

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ УСЛОВИЯМИ РОСТА И КАЧЕСТВОМ ГЕТЕРОГРАНИЦЫ В СЛГС $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$, ВЫРАЩЕННЫХ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИЕЙ

С. Д. Быстров, Ле Туан, С. В. Новиков, И. Г. Савельев

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 9 августа 1993 г. Принята к печати 30 августа 1993 г.)

Проведены исследования изменения состояния гетерограницы в СЛГС $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ с 2МЭГ, выращенных методом ЖФЭ при различных температурах эпитаксии T_{ep} слоев твердых растворов $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$. Показано, что даже незначительное отклонение от оптимальной температуры эпитаксии T_{ep}^* приводит к снижению подвижности носителей 2МЭГ, связанному с ухудшением качества гетерограницы, вероятно, за счет увеличения концентрации заряженных дефектов и шероховатостей.

Квантовые гетероструктуры с двумерным электронным газом (2МЭГ) на основе слоев твердых растворов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ нашли широкое применение при создании современных приборов СВЧ техники и оптоэлектроники. Известно, что изменение технологических условий роста многокомпонентных твердых растворов в методе жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), в частности, изменение температуры начала эпитаксии приводит к сдвигу стехиометрии и изменению состава выращиваемых слоев [1]. Это приводит к рассогласованию постоянных решетчатого твердого раствора и нижележащего бинарного полупроводникового материала, что в свою очередь является источником дислокации и других структурных дефектов. Влияние рассогласования постоянных решетки на свойства наращиваемых слоев интенсивно исследовалось ранее в применении к твердым растворам [2-5]. В твердом растворе с неограниченной растворимостью компонентов малые изменения его состава существенно не изменяют электрофизических свойств объемных слоев полупроводника, но могут оказать значительное влияние на состояние гетерограницы. В связи с этим актуально исследование методик, позволяющих изучать параметры характеризующих качество гетерограницы. Результаты предыдущих работ [6, 7] показали, что подвижность носителей в двумерном электронном газе, расположенном вблизи гетерограницы $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$, при низких температурах во многом определяется свойствами гетерограницы, а именно концентрацией заряженных дефектов и шероховатостью — амплитудой δ и периодом Λ мелкомасштабных пространственных флуктуаций на гетерогранице.

Это и побудило нас применить анализ низкотемпературной подвижности 2МЭГ в качестве простой методики, позволяющей качественно судить о состоянии гетерограницы.

Целью нашей работы было исследовать влияние слабого (не более 2%) изменения начальной температуры эпитаксии на качество гетерограницы в селективно легированных гетероструктурах (СЛГС) $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$, выращенных методом ЖФЭ.

Исследуемые структуры получались на полуизолирующих подложках InP ориентации (100) по стандартной методике ЖФЭ с принудительным охлаждением раствора-расплава. Выращивались последовательно буферный слой InP, легированный Sm [$p < 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$], слой n -InP [$n \sim (1 \div 2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$], специально не легированный в качестве источника электронов для 2МЭГ и слой узкозонного твердого раствора $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ p -типа, легированный Sm [$p < (1 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$]. Первые два слоя были выращены в стандартных технологических условиях, выбранных согласно результатам работы [8]. Слой твердого раствора выращивался из раствора-расплава в индии с составом в жидкой фазе $x'_{\text{Ga}} = 0.0275$, $x'_{\text{As}} = 0.062$ ат. долей. Редкоземельный элемент Sm вводился в раствор-расплавы в концентрации $x'_{\text{Sm}} = 5 \cdot 10^{-5}$ ат. долей для снижения уровня остаточных примесей [9]. Рост буферного слоя всегда начинался при 648 °С. Интервал охлаждения при росте нелегированного слоя InP (источника электронов) поддерживался равным 1 °С во всех проведенных опытах. Охлаждение раствора-расплава In—Ga—As проводилось для всех образцов серии в интервале 2.5 градуса и со скоростью 0.5 град/мин, что обеспечило толщины порядка 2 мкм для эпитаксиального слоя $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$. Технологические режимы выращивания образцов серии отличались друг от друга только за счет варьирования начальных температур роста второго (InP) и третьего ($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$) слоев. Начальная температура выращивания слоя $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$: Sm T_{ep} изменялась в диапазоне 631—642 °С. Рост гомоэпитаксиального слоя InP начинался с температуры ($T_{ep} + 1$ °С).

Из выращенных структур изготавливались образцы для гальваномангнитных измерений в форме двойного холловского креста. Омические контакты создавались вжиганием капель In в вакууме при температуре 400 °С. Измерения проводились потенциометрическим методом при температурах 4.2 К в магнитных полях до 10 кГс, затем был проведен анализ зависимости подвижности μ двумерного электронного газа от условий роста в исследуемых образцах. Концентрация двумерных электронов в исследуемых образцах серии лежит в диапазоне $n = (1.0 \div 2.5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, значения подвижности в диапазоне $(1.0 \div 7.0) \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Как показано в работе [6], подвижность 2МЭГ при 4.2 К определяется в основном рассеянием носителей на дефектах и неоднородностях образца. На рис. 1 представлена зависимость подвижности μ 2МЭГ для исследуемых образцов от T_{ep} — начальной температуры роста слоя $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$. Точки соответствуют экспериментальным значениям подвижности в образцах, пунктирная линия — усредненная зависимость для всей серии образцов. При $T_{ep}^* = 634$ °С наблюдается максимум подвижности 2МЭГ.

Попробуем объяснить такой характер зависимости μ от T_{ep} . Подвижность 2МЭГ определяется как параметрами эпитаксиальных слоев, образующих гетероструктуру, так и качеством гетерограницы. Вследствие постоянного интервала охлаждения (1 °С) и малого диапазона изменения температуры роста (632—643 °С) на основе данных [10] можно считать, что степень легирования и толщина слоя InP (источника электронов во всех образцах) примерно одинаковы. Различие начальных температур эпитаксии слоя $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ может, по всей вероятности, привести к варьированию x в образцах вокруг значения $x = 0.47$, соответствующего изопериодическому с InP составу [8, 11]. Однако, сопоставив диапазон изменения $T_{ep} = (631—642$ °С) с результатами работы [5], где был исследован рост слоя твердого раствора $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ в интервале 500—800 °С, можно сделать вывод, что вариации состава твердого раствора x , вызванные изменением T_{ep} , в нашем случае не влияют существенно на величину разрыва зон на гетерогранице и, следовательно, на энергетическую структуру квантовой ямы, т. е. различия в подвижности 2МЭГ для разных

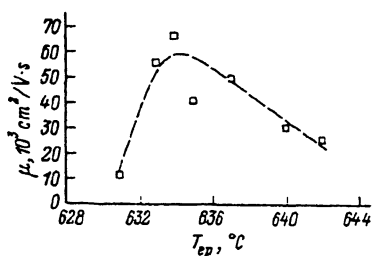


Рис. 1. Зависимость подвижности μ двумерных электронов от начальной температуры эпитаксии T_{ep} слоя твердого раствора в СЛГС $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$.

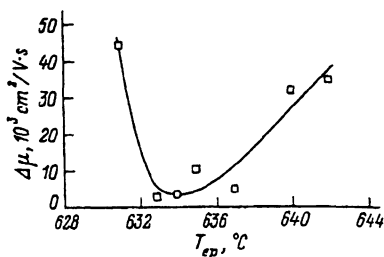


Рис. 2. Изменение величины подвижности 2МЭГ в режиме замороженной фотопроводимости по отношению к ее значению в исходном состоянии в зависимости от температуры эпитаксии T_{ep} .

образцов могут быть вызваны, по-видимому, только различным качеством гетерограницы.

Несмотря на то что изменение состава x при изменении T_{ep} крайне мало, тем не менее оно может нарушить согласование постоянных решетки между слоями $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ и InP и привести к увеличению концентрации заряженных дефектов и шероховатостей на гетерогранице. Известно [6], что такие дефекты способны сильно уменьшать величину подвижности 2МЭГ при гелиевых температурах. По нашему мнению, максимум на зависимости подвижности от T_{ep} в данном случае вызван тем, что в образцах, выращенных с начальной температурой эпитаксиального роста слоя $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ $T_{ep}^* = 634^\circ\text{C}$, постоянная решетки слоя твердого раствора наилучшим образом совпадает с постоянной решетки InP . В образцах, выращенных при других начальных температурах эпитаксии $T_{ep} \neq T_{ep}^*$, меньшая величина подвижности вызвана различной степенью рассогласования постоянных решетки. Таким образом, поведение зависимости $\mu(T_{ep})$ позволяет предполагать, что даже при малом отклонении T_{ep} от оптимального значения T_{ep}^* качество гетерограницы ухудшается, что может проявляться в увеличении как концентрации заряженных дефектов, так и шероховатости на гетерогранице.

Дополнительно проводились исследования изменения подвижности носителей 2МЭГ в условиях замороженной фотопроводимости при засветке образцов GaAs -фотодиодом. Причиной замороженной фотопроводимости в исследуемых образцах является тот факт, что рожденные светом электроны падают в квантовую яму вблизи гетерограницы, а дырки захватываются остаточными акцепторами в слое $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$, а также заряженными состояниями на поверхности и у гетерограницы [12]. Нейтрализация дефектов, расположенных вблизи области локализации 2МЭГ, приводит к увеличению его подвижности в режиме замороженной фотопроводимости. Отсюда ясно, что если изменение T_{ep} приводит к изменению концентрации заряженных дефектов в переходном слое на гетерогранице, то освещение светом должно в разной степени увеличивать μ в образцах, выращенных при различных T_{ep} . Этого не должно происходить, если изменение T_{ep} приводит только к изменению параметров шероховатостей гетерограницы. На рис. 2 по оси ординат отложено увеличение подвижности $\Delta\mu$ при 4.2 К в результате засветки, по оси абсцисс — T_{ep} , начальная температура эпитаксии слоя $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$. Точки соответствуют экспериментальным значениям $\Delta\mu$ в каждом из образцов, сплошная линия — усредненная зависимость возрастания подвижности 2МЭГ от температуры эпитаксии для исследуемых образцов. Из рис. 2 видно, что в образцах, выращенных при $T_{ep} = 634\text{--}637^\circ\text{C}$, не происходит сильного возрастания

подвижности 2МЭГ в результате засветки. В образцах, выращенных при более сильном отклонении от оптимальной температуры роста T_{ep}^* , подвижность 2МЭГ при переходе в режим замороженной фотопроводимости сильно возрастает (в 1.5—2.5 раза). Такое сильное увеличение подвижности двумерных носителей вследствие засветки в образцах, выращенных при $T_{ep} \neq T_{ep}^*$, по-видимому, связано с нейтрализацией заряженных дефектов на гетерогранице неравновесными дырками, генерируемыми светом. Это свидетельствует о том, что именно рассеяние на ионизованных центрах на гетерогранице оказывает наиболее существенное влияние на ухудшение подвижности 2МЭГ при отклонении от оптимальной температуры эпитаксии.

Таким образом, в данной работе был оптимизирован технологический режим для получения наилучшего согласования постоянных решетки эпитаксиальных слоев InP и твердого раствора $In_{1-x}Ga_xAs$. Выявлено, что даже незначительное отклонение от оптимального значения T_{ep}^* при данном растворе-расплаве может привести к заметному снижению значения подвижности 2МЭГ в СЛГС, связанному с ухудшением качества гетерограницы, в первую очередь, за счет увеличения концентрации заряженных дефектов на гетерогранице.

Авторы выражают благодарность Т. А. Полянской за постоянный интерес и полезные обсуждения, а также О. Н. Нашекиной и И. Л. Бондарчук за техническую помощь.

Данная работа проведена при частичной финансовой поддержке Американского физического общества из средств Фонда Сороса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. Б. Уфимцев, Р. Х. Акчурин. Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии, 224. М.: Металлургия (1983).
- [2] Y. Takeda, A. Sasaki, Y. Imamura, T. Tagaki. J. Electrochem. Soc.: Sol. St. Sci. a. Techn., 125, 130 (1978).
- [3] Е. В. Соловьева, М. Г. Мильвидский, А. И. Белогорохов, Г. И. Виноградова, Д. Т. Гогаладзе, Л. М. Долгинов, Н. В. Малькова, В. М. Новикова, А. Н. Осипова. ФТП, 25, 965 (1991).
- [4] M. Kubo, Y. Sasai, Y. Yoshioka, M. Ogura. J. Cryst. Growth., 82, 584 (1987).
- [5] K. Nakajima, T. Tanahashi, K. Akita, T. Yamaoka. J. Appl. Phys. 50, 4975 (1979).
- [6] А. М. Крещук, С. В. Новиков, И. Г. Савельев. ФТП, 26, 1375 (1992).
- [7] С. Д. Быстров, А. М. Крещук, С. В. Новиков, И. Г. Савельев. ФТП, 27, 645 (1993).
- [8] В. В. Воробьева, М. В. Егорова, А. М. Крещук, С. В. Новиков, И. Г. Савельев, И. И. Сайдашев. Письма ЖТФ, 15, 73 (1989).
- [9] В. В. Воробьева, М. В. Егорова, А. М. Крещук, С. В. Новиков, И. Г. Савельев, И. И. Сайдашев. ФТП, 23, 1699 (1989).
- [10] А. И. Казаков, В. А. Мокрицкий, В. Н. Романенко, Л. Хитова. Расчет фазовых равновесий в многокомпонентных системах, 136. М.: Металлургия (1987).
- [11] Л. В. Голубев, А. М. Крещук, С. В. Новиков, Т. А. Полянская, И. Г. Савельев. ФТП, 22, 1948 (1988).
- [12] Н. А. Берг, В. В. Воробьева, М. В. Воронцова, А. М. Крещук, С. В. Новиков, К. Ю. Погребницкий, И. Г. Савельев, Д. Ж. Сайфидинов, И. П. Сошников, А. Я. Шик. ФТП, 24, 653 (1990).

Редактор В. В. Чалдышев