

ПОВЕДЕНИЕ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ В ЯДЕРНО ЛЕГИРОВАННОМ АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Глорнозова Р. И., Колесник Л. И., Колин Н. Г., Освенский В. Б.

Возросший за последние годы интерес к применению метода ядерного легирования для полупроводниковых соединений $A^{111}B^V$ делает актуальным вопрос изучения полноты отжига, а также кинетики преобразования при термообработке сопутствующих радиационных дефектов, возникающих в образцах в процессе облучения.

Спектр глубоких уровней в облученных высокоэнергетическими частицами (в основном электронами и быстрыми нейтронами) образцах арсенида галлия изучался в работах [1-5], однако их природа до сих пор окончательно не установлена. Донорный центр, расположенный в середине запрещенной зоны с $E_t = E_c - 0.75$ эВ (так называемый центр $EL2$), ставший также предметом многих исследований в связи с необходимостью получения качественных монокристаллов полупроводящего арсенида галлия [6], отождествляется с наличием в кристалле антиструктурных дефектов As_{Ga} , а также их ассоциациями с междоузельными атомами.

Спектр глубоких центров в ЯЛАГ

$E_c - E_d$, эВ	Концентрации центров, $см^{-3}$					
	в исходном материале	после облучения нейтронами $\Phi \cdot 10^{-17}$, $см^{-2}$ и отжига				
		5 *	1 **	2,2 **	5 **	8 **
0.29	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{15}$	—	—	—	—
0.35	$4 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{15}$	—	—	—	—
0.58	$3 \cdot 10^{14}$	$1.4 \cdot 10^{16}$	—	—	—	—
0.75	$6 \cdot 10^{15}$	$1.4 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{16}$	$9.2 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{15}$
Концентрация носителей заряда $n_{зон}$, $см^{-3}$	$4 \cdot 10^{15}$	$1.4 \cdot 10^{16}$	$1.6 \cdot 10^{16}$	$3.5 \cdot 10^{16}$	$8.4 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^{17}$

Примечание. * Образцы отжигались при 650 °С, 5 мин. ** Образцы отжигались при 800 °С, 20 мин.

Целью настоящей работы было изучение спектра глубоких центров, возникающих в арсениде галлия в процессе ядерного легирования (облучение полным спектром реакторных нейтронов с последующей термообработкой [7]), методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ).

В качестве исходного материала для ядерного легирования использовались нелегированные кристаллы арсенида галлия n -типа проводимости, полученные методом Чохральского, как с концентрацией носителей заряда $\sim 10^{15} см^{-3}$ при комнатной температуре, так и высокоомные ($\rho \sim 10^8$ Ом.см).

Облучение нейтронами проводилось в реакторе ВВР-ц при отношении плотностей потоков тепловых и быстрых нейтронов $\varphi_T/\varphi_0 = 10$ и температуре не выше 70 °С. Флюенс тепловых нейтронов $\Phi_T \sim (1-8) \cdot 10^{17} см^{-2}$ выбирали таким образом, чтобы суммарная концентрация вводимых донорных примесей Ge и Se [1] варьировалась в интервале $n \approx 10^{16} - 10^{17} см^{-3}$.

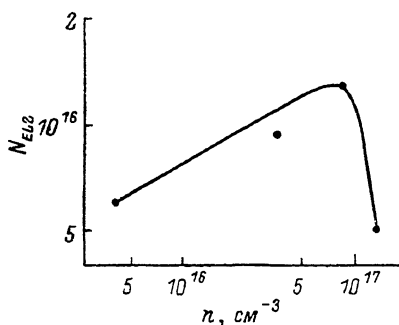
Спектр глубоких центров в кристаллах ядерно легированного арсенида галлия (ЯЛАГ) измеряли методом РСГУ на барьерах Шоттки $Au-n-GaAs$, которые создавали методом вакуумного напыления металла [8]. Поскольку непосредственно после облучения кристаллы ЯЛАГ были высокоомными, измерения проводили в образцах, отожженных при температурах 650 (5 мин) и 800 °С (20 мин).

Полученные результаты сведены в таблице. Там же приведен спектр глубоких центров в исходных кристаллах арсенида галлия. Как видно из таблицы, в не-

легированном арсениде галлия в верхней половине запрещенной зоны наблюдается несколько глубоких центров, превалирующим среди которых является центр $EL2$. Концентрация центров $EL2$ составляет $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

В кристаллах ЯЛАГ после кратковременного отжига при 650°C (5 мин) наблюдаются три центра: $E_c-0.35$, $E_c-0.58$ эВ и $EL2$. При этом их концентрации выше, чем в исходных кристаллах до облучения. В то же время аналогичная термообработка необлученных кристаллов не изменяет концентрации наблюдаемых глубоких центров. Это дает основание предположить, что указанные центры генерируются в результате нейтронного облучения и сохраняются в кристалле даже после отжига при 650°C , т. е. являются достаточно термостабильными.

Увеличение температуры термообработки до 800°C и времени отжига до 20 мин приводит практически к исчезновению центров $E_c-0.35$ и $E_c-0.58$ эВ (их концентрация становится ниже предела обнаружения $n \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-3}$).



В верхней половине запрещенной зоны остаются только уровни $EL2$, концентрация которых снижается по сравнению с отжигом при 650°C , но по-прежнему остается выше, чем в исходных кристаллах. Зависимость концентрации этих центров от стационарной концентрации электронов после термообработки при

Зависимость концентрации центров $EL2$ от стационарной концентрации электронов после термообработки при 800°C в течение 20 мин.

800°C (20 мин) (т. е. от флюенса нейтронов) приведена на рисунке. Как видно, эта зависимость характеризуется кривой с максимумом. При увеличении концентрации электронов до $\sim 8.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ наблюдается возрастание концентрации $EL2$, что качественно согласуется с результатами работы [1]. Уменьшение концентрации центров $EL2$ до значений, соответствующих исходным кристаллам, наблюдается только при больших флюенсах нейтронов ($> 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$), соответствующих высокому уровню легирования. Как известно [8, 9], наблюдаемые в верхней половине запрещенной зоны структурно-чувствительные глубокие центры связаны с наличием в кристаллах арсенида галлия собственных точечных дефектов (типа V_{Ga} и As_i). Из полученных результатов следует, что в ЯЛАГ после термообработки даже при температурах выше 650°C сохраняются избыточные точечные дефекты, с которыми связано образование дополнительных по сравнению с необлученными кристаллами глубоких центров.

Ранее в работе [10] было установлено, что с повышением уровня ядерного легирования скорость отжига радиационных дефектов увеличивается. Этот эффект и приводит к наблюдаемому уменьшению концентрации центров $EL2$ в отожженных образцах при высоких флюенсах нейтронов.

Из приведенных выше экспериментальных данных наиболее неожиданным является возрастание концентрации центров $EL2$ при отжиге облученных кристаллов вплоть до 800°C по сравнению с исходным состоянием материала до облучения. В принципе, возможны два объяснения наблюдаемого эффекта.

1. Дефекты, ответственные за появление центров $EL2$, образуются в процессе низкотемпературного ($\leq 650^\circ\text{C}$) отжига облученного GaAs.

2. Возрастание концентрации центров $EL2$, наблюдаемое с помощью метода РСГУ, является результатом изменения формы нахождения точечных структурных дефектов (образовавшихся при нейтронном облучении), общая концентрация которых при отжиге уменьшается (по крайней мере не возрастает).

Хотя полученных экспериментальных данных недостаточно, чтобы сделать однозначное заключение, однако можно высказать некоторые предположения. Как уже отмечалось, центры $EL2$ связаны с наличием в кристалле междоузельных атомов As_i и вакансий V_{Ga} . Обычно уровни $EL2$ отождествляют с антиструктурными дефектами As_{Ga} , выявляемыми при измерении электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). В работе [1] приведены данные о том, что вводимые в GaAs при нейтронном облучении дефекты As_{Ga} (по результатам измерения ЭПР)

интенсивно отжигаются при температурах >400 °С. В этом случае наблюдаемое возрастание концентрации $EL2$ при отжиге может быть связано лишь с изменением формы нахождения и, следовательно, электрического поведения дефектов As_{Ga} на фоне уменьшения их общей концентрации. Согласно модели, предложенной в [1], при измерении РСГУ лишь изолированные дефекты выявляются в виде глубоких центров $EL2$ ($E_c - 0.75$ эВ). Если же антиструктурные дефекты окружены более мелкими электронными ловушками (находящимися на расстоянии десятков или сотен ангстрем), то они проявляются в спектре РСГУ в виде полосы вблизи $E_c - 0.5$ эВ (в нашем случае $E_c - 0.58$ эВ). При отжиге происходит миграция более мелких центров от As_{Ga} , в результате чего концентрация уровней $E_c - 0.5$ эВ уменьшается, а изолированных антиструктурных дефектов — может возрастать, хотя общая концентрация As_{Ga} (включая ассоциированные дефекты) уменьшается. Поэтому определяемая по данным РСГУ концентрация центров $EL2$ при $T > 400$ °С возрастает. Такая модель не противоречит полученным в настоящей работе результатам и объясняет, почему в отожженных при $T = 650 - 800$ °С образцах концентрация $EL2$ выше, чем в исходном необлученном материале. При этом термообработка при 800 °С приводит к некоторому уменьшению концентрации $EL2$ по сравнению с образцами, отожженными при 650 °С, что является результатом уменьшения концентрации неравновесных дефектов, ответственных за $EL2$, с повышением температуры.

Рассмотренная схема является, конечно, не более чем гипотезой, позволяющей описать экспериментальные данные, поскольку нельзя признать бесспорным бытующее в литературе представление о тождественности центров $EL2$ с антиструктурными дефектами As_{Ga} . Однако изменение состояния (и электрического поведения) введенных облучением точечных дефектов решетки в процессе отжига представляется вполне вероятным. С этим, в частности, связан наблюдавшийся нами ранее при изучении спектров фотолюминесценции в ядерно легированном арсениде галлия [10] немонотонный характер отжига дефектов (в том числе As_i). Этот процесс необходимо учитывать наряду с отжигом неравновесных радиационных дефектов. В то же время полученные результаты недвусмысленно указывают на то, что образовавшиеся при ядерном легировании дефекты типа As_i и V_{Ga} сохраняются в кристаллах вплоть до температур 800 °С, что и определяет более высокую термостабильность центров $EL2$ по сравнению с другими менее глубокими центрами.

Л и т е р а т у р а

- [1] Martin G. M., Esteve E., Langlage P., Makram-Ebeid S. — J. Appl. Phys., 1984, v. 56, N 10, p. 2655—2657.
- [2] Goltzene A., Meyer B., Schard C. — J. Appl. Phys., 1985, v. 57, N 4, p. 1332—1335.
- [3] Beall R. B., Newman R. C., Whitehouse J. E. — J. Phys. C: Sol. St. Phys., 1986, v. 19, p. 3745—3752.
- [4] von Bardelben H. J., Stievenard D., Deresmer D., Huber A., Bourgein J. C. — Phys. Rev., 1986, v. 34, N 10, p. 7192—7202.
- [5] Колин Н. Г., Кольченко Т. И., Ломако В. М. Спектроскопия радиационных дефектов в ядерно легированном арсениде галлия. — ФТП, 1987, т. 21, в. 2, с. 327—330.
- [6] Полуизолирующие соединения $A^{III}B^V$ / Перев. под ред. М. Г. Мильвидского. М., 1984 256 с.
- [7] Колин Н. Г., Куликова Л. В., Освенский В. Б., Соловьев С. П., Харченко В. А. Изменение электрофизических свойств ядерно легированного арсенида галлия при отжиге. — ФТП, 1984, т. 18, в. 12, с. 2187—2192.
- [8] Большева Ю. Н., Воронков В. В., Глориозова Р. И., Колесник Л. И. Структурно-чувствительные глубокие центры в слабо легированном арсениде галлия. — ФТП, 1985, т. 19, в. 2, с. 292—295.
- [9] Воронков В. В., Большева Ю. Н., Глориозова Р. И., Колесник Л. И., Столяров О. Г. Собственные точечные дефекты в арсениде галлия: резкая зависимость остаточных концентраций от состава расплава. — Кристаллография, 1987, № 1, с. 208—213.
- [10] Колесник Л. И., Колин Н. Г., Лопшинский А. М., Освенский В. Б., Токаревский В. В., Харченко В. А. Изучение процесса отжига ядерно легированного арсенида галлия методом фотолюминесценции. — ФТП, 1985, т. 19, в. 7, с. 1311—1316.

Филиал научно-исследовательского
физико-химического института
им. Л. Я. Карпова
Обнинск

Получно 15.04.1987
Принято к печати 22.07.1987