

УДК 539.2: 539.107.6

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ДИФФУЗИЯ УГЛЕРОДА И КИСЛОРОДА В АРСЕНИД ГАЛЛИЯ

Л. Е. Кузьмин, А. М. Казанцев, В. В. Тишин

С использованием ядерных реакций $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$ и $^{16}\text{O}(d, p_0)^{17}\text{O}$ исследована миграция атомов углерода и кислорода в сколах кристаллов GaAs при облучении пучком дейтронов с энергией 0.6 МэВ и дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Обнаружено резкое повышение диффузионной способности атомов углерода и кислорода, сорбированных на поверхности скола, которые мигрируют к стокам дефектов в области упругих напряжений вблизи максимума концентрации вакансий, генерируемых дейтронами.

Радиационно-индуцированная диффузия (РИД) газообразующих примесей в полупроводники при ионном легировании или создании высокоомных слоев внутри кристаллов ионным облучением представляет значительный интерес, поскольку данный процесс может приводить к существенному изменению электрофизических характеристик полупроводниковых приборов [1, 2]. Особое значение РИД имеет для GaAs , кристаллы которого в результате низкой температуры разложения ($\sim 600^\circ\text{C}$) требуют применения перед ионной обработкой и отжигом защитных покрытий (SiO_2 , Si_3N_4 и др.), получаемых в низкотемпературных процессах (например, ионное или лазерное напыление). При этом примеси углерода и кислорода могут находиться как в самом покрытии, так и на границе раздела покрытие – кристалл. Ранее, методом ядерного микроанализа с использованием ядерной реакции $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$ нами была обнаружена высокая при $\sim 100^\circ\text{C}$ диффузия углерода из поверхностного слоя в кристаллы оливинов под действием пучков дейтронов с энергией $E = 1.4 \text{ МэВ}$ при дозах $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ [3].

В настоящей работе метод ядерного микроанализа применен для исследования миграции атомов углерода и кислорода в сколах кристаллов GaAs . Работа проводилась на электростатическом ускорителе ЭГ-2 (ИЯИ РАН) на пучке дейтронов размером

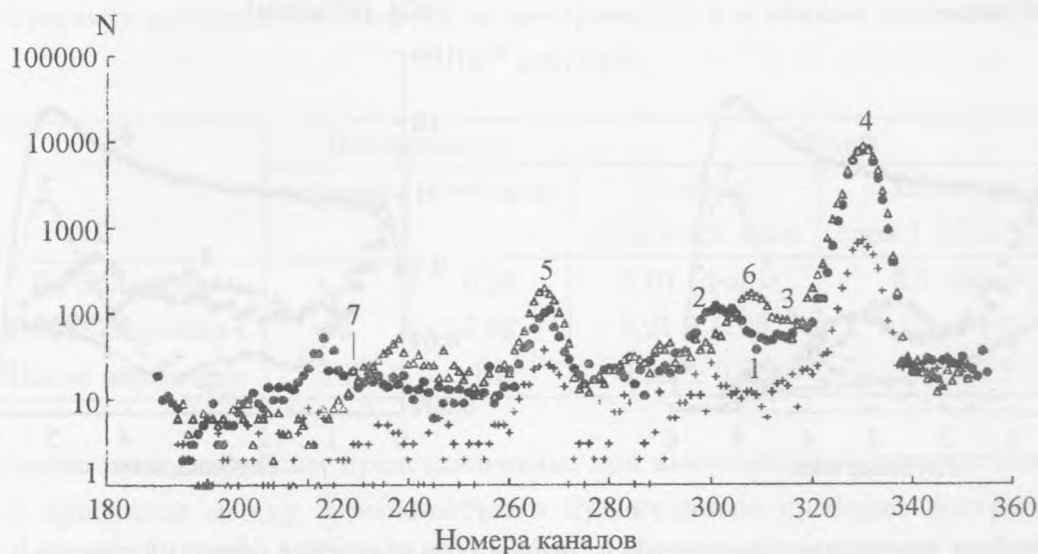


Рис. 1. Энергетические спектры протонов ядерных реакций $^{12}\text{C}(d,p)^{13}\text{C}$ и $^{16}\text{O}(d,p)^{17}\text{O}$. 1 – до облучения; 2 – после облучения; 3 – после выдержки; 4 и 5 – пики от поверхностного углерода и кислорода соответственно; 6 и 7 – области объемного углерода и кислорода соответственно. N – число отсчетов на канал.

$2 \times 2 \text{ мм}^2$. Регистрация протонов реакций $^{12}\text{C}(d,p)^{13}\text{C}$ и $^{16}\text{O}(d,p)^{17}\text{O}$ осуществлялась кремниевым поверхностно-барьерным полупроводниковым детектором с поглотителем обратнорассеянных дейтронов (пленка майлара 24 мкм). Скалывание образцов проводили на воздухе, после чего образцы помещали в аналитическую камеру с азотной ловушкой и откачивали до $1 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ турбомолекулярным и магниторазрядными насосами. Энергетические спектры протонов измеряли при энергии дейтронов $E_0 = 1.6 \text{ МэВ}$, токе пучка $I = 25 \text{ нА}$ и дозе 120 мкКл . Непосредственно после измерения исходного (первого) спектра, образец облучали молекулярным пучком дейтронов (D_2^+) с энергией $E_0 = 0.6 \text{ МэВ/дейтрон}$ при том же токе дозой 160 мкКл ($5 \cdot 10^{16} \text{ ат/см}^2$). Сразу после облучения проводили измерение второго спектра. После напуска атмосферы в аналитическую камеру и выдержки при нормальных условиях в течение 24 часов без изменения положения образца проводили третье измерение. Полученные энергетические спектры в области вышеуказанных реакций представлены на рис.1. Рассчитанные по программе BEAM EXPERT [4] профили концентрации атомов углерода и кислорода для всех спектров приведены на рис. 2, 3. Относительная погрешность определения концентрации в

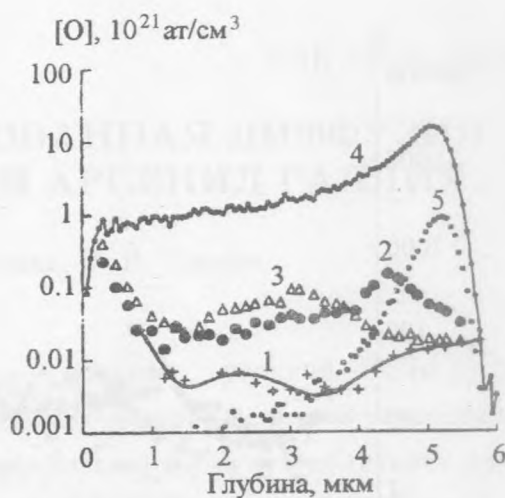
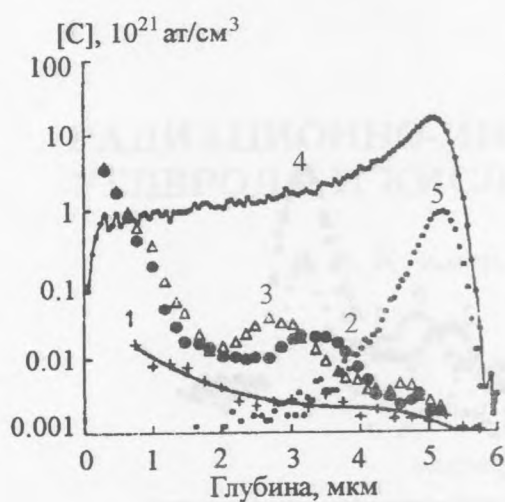


Рис. 2. Профили концентрации углерода в GaAs. 1 – до облучения (фоновый уровень); 2 – после облучения; 3 – после выдержки; 4 – распределение вакансий (TRIM-98); 5 – распределение внедренных атомов дейтерия (TRIM-98).

Рис. 3. Профили концентрации кислорода в GaAs. 1 – до облучения (фоновый уровень); 2 – после облучения; 3 – после выдержки; 4 – распределение вакансий (TRIM-98).

каждой точке профиля не превышала 20%. Там же представлены данные, полученные с помощью программы TRIM-98, по распределению вакансий, генерируемых дейтронами с энергией 0.6 МэВ. Содержания углерода и кислорода на поверхности, рассчитанные из площади соответствующих пиков реакций $^{12}\text{C}(d, p)^{13}\text{C}$ и $^{16}\text{O}(d, p_0)^{17}\text{O}$ (рис. 1), а также интегральные содержания атомов C и O в объеме кристалла после облучения и выдержки (за вычетом фона) приведены в табл. 1.

Из полученных экспериментальных результатов видно, что после облучения содержания углерода и кислорода как на поверхности, так и в приповерхностном слое толщиной $\sim 2.5 - 4$ мкм резко возросли, причем в объеме при суточной выдержке в атмосфере они практически не изменились. Максимум кривой для углерода (рис. 2) находится ближе к поверхности, чем максимум для кислорода (рис. 3), который расположен на глубине, соответствующей максимальному градиенту концентрации вакансий. После выдержки наблюдается обратная диффузия атомов углерода и кислорода. Полученный результат, воспроизведенный несколько раз на разных сколах, по-видимому, может быть объяснен следующим образом.

Т а б л и ц а 1

Содержание углерода и кислорода на поверхности и в объеме кристалла GaAs,
 10^{16} ат/см²

	Поверхность		Объем	
	углерод	кислород	углерод слой 2-4.5 мкм	кислород слой 1.5-5.5 мкм
До облучения	1.3	0.24	0.07 (фон)	0.3 (фон)
После облучения	16	0.82	0.21 ± 0.05	1.7 ± 0.2
После выдержки	18	1.6	0.28 ± 0.05	1.4 ± 0.2

Согласно существующим представлениям, при высокодозовой имплантации легких ионов в кристалле между поверхностью и проективным пробегом дейтронов могут существовать три дефектных слоя. Первый – это приповерхностная область скола, характеризующаяся наличием напряжений и являющаяся стоком дефектов, второй – разупорядоченная (или аморфная) область на конце пробега дейтронов (в данном случае 5.05 ± 0.35 мкм). Третий слой образуется на границе раздела разупорядоченная область – кристаллическая матрица и также характеризуется высокими напряжениями. Стремление системы к равновесию приводит к возникновению в этом слое заряда и соответственно к резкому повышению диффузионной способности атомов углерода и кислорода, сорбированных на поверхности скола, которые мигрируют к стокам дефектов. Можно предположить, что геттером для углерода, как электронейтрального атома, является область упругих напряжений, расположенная ближе к поверхности, чем максимум концентрации вакансий. Электроотрицательные атомы кислорода, взаимодействуя с вакансиями, образуют комплексы, которые стабилизируются вблизи этого максимума. Поэтому сегрегация атомов углерода и кислорода происходит на различных глубинах. При выдержке в течение 24 часов происходит частичный отжиг дефектов в области проективного пробега дейтронов и возрастает роль поверхности как геттера для примесных атомов. Это приводит к обратной диффузии углерода и кислорода. Согласно полученным результатам (табл. 1), поступление кислорода из вакуумной системы происходит непрерывно в процессе облучения, в то время как углерод внедряется в кристаллическую решетку из 1-2 монослоев на границе раздела углеродная пленка – поверхность скола. Пленка образуется из сорбированных углеводородов, содержащихся в вакуумной системе при полимеризации ионным пучком.

Следует отметить, что в большинстве работ механизм РИД в полупроводниках изу-

чался путем косвенных электрофизических измерений. В настоящей работе РИД исследована *in situ* с использованием пучка дейтронов как для генерации дефектов, так и прямого измерения профилей концентрации газообразующих примесей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вопросы радиационной технологии полупроводников. Под ред. Л.С. Смирнова. Новосибирск, Наука, 1980.
- [2] Вавилов В.С., Кив А.Е., Ниязова О.Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М., Наука, 1981.
- [3] Кузьмин Л.Е., Шилобреева С.Н., Казанцев А.М., Минаев В.М. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9, 12 (1998).
- [4] Kogan D.L., Kazantsev A.M., and Kuzmin L.E. Nucl. Instrum. Methods, **B88**, 495 (1994).

Институт ядерных исследований РАН

Поступила в редакцию 14 декабря 1999 г.