

ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ТРАНСМУТАЦИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

В.А.Быковский, В.И.Хитько
ГП Минский НИИ Радиоматериалов, г. Минск

Проведены комплексные исследования электрофизических и рекомбинационных свойств нейтронно и фотоядерно легированного арсенида галлия. Рассмотрено влияние свойств исходного материала и условий облучения на закономерности пострadiaционного отжига и процессы дефектообразования в трансмутационно легированных монокристаллах и эпитаксиальных слоях GaAs. Обсуждается роль остаточной технологической примеси углерода в процессах радиационного дефектообразования и рассмотрены механизмы излучательной рекомбинации в трансмутационно легированном GaAs.

1. Введение

Интерес к проблеме трансмутационного легирования GaAs под действием облучения тепловыми нейтронами, высокоэнергетическими γ -квантами, α -частицами, протонами обусловлен возможностью получения в результате ядерных реакций однородно легированных монокристаллов и эпитаксиальных структур с точно заданным уровнем легирования мелкими примесями. Практическое получение высококачественных трансмутационно легированных монокристаллов и эпитаксиальных слоев GaAs связано с преодолением ряда трудностей физического, технологического характера и требует углубленного знания физики процессов, протекающих при облучении и пострadiaционном отжиге кристаллов.

В основе нейтронного трансмутационного легирования (НТЛ) GaAs лежат (n, γ) реакции захвата тепловых нейтронов изотопами ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{75}As и в результате β -распада их нестабильных изотопов образуются стабильные изотопы Ge, Se. Возможность фотоядерного легирования (ФЯЛ) GaAs с помощью облучения высокоэнергетическими γ -квантами ($10 < E < 30$ МэВ) обусловлена гигантским дипольным резонансом при котором доминируют реакции с выбиванием только одного нуклона (нейтрона или протона) из ядра. В этих реакциях образуются примеси Zn, Ge и Se.

Сечения ядерных реакций достаточно точно установлены методами ядерной физики. Однако уровни легирования, полученные из сечений реакций, могут отличаться от экспериментальных результатов. Это связано с амфотерными свойствами примеси IV группы Ge, вследствие возможности вхождения в III или V подрешетку в бинарном полупроводнике GaAs. Вторая причина, которая свойственна всем полупроводниковым материалам, связана с взаимодействием трансмутационно вводимых примесей с радиационными дефектами, остаточными примесями и примесно-дефектным взаимодействием в процессе облучения и отжига материалов. В значительной части эти вопросы решались различными исследовательскими группами [1-3].

В настоящей работе проведен систематический анализ методов роста исходных кристаллов и эпитаксиальных структур GaAs, влияния "жесткости" нейтронного спектра, диапазона доз облучения на параметры нейтронно легиро-

ванного GaAs и представлены результаты впервые осуществленного фотоядерного легирования эпитаксиальных слоев GaAs.

2. Методика

Объектами нейтронного легирования являлись специально нелегированные полуизолирующие ($\rho > 10^7$ Ом·см) и n-типа проводимости ($n = 10^{15} - 10^{17}$ см $^{-3}$) объемные монокристаллы, полученные методом Чохральского а также эпитаксиальные слои (ЭС) ($n = 10^{14} - 10^{15}$ см $^{-3}$) выращенные газовой эпитаксией хлоридным и металлоорганическим гидридным методами. Нейтронное легирование осуществлялось в диапазоне флюенсов тепловых нейтронов $\Phi_{\text{th}} = 10^{15} - 10^{19}$ см $^{-2}$ при соотношении плотностей потоков тепловых и быстрых нейтронов ("жесткость" нейтронного спектра) $\Phi_{\text{th}}/\Phi_{\text{f}}$ в диапазоне 1-185. Фотоядерному легированию подвергались ЭС при облучении тормозными γ -квантами быстрых электронов с энергией $E = 30$ МэВ дозой $D = 3 \cdot 10^{19}$ см $^{-2}$. Отжиг образцов проводился в диапазоне температур 50-1000°C с противодавлением паров As.

Применявшийся в работе комплекс методов исследования электрофизических и рекомбинационных свойств трансмутационно легированных материалов включал измерения проводимости и эффекта Холла, анализ спектров фотолюминесценции (ФЛ) и нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Влияние условий облучения и свойств исходного материала на закономерности отжига и электрические параметры нейтронно легированного GaAs

Изменение удельного сопротивления кристаллов GaAs после облучения реакторными нейтронами в одинаковых условиях (Φ_{th} , $\Phi_{\text{th}}/\Phi_{\text{f}}$), зависит от уровня легирования исходных кристаллов и ослабевает с увеличением "жесткости" нейтронного спектра.

Характер восстановления электропроводности НТЛ GaAs при пострadiaционном отжиге зависит как от характеристик исходного материала, так и от "жесткости" нейтронного спектра. Увеличение концентрации электронов в исходных образцах n-типа приводит к более ранней



стабилизации значений ρ , что наиболее отчетливо проявляется при облучении в наиболее "мягком" канале реактора ($\Phi_{th}/\Phi_f = 185$). Облучение более "жестким" нейтронным спектром приводит к высокотемпературному сдвигу кривой отжига. При этом особенности, обусловленные различием уровней легирования, ослабевают и после облучения при $\Phi_{th}/\Phi_f = 10$ практически отсутствуют. Увеличение температуры восстановления электрических параметров НТЛ полуизолирующего GaAs по сравнению с аналогично облученными образцами n-типа связано с особенностями примесно-дефектного состава полуизолирующих кристаллов. Данные факты свидетельствуют о том, что спектр вводимых радиационных повреждений при трансмутационном легировании GaAs зависит от положения уровня Ферми в облучаемых образцах. Результирующий уровень легирования НТЛ GaAs в использованных условиях облучения ($\Phi_{th} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $\Phi_{th}/\Phi_f = 10-185$) не зависит от "жесткости" нейтронного спектра, а определяется наряду с флюенсом тепловых нейтронов величиной исходного уровня легирования образцов до облучения.

Характер восстановления концентрации электронов при изохронном отжиге в целом сходен с восстановлением удельного сопротивления. Изменение холловской подвижности μ_h при отжиге в большей степени зависит от условий облучения, чем от свойств исходных кристаллов. Восстановление подвижности в образцах, облученных при $\Phi_{th}/\Phi_f = 185$ происходит в две стадии при температурах отжига 250 - 300°C и 450 - 500°C, тогда как для кристаллов, облученных при $\Phi_{th}/\Phi_f = 10$, при температурах отжига 200 - 400°C наблюдается резкий минимум зависимости $\mu_h(T_{отж})$, что обусловлено обратной конверсией типа проводимости p-n.

Облучение флюенсами $\Phi_{th} = (1-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ полуизолирующих кристаллов GaAs не приводит к утрате ими полуизолирующих свойств после пострadiационного отжига, что связано с захватом носителей с трансмутационно активированных примесей на уровне собственных глубоких дефектов исходного материала. В тоже время нейтронное легирование флюенсами $\Phi_{th} = 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ приводит к проводимости p-типа с концентрацией дырок $\approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Увеличение облучающего флюенса вызывает компенсацию дырочной проводимости, и при $\Phi_{th} > 10^{17} \text{ см}^{-2}$ кристаллы характеризуются проводимостью n-типа.

Зависимость $\rho(\Phi_{th})$ для НТЛ полуизолирующих кристаллов объясняется изменением в процессе трансмутационного легирования и последующего отжига баланса глубоких, мелких примесных и дефектных уровней, обуславливающих полуизолирующие свойства исходных кристаллов.

Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных уровней легирования (отклонение менее 10%) отожженных НТЛ кристаллов GaAs имеет место в диапазоне флюенсов тепловых нейтронов $\Phi_{th} = 2 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. "Дефицит" концентрации электронов в НТЛ GaAs при боль-

ших уровнях трансмутационного легирования ($\Phi_{th} > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$), сопровождающийся увеличением степени компенсации Na/Nd и приводящий к фактическому насыщению зависимости $\rho(\Phi_{th})$, обусловлен процессами комплексобразования с участием трансмутационно вводимых мелких примесей Ge и Se.

Однородность распределения электрофизических свойств (ρ , p , μ) трансмутационно легированного GaAs возрастает по мере увеличения кратности легирования (отношение $n_{НТЛ}/n_{исх}$). Нейтронно легированные эпитаксиальные сплои GaAs превосходят по однородности ЭС аналогичного уровня легирования, полученные методами газовой эпитаксии.

3.2. Рекомбинационные свойства эпитаксиальных слоев и кристаллов НТЛ GaAs

В спектрах ФЛ ЭС облученных флюенсами тепловых нейтронов $\Phi_{th} < 10^{17} \text{ см}^{-2}$ акцепторная локализация трансмутационной примеси Ge проявляется полосой межпримесных переходов D,e,A(Ge) сразу после облучения и остается стабильной до заключительной стадии отжига при $T = 500-600^\circ\text{C}$. Интенсивность полосы излучения D,e,A(C) с участием акцепторов углерода для ЭС отожженных при $T = 500^\circ\text{C}$ близка к интенсивности экситонных полос D,X; X. Этот результат может быть объяснен радиационно-стимулированной диффузией остаточной технологической примеси углерода из подложки в эпитаксиальный слой.

В спектрах ФЛ исходных слаболегированных и полуизолирующих кристаллов после облучения флюенсом тепловых нейтронов $\Phi_{th} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при различных соотношениях $\Phi_{th}/\Phi_f = 10-185$ восстановление рекомбинационного излучения происходит после отжига при $T = 350 - 400^\circ\text{C}$ в прямой зависимости от жесткости нейтронного спектра. Акцепторная локализация трансмутационной примеси Ge в виде полосы D,e,A(Ge) наблюдается вплоть до температур отжига 700°C . Стационарное значение интенсивности краевой полосы излучения D,h для всех исследованных образцов достигается после отжига при $T = 700^\circ\text{C}$. В процессе отжига НТЛ кристаллов наблюдалась перестройка примесной полосы излучения D,e,A с характерной стадией отжига при $T = 600-800^\circ\text{C}$. Трансформация примесной полосы в процессе отжига НТЛ GaAs, заключающаяся в доминировании на начальных стадиях отжига (до $T = 400-600^\circ\text{C}$) полосы излучения D,e,A(Ge), связанной с трансмутационными акцепторами Ge, в то время как максимум примесной полосы после отжига при $T > 600^\circ\text{C}$ соответствует межпримесным излучательным переходам D,e,A(C) с участием остаточных акцепторов углерода, может быть объяснена комплексобразованием атомов углерода с радиационными дефектами. Распад данных комплексов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации, происходит при температурах отжига $T = 600-800^\circ\text{C}$.

Особенностью НЕСГУ-спектров является присутствие пика, соответствующего ловушке P1 ($E_a = 0,36 \text{ эВ}$), и так называемой U-полосы



($E_a = 0,6$ эВ), связываемой с областями разупорядочения. Значительный рост интенсивности U-полосы при увеличении "жесткости" нейтронного спектра свидетельствует о доминирующем вкладе в U-полосу дефектов, создаваемых быстрыми нейтронами. В облученных "жестким" нейтронным спектром ($\phi_{th}/\phi_f = 1$) полуизолирующих кристаллах U-полоса больше по амплитуде, а ее максимум сдвинут в сторону низких температур по сравнению с НТЛ кристаллами п-типа, что свидетельствует в пользу того, что спектр дефектов в U-полосе зависит от положения уровня Ферми и типа мелких фоновых примесей в исходном необлученном материале. В процессе отжига происходит уменьшение амплитуды U-полосы наряду со смещением ее максимума в сторону высоких температур, что свидетельствует о перестройке U-полосы. Термообработка при $T = 550^\circ\text{C}$ приводит к исчезновению U-полосы.

3.3. Фотоядерно легированные эпитаксиальные слои GaAs

Облучение тормозными γ -квантами приводит к значительному росту (около трех порядков величины) удельного сопротивления слоев. Восстановление электрофизических свойств ФЯЛ GaAs происходит при температурах $T = 200-500^\circ\text{C}$. Отличия характера отжига ФЯЛ ЭС от случая облучения γ -квантами ^{60}Co ($E = 1,2$ МэВ) связаны с введением при облучении высокоэнергетическими γ -квантами ($10 < E < 30$ МэВ) разупорядоченных областей.

Проведенная оценка из электрофизических измерений суммарной концентрации ионизованных примесей в исходных и легированных образцах показала увеличение $N = N_d + N_a$ от $1,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $3,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, сопровождающееся ростом степени компенсации N_a/N_d от 0,7 до 0,85. Установить химическую природу компенсирующих примесей позволило исследование спектров ФЛ.

Существенной особенностью спектров ФЛ фотоядерно легированных ЭС является присутствие полос излучения, связанных с примес-

ными и межпримесными переходами с участием трансмутационных акцепторов цинка хотя обнаружить полосы излучения с участием трансмутационных акцепторов Ge не удалось вследствие их низкой концентрации и присутствия в данной области спектра интенсивного фоновонного повторения экситонных линий. Обнаружено, что в отличие от исходных ЭС в спектрах ФЛ облученных и отожженных образцов отчетливо проявляются примесные полосы с участием акцепторов углерода, что обусловлено, как и в случае НТЛ слоев GaAs, радиационно-стимулированной диффузией остаточных технологических акцепторов углерода из подложечного материала в эпитаксиальный слой в процессе облучения. Компенсация ЭС GaAs при ФЯЛ обусловлена введением трансмутационных акцепторов Zn и радиационно-стимулированной диффузией акцепторов углерода.

Исследование спектров глубоких центров показывает, что основную роль в процессе пострадиационного отжига ФЯЛ ЭС GaAs играет изменение концентраций ловушек P1 ($E_a = 0,36$ эВ) и P2 ($E_a = 0,48$ эВ). Центр P1 является вторичным радиационным дефектом, отжигающимся при температуре $T = 650^\circ\text{C}$. Данная ловушка является наиболее термостабильной из всех центров радиационного происхождения, наблюдаемых в трансмутационно легированном GaAs. Ловушка P2 исчезает после отжига при температуре $T = 600^\circ\text{C}$. Соотношение скоростей введения ловушек P2 и P3 ($E_a = 0,75$ эВ) зависит от уровня легирования исходных ЭС. Предположительно центры P1 и P2 являются примесно-дефектными комплексами, включающими атомы остаточных технологических примесей.

Список литературы

1. Легирование полупроводников методом ядерных реакций // Под ред. Л.С.Смирнова.- Новосибирск: Наука, 1981, с.182
2. Колин Н.И. и др. // ФТП.-1981. Т.15. - N3. - С.565.
3. Быковский В.А. и др. // ФТП. - 1989. Т.23. - N1.- С.79.

PHYSICS AND TECHNOLOGY OF THE TRANSMUTATION DOPING OF GALLIUM ARSENIDE

V.A.Bykovsky, V.I.Khit'ko
Research Institute of Radiomaterials, Minsk

Combined investigation of electrophysical and recombination properties of neutron (NTD) and photonuclear (PTD) transmutation doped GaAs crystals and epilayers was carried out using conductivity and Hall effect measurements, low temperature photoluminescence and deep level transient spectroscopy methods. The effect of starting GaAs properties and irradiation conditions on post irradiation annealing characteristic features and defect formation processes in NTD GaAs single crystals and epilayers was investigated. Residual carbon impurity influence in the processes of radiation induced defect (RID) formation in transmutation doped GaAs is discussed. The mechanisms of radiative recombination and impurity-defect structure of NTD GaAs are considered. For the first time there were studied characteristic features of electrophysical and recombination properties recovery during isochronous annealing process of GaAs epilayers, which were irradiated with the aim of transmutation doping by bremsstrahlung of fast electrons. Impurity-defect structure of PND GaAs epilayers is considered.

3-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» 6-8 октября 1999 г. Минск Беларусь
3-d International Conference «Interaction of Radiation with Solids» October 6-8 1999 Minsk Belarus



This document has been edited with Infix PDF Editor - free for non-commercial use.

To remove this notice, visit: www.iceni.com/unlock.htm