галлия на кремнии сравнительно невелики. Так, в случае структуры с активным слоем толщиной  $\sim 3$  мкм отношение  $N_T/n_0$  для центров  $E1$  и  $E2$  составляет  $\sim 4 \cdot 10^{-3}$  и  $10^{-2}$  соответственно. Относительные концентрации указанных ловушек примерно соответствуют концентрациям ловушек в слоях GaAs/Si, выращенных с использованием напряженных сверхрешеточных слоев [8]. По мере снижения толщины активного слоя, как видно из кривых 3, 4 рис. 2, относительный вклад ловушки  $E1$  по сравнению с  $E2$  несколько возрастает.

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что качество легированных кремнием слоев GaAs/Si, с точки зрения люминесцентных характеристик и содержания глубоких центров, является вполне удовлетворительным, а основные характеристики барьеров Шоттки на гетероструктурах близки к соответствующим данным для гомоэпитаксиальных слоев.

#### Список литературы

- [1] Shastry S. K., Zemon S. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. N 8. P. 467—469.
- [2] Zemon S., Jagannath C., Shastry S. K., Lambert G. // Sol. St. Commun. 1988. V. 65. N 7. P. 553—556.
- [3] Freundlich A., Grenet J. C., Neu G., Yeycuras A., Verle C. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. N 23. P. 1976—1978.
- [4] Shimizu M., Furukawa M., Mizuki T., Sakurai T. // J. Cryst. Growth. 1988. V. 93. P. 475—480.
- [5] Watanabe Y., Kadote Y., Okamoto H., Seki M. // J. Cryst. Growth. 1988. V. 93. P. 459—465.
- [6] Pearton S. J., Maim D. L., Neibrook L. A., Abernathy C. R., Caruso R. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 9. P. 682—684.
- [7] Pearton S. J., Abernathy C. R., Caruso R., Vernon S. M., Short K. T., Brown J. M., Chi S. N. F., Stavola M., Haven V. E. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 3. P. 775—783.
- [8] Soga T., Sakai S., Umeno M., Hattori S. // Japan. J. Appl. Phys. 1986. V. 25. N 10. P. 1510—1513.
- [9] Vernon S. M., Haven V. E., Tobin S. P., Wolfson R. G. // J. Cryst. Growth. 1986. V. 77. P. 530—538.
- [10] Nozaki S., Noto N., Sgawa T., Wu A. T., Soga T., Jimbo T., Umeno M. // Japan. J. Appl. Phys. 1990. V. 29. N 1. P. L138—L144.
- [11] Heim U., Hiesinger P. // Phys. St. Sol. (b). 1977. V. 66. P. 461—470.
- [12] Берг А., Дин П. Светодиоды. М., 1979. 686 с.
- [13] Bhangana R. N., Nathan M. E. // Phys. Rev. 1967. V. 161. N 3. P. 695—698.
- [14] Стриха В. И., Бузанева Е. В., Радзиевский И. А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. М., 1974.

Научно-исследовательский институт  
прикладных физических проблем  
им. А. Н. Севченко при ВГУ  
им. В. И. Ленина  
Минск

Получена 16.04.1991  
Принята к печати 23.04.1991