

**ПРЯМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ПОДВИЖНОСТИ
ПЕРВИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В GaAs**

Важнейшей задачей радиационной физики полупроводников является установление природы и свойств вводимых облучением дефектов. Подход к решению этой проблемы тесно связан с вопросом подвижности первичных дефектов при температуре облучения 300 К. Относительно GaAs существуют две точки зрения по данному вопросу. Наблюдаемые экспериментальные результаты авторы [1, 2] объясняют исходя из неподвижности первичных радиационных дефектов (РД), в то время как в работах [3, 4] утверждается, что совокупность экспериментальных результатов может быть объяснена с позиций подвижных первичных дефектов. Вопрос о подвижности первичных дефектов в GaAs до настоящего времени оставался дискуссионным. Не было прямых экспериментальных доказательств в пользу ни одного из этих предположений. Вместе с тем окончательно определить подход к проблеме природы стабильных РД в GaAs невозможно без решения вопроса подвижности первичных РД.

Целью настоящей работы явилось исследование процессов миграции и перераспределения точечных дефектов в GaAs в ходе облучения и последующего термического отжига.

Одним из доказательств подвижности точечных дефектов при заданной температуре может служить изменение каких-либо свойств материала в случае, когда исследуемая область кристалла пространственно удалена от области генерации первичных дефектов. Это можно легко достичь при облучении полупроводниковых структур различного типа частями с малой длиной пробега. В качестве таких структур нами выбраны чистые эпитаксиальные пленки n -типа толщиной 15 мкм с высокой степенью совершенства, выращенные на полужолирующих подложках толщиной 250 мкм и электролюминесцентные p^+-p-n^+ структуры с сильнолегированной компенсированной активной областью p -типа. Структуры облучались α -частицами с энергией 4,5 МэВ, длина пробега которых в GaAs составляет 20 мкм.

Облучение образцов со стороны эпитаксиальных пленок при $T=300$ К приводило к уменьшению как концентрации, так и подвижности носителей заряда. Скорость удаления носителей при этом составляла $\sim 10^5$ см $^{-1}$. После прекращения облучения величина подвижности продолжала изменяться еще в течение 50—60 ч. Анализ показал, что эта длинновременная релаксация не связана с ионизацией кристалла, а обусловлена миграцией первичных дефектов из эпитаксиальной пленки в подложку из-за наличия градиента концентраций. Этот вывод подтвержден результатами облучения эпитаксиальных пленок и электролюминесцентных структур со стороны подложек. В этом случае область генерации дефектов отделена от исследуемой слоем подложки толщиной 150—200 мкм. Тем не менее, в эпитаксиальных пленках наблюдалось уменьшение подвижности носителей заряда, а в электролюминесцентных структурах — квантового выхода и времени жизни (рис. 1). Видно, что в обоих случаях наблюдается насыщение изменений указанных параметров от потока облучения. Это насыщение, по-видимому, связано с уменьшением диффузионной длины первичных РД в области их генерации по мере накопления стабильных дефектов. Действительно, оценки показывают, что насыщение начинает наблюдаться при концентрации стабильных РД в области генерации дефектов 10^{18} — 10^{19} см $^{-3}$.

Таким образом, результаты экспериментов согласуются друг с другом и свидетельствуют о подвижности некоторых типов первичных РД в GaAs при комнатной температуре.

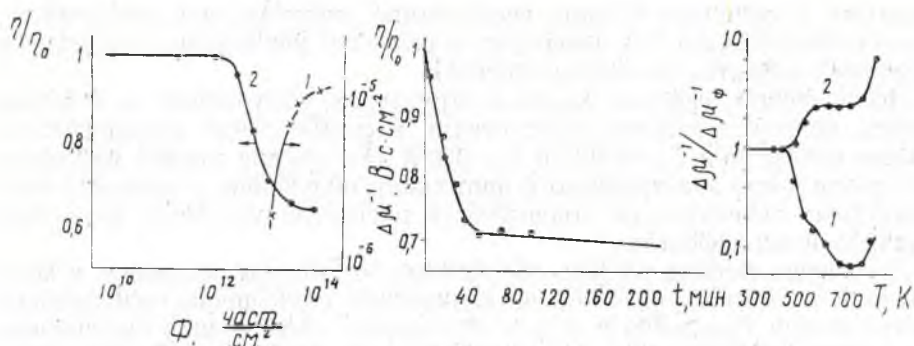


Рис. 1. Изменение подвижности (1) носителей заряда в эпитаксиальном n -GaAs ($T=77$ К) и квантового выхода электролюминесценции (2) в эпитаксиальных p — n -структурах на основе GaAs в результате облучения со стороны подложки ($T=300$ К). Температура облучения 300 К

Рис. 2. Изменение внешнего квантового выхода люминесценции p — n -структуры, облученной альфа-частицами со стороны эпитаксиального слоя ($T_{обл}=77$ К) в процессе хранения при $T=300$ К (η_0 — внешний квантовый выход при $T=300$ К до облучения)

Рис. 3. Изменение подвижности носителей заряда при $T=77$ К в ходе изохронного отжига пленок GaAs, облученных альфа-частицами со стороны пленки (1) и подложки (2)

Для определения механизма миграции первичных дефектов проводилось облучение электролюминесцентных структур со стороны p^+ -области при $T=77$ К. Вследствие высокой степени легирования p^+ -области уровень Ферми в ней локализован вблизи V -зоны, и перезарядка первичных дефектов из-за понижения температуры маловероятна. Установлено, что облучение образцов не приводило к уменьшению квантового выхода люминесценции, хотя аналогичное облучение при 300 К давало значительный спад интенсивности люминесценции. При повышении температуры облученных образцов от 77 до 300 К наблюдалась длинновременная релаксация квантового выхода люминесценции (рис. 2). Полученные результаты позволили оценить энергию активации миграции первичных дефектов: ее величина не превышала 0,35 эВ. Тот факт, что миграция первичных РД наблюдалась в компенсированном и сильнолегированном GaAs n - и p -типа проводимости дает возможность заключить, что зарядовое состояние первичных РД не оказывает принципиального влияния на процессы их миграции.

Высокая подвижность первичных дефектов при комнатной температуре обуславливает и их нестабильность, т. е. эти дефекты должны исчезать на стоках, аннигилировать, либо образовывать устойчивые при данной температуре комплексы дефектов. Установленный в данной работе факт высокой подвижности первичных РД при $T=300$ К свидетельствует о том, что основные типы изолированных дефектов в GaAs должны представлять собой комплексы из первичных дефектов, поскольку мелкие легирующие примеси не участвуют в образовании ни центров гашения люминесценции, ни центров компенсации [3, 5].

Исследование процессов отжига РД может дать дополнительную информацию о природе дефектов.

Многочисленные эксперименты свидетельствуют о многообразии типов стабильных РД в GaAs. Особое место среди изолированных дефектов, вводимых при всех видах облучения (исключая нейтронное), занимает группа дефектов, которые исчезают при $T_{отж}=500$ К, и дающих основной вклад в изменение времени жизни и электропроводности. Однако природа этих дефектов окончательно не установлена, не исследованы процессы аннигиляции и перераспределения точечных дефектов в ходе термического отжига указанных типов дефектов.

В связи с этим представляло интерес сравнить процессы отжига РД,

вводимых в активную область исследуемых структур при α -облучении, с процессами отжига РД, вводимых в условиях равномерной генерации первичных дефектов по объему образцов.

Исследование эффекта Холла в структурах, облученных со стороны пленки, показало наличие двух стадий восстановления электрических свойств пленки при $T_1=500$ К и $T_2=620$ К. Эти стадии отжига наблюдались ранее после электронного и протонного облучения, а характер температурных зависимостей подвижности носителей указывал на отжиг изолированных дефектов.

Изменение свойств пленок, облученных со стороны подложек, в ходе изохронного отжига указывает на дальнейшее уменьшение подвижности носителей при $T_{\text{отж}} \geq 500$ К, т. е. в этом случае происходило дальнейшее накопление дефектов (рис. 3). Следовательно, природа дефектов, определяющих основное изменение свойств пленок при различных вариантах облучения, различна. Изменение концентрации и температурных зависимостей подвижных носителей заряда в результате облучения со стороны подложки и последующего отжига указывает на введение областей скопления дефектов n^+ -типа проводимости.

Совокупность экспериментальных результатов по изменению электрических свойств пленок в ходе отжига свидетельствует о том, что основная часть простейших дефектов, высвобождающихся в результате термической диссоциации основных типов радиационных дефектов при $T \approx 500$ К, аннигилирует или исчезает на стоках, а оставшаяся часть мигрирует на значительные расстояния и оседает на нейтральных скоплениях примесей или включениях второй фазы с образованием n^+ -заряженных областей.

Основные результаты, полученные в работе, сводятся к следующему.

1. Получены прямые экспериментальные доказательства подвижности некоторых типов первичных дефектов при $T=300$ К, оценена их энергия активации миграции.

2. Основные типы стабильных при $T=300$ К изолированных радиационных дефектов представляют собой комплексы из собственных структурных дефектов, образующихся диффузионным путем.

3. Процесс отжига комплексов радиационных дефектов определяется их диссоциацией, при этом основная часть точечных дефектов, освобождающихся в результате диссоциации комплексов, аннигилирует или исчезает на стоках, а незначительная часть участвует в формировании n^+ заряженных включений.

Авторы выражают благодарность Ю. С. Емельяненко за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ланг Д.— В кн.: Точечные дефекты в твердых телах.— М., 1979, с. 187.
2. Арёфьев К. П., Брудный В. Н., Будницкий Д. Л., Воробьев С. А., Цой А. А.— ФТП, 1977, т. 13, с. 1142.
3. Ломако В. М., Новоселов А. М.— ФТП, т. 10, с. 900.
4. Сирота Н. Н., Курилович Н. Ф., Гатальский Г. В.— Докл. АН СССР, 1977, т. 232, с. 1062.
5. Кольченко Т. И., Ломако В. М.— ФТП, 1975, т. 9, с. 1757.

НИИ ПФП

УДК 535.44 : 537.868.4

А. П. ХАПАЛЮК

ПОЛНОЕ РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ОДНОРОДНОМ ШАРЕ

Условия реализации полного резонансного поглощения в однородном шаре могут быть так же подробно изучены, как в слое [1] или в цилиндре [2]. Принципиальная схема постановки задачи стандартная: требуется