

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ АРСЕНИДА ИНДИЯ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2006 В.В. Постников, М.Н. Левин, М.А. Дронов, О.Н. Шумская, Г.В. Семенова, Т.П. Сушкова

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 18.08.05

Обнаружен эффект существенного изменения температуры плавления $T_{пл}$ у обработанных импульсным магнитным полем образцов арсенида индия, легированного контролируемым количеством серы. Немонотонное изменение $T_{пл}$ объясняется протеканием в образцах после магнитного воздействия дефектных реакций – распадом метастабильных дефектных комплексов, присутствующих в исходных образцах.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее сообщалось о воздействии слабых импульсных магнитных полей (ИМП) на реальную структуру полупроводниковых твердых растворов Sb-As, Sb-As-Ge, а также соединений $A^{III}B^V$ на примере InAs [1-3]. Были обнаружены стимулированные ИМП-обработкой эффекты структурных перестроек, сопровождающихся немонотонным изменением температур плавления $T_{пл}$ образцов, причем эффект усиливался в зависимости от возрастания степени дефектности обрабатываемого материала. Предполагалось, что ИМП-воздействие снимает запреты на интеркомбинационные переходы валентных электронов, приводящие к ослаблению и иницирующие разрыв напряженных связей в вакансионно-дефектных комплексах, присутствующих в исходной структуре кристалла. Известно, что концентрация вакансий As в кристаллах InAs при любых условиях синтеза превышает, как правило, термодинамически равновесную, и приводит к образованию вакансионных комплексов [5]. В этой связи представляет интерес выяснение возможности воздействия ИМП на образцы InAs, содержащие в дефектных комплексах дополнительно примесные атомы. Целью настоящей работы явилось исследование влияния ИМП на температуру плавления образцов InAs, легированных контролируемым количеством серы.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Синтез кристаллов InAs осуществлялся одно-температурным методом в кварцевых ампулах,

вакуумированных до остаточного давления $5 \cdot 10^{-4}$ гПа. Две серии образцов были получены сплавлением поликристаллического арсенида индия с серой (с концентрацией последней $1 \cdot 10^{19}$ и $1,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³), а третья – сплавлением InAs с предварительно синтезированным сульфидом In_2S_3 . Для получения соединений использовались очищенный вакуумной сублимацией мышьяк ОСЧ-9-5, индий ОСЧ-11-5 и сера ОСЧ ВЗ. Взвешивания компонентов проводились при помощи весов ВЛР-200 с погрешностью, не превышающей $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г.

Воздействие ИМП в каждом эксперименте осуществлялось серией из 3000 симметричных треугольных импульсов с амплитудой $B_0 \sim 0.3$ Тл (для некоторых образцов B_0 составляла 0.5 Тл), длительностью $\tau \sim 10^{-5}$ с и частотой следования $f \sim 50$ Гц. Импульсы магнитного поля формировались разрядом батареи конденсаторов через соленоид с малой индуктивностью. Воздействие ИМП проводилось при комнатной температуре. Обработанные образцы в перерывах между измерениями хранились при комнатной температуре в запаянных кварцевых ампулах вместе с контрольными образцами, не подвергавшимися обработке.

Исследования воздействия ИМП на температуру плавления кристаллов InAs + S проводились методом дифференциального термического анализа (ДТА). Термограммы ДТА для процесса плавления исследуемых образцов были получены по стандартной методике на приборах типа ФРУ-64 и НТР-75.

На рис. 1 приведены типичные термограммы ДТА для образцов InAs, содержащих атомы S

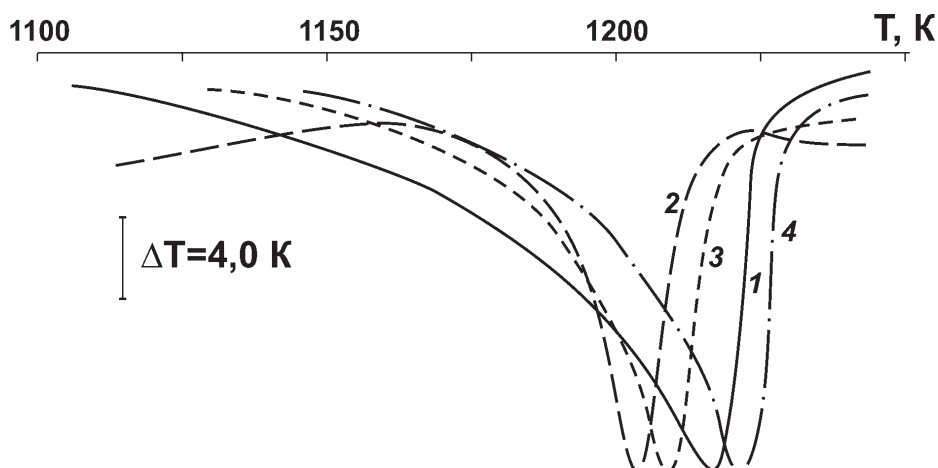


Рис. 1. Термограммы ДТА для образцов InAs, содержащих примесь серы с концентрацией $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$: 1 – исходный, 2, 3, 4 – через 120, 168 и 240 часов после ИМП – воздействия соответственно

концентрацией $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а на рис. 2 – температуры плавления легированных образцов InAs в зависимости от времени после ИМП-воздействия. Как видим, у серии образцов InAs, содержащих в качестве примеси сульфид индия In_2S_3 , воздействие ИМП не вызывает никаких изменений $T_{\text{пл}}$ (кривая 1 на рис. 2), в то время как ИМП – обработанные образцы с примесью серы обнаруживают немонотонную зависимость $T_{\text{пл}}$ от времени после воздействия. Для обеих серий образцов, содержащих разное количество серы, характерно наличие трех основных участков – латентного (первые сутки после воздействия), на котором эффект еще не проявляется, участка существенного изменения $T_{\text{пл}}$ с максимумом, приходящимся на 5-е сутки (120 часов после ИМП-обработки), и, наконец, участка, на котором $T_{\text{пл}}$ возвращается к своему исходному значению (~ 240 часов после воздействия).

Приведенные результаты хорошо согласуются с полученными ранее для образцов чистого соединения InAs [3].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для использовавшихся в настоящей работе ИМП выполняется условие $\mu_B H \ll kT$ (μ_B – магнетон Бора, H – напряженность магнитного поля, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура), то есть изменение энергии электрона в магнитном поле за счет эффекта Зеемана на несколько порядков ниже, чем кинетическая энергия теплового движения, приходящаяся на одну степень свободы электрона. Другими словами, энергетическое воздействие ИМП пренебрежимо мало и не может быть причиной наблюдавшихся эффектов.

Обнаруженные эффекты не могли быть также следствием воздействия на образцы вихревого электрического поля или элементарного джоулева разогрева индукционными токами. Напряженность индукционного электрического поля для использовавшихся в настоящей работе магнитных импульсов можно оценить следующим образом. Уравнение

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{Максвелла}$$

в нашем
случае можно представить в виде:

$$E = \frac{B \cdot r}{2t}$$

, откуда $E = \frac{B \cdot r}{2t}$, где в качестве r возьмем размер образца (1 см). Подстановка $B=0.3 \text{ Тл}$, $t=10^{-5} \text{ с}$ (длительность импульса) дает $E=150 \text{ (В/м)}$, что явно недостаточно для «силового воздействия», которое могло бы привести к осуществлению наблюдавшихся радикальных изменений структуры кристалла.

Оценим теперь изменение температуры образца, вызванное индукционными токами, возникающими в процессе обработки. Поле с $E=150 \text{ В/м}$ оказывало воздействие на образец в течение $t_s = 60 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ (т.к. длительность импульса 10^{-5} с , за 1 с следует 50 импульсов, а время экспозиции образца 60 с). Это означает, что плотность тока, определяемая по закону Ома $j = \sigma E = E/\rho$ (где удельное сопротивление InAs при комнатной температуре $\rho = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ рассчитано по данным [4]), составит величину $j = 5 \cdot 10^4 \text{ (А/м}^2\text{)}$. Тогда удельная мощность $W = j^2 \cdot \rho$, выделяемая в образце вследствие действия индукционного тока, будет равна $W = 1,5 \cdot 10^7 \text{ (Вт/м}^3\text{)} = 15 \text{ Вт/см}^3$. С учетом времени действия поля t_s , найдем плотность энергии, получаемой

образцом при ИМП-воздействии: $Q^* = Q/V = W \cdot t_j = 0.45$ (Дж/см³). Здесь $V = 0.08$ см³ – объем образца. Отсюда количество тепла, выделяемое в образце за время действия ИМП: $Q = Q^* \cdot V = 0.04$ Дж. Далее, используя известное соотношение $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ (здесь $c = 144$ Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость InAs [4], а $m = 4.5 \cdot 10^{-4}$ кг – масса образца), определим изменение температуры образца, вызванное действием индукционных токов: $\Delta T = 0.04 / (144 \cdot 4.5 \cdot 10^{-4}) = 0.6$ (К)!

Основным фактором чувствительности структуры кристаллов InAs к ИМП-воздействию следует считать, по-видимому, наличие в исходных образцах комплексов точечных дефектов, способных распадаться в слабых магнитных полях. Как известно, в полупроводниковых соединениях A^{III}B^V доминирующими являются дефекты нестехиометрии, обусловленные вакансиями элемента пятой группы (As), и антиструктурные дефекты, формирующие между собой вакансионно-дефектные комплексы [5]. При легировании InAs серой атомы последней занимают вакансии мышьяка, частично стабилизируя напряженное состояние дефектно-вакансионных комплексов. При увеличении концентрации серы в InAs она может занимать междоузельные положения (либо образовывать отдельную фазу), создавая тем самым дополнительное метастабильное состояние кристалла [6]. Именно поэтому, по нашему мнению, эффект воздействия ИМП на кристаллы InAs с повышенным содержанием S оказывается более заметным (кривые 2 и 3 на рис. 2).

Как было показано в [7], воздействие слабого магнитного поля на дефектный кристалл может быть следствием возникновения в окрестности дефектного комплекса некоего антиферромагнитного упорядочения, то есть возникновения в спектре элементарных возбуждений такого кристалла магнитоупорядоченных ветвей. В результате инициированного ИМП протекания дефектной реакции (распада дефектных комплексов на подвижные части с более простой структурой – продукты реакции) происходит увеличение степени гомогенности легированного S соединения InAs, то есть установление равномерного пространственного распределения продуктов реакции. Однако возникшее таким образом состояние является метастабильным, поскольку объединение продуктов реакции в новые комплексы отвечает некоторому понижению внутренней энергии. Такое объединение может происходить в результате спин – орби-

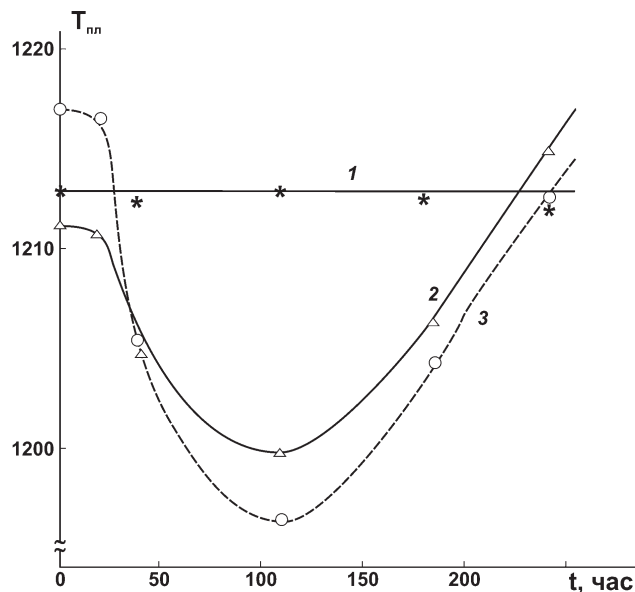


Рис. 2. Зависимости температуры плавления легированных серой образцов InAs от времени после ИМП – обработки: 1 – сера введена в виде соединения In₂S₃, 2, 3 – концентрация свободной серы в образцах $1 \cdot 10^{19}$ и $1,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³ соответственно.

тального взаимодействия, которое устанавливает химическое равновесие в системе, что, в свою очередь, приводит к возвращению температуры плавления образцов к своему исходному значению и даже к некоторому ее увеличению.

При введении в InAs сульфида In₂S₃ сера, занимая вакансии мышьяка, оказывается более прочно связанной с матрицей и имеет поэтому существенно меньшую подвижность [6]. Такие образцы не откликаются на ИМП-воздействие (кривая 1 на рис. 2) даже при увеличении амплитуды импульсов до 0.5 Тл.

Величина латентного периода для легированных серой образцов InAs определяется скоростью инициированных ИМП диффузионных процессов, протекающих в соединении при комнатной температуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, воздействие ИМП на легированные свободной серой образцы InAs приводит, по нашему мнению, к протеканию в образцах дефектных реакций: стабильные в отсутствии поля дефектные комплексы распадаются на части с более простой структурой. При этом магнитное поле снимает строгий запрет на переход «комплекс – продукты

реакции». Далее продукты реакции равномерно распределяются, приводя к гомогенизации образцов, а затем образуют новые комплексы. Такие стимулированные ИМП – воздействием процессы сопровождаются немонотонным изменением температуры плавления образцов легированного InAs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постников В.В., Левин М.Н., Семенова Г.В., Сушкова Т.П., Долгополова Э.А. Структурные превращения в твердых растворах Sb-As при воздействии слабых импульсных магнитных полей. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2002. Т. 4. №4. С. 326-332.
2. Левин М.Н., Семенова Г.В., Сушкова Т.П., Постников В.В., Аганов Б.Л. Влияние импульсного магнитного поля на реальную структуру твердых растворов в системе Sb-As. // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. № 4. С. 609-612.
3. Левин М.Н., Семенова Г.В., Сушкова Т.П., Долгополова Э.А., Постников В.В. Воздействие импульсных магнитных полей на реальную структуру кристаллов арсенида индия. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. № 19. С. 50-55.
4. Стрельченко С.С., Лебедев В.В. Соединения $A^{III}B^V$. М: Металлургия. 1984. 144 с.
5. Булярский С.В., Фистуль В.И. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. М.: Наука. 1997. 352 с.
6. Мильвидский М.Г., Пелевин О.В., Сахаров Б.А. Физико-химические основы получения разлагающихся полупроводниковых соединений. М: Металлургия. 1974. 392 с.
7. Belyavsky V.I., Levin M.N. Spin Effects in Defect Reactions. // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 104101.