

УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ В GaAs ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ Ar

Е. А. Боброва, В. С. Вавилов, Г. Н. Галкин, А. В. Спицын

Методами DLTS и C-V характеристик исследованы глубокие уровни дефектов, обусловленные имплантацией аргона в структуры с барьерами Шоттки (Au) на GaAs. Установлено, что при имплантации с дозой $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и энергией 350 кэВ через слой Au толщиной 0,3 мкм дефекты в GaAs образуются на глубине, значительно превышающей средний проецированный пробег ионов.

Эффекты дальнего действия, наблюдавшиеся при ионной имплантации [1, 2], представляют практический и научный интерес. В работе [3] сообщалось о наблюдении дальнего действия в GaAs при имплантации ионов Ar^+ с дозой $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и энергией ионов 40 и 100 кэВ, которое проявлялось, в частности, в изменении концентрации дефектов как вдоль поверхности на расстоянии $\geq 0,5 \text{ мм}$ от границы области имплантации, так и вглубь от имплантируемой поверхности на расстоянии, существенно превышающем пробеги ионов. Изменение концентрации дефектов регистрировалось различными методами, в том числе методом DLTS. Заключение делалось на основе ряда предположений и оценок.

В настоящей работе методами DLTS и C-V характеристик на барьерах Шоттки (БШ) исследовался обнаруженный ранее также методом DLTS [3] эффект дальнего действия. Условия эксперимента выбраны таким образом, чтобы сделать более обоснованными выводы о дальнем действии.

Исследовались эпитаксиальные пленки GaAs толщиной 10 мкм, равномерно легированные донорной примесью с концентрацией $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для интерпретации результатов экспериментально определялась как возможность влияния имплантации вокруг барьера Шоттки на подконтактную область, так и степень проникновения ионов в подконтактную область через защитное покрытие (фоторезист) и металлический контакт

БШ. Для этого использовались различные маски во время имплантации, а также варьировалась энергия имплантации Ar^+ . Перед имплантацией на пластине $GaAs$ были изготовлены напылением слоя Au толщиной $\approx 0,3$ мкм барьеры Шоттки круглой формы с диаметрами 0,65, 1,15 и 2 мм. Толщина пленки Au контролировалась профилометром с точностью $\pm 0,01$ мкм. Затем были подготовлены образцы следующих типов:

1) структура с БШ диаметром 1,15 мм была закрыта маской диаметром 1,2 мм из Al фольги толщиной 0,1 мм. Облучалась только область $GaAs$ вокруг БШ на расстоянии $\approx 0,025$ мм от БШ;

2) пластина $GaAs$ была закрыта маской с отверстием диаметром 1,45 мм над металлическим контактом БШ диаметром 2 мм. Облучалась только незакрытая часть металлического контакта;

3) барьер Шоттки был покрыт слоем фоторезиста толщиной 1 мкм, выступающим за края контакта на 10 мкм, что позволило, в отличие от работы [3], избежать после облучения появления дополнительных токов утечки по периметру структуры. Облучались как поверхность $GaAs$ вокруг БШ, так и металлический контакт через слой фоторезиста. После имплантации фоторезист удалялся.

В образцы проводилась имплантация ионов Ar с дозой $5 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$, превышающей дозу аморфизации $GaAs$. Использовались различные энергии ионов E . При $E = 100$ и 350 кэВ формировались узкие заглубленные слои с дефектами, а при имплантации с распределенной дозой в $GaAs$ ($E = 20 - 60 - 150 - 350$ кэВ) формировался слой с равномерным распределением дефектов. В табл. 1, знаком + отмечены энергии ионов, имплантированных в образцы различных типов.

Т а б л и ц а 1

Энергия ионов при имплантации образцов различного типа

Тип образца	E , кэВ		
	100	350	20-350
1	-	+	-
2	-	-	+
3	+	+	+

Расчетные данные о средних проецированных пробегах (R_p) и их среднем разбросе (ΔR_p) в $GaAs$ и Au [4] приведены в табл. 2. Из табл. 2 следует, что слой Au толщиной 0,3 мкм должен значительно уменьшить как количество ионов, проникающих в подконтактную область, так и их пробег в $GaAs$.

Т а б л и ц а 2

Зависимость R_p и ΔR_p в GaAs и Au от энергии ионов Ar

E , кэВ	GaAs		Au	
	R_p	ΔR_p	R_p	ΔR_p
	мкм	мкм	мкм	мкм
100	0,066	0,036	0,028	0,026
150	0,100	0,050	0,041	0,036
350	0,250	0,100	0,101	0,073

В исходном материале наблюдались два глубоких уровня (ГУ) с энергиями активации $E_c - 0,49$ и $E_c - 0,82$ эВ (рис. 1) и концентрациями $2 \cdot 10^{13}$ и 10^{14} см^{-3} . Их пространственное распределение по толщине пленки, полученное из DLTS измерений, было близко к равномерному.

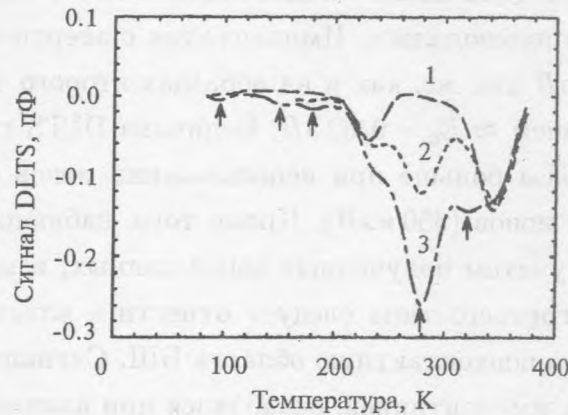


Рис. 1. Спектры DLTS структур с БШ. 1 - исходный образец. Образцы после имплантации ионов Ar⁺ с дозой $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и различными энергиями: 2 - $E = 350$ кэВ, 3 - $E = 20 - 350$ кэВ (распределенная доза).

После имплантации образца первого типа вид спектра DLTS и амплитуда пиков не изменялись. Следовательно, аморфизация GaAs вокруг БШ на расстоянии $\approx 0,025 \text{ мкм}$ от его края и на глубине $\approx 0,025 \text{ мкм}$ не оказывала влияния на свойства подконтактной области. Таким образом, методом DLTS дальное действие вдоль поверхности на расстоянии $\geq 0,025 \text{ мкм}$ от области имплантации в настоящей работе не обнаружено. Заключение об отсутствии дальнего действия вдоль поверхности, сделанное в данной работе на

основе DLTS измерений, вообще говоря, не противоречит результатам, полученным другими методами [3] в силу различия исследуемых характеристик. Выводы об изменении концентрации определенного типа дефектов с энергией уровня $E_c - 0,49$ эВ на расстоянии до 0,5 мкм, основанные на DLTS измерениях в работе [3], в настоящей работе не подтверждаются. Перестройка структуры дефектов под контактом Шоттки в [3], по-видимому, не связана с облучением поверхности вокруг контакта и имеет другую природу, что будет обсуждаться ниже.

На образце второго типа наблюдалось появление дефектов с энергией уровня $\approx E_c - 0,62$ эВ (рис. 1) и сечением захвата $\approx 4 \cdot 10^{-14}$ см², что указывает на проникновение ионов через металлический контакт. Пробег ионов в GaAs после прохождения слой Au толщиной $\approx 0,3$ мкм, по оценкам, не превышает нескольких сотен ангстрем при первоначальной энергии ионов 350 кэВ. При этом расчетное полное число ионов, проникающих в GaAs, составляет не более 10^{12} см⁻².

На образцах третьего типа после имплантации ионов с энергией 100 кэВ изменений в спектре DLTS не наблюдалось. Имплантация с энергией 350 кэВ и энергиями в интервале 20 – 350 кэВ так же, как и на образцах второго типа, приводила к образованию центров с уровнем $\approx E_c - 0,62$ эВ. Величина DLTS сигнала от этих центров была примерно в два раза больше при использовании ионов с набором энергий, чем в случае одной энергии ионов (350 кэВ). Кроме того, наблюдались еще 4 пика малой амплитуды (рис. 1). С учетом полученных выше данных, изменение спектра уровней дефектов на образцах третьего типа следует отнести к влиянию имплантации через фоторезист и слой Au на подконтактную область БШ. Сигнал DLTS для разного типа центров, обусловленных имплантацией, ослаблялся при наличии фоторезиста в 1,2 – 2 раза при использовании набора энергий ионов в интервале 20 – 350 кэВ. Дефекты под БШ возникали, по-видимому, уже при энергии ионов ≈ 150 кэВ, хотя проникновение ионов в GaAs, согласно расчетным данным, практически отсутствует (см. табл. 2). Сигнал DLTS для ГУ с $E_c - 0,62$ эВ увеличивался примерно пропорционально площади БШ, что указывает на образование дефектов под всей площадью контакта и отсутствие краевых эффектов.

Пространственное распределение в пленке GaAs основного типа дефектов с энергией $E_c - 0,62$ эВ оценивалось экспериментально методом C-V характеристик. Имплантация ионов Ar⁺ с энергиями 350 и 20–350 кэВ приводила к изменению C-V характеристик, обусловленному высокой концентрацией центров с глубоким уровнем (рис. 2). Падение емкости при нулевом смещении на структуре (рис. 2, вставка) и, соответственно,

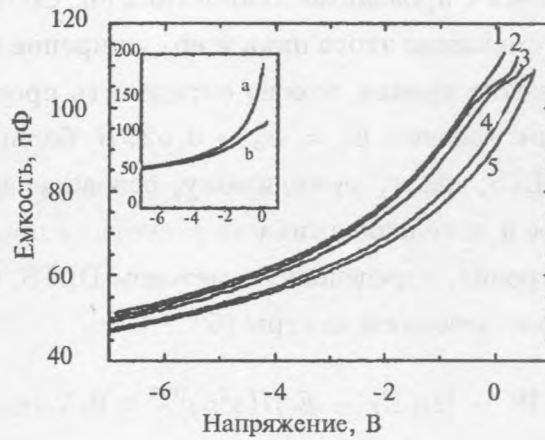


Рис. 2. C - V характеристики структур с БШ, подвергнутых имплантации ионами Ar^+ с распределенной дозой $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ($E = 20\text{--}350 \text{ кэВ}$), при различных температурах: 1 – 330 К; 2 – 270 К; 3 – 230 К; 4 – 170 К; 5 – 130 К. На вставке C - V характеристики структуры с БШ при температуре 270 К: а) до имплантации; б) после имплантации.

увеличение области пространственного заряда указывает на уменьшение концентрации электронов в приповерхностной области БШ и свидетельствует о появлении акцепторных центров с концентрацией соизмеримой с исходным уровнем легирования в $GaAs$. В связи с этим метод DLTS был непригоден для определения профиля распределения центров.

Измерения C - V характеристик проводились на частоте $\approx 800 \text{ кГц}$, на которой отсутствовал отклик глубоких центров на измерительный сигнал во всем интервале температур. При записи C - V характеристик со скоростью развертки напряжения 50 мВ/с наблюдалась ступенька на кривых при температурах $\geq 230 \text{ К}$, связанная с перезарядкой глубоких центров. Ступенька становилась слабо выраженной при температуре 170 К и исчезала при температурах ниже 130 К из-за сильного возрастания времени перезарядки. Столь резкие температурные изменения C - V кривых связаны с активационным характером зависимости времени отклика центров с ГУ от температуры [5]. С повышением температуры ($\geq 330 \text{ К}$) ступенька также более слабо выражена, что, по нашим оценкам, объяснимо температурным смещением уровня Ферми и размытием функции фермиевского распределения заполнения центров. На расчетном профиле концентрации носителей заряда, полученном из анализа C - V данных, наблюдался острый пик (рис. 3), характерный для пространственно локализованных акцепторов с ГУ в структурах

БШ на основе полупроводника с проводимостью n -типа [6]. Соответственно изменению C - V кривых, происходило смещение этого пика и его уширение с ростом температуры. Зная энергетическое положение уровня, можно определить пространственную локализацию центров [6]. Центры с уровнем $E_t = E_c - 0,62 \text{ эВ}$, большой сигнал от которых наблюдался в спектрах DLTS, дают, по-видимому, основной вклад в изменение C - V характеристик, приводящее к появлению пика на расчетном профиле легирующей примеси. Используя энергию уровня, определенную методом DLTS, получим расстояние от поверхности, на котором локализованы центры [6]:

$$L = W - [2\epsilon(E_f - E_t)/(q^2n)]^{0,5} \approx 0,5 \text{ мкм},$$

где W – ширина области пространственного заряда, соответствующая положению пика на расчетном профиле (рис. 3). Величина L существенно превышает величину пробега ионов в $GaAs$ после прохождения их через двухслойное покрытие (фоторезист + Au). Полученные результаты указывают на существование эффекта дальнего действия в направлении имплантации.

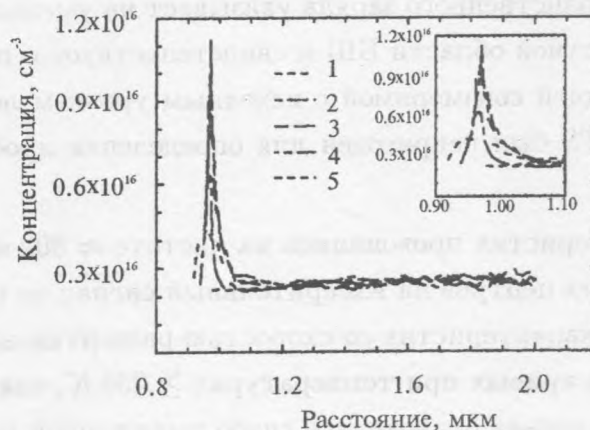


Рис. 3. Профили распределения легирующей примеси, рассчитанные по C - V характеристикам, представленным на рис. 2. Обозначения соответствуют температурам рис. 2.

Необходимо отметить, что методом DLTS исследовались только центры с ГУ в верхней половине запрещенной зоны $GaAs$. Допустив, что основной вклад в изменение C - V характеристики дают центры с уровнем, близким к валентной зоне, получим для L наименьшее возможное значение $\approx 0,13 \text{ мкм}$, которое, тем не менее, сильно превышает

пробег ионов. Для более точных оценок требуются дальнейшие исследования с целью выяснения существования центров в нижней половине запрещенной зоны.

Теоретическое рассмотрение не позволяет из полученных профилей оценить концентрацию акцепторных центров в полупроводнике *n*-типа (это возможно для донорных центров) [6]. Оценки усредненной в области пространственного заряда концентрации акцепторных центров по значению емкости при нулевом смещении на структуре и напряжению отсечки на прямой ветви *I-V* характеристики дают значение около $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. С учетом пространственной локализации центров их реальная концентрация должна быть значительно выше.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о возникновении пространственно локализованных дефектов в *GaAs* на расстояниях от поверхности, существенно превышающих средний проецированный пробег ионов. Эти расстояния сопоставимы с теми, на которых наблюдалась стимулированная поверхностными реакциями перестройка структуры дефектов [7, 8]. Причиной такой перестройки авторы указанных работ считают генерацию подвижных точечных дефектов на поверхности полупроводника. Аналогичные явления наблюдались также при реактивном ионном травлении [1]. В нашем случае, при ионной имплантации, ионы, проникающие в приповерхностный слой *GaAs* после прохождения слоя *Au*, обладают относительно невысокой энергией и, по-видимому, будут создавать в основном простые точечные дефекты, влияние которых подобно тому, что наблюдалось в работах [1, 7, 8]. Возможно также, что наблюдаемый эффект связан с возникающими при имплантации механическими напряжениями. Сравнение с полученными ранее результатами [3] свидетельствует о том, что типы и количество центров с глубокими уровнями, возникающими (результаты данной работы) или исчезающими [3] из-за имплантации через контакт БШ отличаются в различных материалах, что, по-видимому, связано с исходным дефектно-примесным составом.

Авторы благодарят В. А. Дравина за проведение имплантации и связанных с ней расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lee Y. N., Oehrlein G. S., and Ransom C., Radiat. Eff. Defects Solids, **111/112**, 221 (1989).
- [2] Polyaninov A. V., Yanushkevich Y. A., Ivanov L. J., and Gurov K. P., Rad. Effects Express, **2**, 165 (1989).
- [3] Aleshchenko Yu. A. et al., Radiat. Eff. Defects Solids, **25**, 323 (1993).

- [4] Буренков А. Ф., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Темкин М. М.,
Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных
примесей, Минск, БГУ, 1980.
- [5] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках, М., Мир, 1977.
- [6] Schulz M., Appl. Phys., 4, 225 (1974).
- [7] Вяткин А. Ф., Итальянцев А. Г., Копецкий Т. В.,
Мордкович В. Н., Поверхность, 11, 67 (1986).
- [8] Итальянцев А. Г., Митюхляев В. Б., Пашенко П. Б.,
Файфер В. Н., Поверхность, 11, 93 (1988).

Поступила в редакцию 20 февраля 1995 г.