

06.2; 12

© 1990

ВЫСОКОЧИСТЫЙ  $\rho$ - $GaAs$ , ВЫРАЩЕННЫЙ  
ИЗ РАСТВОРА  $GaAs$  В  $Bi$ ,  
ЛЕГИРОВАННОГО ИТТЕРБИЕМ

Н.С. Рудая, Ю.Б. Болховитянов,  
К.С. Журавлев, О.А. Шегай,  
Н.А. Якушева

За последние несколько лет следует отметить возросшую активность исследователей в получении чистого эпитаксиального  $GaAs$  выращиванием этого материала либо из раствора-расплава на основе висмута [1-3], либо добавлением в галлиевый раствор редкоземельных элементов (РЗЭ) [4, 5]. В первом случае улучшение электрофизических свойств слоев  $GaAs$  связывается с уменьшением в жидкой фазе основных фоновых примесей  $Si$  и  $C$ , особенно при низких температурах роста ( $\sim 700$  °C), при которых достигнуты высокие для метода ЖФЭ результаты [2]. Добавление же РЗЭ в галлиевый раствор приводит к связыванию в жидкой фазе примесей VI группы таблицы Менделеева [4, 5], являющихся донорами в  $GaAs$  при малых временах отжига жидкой фазы на основе  $Ga$ .

Основываясь на том, что одной из главных остаточных донорных примесей в чистом арсениде галлия, выращиваемом из висмутового раствора, является сера [2], мы предположили возможность ее связывания в растворе добавлением к нему иттербия.

Были сохранены основные режимы выращивания чистых пленок  $GaAs$  из висмутового раствора-расплава [2]:  $T_p = 700$  °C, время предварительного отжига - 4 ч. Были проведены измерения холловских концентрации и подвижности носителей в пленках, низкотемпературные (2.2 К) фотолюминесцентные (ФЛ) исследования и фотоэлектрическая лазерная магнитоспектроскопия мелких доноров в пленках  $GaAs$ .

Основные электрофизические параметры полученных слоев приведены в таблице.

Из таблицы видно, что, действительно, при добавлении  $Yb$  в жидкую фазу наблюдается закономерный переход по свойствам от слоев  $GaAs$   $n$ -типа к слоям  $\rho$ -типа, причем этот переход осуществляется при общем низком уровне концентрации носителей ( $\sim 10^{14}$  см $^{-3}$ ). Как известно, измерения транспортных свойств чистых пленок, особенно  $\rho$ -типа проводимости, затруднены вследствие обеднения их носителями заряда, что приводит к заметному разбросу данных. Это и наблюдается в таблице. Однако, оптические исследования, например, низкотемпературная фотолюминесценция (ФЛ) на таком материале возможны.

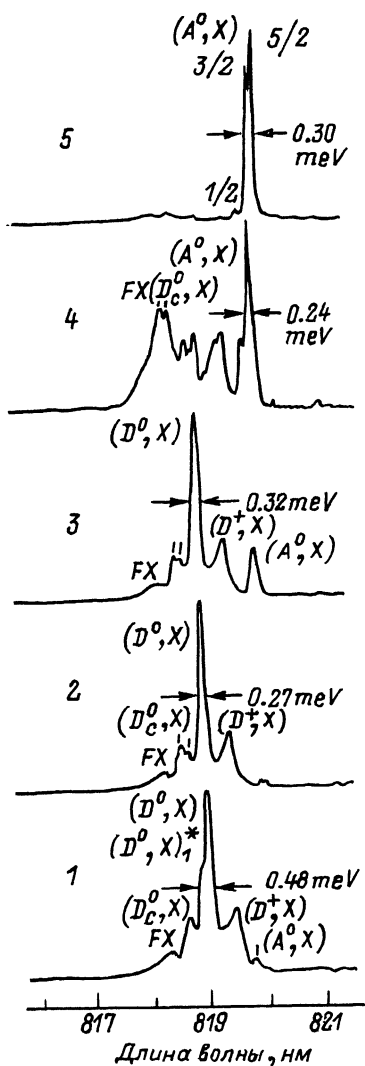


Рис. 1. Экситонная область спектров ФЛ при 2.2 К. Плотность возбуждения  $20 \text{ Вт/см}^2$ , разрешение 0.1 мэВ. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

На рис. 1 представлены спектры экситонной ФЛ образцов, выращенных из растворов с различным содержанием  $\text{Yb}$ . В спектре образца № 1, полученного без добавления  $\text{Yb}$  в жидкую фазу, доминируют линии экситонов, связанных на нейтральных донорах  $(\mathcal{D}^0, X)$ , ионизированных донорах  $(\mathcal{D}^+, X)$ , и экситонов, связанных на комплексах, включающих нейтральный донор —  $(\mathcal{D}_C^0, X)$  [6]. Изменения экситонной ФЛ при увеличении  $\text{Yb}$  в растворе отражают уменьшение концентрации мелких доноров в слоях  $\text{GaAs}$ . Действительно, в спектре образца № 2 наблюдается уменьшение ширины линии  $(\mathcal{D}^0, X)$  и отчетливо видна линия  $(\mathcal{D}^0, X)^*$ , соответствующая возбужденному состоянию  $(\mathcal{D}^0, X)$ , что свидетельствует об очистке образца. Дальнейшее уменьшение концентрации мелких доноров приводит к увеличению степени компенсации в образцах и, следовательно, к уширению линии

$(\mathcal{D}^0, X)$  и уменьшению ее относительной интенсивности по сравнению с линией  $(\mathcal{A}^0, X)$ . В образцах  $p$ -типа с доминирующей линией  $(\mathcal{A}^0, X)$  отношение интенсивностей  $(\mathcal{A}^0, X) / (\mathcal{D}^0, X)$  достигало 53. В спектре образца № 5 доминирует дублет, который идентифицирован как  $j = 5/2$  и  $j = 3/2$  состояния связанного на нейтральном акцепторе [7]. Наблюдение тонкой структуры линии  $(\mathcal{A}^0, X)$  свидетельствует о высокой чистоте полученных образцов. Насколько нам известно, этот спектр свидетельствует о получении методом ЖФЭ чистых образцов  $p$ - $\text{GaAs}$ , сравнимых с лучшими образцами, полученными методом МЛЭ [8].

№	$X_{Yb}^Z \cdot 10^5$	Тип проводимости	$n, p$ ( $\text{см}^{-3}$ ), 300 К	$\mu$ ( $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ), 300 К
1	0	$n$	$7 \cdot 10^{14}$	6100
2	2	$n$	$1.3 \cdot 10^{14}$	6600
3	4	$n$	$1.6 \cdot 10^{14}$	6200
4	6	$p$	$6 \cdot 10^{13}$	400
5	9	$p$	$6 \cdot 10^{14}$	420
6	18	$p$	$1.5 \cdot 10^{14}$	350
7	37	$p$	$3 \cdot 10^{14}$	400

В акцепторной области спектров ФЛ  $p$ -GaAs наблюдались линии, обусловленные переходами на акцепторные уровни  $Mg/Be$  и  $Zn$ . Появление других мелких акцепторов при добавлении  $Yb$  в  $Bi$ -раствор не обнаружено.

Известно, что лазерная магнито-спектроскопия субмиллиметрового (СММ) диапазона позволяет при концентрации доноров  $\lesssim 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в GaAs наблюдать спектры переходов примесей, создающих мелкие донорные уровни, и проводить по ним идентификацию химической природы этих примесей [2]. На рис. 2 представлены спектры основного перехода  $1s \rightarrow 2p_+$  для мелких доноров под действием СММ

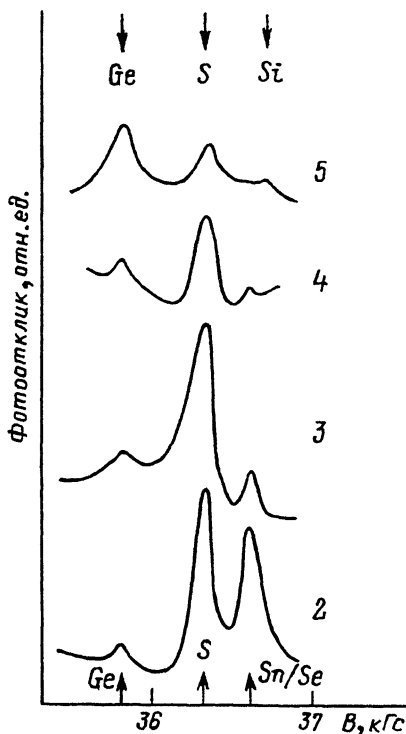


Рис. 2. Спектры фотовозбуждения  $1s \rightarrow 2p_+$  переходов доноров в GaAs при возбуждении излучением субмиллиметрового лазера с длиной волны  $\lambda = 118.8 \text{ мкм}$  (10.44 мэВ).

лазера при сканировании магнитного поля. Видно, что основными донорными примесями являются  $Ge$ ,  $S$ ,  $Sn/Se$ . С добавлением  $Yb$  в жидкую фазу наблюдается заметное уменьшение интенсивности пиков не только серы (что предполагалось), но и  $Sn/Se$ .

Таким образом, добавление  $Yb$  в раствор  $GaAs$  в  $Bi$  позволяет выращивать некомпенсированные слои  $GaAs$   $p$ -типа проводимости с рекордно низким для метода ЖФЭ остаточным фоном неконтролируемых акцепторов:  $\rho \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu_{300K} \sim 420 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , полуширина  $(A, X)$  перехода при 2.2 К - 0.24-0.3 мэВ, отношение  $(A, X)/(D^0, X)$  - до 53.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ганина Н.В., Уфимцев В.Б., Фистуль В.И. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. В. 10. С. 620-623.
- [2] Yakusheva N.A., Zhuravlev K.S., Chikichev S.I., Shegaj O.A. // Cryst. Res. Technol. 1989. V. 24. N 2. P. 235-246.
- [3] Бирюлин Ю.Ф., Воробьева В.В., Голубев В.Г. и др. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 12. С. 2201-2209.
- [4] Беспалов В.А., Елкин А.Г., Журкин Б.Г. и др. В сб. Краткие сообщения по физике. М.: ФИАН, 1987. № 9. С. 32-34.
- [5] Raczynska J., Fronc K., Langer J.M. et al. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 9. P. 761-763.
- [6] Heim U., Hiesinger P. // Phys. Stat. Sol. (B). 1974. V. 66. N 2. P. 461-476.
- [7] White A.M., Dean P.J., Day B. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1974. V. 7. P. 1400-1411.
- [8] Heiblum M., Mendez E.E., Osterling L. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. N 12. P. 6982-6988.

Институт физики полупроводников  
СО АН СССР, Новосибирск

Поступило в Редакцию  
17 ноября 1989 г.