

УДК 621.039.531:539.534.9

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МЕТАЛЛОВ ИОНАМИ РАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (H, He, Ar, C, N)

С.Н. Коршунов, Ю.В. Мартыненко, В.Г. Столярова (РНИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия)

Проведено исследование некоторых особенностей синергетических эффектов, обусловленных облучением металлов ионами разных элементов. Облучение образцов проводилось на ускорителе ИЛУ ионами He^+ , Ar^+ , C^+ и N^+ энергией 40 кэВ до доз в интервале $(1-2)10^{21} \text{ м}^{-2}$ при плотности ионного тока от 0,4 до 0,8 А/м², а также ионами H^+ энергией 20 кэВ до дозы 10^{22} м^{-2} при плотности ионного тока 0,8 А/м². Температура в процессе облучения не превышала 670 К. В работе использованы плоские образцы из технического никеля марки НП-2 размером 10×10×0,5 мм. Синергетические эффекты при облучении ионами H^+ , He^+ , C^+ исследованы также на никелевых образцах с нанесённым углеродным покрытием толщиной ~100 нм. Методами ВИМС и оже-спектроскопии получены профили распределения внедрённых атомов гелия, углерода и азота в никеле для различных комбинаций внедрения ионов H^+ , He^+ , Ar^+ , C^+ и N^+ . В результате проведённого анализа обнаружены две основные тенденции в изменении профилей распределения основных внедрённых элементов — углерода и азота. Предварительное облучение образцов ионами инертных газов (Ar и He) способствует сдвигу основных максимумов профилей распределения атомов C и N в сторону поверхности и образованию менее выраженного второго максимума на глубине. Финишное облучение образцов ионами H^+ приводит к уменьшению максимальной концентрации углерода и азота и сдвигу профилей распределения атомов C и N вглубь образцов. Под нанесённой на никель углеродной плёнкой после облучения ионами He^+ , C^+ и H^+ образуется слой толщиной около 200 нм, обогащённый углеродом до 20% ат. Наблюдаемые трансформации профилей распределения внедрённых атомов могут быть связаны с образованием дополнительной системы ловушек—стоков (дислокационная, гелий-вакансионная и пузырьковая структуры) для внедрённых атомов углерода и азота, созданной облучением ионами инертных газов. Обсуждаются разные механизмы увеличения подвижности внедрённых атомов углерода и азота водородным пучком.

Ключевые слова: ионное облучение, внедрённые атомы, синергетические эффекты, профиль распределения атомов, углеродная плёнка.

SYNERGETIC EFFECTS AT METALS IRRADIATION BY IONS OF DIFFERENT ELEMENTS (H, He, Ar, C, N). S.N. KORSHUNOV, Yu.V. MARTYENKO, V.G. STOLYAROVA. The study of some peculiarities of synergetic effects caused by metal irradiation by ions of different elements had been carried out. Samples irradiation was being performed in an accelerator ILU with 40 keV energy He^+ , Ar^+ , C^+ and N^+ ions to doses range $(1-2)10^{21} \text{ м}^{-2}$ at ions current density from 0,4 to 0,8 A/m² and also with 20 keV energy H^+ ions up to dose 10^{22} м^{-2} at ions current density 0.8 A/m². The temperature of the samples during irradiation did not exceed 670 K. Flat samples of technical nickel NP-2 with dimensions of 10×10×0.5 mm³ were used. Synergetic effects under H^+ , He^+ and C^+ ions irradiation were also studied on nickel samples coated with the carbon film of ~100 nm thickness. The distribution profiles of implanted helium, carbon and nitrogen atoms into nickel for various combinations of H^+ , He^+ , Ar^+ , C^+ and N^+ ions implantation were obtained by SIMS and Auger spectroscopy methods. Analysis of results showed two major trends in the change of distribution profiles of main implanted elements — carbon and nitrogen. Preliminary samples irradiation by inert gas (Ar and He) ions promotes the shift of main peaks in the distribution profiles of C and N atoms toward the surface and the formation of less pronounced second peak of these elements at the depth. Post-irradiation of the samples by H^+ ions results in maximal concentration decrease of carbon and nitrogen and promotes C and N distribution profiles shift toward the depth of the samples. After He^+ , C^+ and H^+ ions irradiation a layer of about 200 nm thickness enriched with carbon up to 20% at. is formed under the carbon film deposited on nickel. The observed transformations of distribution profiles of implanted atoms can be associated with the formation of additional system of traps-sinks (dislocation, He-vacancy complexes and bubble structures) for implanted carbon and nitrogen atoms under inert gas ions irradiation. Different mechanisms of implanted carbon and nitrogen atoms mobility enhancement caused by hydrogen beam are discussed.

Key words: ion irradiation, implanted atoms, synergetic effects, atom distribution profile, carbon film.

ВВЕДЕНИЕ

Последние исследования [1] показали, что углерод будет присутствовать в плазме, даже в токамаке без графитовых частей (например, в ИТЭР на тритиевой стадии, когда обращённые к плазме элементы реактора будут выполнены полностью из вольфрама), если перед этим использовались графитовые части токамака. Весьма вероятно и присутствие азота в вакуумной камере ТЯР, поскольку, как продемонстрировано в экспериментах [2], напуск азота в диверторную область токамака ASDEX уменьшает амплитуду локальных неустойчивостей, так называемых ELMов (Edge Localized Mode). В токамаке возможны также другие примеси, например Ar и Ne, которые используются для охлаждения краевой плазмы и сильно влияют на эрозию и накопление изотопов водорода в материалах [3]. Поэтому представляет интерес исследование синергизма воздействия ионов H, He, Ar, C, N на материалы, в том числе и конструкционные стали, используемые для вакуумного корпуса токамаков.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исследуемого материала, моделирующего поведение большинства конструкционных сталей, выбран технический никель НП-2 (Ni — 99,5% мас., Fe — 0,1% мас., Cu — 0,1% мас., Mg — 0,1% мас., Mn — 0,1% мас., Si — 0,05% мас. и др.). В экспериментах использованы плоские никелевые образцы размером $10 \times 10 \times 0,5$ мм, предварительно отожжённые ($T = 1170$ К, $t = 1$ ч) в вакууме 10^{-3} Па. Для подготовки поверхности образцов применялись стандартные процедуры полировки.

Облучение образцов проводилось на ускорителе ИЛУ [4] моноэнергетическими ионами H^+ энергией 20 кэВ до дозы 10^{22} м^{-2} при плотности ионного тока $0,8$ $\text{А}/\text{м}^2$, ионами He^+ энергией 40 кэВ до дозы 10^{21} м^{-2} при плотности ионного тока $0,4$ $\text{А}/\text{м}^2$, ионами Ar^+ энергией 40 кэВ до дозы 10^{21} м^{-2} при плотности ионного тока $0,8$ $\text{А}/\text{м}^2$, ионами C^+ энергией 40 кэВ до дозы 10^{21} м^{-2} при плотности ионного тока $0,5$ $\text{А}/\text{м}^2$ и ионами N^+ энергией 40 кэВ до дозы $2 \cdot 10^{21}$ м^{-2} при плотности ионного тока $0,8$ $\text{А}/\text{м}^2$. Независимо от вида бомбардирующих ионов температура образцов в процессе облучения не превышала 670 К. Для исследования синергетических эффектов при воздействии ионов разных элементов использованы следующие комбинации ионного внедрения: He + H; He + N; He + N + H; Ar + N; Ar + N + H; He + C; He + C + H. Приведённые обозначения комбинаций ионного внедрения указывают и на соответствующую последовательность облучения ионами разных элементов.

Распределения гелия по глубине получены методом ВИМС с использованием послойного анализа при распылении поверхностного слоя образцов ионами Ar^+ энергией 3—5 кэВ со скоростью 0,05—0,1 нм/с. Эксперименты проводились в высоковакуумной камере, оборудованной источником распыляющих ионов и квадрупольным анализатором. Профили распределения атомов углерода и азота по глубине измерены методом оже-спектроскопии на спектрометре РНИ 548 с послойным анализом за счёт распыления поверхности анализируемого материала 3 кэВ-ными ионами Ar^+ .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены профили распределения гелия в никеле, облучённом ионами He^+ энергией 40 кэВ до дозы 10^{21} м^{-2} (кривая 1), а также последовательно ионами He^+ энергией 40 кэВ до дозы 10^{21} м^{-2} и затем ионами H^+ энергией 20 кэВ до дозы 10^{22} м^{-2} (кривая 3) при температуре, не превышающей 670 К. Для сравнения на рис. 1 приведены данные расчёта для профиля распределения гелия (He^+ , 40 кэВ) в никеле по программе TRIM при комнатной температуре (кривая 2).

Расчётная и экспериментальная кривые несколько отличаются друг от друга вследствие термодиффузионного расширения профиля с ростом температуры облучения. Трансформация (уширение в глубину) профиля атомов гелия в результате воздействия водородного пучка (см. рис. 1, кривая 3) достаточно уверенно указывает на вынос почти 20% атомов гелия из зоны (ΔR_p) максимальной концентрации на ~ 100 нм вглубь материала. При этом положение максимума распределения не меняется, но значение максимальной концентрации уменьшается на $\sim 12\%$.

Значительно более ярко выраженные синергетические эффекты проявляются при перераспределении таких внедрённых примесей, как углерод и азот, под действием предварительного облучения ионами инертных газов (He^+ и Ar^+) и последующего воздействия пучка ионов H^+ .

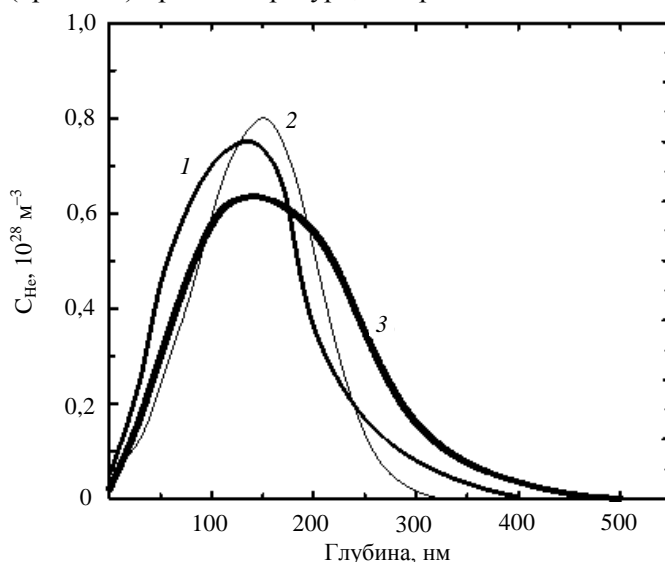


Рис. 1. Профили распределения гелия в никеле после облучения ионами He^+ и H^+ при $T \leq 670$ К: 1 — ионы He^+ ($E = 40$ кэВ, $D = 10^{21}$ м^{-2}); 2 — расчёт по программе TRIM; 3 — ионы He^+ ($E = 40$ кэВ, $D = 10^{21}$ м^{-2}), затем ионы H^+ ($E = 20$ кэВ, $D = 10^{22}$ м^{-2})

На рис. 2, а показаны профили распределения атомов азота в никеле после последовательного облучения сначала ионами He^+ (40 кэВ , 10^{21} м^{-2}), затем ионами N^+ (40 кэВ , $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$) и окончательно ионами H^+ (20 кэВ , 10^{22} м^{-2}) при $T \leq 670 \text{ К}$.

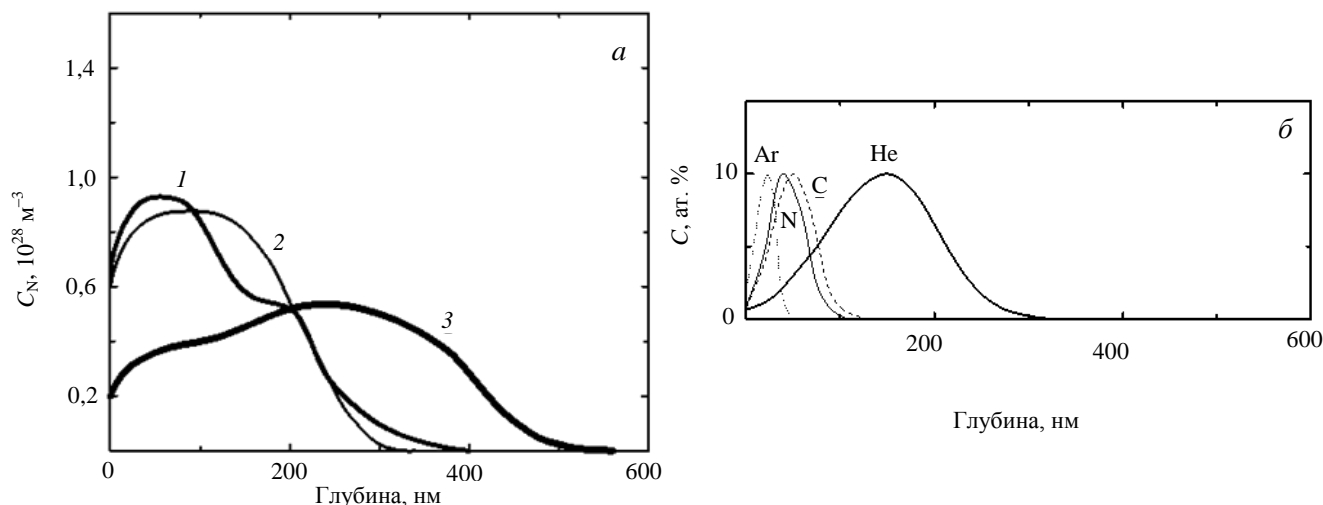


Рис. 2. Профили распределения азота в никеле после облучения ионами He^+ , N^+ и H^+ при $T \leq 670 \text{ К}$ (а): 1 — ионы He^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы N^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$); 2 — ионы N^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$); 3 — ионы He^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы N^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$) и ионы H^+ ($E = 20 \text{ кэВ}$, $D = 10^{22} \text{ м}^{-2}$); б — расчёт профилей распределения атомов He, Ar, C и N в никеле по программе TRIM

Предварительное облучение ионами He^+ смещает положение основного максимума распределения атомов азота ближе к поверхности со 100 до 50 нм, что практически совпадает с положением максимума профиля распределения атомов азота, рассчитанного по программе TRIM (см. рис. 2, б). На глубине $\sim 200 \text{ нм}$ проявляется менее выраженный второй максимум распределения азота по глубине (см. рис. 2, а, кривая 1). Последующее облучение ионами H^+ ($E = 20 \text{ кэВ}$, $D = 10^{22} \text{ м}^{-2}$) ведёт к значительному перераспределению внедрённых атомов азота вглубь материала: наблюдается слабо выраженный первый максимум на глубине $\sim 50 \text{ нм}$ и пологий второй максимум на глубине $\sim 250 \text{ нм}$ (см. рис. 2, а, кривая 3), причём значение максимальной концентрации понижается почти на 80%.

На рис. 3, а представлены профили распределения атомов азота в никеле после последовательного облучения ионами Ar^+ (40 кэВ , 10^{21} м^{-2}), N^+ (40 кэВ , $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$) и H^+ (20 кэВ , 10^{22} м^{-2}) при $T \leq 670 \text{ К}$.

Трансформация профилей распределения атомов азота в результате предварительного облучения ионами Ar^+ имеет аналогию с перераспределением азота при начальном облучении ионами He^+ . Наблюдается раздвоение профиля с образованием двух хорошо различимых максимумов на глубине ~ 40 и $\sim 180 \text{ нм}$. Облучение ионами H^+ ($E = 20 \text{ кэВ}$, $D = 10^{22} \text{ м}^{-2}$) понижает уровень максимальной концентрации атомов азота, уширяет профиль распределения, почти на 100 нм сдвигая его правую ветвь вглубь образца.

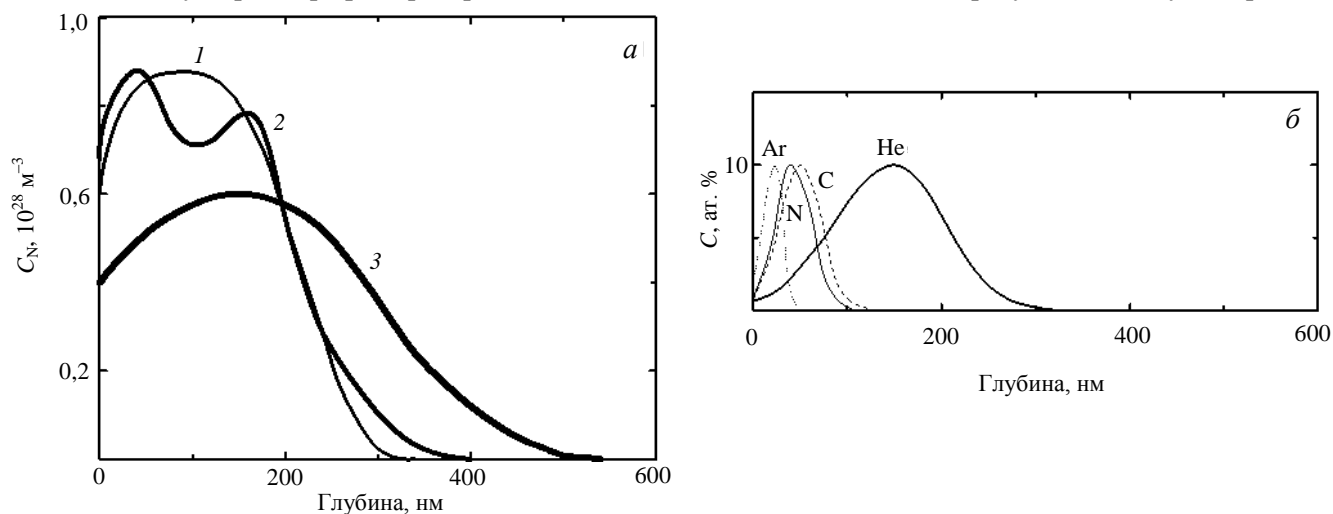


Рис. 3. Профили распределения азота в никеле после облучения ионами Ar^+ , N^+ и H^+ при $T \leq 670 \text{ К}$ (а): 1 — ионы N^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$); 2 — ионы Ar^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы N^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$); 3 — ионы Ar^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы N^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$) и ионы H^+ ($E = 20 \text{ кэВ}$, $D = 10^{22} \text{ м}^{-2}$); б — расчёт профилей распределения атомов He, Ar, C и N в никеле по программе TRIM

На рис. 4, *a* показаны профили распределения атомов углерода в никеле после последовательного облучения ионами He^+ (40 кэВ, 10^{21} м^{-2}), C^+ (40 кэВ, 10^{21} м^{-2}) и H^+ (20 кэВ, 10^{22} м^{-2}) при $T \leq 670 \text{ К}$.

Сравнение профилей распределения атомов N и C, приведённых на рис. 2, *a* и 4, *a*, показывает хорошее соответствие в поведении внедрённых примесей как в результате предварительного облучения ионами He^+ , так и финишного облучения пучком ионов H^+ . Это подтверждает наличие и сходство физических процессов, приводящих к трансформации профилей распределения внедрённых атомов углерода и азота. Следует отметить более интенсивное проникновение атомов азота вглубь никеля по сравнению с углеродом (кривая 3 на рис. 2, *a* и рис. 4, *a*), которое, может быть, связано с различной величиной доз облучения для этих элементов: ионы N^+ — $D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$, ионы C^+ — $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$.

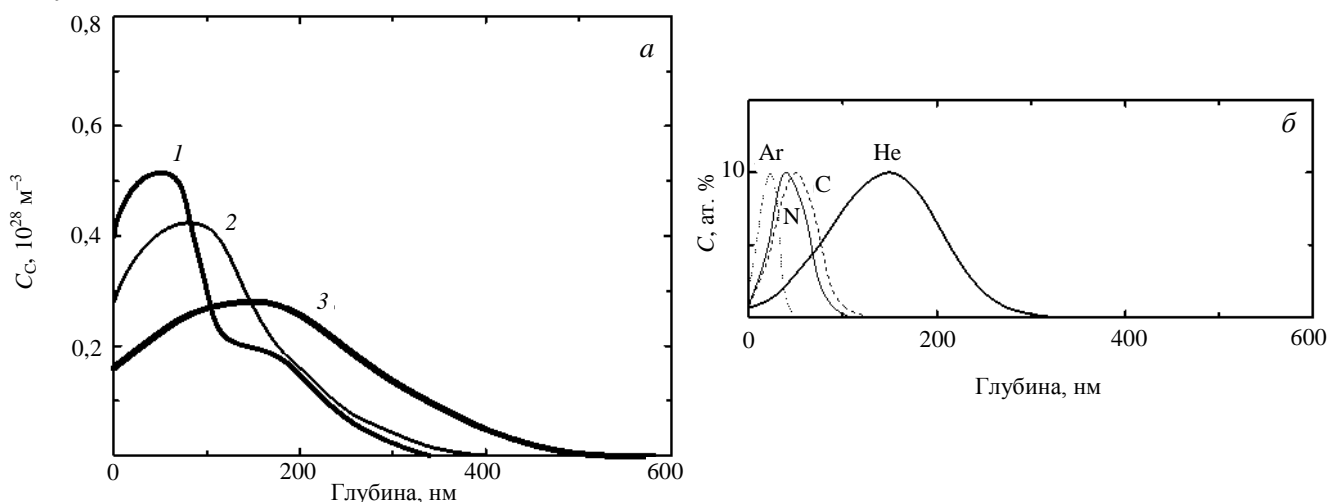


Рис. 4. Профили распределения углерода в никеле после облучения ионами He^+ , C^+ и H^+ при $T \leq 670 \text{ К}$ (*a*): 1 — ионы He^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы C^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$); 2 — ионы C^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы He^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы C^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$) и ионы H^+ ($E = 20 \text{ кэВ}$, $D = 10^{22} \text{ м}^{-2}$); *b* — расчёт профилей распределения атомов He, Ar, C и N в никеле по программе TRIM

Полученные экспериментальные результаты о поведении внедрённых примесей на образцах из чистого никеля достаточно хорошо коррелируют с данными для никеля с осажждённым углеродным слоем. Распределение элементов в таком (C—Ni) слое представлено на рис. 5.

Профили распределения углерода в системе осажждённый углеродный слой—никель после облучения ионами C^+ (40 кэВ, 10^{21} м^{-2}), последовательно ионами He^+ (40 кэВ, 10^{21} м^{-2}) и C^+ (40 кэВ, 10^{21} м^{-2}), последовательно ионами He^+ (40 кэВ, 10^{21} м^{-2}), C^+ (40 кэВ, 10^{21} м^{-2}) и H^+ (20 кэВ, 10^{22} м^{-2}) при $T \leq 670 \text{ К}$ представлены на рис. 6. На этом же рисунке показано исходное распределение углерода в осажденном углеродном слое (см. рис. 6, кривая 1).

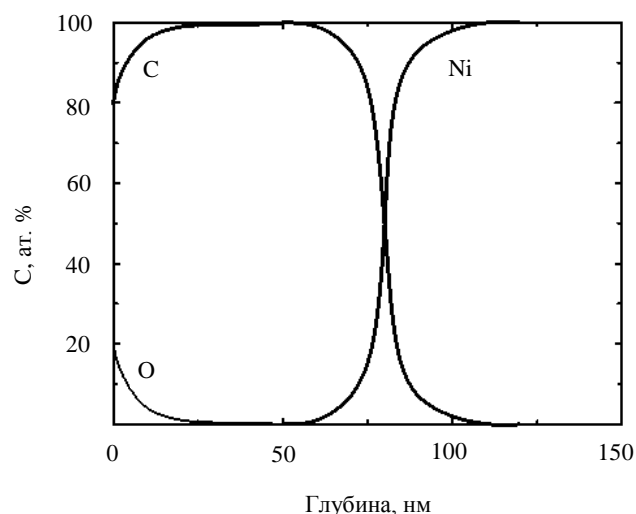


Рис. 5. Распределение элементов в осаждённом на никелевую подложку углеродном слое

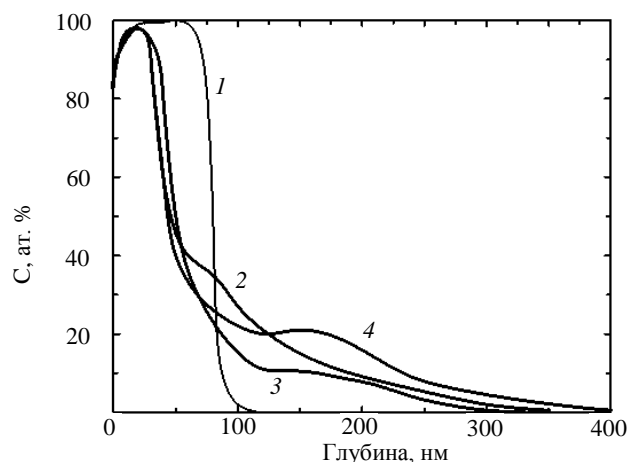


Рис. 6. Профили распределения углерода в системе осаждённый углеродный слой—никель после облучения ионами He^+ , C^+ и H^+ при $T \leq 670 \text{ К}$: 1 — исходный углеродный слой; 2 — ионы He^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы C^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$); 3 — ионы C^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$); 4 — ионы He^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$), затем ионы C^+ ($E = 40 \text{ кэВ}$, $D = 10^{21} \text{ м}^{-2}$) и ионы H^+ ($E = 20 \text{ кэВ}$, $D = 10^{22} \text{ м}^{-2}$)

Анализ поведения профилей углерода, представленных на рис. 6, показывает, что:

— граница С—Ni-слоя смещается к поверхности с 80 (положение кривой 1 на полувысоте) до 50 нм (положение кривой 3 на полувысоте) вследствие перемешивания при бомбардировке ионами C^+ , при этом на кривой 3 проявляется максимум углерода на глубине ~160 нм (на расстоянии ~110 нм от границы С—Ni-слоя);

— предварительное облучение ионами He^+ (кривая 1) приводит к сдвигу максимума концентрации внедрённого С к поверхности до глубины ~80 нм (~30 нм от границы С—Ni-слоя) по сравнению с кривой 3;

— при последовательном облучении ионами He^+ (предварительное воздействие), C^+ и H^+ (финишное воздействие) появляется широкий максимум (кривая 4) концентрации углерода на глубине около 180 нм (~130 нм от границы С—Ni-слоя).

Главным отличием данных профилей распределения атомов углерода от представленных для образцов из чистого никеля (см. рис. 4) является уровень углеродных концентраций, достигающий в максимумах значений более 20% ат. ($1,6 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$) (для Ni без покрытия эта величина не превышала 6% ($0,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$)). Наличие таких высоких концентраций атомов углерода обусловлено проходящим процессом ионного перемешивания тонкого (~80 нм) осаждённого углеродного слоя на поверхности Ni (см. рис. 6, кривая 1). Иными словами, речь идёт о присутствии дополнительного мощного источника внедряемых атомов углерода на поверхности образца, который тем не менее не меняет основные направления процессов, происходящих под действием облучения ионами He^+ и H^+ .

Наблюдаемые изменения профилей атомов углерода и азота в никелевых образцах, предварительно облучённых ионами инертных газов (Ar, Ni), наиболее вероятно связаны с формированием дополнительной системы стоков, обусловленной радиационной повреждаемостью облучённого материала. Например, при облучении никеля высокоэнергетическими ионами He^+ в приповерхностном слое образуются такие мощные системы стоков, как дислокационно-петлевая структура, кластерная структура гелий-вакансионных комплексов типа $He_m V_n$, структура гелиевых пузырьков [5]. При облучении ионами C^+ и N^+ металла, насыщенного такими структурными дефектами, часть внедряемых атомов может захватываться стоками-ловушками, тем самым теряя свою термодиффузионную подвижность и оседая в зоне распределения, близкой к расчётному разбросу пробегов ΔR_p (без учёта температуры). В результате профили распределений атомов С и N приобретают ярко выраженные максимумы на глубинах в диапазоне 40—50 нм, положение которых хорошо согласуется с величинами расчётных проективных пробегов ионов в никеле (см. рис. 4, б).

Финишное облучение образцов ионами H^+ приводит к уменьшению максимальной концентрации и сдвигу профилей распределения атомов С и N вглубь образцов. Это свидетельствует об увеличении подвижности атомов С и N при облучении ионами водорода. Можно предположить несколько механизмов увеличения подвижности атомов примеси при наличии водорода. Во-первых, авторы работ [6, 7] обнаружили подвижные комплексы междоузельных атомов металлов и водорода. Подвижность таких комплексов обусловлена тем, что они плохо захватываются ловушками. Аналогично подвижности комплексов атомов металла и водорода комплексы типа С—Н и N—Н также могут иметь высокую подвижность, что приводит к «расползанию» атомов С и N и, как следствие, к уменьшению их максимальной концентрации, а также сдвигу профилей вглубь образца. В то же время теоретические расчёты [8] показывают, что энергия связи атома водорода с примесными междоузельными атомами (He, C, N, O) мала и не превышает 0,2 эВ. Однако высокая концентрация водорода и большая вероятность образования таких комплексов могут компенсировать их распад и способствовать реализации такого механизма. Во-вторых, возможно вытеснение атомов углерода и азота из ловушек с малой энергией связи (например, вытеснение атомов, удерживаемых полями напряжений около ловушек типа гелиевых пузырьков). Даже при малой вероятности такого вытеснения большая подвижность атомов водорода и, как следствие, их большой поток на ловушки делают этот процесс вполне вероятным. В-третьих, возможно возбуждение электронной подсистемы металла за счёт неупругих потерь ионов водорода [9], которые преобладают для H^+ энергией 20 кэВ. При этом меняется, скорее всего, уменьшается связь атомов углерода и азота в ловушках, что способствует увеличению их подвижности. В рамках этой концепции возможен процесс изменения энергии связи

атомов углерода и азота в ловушках за счёт возмущения электронной конфигурации при подходе атома водорода [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование синергетических эффектов, обусловленных облучением никеля, а также никелевых образцов с нанесённым углеродным покрытием ионами He^+ , Ar^+ , C^+ и N^+ энергией 40 кэВ и ионами H^+ энергией 20 кэВ при $T \leq 670$ К. Выявлены особенности в перераспределении основных внедрённых элементов — углерода и азота по глубине образцов. Предварительное облучение образцов ионами инертных газов (Ar и He) приводит к смещению основных максимумов профилей атомов C и N к поверхности и образованию слабо выраженного второго максимума на глубине. Такое поведение внедрённых атомов C и N может быть обусловлено образованием ионами инертных газов мощной системы стоков (дислокационная, гелий-вакансионная и пузырьковая структуры), ограничивающих термодиффузионную подвижность этих элементов.

Финишное облучение образцов ионами H^+ способствует уменьшению максимальной концентрации и сдвигу профилей распределения атомов C и N вглубь образцов. Эти данные свидетельствуют об увеличении подвижности внедрённых атомов углерода и азота в насыщенном структурными дефектами материале при воздействии потока ионов H^+ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-08-01220а.

REFERENCES

1. **Mayer M., Rohde V., Sugiyama K. et al.** Carbon balance and deuterium inventory from a carbon dominated to a full tungsten ASDEX Upgrade. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, pp. 538—543.
2. **Zohn H. et al.** Overview of asdex upgrate results. — In: 22nd IAEA Fusion Energy Conf. Geneve. October 13th 2008. Talk OV/2-3.
3. **Ueda Y.** Exposure of tungsten nano-structure to TEXTOR edge plasma. — In: 19th Intern. Conf. on Plasma Surface Interaction. San Diego, USA, May 24—28, 2010.
4. **Gusev V.M., Busharov N.P., Naftulin S.M.** 100 Kev ion accelerator ILU with ions separation by mass. — Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and experimental technique), 1969, № 4, pp. 19—25 (in Russian).
5. **Neklyudov I.M., Tolstolutskaya G.D.** Helium and hydrogen in structural materials — VANT. Ser.Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of radiation damages and radiation material science), 2003, № 3, pp. 3—14 (in Russian).
6. **Sharapov V.M., Zakharov A.P.** The influence of point defects on the penetration of hydrogen through molybdenum cathode of glow discharge. — ZhETF (JETPh), 1978, vol. 48, issue 6, pp. 1213—1218 (in Russian).
7. **Zakharov A.P., Sharapov V.M., Gorodetskiy A.E.** About the impact of their own interstitial atoms on the diffusion mobility of hydrogen and helium in molybdenum. — Reports of the USSR AS, 1980, vol. 251, № 6, pp. 1388—1391 (in Russian).
8. **Daw M.S., Bisson C.L., Wilson W.D.** Hydrogen binding to fixed interstitial impurities in metals. — Solid State Communications, 1983, vol. 46, № 10, pp. 735—738.
9. **Baumbakh Kh., Krening M., Tyurin Yu.I., Chernov I.P., Cherdantsev Yu.P.** Nonequilibrium metal-hydrogen systems. Titanium, stainless steel. — Tomsk: Pub. house of Tomsk University, 2002, p. 350 (in Russian).
10. **Trubnikov B.A., Yavlinskiy Yu.N.** Virtual levels for screened Coulomb potential. — ZhETF (JETPh), 1965, vol. 48, p. 161 (in Russian).

AUTHORS

Korshunov S.N. RRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; skorshun@nfi.kiae.ru
Martynenko Yu.V. RRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Martyn@nfi.kiae.ru
Stolyarova V.G. RRC «Kurchatov Institute», pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 8 July 2010
 Problems of Atomic Science and Technology
 Ser. Thermonuclear Fusion, 2010, issue 4, pp. 20—25.