

## Геттерирование эпитаксиального арсенида индия редкоземельным элементом гольмием

© Е.В. Куницына, Я.А. Пархоменко, А.А. Пивоварова, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kunits@iropt9.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 20 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 15 февраля 2023 г.

Принята к публикации 20 февраля 2023 г.

Приведены результаты исследования гальваномагнитных свойств арсенида индия, выращенного методом жидкофазной эпитаксии. Показано, что получение эпитаксиальных слоев InAs при использовании редкоземельного элемента Ho позволяет снизить концентрацию электронов на 2 порядка до  $n = 2.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77 \text{ К}$  за счет геттерирования мелких фоновых примесей путем образования их соединений в растворе-расплаве. При увеличении содержания гольмия в жидкой фазе более 0.12 мол% концентрация носителей тока в материале начинает возрастать, при этом наблюдается снижение подвижности, что предположительно связано с влиянием донорных центров  $V_{As}$ -Ho. Данный способ геттерирования перспективен для получения материалов  $A^{III}B^V$  с низкой концентрацией носителей тока, востребованных в оптоэлектронной промышленности.

**Ключевые слова:** арсенид индия, редкоземельные элементы, коэффициент Холла, концентрация носителей тока, подвижность носителей тока.

DOI: 10.21883/FTP.2023.02.55327.4503

### 1. Введение

В настоящее время арсенид индия и узкозонные материалы на его основе широко применяются в оптоэлектронике для создания лазеров [1,2], светодиодов [3,4] и фотоприемников [5,6]. Данные приборы работают при комнатной температуре и неглубоком охлаждении в средней и дальней ИК областях, актуальных для фундаментальных и прикладных задач.

Эпитаксиальный InAs без легирования имеет электронный тип проводимости. Однако если в полупроводнике, выращенном методом Чохральского, при  $T = 77 \text{ К}$  концентрация электронов составляет  $n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и подвижность  $\mu \sim 5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , то в эпитаксиальных слоях InAs концентрация электронов почти на порядок выше, а подвижность в 2 и более раз ниже [7]. Это различие обусловлено тем, что в первом случае проводимость кристаллического InAs в основном определяется мелкими фоновыми примесями VI группы (S, Se, Te) с энергией активации  $E_1 = 0.002 \text{ эВ}$ . При получении InAs методом жидкофазной эпитаксии при температурах  $T = 550\text{--}650^\circ\text{С}$  чистота эпитаксиальных слоев определяется не только концентрацией примесных атомов, но и количеством собственных точечных дефектов и донорных центров типа  $V_{As}$ -примесь с энергией активации  $E_2 = 0.02\text{--}0.03 \text{ эВ}$  и  $E_3 = 0.09\text{--}0.1 \text{ эВ}$ .

Для получения чистых эпитаксиальных слоев InAs с низкой концентрацией носителей предложены различные методы. Один из них — использование свинца в качестве нейтрального растворителя [8], позволяющее в широких пределах изменять соотношение содержания In

и As в растворе-расплаве. При этом происходит снижение концентрации не только структурных дефектов, но и донорных примесей из-за связывания их в жидкой фазе в соединения PbS, PbSe и PbTe.

Известным методом очистки полупроводников  $A^{III}B^V$  является геттерирование в процессе синтеза с помощью редкоземельных элементов [9,10]. В последние годы данный метод успешно применяется и в технологии других соединений, в частности низкотемпературных термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута [11].

В качестве геттерирующей примеси для получения чистых эпитаксиальных слоев InAs могут использоваться иттербий Yb и гадолиний Gd, влияние которых на электрофизические свойства полупроводников  $A^{III}B^V$  достаточно хорошо изучено. Слабое легирование иттербием (0.003 мол%) позволяет снизить концентрацию основных носителей тока в эпитаксиальных слоях  $n$ -InAs на 1.5 порядка и получить чистый материал с концентрацией электронов  $n = 5.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77 \text{ К}$  и значением подвижности, близким к теоретическому пределу для данного полупроводника [12].

Легирование раствора-расплава гадолинием при выращивании эпитаксиальных слоев InGaAsSb на основе InAs дает возможность уменьшить концентрацию электронов в материале в 3–6 раз и увеличить подвижность [13]. При этом уменьшается концентрация как акцепторов, так и доноров за счет снижения фоновой концентрации примесей элементов VI группы, взаимодействующих с Gd с образованием тугоплавких соединений.

В данной работе приводятся первые результаты изучения электрофизических свойств эпитаксиальных слоев InAs, выращенных из легированных гольмием растворов-расплавов. Такие материалы могут найти применение для создания полупроводниковых приборов в средней ИК области спектра, в частности, фотоприемников, где одним из необходимых требований является низкая концентрация носителей в активной области.

## 2. Эксперимент

Эпитаксиальные слои  $n$ -InAs выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) при температуре  $T = 600^\circ\text{C}$  на легированных марганцем подложках  $p$ -InAs(100). Концентрация и подвижность носителей в материале подложки составляли:  $p = 1.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu \approx 91 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $T = 300 \text{ К}$  и  $n = 1.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu \approx 775 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $T = 77 \text{ К}$  соответственно. Толщина слоев была 5–25 мкм. Редкоземельный элемент Ho вводился в раствор-расплав в количестве до 0.2 мол%. Так как подложка  $p$ -InAs:Mn является высокоомной с проводимостью  $\sigma = 0.08 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  при  $T = 77 \text{ К}$ , ее влиянием на свойства эпитаксиальных слоев можно пренебречь. Из эпитаксиальных структур  $p$ -InAs/ $n$ -InAs вырезались прямоугольные образцы 8–10 мм длиной и 2–3 мм шириной. На поверхность эпитаксиального слоя вплавлялись 6 индиевых контактов. Измерялись коэффициент Холла  $R$ , электропроводность  $\sigma$ , продольное  $(\Delta\rho/\rho)_{\parallel}$  и поперечное  $(\Delta\rho/\rho)_{\perp}$  магнитосопротивление в умеренных магнитных полях с напряженностью  $H = 2\text{--}20 \text{ кЭ}$  в интервале температур 77–300 К. По данным измерений определялись концентрация и холловская подвижность носителей. Следует особо отметить, что при определении параметров InAs с помощью холловских измерений под концентрацией и подвижностью носителей следует понимать некую эффективную величину.

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В эпитаксиальных слоях  $n$ -InAs были изучены зависимости концентрации и подвижности носителей тока от содержания гольмия  $X_{\text{Ho}}$  в растворе-расплаве. Характеристики эпитаксиальных слоев InAs при  $T = 77 \text{ К}$  представлены в таблице.

Исходный нелегированный эпитаксиальный слой InAs, выращенный без добавления Ho в жидкой фазе, имеет концентрацию носителей  $n = 3.51 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и их подвижность  $\mu = 17129 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $T = 77 \text{ К}$  (см. таблицу, образец 1). При добавлении в раствор-расплав Ho гальваномагнитные свойства материала изменялись. На зависимостях концентрации (рис. 1) и подвижности носителей (рис. 2) от содержания Ho можно выделить три области (1, 2 и 3) и в свою очередь разделить

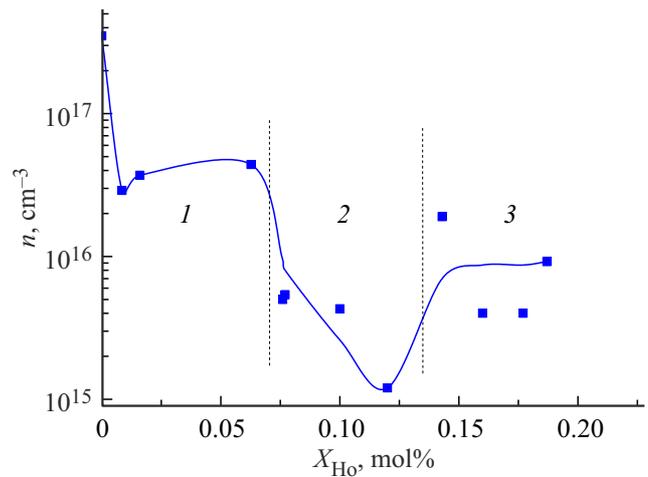


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей тока в эпитаксиальных слоях  $n$ -InAs от содержания гольмия  $X_{\text{Ho}}$  в жидкой фазе,  $T = 77 \text{ К}$ ,  $H = 10 \text{ кЭ}$ : 1 — 0.0085–0.0627, 2 — 0.076–0.121, 3 — 0.143–0.195 мол%.

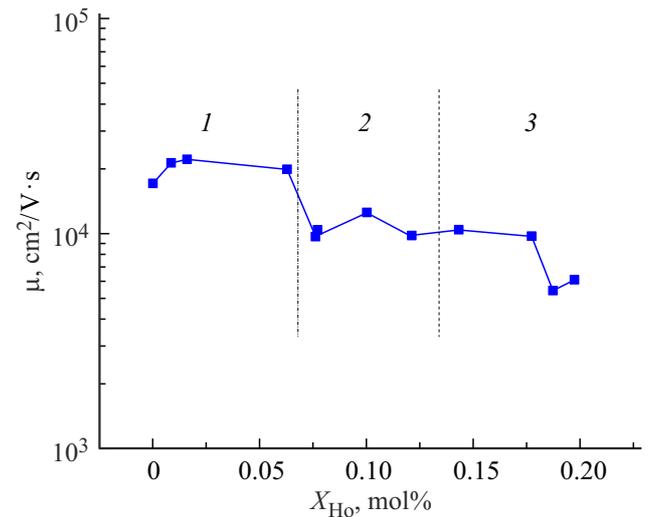


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей тока в эпитаксиальных слоях  $n$ -InAs от содержания гольмия  $X_{\text{Ho}}$  в жидкой фазе,  $T = 77 \text{ К}$ ,  $H = 10 \text{ кЭ}$ : 1 — 0.0085–0.0627, 2 — 0.076–0.121, 3 — 0.143–0.195 мол%.

образцы эпитаксиальных слоев InAs, параметры которых приведены в таблице, на три группы.

Для первой группы с содержанием Ho в жидкой фазе до  $X_{\text{Ho}} = 0.0085\text{--}0.0627 \text{ мол}\%$  (см. таблицу, образцы 2–4) концентрация электронов падает не более чем на порядок и их подвижность возрастает. Так, при добавлении Ho на уровне 0.016 мол% концентрация носителей тока в эпитаксиальном слое снизилась до  $n = 2.9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (см. таблицу, образец 2) при увеличении подвижности до  $21336 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $T = 77 \text{ К}$ . Образцы второй группы (см. таблицу, образцы 5–8) характеризуются еще более низкими значениями кон-

Характеристики эпитаксиальных слоев InAs при  $T = 77$  К

№ образца	Концентрация No в жидкой фазе, мол%	$\sigma$ , Ом <sup>-1</sup> · см <sup>-1</sup>	$R$ , см <sup>3</sup> · Кл	Концентрация носителей $n$ , см <sup>-3</sup>	Подвижность носителей $\mu$ , см <sup>2</sup> /(В·с)
1	0	960.69	17.83	$3.51 \cdot 10^{17}$	17129
2	0.0085	100.9	211.46	$2.9 \cdot 10^{16}$	21336
3	0.016	130.7	169.6	$3.7 \cdot 10^{16}$	22167
4	0.0627	140.3	142.1	$4.4 \cdot 10^{16}$	19937
5	0.076	7.93	1221	$5.0 \cdot 10^{15}$	9683
6	0.077	9.0	1157.7	$5.4 \cdot 10^{15}$	10419
7	0.1	8.72	1438.5	$4.3 \cdot 10^{15}$	12544
8	0.121	1.973	4978	$1.25 \cdot 10^{15}$	9822
9	0.143	32.3	322.9	$1.9 \cdot 10^{16}$	10430
10	0.177	6.6	1474.8	$4.2 \cdot 10^{15}$	9734
11	0.187	8	677.95	$9.2 \cdot 10^{15}$	5424
12	0.195	10.6	575	$1.0 \cdot 10^{16}$	6095

центрации электронов по сравнению со значениями в образцах первой группы. При росте  $X_{\text{Ho}}$  до 0.12 мол% концентрация достигает  $1.25 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, что почти на 2 порядка ниже по сравнению с концентрацией в исходном образце. При этом подвижность имеет более низкое значение по сравнению с подвижностью образцов первой группы — около 10 000 см<sup>2</sup>/(В·с). Для третьей группы образцов, когда  $X_{\text{Ho}}$  в жидкой фазе превышает 0.14 мол% (см. таблицу, образцы 9–12), концентрация электронов вновь возрастает, а их подвижность продолжает уменьшаться.

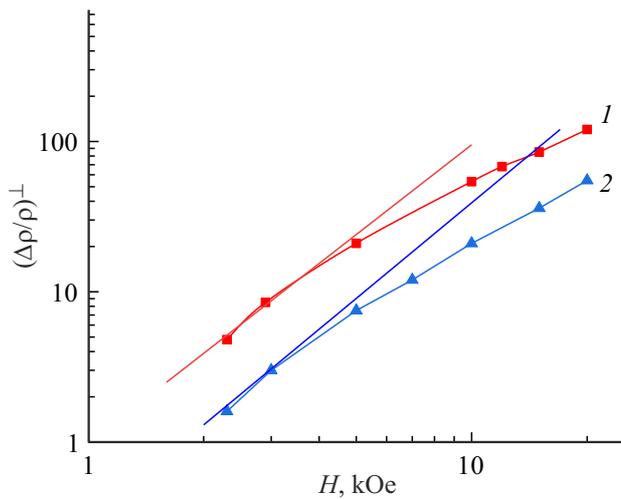
Известно, что снижение концентрации носителей в эпитаксиальных слоях InAs при введении редкоземельного элемента в раствор-расплав происходит за счет геттерирования мелких фоновых примесей путем образования их соединений в растворе-расплаве [12]. Мы полагаем, что данный механизм приводит к снижению концентрации электронов в экспериментальных образцах первой и второй групп (см. таблицу, образцы 5–8). Последующий рост концентрации электронов в образцах третьей группы (см. таблицу, образцы 9–12) предположительно связан с увеличением концентрации донорных центров  $V_{\text{As}}-\text{No}$  в твердой фазе при росте концентрации No в растворе-расплаве.

Для трех групп образцов был проведен анализ подвижности и магнитосопротивления — как поперечного  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$ , так и продольного  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$ . Поперечное магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  — изменение сопротивления в магнитном поле, направленном перпендикулярно линиям тока в образце, является суммой двух компонент:  $(\Delta\rho/\rho)_L$ , обусловленного подвижностью Лоренца, и  $(\Delta\rho/\rho)_{\text{inh}}$ , связанного с существованием различного рода неоднородностей. Физическое магнитосопротивление определяется как  $(\Delta\rho/\rho)_L = B^\perp(\mu_0 H/c)^2$ , где коэффициент поперечного магнитосопротивления  $B^\perp$  зависит от механизма рассеяния. Так, согласно теории невырожденных полупроводников, для рассеяния на колебаниях решетки  $B^\perp = 0.1$ , а на ионах примеси —  $B^\perp = 0.56$  [7].

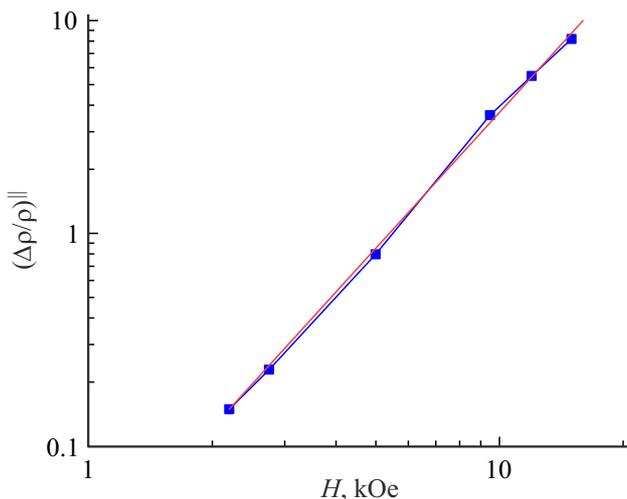
Как правило, в полупроводниковом материале присутствуют снижающие подвижность дополнительные центры рассеяния (скопления и неоднородности), которые проявляются наличием компоненты  $(\Delta\rho/\rho)_{\text{inh}}$  и дают вклад в  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$ .

Наши исследования показали, что во всех образцах первой группы наблюдается квадратичная зависимость  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от напряженности магнитного поля вплоть до  $H = 5-6$  кЭ для разных образцов. Отсюда следует, что данное положительное магнитосопротивление связано с эффектом Лоренца в слабых магнитных полях ( $\mu^2 H^2 \leq 1$ ), и истинную подвижность Лоренца можно оценить по концу квадратичной зависимости. Если  $(\mu_0 H/c) = 1$ , где  $c$  — скорость света,  $H$  — напряженность магнитного поля, при которой заканчивается квадратичная зависимость  $(\Delta\rho/\rho)^\perp \sim H^2$ , тогда  $\mu_0 \sim 10^8/H$ . Согласно расчету, значение лоренцевской подвижности в первой группе образцов составляет  $\mu_0 \sim 20000$  см<sup>2</sup>/(В·с), что близко к измеренным нами величинам. Следовательно, компонента  $(\Delta\rho/\rho)_{\text{inh}}$  практически равна нулю, что говорит об отсутствии неоднородностей. Величина коэффициента поперечного магнитосопротивления, рассчитанная по зависимости  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от  $H$ , составляла  $B^\perp = 0.16-0.22$  при  $H = 2.2$  кЭ и  $B^\perp = 0.14-0.19$  при  $H = 5$  кЭ, что свидетельствует о смешанном механизме рассеяния с преобладающим вкладом рассеяния на колебаниях решетки, а не на ионах примеси. С ростом  $H$  до 20 кЭ величина коэффициента постепенно падала до значений  $B^\perp = 0.04-0.07$ . Кроме того, было обнаружено, что в образцах первой группы отсутствует продольное магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$ , что также подтверждает однородность полученных полупроводниковых материалов.

Образцы второй группы характеризуются более низкой подвижностью, чем первой (см. рис. 2), что, вероятно, связано с проявлением дополнительных центров рассеяния, донорных центров  $V_{\text{As}}-\text{No}$ . На рис. 3 представлена зависимость  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  от напряженности



**Рис. 3.** Зависимость поперечного  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  магнитосопротивления от напряженности магнитного поля  $H$  при  $T = 77$  К для образцов  $n$ -InAs, выращенных при содержании гольмия в жидкой фазе  $X_{\text{Ho}} = 0.076$  (2) и 0.12 мол% (1).



**Рис. 4.** Зависимость продольного  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$  магнитосопротивления от напряженности магнитного поля  $H$  при  $T = 77$  К для образцов  $n$ -InAs, выращенных при содержании гольмия в жидкой фазе  $X_{\text{Ho}} = 0.076$ –0.12 мол%.

магнитного поля  $H$  для этих материалов. Как и для образцов первой группы, магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^\perp$  квадратично зависит от напряженности магнитного поля почти до  $H = 5$  кЭ. Величина коэффициента поперечного магнитосопротивления составляла  $B^\perp = 0.16$ –0.25 в диапазоне  $2.2 \leq H \leq 5$  кЭ, что практически не отличается от значений для первой группы образцов. Однако для данных эпитаксиальных слоев InAs проявляется основной „индикатор“ наличия неоднородностей — продольное магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$  (рис. 4), которое имеет следующую зависимость:  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel = B^\parallel(\mu H/c)^2$ , где значение коэффициента продольного магнитосопротивления

равно  $B^\parallel$ , также как и  $B^\perp$ , определяется преобладающим механизмом рассеяния. Для материала с небольшой концентрацией примесей, не искажающих путей протекания тока, обычно наблюдается незначительное  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$  — отрицательное при низкой температуре  $T = 77$  К и положительное при  $T = 300$  К. Однако наши измерения показали, что  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$  для второй группы образцов имеет положительные значения при двух указанных температурах, что говорит о наличии скопления примесей и искажении путей протекания тока. Данные скопления формируют снижающие подвижность области пространственного заряда, точнее слои пространственного заряда, средний радиус которых  $R_{\text{ch}}$  много больше длины свободного пробега электрона.

Подвижность можно представить в виде

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\chi} \left( \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_p} + \frac{1}{\mu_{\text{ch}}} \right), \quad (1)$$

где  $\chi$  — коэффициент, учитывающий вклад различных механизмов в рассеяние [14]; подвижность  $\mu_I$  — определяется рассеянием на ионах примеси;  $\mu_p$  — на колебаниях решетки;  $\mu_{\text{ch}}$  — на дополнительных центрах (предположительно, на объемных пространственных зарядах).

По теории Вайсберга [15], подвижность  $\mu_{\text{ch}}$  рассчитывается как  $\mu_{\text{ch}} \sim T^{-5/6}/N_{\text{ch}}$ , где  $T$  — температура,  $N_{\text{ch}}$  — концентрация объемных пространственных зарядов. Вклад рассеяния на объемных пространственных зарядах проявляется в наибольшей степени при комнатной температуре, в результате значения подвижности, измеренные нами при  $T = 300$  К, практически на порядок ниже значений, полученных при  $T = 77$  К.

Используя формулы теории эффективной среды [12], можно определить долю скопления и истинную подвижность в матрице кристалла:

$$\mu = \mu_0 \frac{1 - \frac{3}{2}f}{1 - \frac{3}{4}f}, \quad (2)$$

$$(\Delta\rho/\rho)^\parallel = 0.3f \left( \frac{\mu_0 H}{c} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\mu$  — экспериментальное значение подвижности,  $\mu_0$  — лоренцевская подвижность в матрице кристалла,  $f$  — доля объема, занятая неоднородностями,  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$  — продольное магнитосопротивление.

При решении системы уравнений (2) и (3) с использованием измеренных значений  $\mu$  и  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$ , для образцов из второй группы было получено значение  $f \sim 0.3$  при  $T = 77$  К, что позволяет сделать вывод об относительно большом количестве скопления неоднородностей. Рассчитанная истинная лоренцевская подвижность имела величину  $\mu_0 = (17400 - 20000) \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , что выше экспериментальных значений. Как упоминалось выше, коэффициент Холла  $R_H$  связан не с истинной концентрацией

носителей тока  $n$ , а с „эффективной“ концентрацией на уровне протекания тока:

$$R_H = -\frac{A}{e\bar{n}}, \quad (4)$$

где  $A$  — безразмерный параметр, зависящий от механизма рассеяния электронов в полупроводнике и напряженности магнитного поля (в InAs  $A = 1$ ).

В третьей группе образцов наблюдаются еще более низкие подвижности носителей тока. При этом величина коэффициента поперечного магнитосопротивления составляла  $B^\perp = 0.35$  при  $H = 2.2$  кЭ и  $B^\perp = 0.23$  при  $H = 5$  кЭ, что значительно выше значений для образцов первой и второй групп. Мы предполагаем, что к этому приводит увеличение числа дополнительных центров рассеяния с увеличением концентрации Но. В данном случае  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$ , также как и для образцов второй группы, положительно при  $T = 77$  и 300 К. Доля объема, занятая неоднородностями, в частности, для образца 11 (см. таблицу) с самым низким значением подвижности, составила  $f \sim 0.54$ , что говорит о крупных примесных кластерах. Такие скопления приводят к искривлению линий тока и уменьшению измеряемой величины подвижности  $\mu = R_H \cdot \sigma$ , тем не менее свойства носителей тока в матрице кристалла не изменяются.

#### 4. Заключение

Изучено влияние редкоземельного элемента Но на гальваномагнитные свойства эпитаксиальных слоев арсенида индия, полученных методом жидкофазной эпитаксии. Обнаружено, что при небольшом содержании Но в жидкой фазе до  $X_{\text{Но}} = 0.0085\text{--}0.0627$  мол% концентрация электронов в материале падает на порядок и подвижность имеет значения, близкие к теоретическим. Мы полагаем, что данный эффект связан с геттерированием редкоземельным элементом мелких фоновых примесей путем связывания их в жидкой фазе в тугоплавкие соединения. При этом Но не встраивается в твердую фазу. В образцах, полученных из слабо легированного Но раствора-расплава, отсутствует продольное магнитосопротивление  $(\Delta\rho/\rho)^\parallel$ , что подтверждает их однородность.

При увеличении содержания Но в жидкой фазе до  $X_{\text{Но}} = 0.076\text{--}0.12$  мол% концентрация электронов в эпитаксиальных слоях InAs продолжает падать, однако при этом подвижность носителей также уменьшается, что, вероятно, связано с проявлением влияния донорных центров  $V_{\text{As}}\text{--}Но$ . Выращивание арсенида индия из раствора-расплава, легированного гольмием на уровне 0.12 мол%, приводит к падению концентрации в материале на 2 порядка до  $n = 2.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77$  К.

Образцы, выращенные из раствора-расплава с содержанием гольмия  $X_{\text{Но}} = 0.14$  мол% и выше, демонстрируют возрастание концентрации электронов при низкой подвижности. Предположительно, к этому приводит

увеличение числа дополнительных центров рассеяния с увеличением концентрации Но.

Рассмотренный способ геттерирования InAs при выращивании с помощью введения редкоземельного элемента Но в жидкую фазу перспективен для получения материалов  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  с низкой концентрацией носителей тока, применяемых в современных оптоэлектронных приборах.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] J. Kwoen, T. Imoto, Y. Arakawa. *Opt. Express*, **29** (18), 29378 (2021).
- [2] A. Baranov, R. Teissier. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **21** (6), 1200612 (2015).
- [3] Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова. *Опт. и спектр.*, **127** (2), 300 (2019).
- [4] В.В. Романов, Э.В. Иванов, А.А. Пивоварова, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **54** (2), 202 (2020).
- [5] A.A. Klimov, R.E. Kunkov, A.A. Lavrov, N.M. Lebedeva, T.C. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyi. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1851** (1), 012019 (2021).
- [6] S. Woo, G. Ryu, S.S. Kang, T.S. Kim, N. Hong, J.H. Han, R.J. Chu, I.H. Lee, D. Jung, W.J. Choi. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13** (46), 55648 (2021).
- [7] Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, К.Д. Моисеев, А.Е. Розов, М.А. Сиповская, М.В. Степанов, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **33** (7), 781 (1999).
- [8] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, А.А. Гореленок, Т.С. Лагунова, А.М. Литвак, М.А. Сиповская, С.П. Старосельцева, В.А. Тихомирова, В.В. Шерстнев. *ФТП*, **26**, 1612 (1992).
- [9] А.Т. Гореленок, А.В. Каманин, Н.М. Шмидт. *ФТП*, **37** (8), 922 (2003).
- [10] Е.Р. Domaslievskaya, P.V. Seregin, A.V. Glotov. *Phys. Status Solidi C*, **7**, 1694 (2009).
- [11] М.Н. Япрынец, Р.А. Любушкин, О.Н. Соклакова, О.Н. Иванов. *ФТП*, **51** (6), 744 (2017).
- [12] А.Н. Баранов, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.А. Сиповская, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **27** (3), 421 (1993).
- [13] Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. *ФТП*, **33** (8), 1010 (1999).
- [14] А.И. Ансельм, В.И. Клячкин. *ЖЭТФ*, **22** (3), 297 (1952).
- [15] L.R. Weisberg. *J. Appl. Phys.*, **33** (5), 1817 (1962).

Редактор А.Н. Смирнов

## Gettering of epitaxial indium arsenide by the rare earth element holmium

*E.V. Kunitsyna, Ya.A. Parkhomenko, A.A. Pivovarova, Yu.P. Yakovlev*

Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The results of a study of the galvanomagnetic properties of indium arsenide grown by liquid-phase epitaxy are presented. It is shown that the use of the rare earth element holmium in the growth of InAs epitaxial layers makes it possible to reduce the electron concentration by two orders of magnitude to  $n = 2.1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  at  $T = 77 \text{ K}$ . This effect is due to the gettering of shallow background impurities with the formation of their compounds in the melt. With an increase in the holmium content of more than 0.12 mol.% the concentration of current carriers in the material begins to increase, while mobility decreases due to the influence of  $V_{\text{As}}\text{-Ho}$  donor centers. This method of gettering is promising for obtaining  $A^3B^5$  materials with a low concentration of current carriers, which are in demand in the optoelectronic industry.