

06.2;06.3;07;12

Фотолюминесцентные свойства эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных в условиях сверхбыстрого охлаждения раствора-расплава

© А.В. Абрамов, А.Г. Дерягин, Н.Г. Дерягин,
С.И. Кохановский, В.И. Кучинский, Э.У. Рафаилов,
Г.С. Соколовский, Д.Н. Третьяков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 11 октября 1996 г.

В работе приведены результаты исследований фотолюминесцентных свойств эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии при кристаллизации в неравновесных условиях, для создания которых использовались сверхвысокие скорости охлаждения раствора-расплава ($V \sim 10^2 - 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$). Полученные фотолюминесцентные характеристики свидетельствуют о высоком качестве эпитаксиальных слоев. Кроме того, обнаружено, что под воздействием на образцы с $x_{\text{буф}} = 0.5 - 0.55$ лазерного излучения с плотностью мощности $\sim 1 \text{ кВт}/\text{см}^2$ при температуре 77 К в спектральном составе излучения происходят необратимые изменения, связанные с образованием комплекса вакансии мышьяка (V_{As}) — донорная примесь.

Твердые растворы $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ широко используются для изготовления микро- и оптоэлектронных приборов. Методом жидкофазной эпитаксии $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$ гетероструктуры обычно выращиваются в условиях, не сильно отличающихся от равновесных. В последнее время получил распространение метод жидкофазной эпитаксии, где при сверхбыстром охлаждении раствора-расплава обеспечиваются условия кристаллизации, сильно отличающиеся от равновесных [1]. В работе [2] было показано, что подобные условия кристаллизации приводят к изменению таких параметров слоев, как толщина, распределение состава по толщине и концентрация носителей. В настоящей работе представлены результаты исследования фотолюминесцентных свойств эпитаксиальных слоев твердых растворов AlGaAs , выращенных при кристаллизации в

неравновесных условиях, для создания которых использовались сверхвысокие скорости охлаждения раствора-расплава $\sim 10^2-10^3$ °C/c [2].

Исследование фотолюминесцентных характеристик проводилось при накачке образцов излучением аргонового лазера ЛГ-106 ($\lambda_{\text{нак}} \cong 0.5$ мкм) при температурах 77 и 2 К. Плотность возбуждения варьировалась в диапазоне 10–1000 Вт/см². Исследуемые образцы представляли собой многослойную структуру, состоящую из подложки *n*-GaAs(100), выращенного на ней буферного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x_{\text{буф}} = 0.05-0.65$) постоянного состава и выращенного на нем в условиях сверхбыстрого изменения температуры жидкой фазы слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с переменным распределением состава по толщине. Следует отметить, что вне зависимости от содержания алюминия в буферном слое распределение AlAs в слое с переменным составом имеет характерный минимум [2].

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесцентных образцов, различающихся содержанием AlAs в буферном слое. На вставке к рисунку приведено типичное распределение AlAs по толщине (*d*) исследуемых структур. Исследуемые образцы можно разделить на три группы: 1) образцы с содержанием AlAs $x \leq 0.45$ в буферном слое, у которых значение "x" в области минимума соответствует прямой структуре запрещенной зоны твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; 2) образцы с содержанием AlAs в буферном слое $0.5 \leq x \leq 0.55$, у которых значение "x" в области минимума находится вблизи точки перехода от прямой к непрямой структуре запрещенной зоны, и 3) образцы с большим содержанием AlAs ($x \sim 0.60-0.65$) в буферном слое, у которых содержание AlAs в области минимума соответствует непрямой структуре запрещенной зоны.

Приведенный на рис. 1 спектр фотолюминесцентного образца с содержанием AlAs в буферном слое $x \cong 0.26$ является типичным для всех образцов из первой группы. Как видно из рисунка, спектр содержит два максимума. Коротковолновый пик относится к излучению из области образца с минимальным содержанием AlAs, а длинноволновый спектральный максимум обусловлен излучением из области подложки. Значение спектрального положения коротковолнового пика дает возможность определить состав твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, соответствующий этому излучению. Нами использовалось следующее соотношение, связывающее энергию излучения фотолюминесценции с

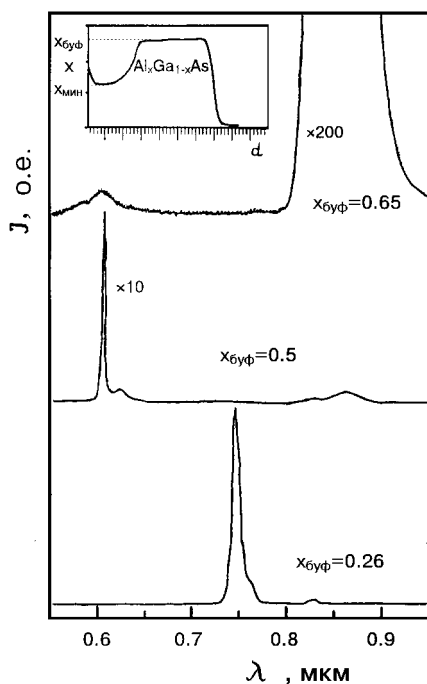


Рис. 1. Спектры фотолуминесценции эпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с различным содержанием "x" в буферном слое, измеренные при температуре $T = 77\text{ K}$. На вставке показано типичное распределение AlAs по толщине структуры.

содержанием AlAs в твердом растворе [3]:

$$E_{\text{фл}}(77\text{ K}) = 1.508 + 1.443x, \quad (1)$$

где $E_{\text{фл}}$ — энергия фотонов в максимуме, x — состав твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Рассчитанное по формуле (1) содержание AlAs хорошо согласуется со значением x , определенным методом вторично-ионной масс-спектрометрии. Например, для структуры с $x_{\text{буф}} = 0.26$, спектр фотолуминесценции которой приведен на рис. 1, рассчитанное по формуле (1) содержание AlAs составляет 12.6 мол.%, а определенное методом ВИМС — 11.8 мол.%. Наблюдаемые в эксперименте значения

полуширины коротковолнового максимума фотолюминесценции $\Delta h\nu$ составляли 12–50 мэВ. Следует отметить, что минимальные значения $\Delta h\nu = 12$ мэВ наблюдались при исследовании образцов, имеющих довольно протяженную (~ 0.3 мкм) область практически постоянного состава вблизи минимума. Такие значения $\Delta h\nu$ свидетельствуют о высоком качестве эпитаксиальных слоев, выращенных в условиях сверхбыстрого охлаждения раствора-расплава.

В спектрах фотолюминесценции образцов третьего типа характерно присутствие коротковолновой полосы малой интенсивности. Наличие этой полосы обусловлено рекомбинацией носителей в непрямозонном $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. В спектрах наблюдался вклад как прямых излучательных переходов в непрямозонном материале из Γ минимума зоны проводимости, так и не прямых излучательных переходов из X минимума зоны проводимости. Так, для образца с $x_{\text{буф}} = 0.65$ это пики с $\lambda_{\text{макс}} = 0.584$ мкм и $\lambda_{\text{макс}} = 0.607$ мкм соответственно (рис. 1).

Наиболее интересные эффекты в спектрах фотолюминесценции наблюдались при исследовании образцов второй группы с таким значением x в области минимума, при котором зависимости ширины прямой и не прямой запрещенных зон от состава ($E_g^{\Gamma}(x)$ и $E_g^X(x)$ соответственно) пересекаются. Типичный спектр фотолюминесценции образца такого типа с $x_{\text{буф}} = 0.5$, зарегистрированный при плотности возбуждения ~ 50 Вт/см², приведен на рис. 1. Более детально спектр фотолюминесценции этого образца показан на рис. 2. Как видно из рис. 2, спектр состоит из группы интенсивных пиков, расположенных в области вблизи $\lambda \sim 0.61$ мкм. Подобная структура спектра ранее уже наблюдалась в работе [4] для слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений, и была интерпретирована как фотолюминесценция связанного экситона (на рис. 2, б $\lambda_{\text{св.экс.}} = 0.597$ мкм) и нескольких фононных реплик. Такие спектры характерны для высококачественных слоев.

Интересной особенностью исследуемых образцов из второй группы являлось необратимое изменение их фотолюминесцентных характеристик при увеличении плотности накачки до 1 кВт/см² при 77 К. Спектр фотолюминесценции образца, подвергнутого такому "лазерному отжигу", также приведен на рис. 2. Модификация спектра заключалась в резком уменьшении (примерно в 20 раз) интенсивности экситонной линии и фононных реплик в области $\lambda \sim 0.61$ мкм и появлении широкой полосы ($\Delta h\nu \sim 200$ мэВ) с $\lambda_{\text{макс}} \sim 0.69$ мкм. Однако при уменьшении

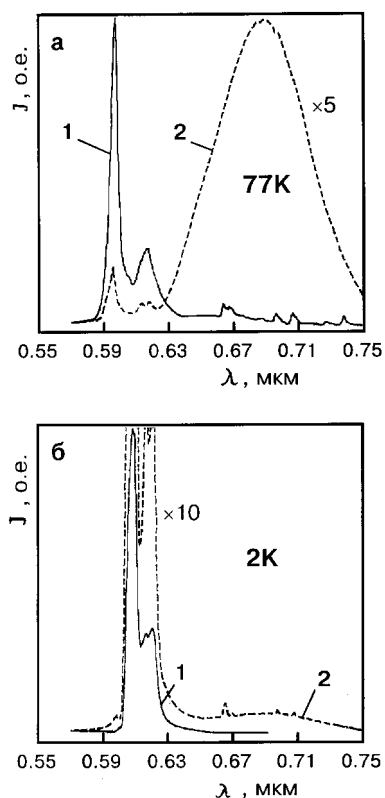


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции образца с $x_{буф} = 0.5$, зарегистрированные при $T = 77\text{ K}$ и $T = 2\text{ K}$: 1 — исходные спектры, 2 — модифицированные спектры.

температуры образца до 2 K в спектрах фотолюминесценции вновь доминировала экситонная линия (рис. 2, б). В то же время "лазерный отжиг" при тех же плотностях мощности накачки и комнатной температуре образцов не приводил к сколько-нибудь заметным изменениям их фотолюминесцентных характеристик. Возможные механизмы такого поведения при температуре 77 K рассматривались ранее в работе [5] и связывались нами с оптически индуцированным отжигом дефектов, а

также с рекомбинационно-генерационным процессом диффузии примеси с образованием комплекса вакансии мышьяка (V_{As}) — донорная примесь.

Таким образом, исследование фотолюминесцентных характеристик эпитаксиальных слоев, полученных в условиях сверхбыстрого охлаждения раствора-расплава, свидетельствует об их высоком качестве.

Кроме того, обнаружено, что под воздействием на образцы с $x_{буф} = 0.5-0.55$, т. е. с $x_{мин}$ в области минимума вблизи точки перехода от прямой к непрямой структуре запрещенной зоны лазерного излучения с плотностью мощности ~ 1 кВт/см² при температуре 77 К в спектральном составе излучения происходят необратимые изменения, связанные с образованием комплекса вакансии мышьяка (V_{As}) — донорная примесь.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, код проекта 96-02-17864а.

Список литературы

- [1] Abramov A.V., Deryagin N.G., Tretyakov D.N. // *Semicond. Sci. Technol.* 1996. V. 11. N 4. P. 607–619.
- [2] Абрамов А.В., Бер Б.Я., Дерягин Н.Г., Меркулов А.В., Третьяков Д.Н. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 3. С. 35–38.
- [3] Chang K.H., Lee C.P., Wu J.S., Liu D.G., Wang M.H., Chen L.J., Marais M.A. // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 70. P. 4877–4882.
- [4] Kuech T.F., Wolford D.J., Potemski R., Bradley J.A., Kelleher K.H., Yan D., Farrell J.P., Lesser P.M.S., Pollak F.H. // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V. 51. P. 505–507.
- [5] Abramov A.V., Deryagin A.G., Deryagin N.G., Kuchinskii V.I., Sobolev M.N., Papensev M.I. // *Materials Science Forum.* 1995. V. 196–201. P. 1437–1442.