

06.1; 06.3; 07; 12

© 1991

МЕЛКИЙ АКЦЕПТОРНЫЙ УРОВЕНЬ МАРГАНЦА
В АНТИМОНИДЕ ГАЛЛИЯЕ.И. Георгицэ, Л.М. Гуцуляк,
В.И. Иванов - Омский, В.М. Погорлецкий,
А.Н. Титков

В работе сообщается о результатах исследования спиновой релаксации электронов проводимости в антимониде галлия, легированном марганцем. Подобные исследования в антимониде галлия еще не проводились. Исследовались образцы антимонида галлия, легированные марганцем, р-типа проводимости при температуре 4.2 К. Образцы получены модифицированным методом зонной плавки. Марганец вводился в расплав во время роста. Концентрация легирующей примеси в расплаве изменялась в пределах 0.005...1 ат%.

Для образцов с различным содержанием марганца сняты температурные зависимости постоянной Холла и удельного сопротивления, а также спектры краевой фотолюминесценции. Основные параметры исследованных образцов приведены в таблице. В экспериментах для возбуждения фотолюминесценции применялся гелий-неоновый лазер с генерацией на длине волны 1.52 мкм (0.814 эВ). Плотность возбуждения во всех экспериментах не превышала $10 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Фотолюминесценция возбуждалась циркулярно-поляризованным светом. Это позволило использовать спектры фотолюминесценции наряду с изучением структуры примесных уровней также и для определения времен жизни и спиновой релаксации неравновесных электронов [1, 2]. Известно [3], что возбуждение фотолюминесценции циркулярно-поляризованным светом приводит к созданию неравновесного распределения электронов по спиновым состояниям зоны проводимости. Процессы спиновой релаксации приводят за время жизни электронов в зоне к частичному выравниванию заселенностей спиновых состояний. Однако сохранившаяся неравновесность заселения вызывает появление циркулярной поляризации спектров фотолюминесценции. Следовательно, в этих условиях в отсутствии магнитного поля фотолюминесценция является циркулярно-поляризованной, что и наблюдалось экспериментально. В магнитном поле, поперечном по отношению к направлению распространения света, происходит деполяризация фотолюминесценции из-за прецессии электронного спина.

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции, исследованные при температуре образцов 4.2 К. Видно, что в спектрах выделяются две излучательные полосы, условно обозначенные А (777 мэВ) и В (793 мэВ). Полоса А для антимонида галлия известна [4] и идентифицирована как переход „зона проводимости -

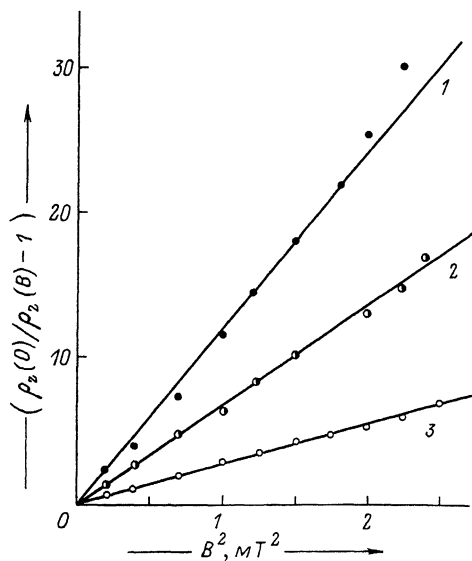
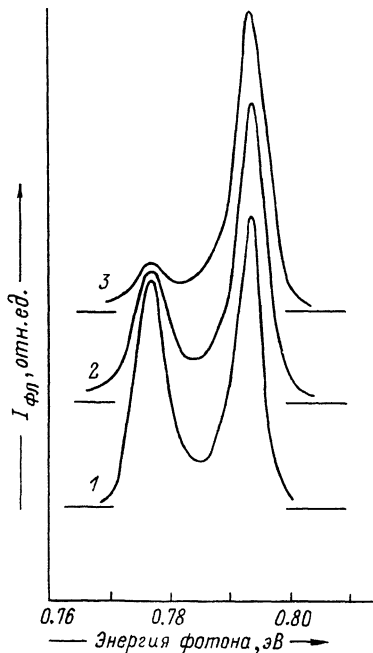


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции $GaSb$ при 4.2 К. 1 - $GaSb$: 0.005 % Mn , 2 - $GaSb$: 0.01 % Mn , 3 - $GaSb$: 0.1 % Mn .

Рис. 2. Контуры Ханле для $GaSb$ при 4.2 К. 1 - $GaSb$: 0.005% Mn , 2 - $GaSb$: 0.01 % Mn , 3 - $GaSb$: 0.1 % Mn . Точки - эксперимент, сплошные - расчет с $g = 9.3$ [3].

природный акцептор". Глубина залегания уровня нейтрального природного акцептора ~ 34 мэВ. Полоса В появляется только в образцах антимида галлия, легированных марганцем. Следовательно, этот переход идентифицируется как переход „зона проводимости - марганцевый акцептор". Глубина залегания этого уровня ~ 18 мэВ. Это говорит о том, что в отличие от других соединений АШВУ, марганец в антимида галлия образует мелкий акцепторный уровень. Из представленных на этом рисунке результатов следует, что с увеличением содержания марганца в образце интенсивность полосы В растет, а интенсивность полосы А уменьшается, и при содержании 1 % Mn полностью исчезает.

Контуры Ханле для ряда легированных марганцем образцов $GaSb$ при $T=4.2$ К приведены на рис. 2. В расчетах использовали значение g -фактора 9.3, взятое из работы [1].

Видно, что с увеличением содержания марганца в образце происходит уменьшение наклона контура Ханле относительно горизонтальной оси. Используя методику, описанную в работе [3], определили

Содержание в расплаве, % Mn	T=300 K		T=4,2 K			
	$N_A - N_D,$ см ⁻³	$M_p,$ см ² B ⁻¹ с ⁻¹	$\tau,$ с	$\tau_s,$ с	τ_s/τ	$N_t,$ см ⁻³
0	$1.4 \cdot 10^{17}$	580	$6.2 \cdot 10^{-9}$	$15.5 \cdot 10^{-9}$	2.5	$2 \cdot 10^{17}$
0.005	$1.9 \cdot 10^{17}$	550	$6.1 \cdot 10^{-9}$	$13.5 \cdot 10^{-9}$	2.21	$1.8 \cdot 10^{17}$
0.01	$2.6 \cdot 10^{17}$	445	$4.5 \cdot 10^{-9}$	$11.0 \cdot 10^{-9}$	2.44	$2.7 \cdot 10^{17}$
0.1	$3.3 \cdot 10^{17}$	505	$2.9 \cdot 10^{-9}$	$6.7 \cdot 10^{-9}$	2.3	$4.3 \cdot 10^{17}$
1	$3.3 \cdot 10^{18}$	205	$0.74 \cdot 10^{-9}$	$8.0 \cdot 10^{-10}$	1.1	$2.4 \cdot 10^{18}$

время жизни (τ) и время спиновой релаксации (τ_s) неравновесных электронов. Полученные значения занесены в таблицу. Из представленных результатов видно, что увеличение содержания марганца в образцах вплоть до 1% приводит к уменьшению (приблизительно в 8 раз) времени жизни неравновесных электронов. Наблюдаемое уменьшение времени жизни неравновесных электронов происходит примерно обратно пропорционально растущей концентрации дырок, и, таким образом, обусловлено увеличением концентрации марганца в электрически активном состоянии. Из данных таблицы также видно, что время спиновой релаксации с увеличением содержания марганца уменьшается примерно в 17 раз. Это говорит о том, что атомы марганца являются эффективными центрами спиновой релаксации неравновесных электронов. Сопоставляя полученные в данной работе результаты для временных характеристик с данными работы [5], имеем, что марганец в антимониде галлия образует мелкий акцептор. Зная из эксперимента время жизни, по формуле $N_t = (\tau \cdot B)^{-1}$ можно определить концентрацию рекомбинационных центров. В расчетах использовали для коэффициента излучательной рекомбинации значение $B = 8 \cdot 10^{-10}$ см³·с⁻¹, характерное для водородоподобных мелких центров [5]. Полученные значения для концентрации излучательных центров (N_t) приведены в таблице. Концентрация излучательных центров, как видно из данных таблицы, растет с увеличением концентрации марганца в расплаве. Во второй графе таблицы приведены данные для ($N_A - N_D$), полученные из электрических измерений тех же образцов. Видно удовлетворительное согласие данных о концентрации, полученных из измерений по оптической ориентации, и электрических. Откуда следует, что влияние марганца в антимониде галлия на скорость рекомбинации носителей состоит в увеличении концентрации мелких акцепторных уровней и по аналогии с [6], в отличие от других соединений $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, не приводит к появлению каналов быстрой безызлучательной рекомбинации.

Из результатов, приведенных на рис. 1, видно, что при увеличении концентрации марганца в расплаве происходит и трансформация

спектров фотолюминесценции. А именно: с увеличением содержания марганца в образце растет интенсивность полосы В и уменьшается интенсивность полосы А, при концентрации марганца $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в образце, что только на порядок больше концентрации природных акцепторов в $GaSb$, в спектре фотолюминесценции остается только полоса В. Это означает, что марганец способствует уменьшению концентрации нейтральных природных акцепторов и росту концентрации мелких акцепторов марганца. В этом случае, по-видимому, марганец в антимониде галлия замещает вакансии сурьмы, ответственные за природные акцепторы материала.

Таким образом, марганец в антимониде галлия образует мелкий акцепторный уровень $(18 \pm 0.2) \text{ мэВ}$, занимая в решетке вакансии сурьмы (Mn_{Sb}).

Ведущиеся в настоящее время исследования примесей переходных металлов в $GaSb$ в основном ограничиваются изучением энергетической структуры вводимых примесных центров и их влиянием на процессы рекомбинации неравновесных носителей. В этих исследованиях остаются без достаточного внимания вопросы взаимодействия носителей с магнитными моментами, локализованными на примесях переходных металлов. Вместе с тем наличие у атомов этих примесей нескомпенсированных спинов может приводить к ряду существенных эффектов, исследование которых представляет большой интерес.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] P a r s o n s R.R. // Phys. Rev. Lett. 1969. V 23. P. 1152-1156.
- [2] Г а р б у з о в Д.З., Е к и м о в А.И., С а ф а р о в В.И. // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 13. С. 24-27.
- [3] А р о н о в А.Г., П и к у с Г.Е., Т и т к о в А.Н. // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. В. 3. С. 1170-1184.
- [4] C h i d l e y T.R., H a y w o o d S.K., H e n r i q u e s A.B., M a s o n N.J., N i c h o l a s R.T., W a l k e r P.J. // Semicond. Sci. Techn. 1991. V 6. N 1. P. 45-54.
- [5] Т и т к о в А.Н., И п у р и д з е Г.Н., М и р о н о в И.Ф., Ч е б а н В.Н. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 1. С. 25-34.
- [6] К р у к о в с к а я Л.П., М и р о н о в И.Ф., Т и т к о в А.Н. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 4. С. 689-692.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
7 августа 1991 г.