

©1995 г.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РОСТА НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУРАХ InAlAs/InGaAs, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ InP МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

*В.М.Устинов, А.Ю.Егоров, А.Е.Жуков, Н.Н.Фалеев,  
А.Ф.Папильников, П.С.Копьев*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Получена 31 октября 1994 г. Принята к печати 8 ноября 1994 г.)

Исследовано влияние температуры роста на подвижность электронов в транзисторных структурах InAlAs/InGaAs, согласованных по параметру решетки с подложками InP. Структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии без изменения условий осаждения в процессе роста. Было обнаружено, что оптимальная температура роста, соответствующая наибольшей подвижности, измеренной при комнатной температуре, заметно превышает температуру 500 °С, традиционно используемую для этих материалов, и составляет приблизительно 540 °С. Увеличение подвижности с повышением температуры осаждения связано с улучшением качества InAlAs, тогда как сегрегация In во время роста InGaAs не оказывает заметного влияния на тенденцию в изменении подвижности. Точка, соответствующая максимальной подвижности, хорошо согласуется с температурой начала интенсивной десорбции In во время роста InGaAs. Поэтому снижение подвижности при дальнейшем увеличении температуры роста, вероятно, обусловлено уменьшением содержания In в канале. Полученные результаты показывают, что оптимизация температуры роста позволяет достичь высоких подвижностей (вплоть до 9800 см<sup>2</sup>/В · с при концентрации двумерных электронов 2.9 · 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>) в приборных структурах без изменений условий осаждения в процессе выращивания.

Полевые транзисторы на основе модулированно-легированных гетероструктур InAlAs/InGaAs на подложках InP имеют наибольшие частоты отсечки (> 300 ГГц) и наименьшие коэффициенты шума (< 1 дБ на частоте 60 ГГц) среди всех трехконтактных полупроводниковых приборов [1]. Среди технологий синтеза подобных структур наиболее широкое распространение получила молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). Одна из основных проблем при выращивании гетероструктур InAlAs/InGaAs с помощью МПЭ заключается в несовместимости оптимальных условий роста для InAlAs и InGaAs. Предпочтительные условия для роста InGaAs — это высокое отношение потоков элементов V/III групп и умеренная (≤ 500 °С) температура подложки.

С другой стороны, для получения высококачественного InAlAs необходимы меньшие потоки мышьяка и более высокие температуры, до 570 °C [2,3]. Температура подложки около 500 °C, обычно используемая для роста всей транзисторной структуры, позволяет подавить нежелательные эффекты термической нестабильности InGaAs и сегрегации In. В то же время низкая поверхностная подвижность атомов Al во время роста InAlAs при низких температурах приводит к шероховатости ростового фронта [4], а высокая химическая активность алюминия благоприятствует захвату фоновых примесей из остаточной атмосферы [2].

Изменение условий роста при переходе от буферного слоя InAlAs к каналу InGaAs и затем вновь к барьеру InAlAs требует прерываний осаждения, что ведет к усложнению и снижению воспроизводимости технологического процесса. Для согласования между условиями роста InAlAs и InGaAs в [5] предлагалось использовать метод модулированного потока мышьяка. В этом методе заслонка периодически перекрывает поток As во время роста InAlAs. Таким образом достигается эффективное уменьшение отношения потоков элементов пятой и третьей групп (V/III), что способствует увеличению темпа поверхностной диффузии атомов. Во время осаждения InGaAs заслонка As постоянно открыта. Однако осуществление подобного режима на практике, помимо необходимой оптимизации цикла работы заслонки, существенно увеличивает вероятность сбоя при проведении технологического процесса.

Наиболее удобным, как нам представляется, является использование одинаковых как температуры подложки, так и потока мышьяка в течение роста всей структуры. Однако эти параметры должны быть выбраны таким образом, чтобы достичь приемлемого компромисса между условиями роста для InAlAs и InGaAs. В этой работе мы покажем, что оптимальная температура роста для транзисторных структур InAlAs/InGaAs лежит заметно выше 500 °C и составляет ~540 °C, как было оценено из поведения холловской подвижности при комнатной температуре. Увеличение подвижности с повышением температуры осаждения связано, как мы полагаем, с улучшением качества InAlAs. Из этого следует, что качество InAlAs даже в структурах с относительно толстым слоем канала имеет заметное влияние на характеристики транспорта электронов.

Исследуемые структуры выращивались на полуизолирующих подложках (100)InP:Fe в установке RIBER 32P, используя поток As<sub>4</sub>. Процедура подготовки подложек включала обезжиривание в изопропанол и последовательное травление в растворах K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>:HBr:H<sub>2</sub>O и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O. Термическая очистка подложек в ростовой камере проводилась при температуре 540 °C в условиях (4 × 1) реконструкции поверхности InP. Скорости роста бинарных компонентов были измерены с помощью осцилляций интенсивности зеркально-отраженного пучка быстрых электронов во время роста слоев (Al)GaAs и напряженного InGaAs на подложках (100)GaAs. Они были подобраны таким образом, чтобы задать скорости роста решеточно-согласованных с подложкой InP слоев InAlAs и InGaAs, равные 0.5 мкм/ч. Температура подложки контролировалась IRCON пирометром V серии.

Схематическое изображение транзисторной структуры N-InAlAs/InGaAs [6], исследованной в настоящей работе, приведено на

InGaAs : Si 7 nm
InAlAs 20 nm
InAlAs : Si 10 nm
InAlAs 3 nm
InGaAs 40 nm
InAlAs 200 nm
(100) InP : Fe substrate

Рис. 1. Схематическое изображение транзисторной структуры InAlAs/InGaAs на подложке InP, использованной в данной работе.

рис. 1. На каждой гетерогранице осуществлялось кратковременное (1 мин) прерывание роста. Уровень легирования InAlAs был выбран таким образом, чтобы дать плотность свободных электронов в канале  $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при 300 К. Высокая величина плотности электронов выбрана с учетом требований, предъявляемых к приборным структурам, в которых требуется достижение наибольшей проводимости канала. Мерой качества структур, выращенных в различных условиях, была избрана подвижность электронов при комнатной температуре, определяемая с помощью холловских измерений методом Ван-дер-Пау. Высокие уровни легирования контактного слоя и слоя InAlAs : Si могут создавать параллельную проводимость. Таким образом, измеряемые величины могут быть несколько заниженными по отношению к истинному значению подвижности электронов в канале.

Как показали эксперименты по выращиванию толстых слоев InGaAs, использование температуры подложки равной  $500^\circ\text{C}$  и эквивалентного давления пучка  $\text{As}_4 \approx 1.7 \cdot 10^5 \text{ Тор}$  ( $V/\text{III} \approx 25$ ) позволяет получать слои, обладающие зеркально-гладкой поверхностью, имеющие ширины рентгеновских кривых качания в несколько десятков угловых секунд (рис. 2), и при легировании свыше  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  подвижность электронов не менее чем  $4000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Именно эти условия были первоначально воспроизведены для осаждения всей транзисторной структуры.

Однако транзисторная структура, выращенная в этих условиях, показала подвижность электронов при комнатной температуре всего  $7300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Мы полагаем, что это является прямым следствием роста InAlAs в неоптимальных условиях. В самом деле, в случае роста слоев InAlAs при  $500^\circ\text{C}$  структурное совершенство улучшается при значительно меньших потоках мышьяка. На рис. 3 приведены ширины рентгеновских кривых качания,  $\text{FWHM}_{\text{epi}}$ , измеренных вблизи отражения (400) от слоев InAlAs толщиной  $\sim 1 \text{ мкм}$ , выращенных решеточно-согласованными с InP при различных потоках мышьяка. Из рисунка видно, что в исследованном диапазоне снижение отношения  $V/\text{III}$  приводит к уменьшению значения  $\text{FWHM}_{\text{epi}}$ . Ширины пика подложки,  $\text{FWHM}_{\text{sub}}$ , также показаны на рис. 3. Для них не наблюдается какой-либо систематической зависимости от потока мышьяка. Поэтому нет оснований полагать, что основной вклад в  $\text{FWHM}_{\text{epi}}$  вносят дефекты на гетерогранице эпитаксиальный слой-подложка.

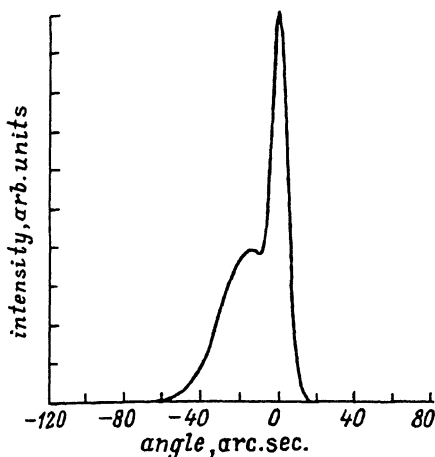


Рис. 2. Рентгеновская кривая качания вблизи отражения InP (004) для слоя InGaAs.

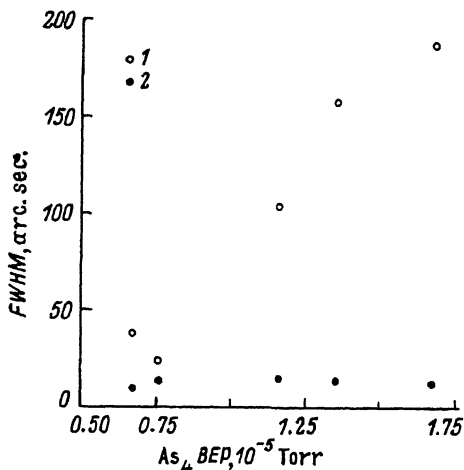


Рис. 3. Ширина пиков рентгеновской кривой качания для слоев InAlAs, решеточно-согласованных с подложкой InP, в зависимости от эквивалентного давления пучка мышьяка:

1 — эпитаксиальный слой, 2 — подложка. Температура роста — 500 °С.

Наиболее вероятной причиной ухудшения совершенства слоев InAlAs с увеличением потока As является возникновение высокой плотности кристаллических дефектов в результате уменьшения длины поверхностей диффузии атомов Al в условиях переизбытка мышьяка [7]. При этом в спектрах фотолюминесценции слоев InAlAs наблюдается широкая полоса люминесценции, расположенная с длинноволновой стороны краевого пика. На рис. 4 сравниваются спектры фотолюминесценции при 77 К двух слоев InAlAs, слабо легированных донорной примесью ( $n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Наблюдается снижение относительной интенсивности длинноволновой полосы по сравнению с интенсивностью краевой люминесценции в слое, выращенном при уменьшенном потоке As. В [3] отмечалась взаимосвязь между улучшением структурного совершенства слоев InAlAs на InP и уменьшением концентрации глубоких центров. Мы полагаем, что эти центры могут вызывать дополнительное рассеяние электронов в транзисторной структуре с относительно узким каналом.

Принимая во внимание отмечавшуюся выше невысокую подвижность носителей в структуре, выращенной в условиях благоприятных для InGaAs, и учитывая описанные тенденции в поведении InAlAs, можно предложить два пути оптимизации условий роста гетероструктур InAlAs/InGaAs, выращиваемых полностью при одинаковых условиях, — снижение используемого потока мышьяка, либо увеличение температуры роста. Второй путь представляется нам более предпочтительным, так как снижает вероятность внедрения фоновых примесей во время роста слоев, содержащих Al.

Нами была выращена серия транзисторных структур, используя температуру роста в диапазоне 500 ÷ 560 °С и сохраняя поток As равным  $1.7 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$ . Структуру поверхности InGaAs, выращиваемого в диапазоне 515 ÷ 540 °С, можно описать как промежуточную между ( $2 \times 1$ )

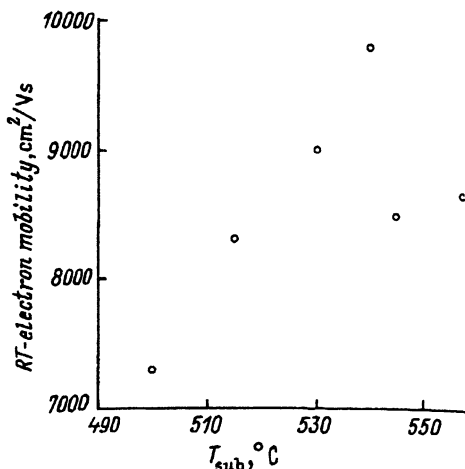
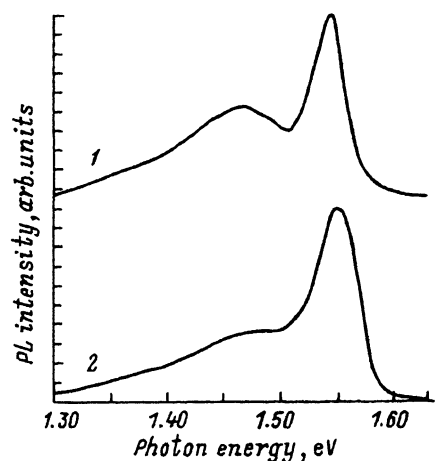


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции, записанные при 77 К, слоев InAlAs, выращенных решеточно-согласованными с подложкой InP с использованием различных потоков мышьяка,  $10^{-5}$  Торр: 1 — 1.7, 2 — 1.0.

Рис. 5. Холловские подвижности, измеренные при 300 К в транзисторных структурах InAlAs/InGaAs, выращенных при различной температуре подложки  $T_{sub}$ .

реконструированной и объемной ( $1 \times 1$ ). Ослабление сверхструктуры вероятно обусловлено поверхностной аккумуляцией In. Сегрегация In обычно рассматривается как нежелательное явление [8]. Однако, как видно из рис. 5, она не оказывает заметного влияния на тенденцию в изменении подвижности при 300 К, а определяющую роль играет улучшение качества InAlAs с повышением  $T_{sub}$ . Возможно, кратковременное прерывание роста после осаждения InGaAs в условиях повышенной температуры позволяет испариться избыточному In из приповерхностного слоя.

Подвижность закономерно увеличивается вплоть до 540 °С, достигая в максимуме значения  $9800 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ . Дальнейшее увеличение  $T_{sub}$  до 560 °С приводит к уменьшению подвижности. Точка, соответствующая максимуму подвижности, хорошо согласуется с температурой начала интенсивной десорбции In во время роста InGaAs, равной  $\approx 535 \text{ }^\circ\text{C}$  [9]. Поэтому можно предположить, что снижение подвижности в высокотемпературном диапазоне вызвано уходом InGaAs от состава, согласованного с подложкой по параметру решетки, в сторону недостатка In. Интересно отметить, что при столь высоких температурах рост InGaAs происходит в условиях реконструкции поверхности ( $4 \times 1$ ), т.е. в условиях обогащения металлом. В случае толстых ( $\sim 1 \text{ мкм}$ ) слоев InGaAs это приводит к плохой морфологии поверхности. В то же время все транзисторных структуры обладали зеркальной поверхностью, а подвижности даже в случае наибольших использованных температур остаются достаточно высокими.

Таким образом, нами было исследовано влияние температуры роста на подвижность электронов в транзисторных структурах InAlAs/InGaAs, выращиваемых методом МПЭ на InP. Было обнаружено, что оптимальная температура роста, соответствующая наибольшей холловской подвижности при 300 К, составляет приблизительно 540 °С. Увеличение подвижности с повышением температуры осажде-

ния связано с улучшением качества InAlAs, тогда как сегрегация In во время роста InGaAs не оказывает заметного влияния на тенденцию в изменении подвижности. Снижение подвижности при дальнейшем увеличении температуры роста, вероятно, обусловлено уменьшением содержания In в канале, так как точка, соответствующая максимальной подвижности, хорошо согласуется с температурой начала интенсивной десорбции In.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Hughes Research Laboratories, Malibu, CA USA.

Авторы благодарны Н.Н. Леденцову и М.В. Максиму за исследование люминесцентных свойств.

### Список литературы

- [1] L.D. Nguyen, A.S. Brown, M.A. Thompson, L.M. Jelloian. *Microwave J.*, 96 (June, 1993).
- [2] C.E.C. Wood, In: *GaInAsP alloy semiconductors*, ed. by T.P. Pearsall (Wiley, N.Y., 1982) Chap. 4, p. 87.
- [3] E. Tournie, Y.-H. Zhang, N.J. Pulsford, K. Ploog. *J. Appl. Phys.*, 70, 7362 (1991).
- [4] F.-Y. Juang, W.-P. Hong, P.R. Berger, P.K. Bhattacharya, V. Das, J. Singh. *J. Cryst. Growth*, 81, 373 (1987).
- [5] S.T. Chou, K.Y. Cheng. *Appl. Phys. Lett.*, 63, 2815 (1993).
- [6] A.S. Brown, V.K. Mishra, J.A. Henige, M.J. Delaney. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 6, 678 (1987).
- [7] J.E. Oh, P.K. Bhattacharya, Y.C. Chen, O. Aina, M. Mattingly. *J. Electron. Mater.*, 19, 435 (1990).
- [8] M. McElhinney, C.R. Stanley. *Electron. Lett.*, 29, 1302 (1993).
- [9] R. Houdre, F. Gueissaz, M. Gailhanou, J.-D. Ganiere, A. Rudra, M. Piegems. *Proc. 6th Int. Conf. on MBE*, aug. 27-31, 1990 (San Diego, CA), paper PII-11.

Редактор В.В. Чалдышев

## Effect of growth temperature on electron mobility in lattice-matched to InP substrates InAlAs/InGaAs transistor structures grown by molecular beam epitaxy

V.M. Ustinov, A. Yu. Egorov, A. E. Zhukov, N. N. Faleev, A. F. Tsatsul'nikov, P. S. Kop'ev

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

Effect of growth temperature on electron mobility in InAlAs/InGaAs transistor structures, which are lattice-matched to InP substrates, have been studied. The structures were grown by molecular beam epitaxy without changing deposition conditions during growth. The optimal growth temperature relating to the maximal measured room-temperature mobility was found to be about 540 °C. It is noticeably higher than a conventional temperature 500 °C used for these materials. The increase in mobility with the deposition temperature is attributed to improvement of InAlAs quality where as In segregation during InGaAs growth has a minor effect on the mobility trend; the temperature of maximal mobility agrees well with that of intense In desorption from InGaAs. Therefore, the decrease in mobility with further increase in growth temperature probably occurs due to the reduction of In content in the channel. The results obtained indicate that the optimization of growth temperature makes it possible to achieve high mobilities (up to 9800 cm<sup>2</sup>/V · s at two-dimensional electron density of 2.9 × 10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>) without changing deposition conditions in structures designed for device application.