

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $\text{InGaAsP}$ С НИЗКИМ УРОВНЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

Фомин И. А., Фетисова В. И., Анненко Н. М.,  
Науменко Н. В.

Исследованы эпитаксиальные слои  $\text{InGaAsP}$ , полученные методом жидкофазной эпитаксии на подложках  $\text{InP}$ . Показано, что в слоях могут присутствовать примеси, образующие глубокие уровни с энергиями термической активации  $\sim 0.65$  и  $\sim 0.2$  эВ, расположенные в верхней и нижней половинах запрещенной зоны соответственно. Наличие таких уровней приводит к появлению эффекта аномального увеличения времени релаксации фотовозбужденных носителей тока. Дополнительная очистка расплава путем его отжига с введением гадолиния существенно снижает концентрацию как глубоких центров, так и «фоновой» примеси.

*Введение.* Эпитаксиальные гетероструктуры на основе четырехкомпонентных твердых растворов  $\text{InGaAsP}$ , полученные методом жидкофазной эпитаксии, находят широкое применение при разработке различных полупроводниковых приборов [1, 2]. Особый интерес представляют слои с низким уровнем легирования, используемые в качестве основы для создания фотоприемников. Получение высококачественного материала ( $n \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) — весьма трудная технологическая задача, связанная с необходимостью устранения примесей, присутствующих в исходных материалах и входящих в расплав из материала контейнера. Для ее решения было предложено [3] введение редкоземельных элементов (РЗЭ) в металл-растворитель, позволяющее провести очистку последнего от донорных примесей и получить эпитаксиальные слои с низкой фоновой концентрацией.

Для полупроводниковых материалов, используемых для создания на их основе фотоприемных устройств, важнейшим параметром является время жизни носителей заряда  $\tau$  [4]. Наиболее интересные эффекты, проявляющиеся при фотовозбуждении носителей заряда, связаны с глубокими примесными уровнями. Поэтому основным направлением исследований четырехкомпонентных слоев  $n\text{-InGaAsP}$ , проведенных в рамках настоящей работы, было изучение релаксации фотоэдс при импульсном фотовозбуждении и установление взаимосвязи процессов захвата носителей с возможным присутствием глубоких примесных центров в полупроводнике.

### 1. Методика эксперимента

Эпитаксиальные гетероструктуры  $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.74}\text{P}_{0.26}/\text{InP}$  были получены методом жидкофазной эпитаксии при  $650^\circ\text{C}$  на подложках  $n$ -типа проводимости с использованием устройства «сдвигового» типа. Для получения «чистого» материала проводилась очистка расплава путем его отжига с РЗЭ гадолинием. Концентрация гадолиния в жидкой фазе изменялась от 0.003 до 0.01 %. Минимальное значение концентрации электронов в слоях  $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . При дальнейшем увеличении гадолиния в жидкой фазе (более чем 0.01 ат%) происходила, как правило, инверсия типа проводимости слоев.

Глубокие примесные центры исследовались методом релаксационной емкостной спектроскопии (DLTS) по методике, предложенной в [5], на установке, описанной в [6]. Для измерения использовались структуры с  $p$ - $n$ -переходом либо с барьером Шоттки. Барьеры Шоттки получали электролитическим осаждением

дением золота. На аналогичных образцах проводились также измерения релаксации фотоэдс при освещении поверхности слоев прямоугольными импульсами света с помощью арсенид-галлиевого лазера [7]. Измерения концентрации носителей заряда в слоях проводились обычным  $C-V$ -методом с помощью капиллярного ртутного контакта.

## 2. Результаты и их обсуждение

Предварительными исследованиями было установлено, что эпитаксиальные слои  $InGaAsP$ , полученные без намеренного легирования какой-либо примесью и использования специальных технологических приемов, имеют  $n$ -тип проводимости с концентрацией электронов в диапазоне  $(0.3-1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (так называемый фоновый уровень легирования). Введение гадолиния в расплав позволяет снизить уровень такого легирования в среднем более чем на порядок. Типичный вид кривых релаксации фотоэдс для двух таких образцов представлен на рис. 1. Кривые 1 и 2 соответствуют образцам с различным значением концентрации основных носителей заряда в слоях  $(1.2 \cdot 10^{15}$  и  $2.2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  соответственно). Значения эффективного времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau_{эф}$ , определенные по спаду фотоэдс на экспоненциальном участке кривых, равны  $2.1 \cdot 10^{-6}$  (1) и  $5.6 \cdot 10^{-6}$  с (2). Для подобных образцов

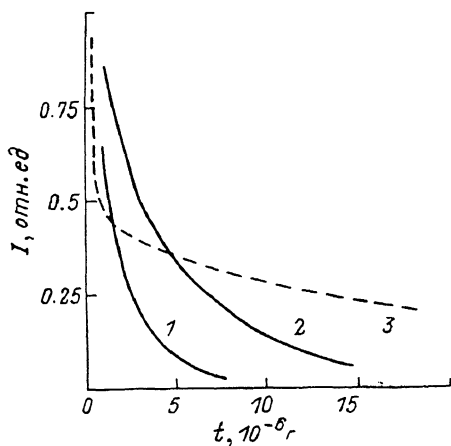


Рис. 1. Кривые релаксации фотоэдс для трех образцов с различным временем спада фото-сигнала.

эффективного времени жизни неосновных носителей заряда  $\tau_{эф}$ , определенные по спаду фотоэдс на экспоненциальном участке кривых, равны  $2.1 \cdot 10^{-6}$  (1) и  $5.6 \cdot 10^{-6}$  с (2). Для подобных образцов

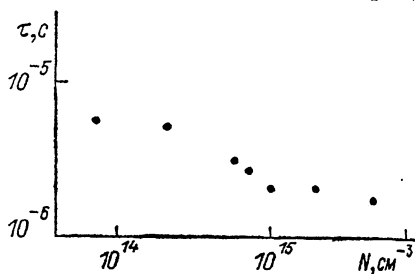


Рис. 2. Зависимость эффективного времени жизни от концентрации электронов в слоях  $InGaAsP$ .

с различной концентрацией носителей заряда в эпитаксиальных слоях  $InGaAsP$  исследована зависимость  $\tau_{эф}$  от  $n$ , представленная на рис. 2. Времена жизни во всем диапазоне достаточно велики, что говорит об отсутствии центров рекомбинации значительной концентрации в исследуемых слоях.

Для ряда образцов с достаточно низким уровнем легирования, полученных без введения гадолиния в расплав, на кривых релаксации фотоэдс отсутствовал ярко выраженный экспоненциальный участок (рис. 1, кривая 3). Как правило, в этом случае наблюдается аномальное увеличение времени спада фотосигнала, что может быть связано со сложными процессами рекомбинации фотовозбужденных носителей заряда. Кроме того, в этих образцах при одновременном межзонном возбуждении прямоугольными световыми импульсами и освещении немодулированным светом из области примесного поглощения наблюдается эффект гашения фотопроводимости, характерный для случая полупроводников с глубокими примесями [8] (рис. 3).

При исследовании глубоких уровней в слоях  $In_{0.88}Ga_{0.12}As_{0.74}P_{0.26}$  были обнаружены глубокие примесные уровни двух типов: уровень, расположенный в верхней половине запрещенной зоны с энергией термической активации  $\sim 0.65$  эВ, уровень, расположенный в нижней половине запрещенной зоны с энергией активации  $0.18-0.2$  эВ. Характерной особенностью первого центра является сильное влияние концентрации соответствующей примеси (неидентифицированной в рамках настоящей работы) на вид релаксационных кривых при измерениях времени жизни: с увеличением концентрации ( $N_T$ , может до-

стигать значений  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) существенно увеличивается постоянная времени спада фотосигнала. Это позволяет считать обнаруженный центр центром прилипания, основное отличие которого от обычного центра рекомбинации заключается в том, что у центра прилипания сечения захвата электронов и дырок значительно (на порядок и более) различаются между собой, поэтому переходы носителей из зоны проводимости в валентную зону через этот центр маловероятны. В этом случае время нахождения электрона на центре значительно превышает время жизни (т. е. время нахождения электрона в зоне проводимости). Именно этим и объясняется концентрационная зависимость

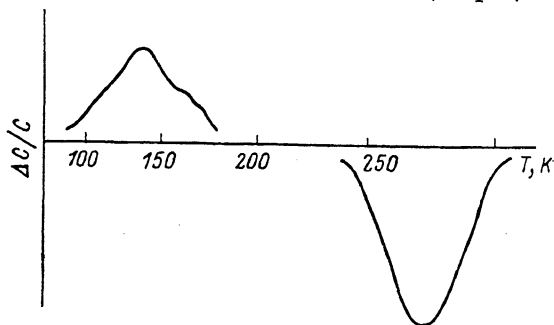


Рис. 3. Типичный вид релаксационного спектра одного из образцов InGaAsP.

времени спада фотосигнала. Такой эффект наблюдается, как правило, в том случае, если уровень образован двукратно ионизованным донором [8].

Второй из наблюдаемых центров, наиболее вероятно, связан с вакансиями легколетучих компонентов исследуемого твердого раствора. Это предположение основывается на результатах работы [9], авторы которой обнаружили уровень  $E_p + 0.22 \text{ эВ}$  в InP, полученном методом жидкофазной эпитаксии, и связали его присутствие с вакансиями фосфора, а также на обнаруженном слабом увеличении энергии термической ионизации центра с изменением состава исследуемых твердых растворов в сторону InP. Достаточно низкие значения концентрации соответствующих дефектов (менее  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  независимо от рассматриваемых способов получения) и величины сечений захвата носителей ( $\sim 4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ) обуславливают тот факт, что наличие этого центра не оказывает заметного влияния на основные электрофизические и рекомбинационные параметры исследуемых слоев.

#### Список литературы

- [1] Forrest S. R. // IEEE J. Quant. Electron. 1981. V. QE-17. N 2. P. 217—226.
- [2] Takahashi K., Murotani T., Ishii M. et al. // IEEE J. Quant. Electron. 1981. V. QE-17. N 2. P. 232—238.
- [3] Гореленок А. Т., Груздов В. Г., Кумар Ракеш и др. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 35—43.
- [4] Stockman F. // RCA Rev. 1975. V. 36. P. 499—507.
- [5] Long D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023—3032.
- [6] Барков В. Б., Лебедева Л. В., Фомин И. А. // ПТЭ. 1982. № 6. С. 178—181.
- [7] Фомин И. А., Анненко Н. М., Барков В. Б. и др. // Электрон. техн. Сер. 6. Материалы. 1979. № 1 (126). С. 103—109.
- [8] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977. 562 с.
- [9] Pelloie J. L., Gnillot G., Neuailhat A. et al. // J. Appl. Phys. 1986. V. 59. N 5. P. 1536—1543.

Получена 10.04.1989  
Принята к печати 30.08.1989