

УДК 621.039.531:539.534.9

## ВЛИЯНИЕ ОДНОВРЕМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ И ИОНАМИ УГЛЕРОДА НИКЕЛЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ГЛУБИНЕ ИОННО-ВНЕДРЁННЫХ АТОМОВ УГЛЕРОДА

С.Н. Звонков, С.Н. Коршунов, Ю.В. Мартыненко, И.Д. Скорлупкин

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Исследовалось одновременное облучение никеля ионами  $C^+$  с энергией 10—40 кэВ и электронами с энергией 1—5 кэВ при температуре мишеней 300—1000 °С. Показано, что во всех случаях сопутствующего электронного облучения вместо одного максимума распределения имплантированных ионов по глубине появляются два максимума. Один максимум располагается около поверхности на глубине до 25 нм, второй — на глубине 150—200 нм, большей, чем при имплантации ионов  $C^+$  без электронного облучения. Минимум между двумя максимумами становится шире при увеличении энергии электронов и температуры мишени во время облучения. При высокой температуре  $T = 800$  °С и, особенно, при  $T = 1000$  °С весь профиль «расплывается», максимумы малы и выделены не чётко. Для всех исследованных энергий ионов  $C^+$  и электронов при температуре 300 °С, а также для комбинаций 30 кэВ  $C^+$  + 5 кэВ  $e^-$  и 10 кэВ  $C^+$  + 3 кэВ  $e^-$  при 500 °С на поверхности никеля растёт углеродная плёнка (на поверхности плёнки концентрация углерода >95% ат. по Ni), достигающая толщины несколько десятков нм. Полученные результаты объясняются на основе диффузионных потоков, обусловленных градиентом концентрации подвижных атомов углерода и градиентом коэффициента диффузии, связанного с большей подвижностью примесных атомов с электроном, возбуждённым в зону выше уровня Ферми [1].

**Ключевые слова:** ионное облучение, электронное облучение, имплантированные атомы, синергетические эффекты, профиль распределения атомов, углеродная плёнка.

## EFFECT OF SIMULTANEOUS NICKEL IRRADIATION BY ELECTRONS AND CARBON IONS ON DEPTH DISTRIBUTION OF IMPLANTED CARBON ATOMS

S.N. Zvonkov, S.N. Korshunov, Yu.V. Martynenko, I.D. Skorlupkin

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Simultaneous nickel irradiation by  $C^+$  ion with energies 10—40 keV and electrons with energies 1—5 keV at temperatures 300—1000 °C was investigated. In all the cases of simultaneous electron irradiation, instead of one maximum of implanted atoms, depth distribution has two maxima. One maximum is situated near the surface at the depth below 25 nm the other is on the depth 150—200 nm higher than at implantation without electron irradiation. Minimum between two maxima becomes broader at electron energy and target temperature increase. At high temperatures 800 °C and especially at 1000 °C all the profile «spreads», maxima becomes low and bad distinguished. For all investigated energies of  $C^+$  ions and electrons at temperature 300 °C, as well for combinations 30 keV  $C^+$  + 5 keV  $e^-$  and 10 keV  $C^+$  + 3 keV  $e^-$  at 500 °C carbon film grows on the nickel surface up to the several tens nm thick (carbon concentration on the film surface is >95% at.). The received results are explained on the base of carbon atoms diffusion flows caused by concentration gradient of mobile carbon atoms and gradient of diffusion coefficient related to higher mobility on additive atoms with electron excited to zone higher than Fermi level [1].

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

### ВВЕДЕНИЕ

В плазменных установках поверхности, обращённые к плазме, испытывают одновременное облучение как ионами, так и электронами. Традиционно считалось [1], что облучение электронами может создавать дефекты в металлах, только если их энергия достаточна для смещения атомов в решётке металла (>0,5 МэВ). Электроны с меньшей энергией возбуждают только электроны. В металлах электронные возбуждения релаксируют в результате оже-переходов из зоны проводимости за время ( $\sim 10^{-15}$  с) [2] значительно меньше, чем период колебаний атомов в решётке ( $\sim 10^{-13}$  с). Поэтому полагалось, что облучение электронами малых энергий не может повлиять на поведение атомов, в частности, на диффузию легирующих атомов в металлах и, следовательно, на распределение по глубине внедряемых атомов. В то же время в полупроводниках, где плотность электронов в зоне проводимости значительно меньше и время релаксации возбуждения больше  $\sim 10^{-8}$  с, электронные возбуждения ускоряют диффузию дефектов и легирующих примесей [3, 4]. Это объясняется меньшей энергией активации диффузии и связи легирующих атомов в ловушках для заряженных дефектов и примесей. В работе [5] показано, что при одновременном облучении графита электронами энергией 0,05—3 кэВ и ионами  $H^+$  энергией 10—20 кэВ коэффициент распыления в несколько раз больше, чем при распылении только ионами  $H^+$ , причём при облучении одними электронами распыле-

ние отсутствует. Плотность электронов проводимости в графите составляет в среднем  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , однако в базисных плоскостях она почти достигает величины, близкой к значениям в металлах [6]. Поэтому в графите можно также ожидать быстрой оже-релаксации электронных возбуждений. Однако обнаруженное влияние облучения электронами малой энергией на распыление графита побудило нас провести исследование влияния одновременного облучения электронами и ионами на распределение по глубине внедрённых атомов в металлах [1]. В этой работе было обнаружено изменение распределения атомов азота и углерода, имплантированных с энергией 10 и 30 кэВ, по глубине образцов из никеля и нержавеющей стали в результате сопутствующего облучения электронами энергией 1 кэВ. Вместо одного максимума распределения появляются два максимума: один — ближе к поверхности, второй — на большей глубине, чем при имплантации без электронного облучения. Влияние электронного облучения объяснялось образованием в системе атомов примеси зоны, находящейся выше уровня Ферми, в которую электроны металла переходят в результате возбуждения бомбардирующими электронами. Электроны в этой зоне имеют достаточно большое время жизни и увеличивают подвижность атомов примесей. Теперь проведены более подробные исследования этого эффекта. Изучено влияние энергии электронов и температуры образца на распределение ионов  $\text{C}^+$  в никеле. Ионы углерода представлены достаточно широко в термоядерных установках. Никель выбран как модельный материал, на котором подобные исследования уже проводились в [1], и сравнение с предыдущими экспериментами позволяет лучше понять наблюдаемый эффект. Кроме того, никель входит как основной элемент в нержавеющие стали, которые используются в термоядерных установках, например, в диагностических портах, вакуумном корпусе и в качестве конструкционного материала.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования использованы плоские образцы из технического никеля марки НП-1 размером  $15 \times 15 \times 1 \text{ мм}$ . Предварительно образцы отжигали в вакууме  $10^{-3} \text{ Па}$  при температуре  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 1 ч. Поверхность образцов подготавливали стандартными методами механической и электролитической полировки до зеркальной чистоты (не менее 11 класса чистоты поверхности с параметром шероховатости  $R_a \leq 0,05 \text{ мкм}$ ).

Схема эксперимента по одновременному облучению образцов ионным и электронным пучком показана на рис. 1. Ионно-электронное облучение мишеней проводилось на ионном ускорителе ИЛУ с сепаратором.

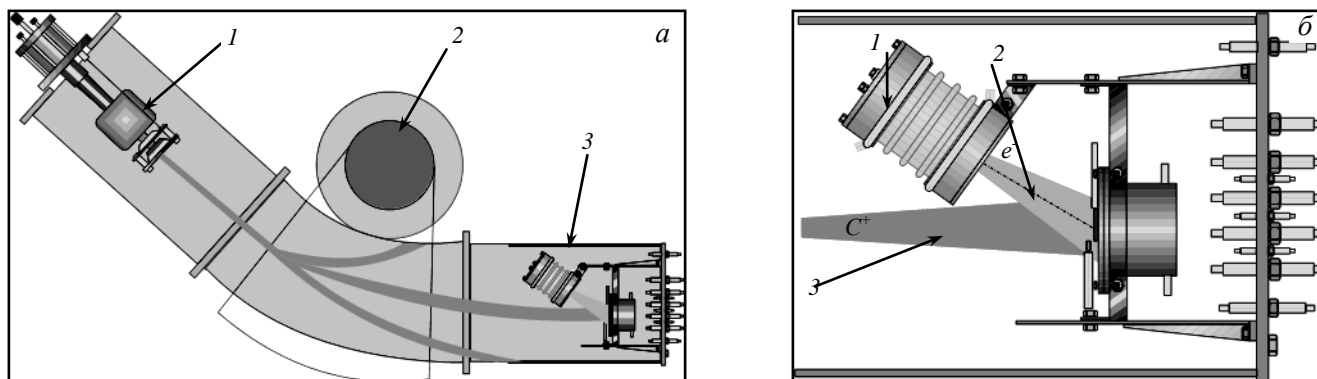


Рис. 1. Схема эксперимента по одновременному облучению образцов ионным и электронным пучком: а — ионный ускоритель ИЛУ с встроенной в камеру приёмника ионов электронной пушкой (1 — ионный источник, 2 — магнит-сепаратор, 3 — камера приёмника ионов и электронов); б — камера приёмника ионов и электронов (1 — электронная пушка, 2 — печь с держателем образцов, 3 — реперная пластина)

рацией ионов по массам [1], в приёмной камере которого была установлена электронная пушка. Фотографическое изображение ионного приёмника с электронной пушкой показано на рис. 2. Образцы-мишени устанавливали в специально сконструированный держатель образцов, закреплённый непосредственно на печном устройстве с омическим нагревателем. Электронная пушка крепилась к фланцу приёмника ионов под углом  $30^\circ$  к оси ионного пучка, перпендикулярной поверхности образца. Температуру образца измеряли платиново-родиевой термопарой, прикреплённой к образцу. Плотность электронного и ион-



Рис. 2. Фотоизображение ионного приёмника с электронной пушкой

ного тока регистрировали с помощью специальных реперных пластин, расположенных на открывающейся диафрагме перед образцом и непосредственно рядом с образцом (см. рис. 1, б, поз. 3).

В экспериментах использованы следующие комбинации ионно-электронного облучения: ионы  $C^+$  (10 кэВ,  $4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ , 50—100 мкА/см<sup>2</sup>) +  $e^-$  (3 кэВ, 100—200 мкА/см<sup>2</sup>); ионы  $C^+$  (30 кэВ,  $4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ , 50—100 мкА/см<sup>2</sup>) +  $e^-$  (1—5 кэВ, 100—500 мкА/см<sup>2</sup>); ионы  $C^+$  (40 кэВ,  $4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ , 50—100 мкА/см<sup>2</sup>) +  $e^-$  (3—5 кэВ, 100—500 мкА/см<sup>2</sup>). Температура образцов в процессе ионно-электронного облучения варьировалась в пределах от 300 до 1000 °С.

Профили распределения атомов углерода по глубине получены методом оже-анализа на спектрометре РНІ 548 с послойным распылением поверхности анализируемого материала 3 кэВ-ными ионами  $Ar^+$ , падающими под углом 30° к поверхности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Особенности трансформации профилей распределения имплантированного углерода в никеле под действием сопутствующего электронного пучка наглядно продемонстрированы на рис. 3—8.

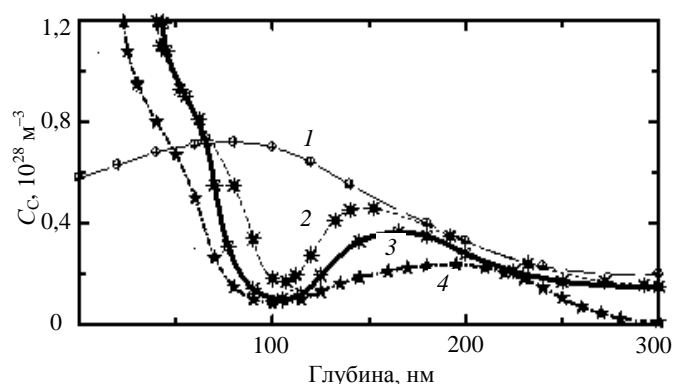


Рис. 3. Профили распределения атомов углерода в никеле при  $T = 300 \text{ °С}$  после облучения ионами  $C^+$  ( $E = 30 \text{ кэВ}$ ,  $D = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) (1) и одновременного облучения  $C^+$  и электронами с энергией 1 (2), 3 (3), 5 кэВ (4) при  $T = 500 \text{ °С}$

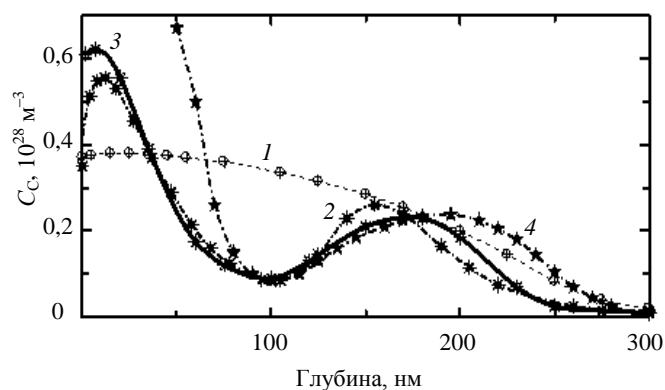


Рис. 4. Профили распределения атомов углерода в никеле при  $T = 500 \text{ °С}$  после облучения ионами  $C^+$  ( $E = 30 \text{ кэВ}$ ,  $D = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) (1) и одновременного облучения ионами  $C^+$  и электронами с энергией 1 (2), 3 (3), 5 кэВ (4)

концентрации  $0,08 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , причём ширина концентрационного минимума увеличивается с ростом энергии электронов. С увеличением энергии электронов становится заметным смещение положения второго максимума в глубь образца со 150 до 200 нм (см. рис. 3, кривые 2, 3 и 4).

На рис. 4 показаны распределения углерода по глубине никелевого образца после одновременного облучения ионами  $C^+$  энергией 30 кэВ до дозы  $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и электронами энергией 1—5 кэВ при температуре 500 °С. Рост температуры образцов до 500 °С не меняет положение минимума распределения (100 нм), но приводит к аналогичному (как и при 300 °С) смещению положения второго максимума в глубь образца

Воздействие электронного пучка в процессе ионного облучения приводит к появлению двух максимумов в распределении имплантированных атомов по глубине независимо от энергии ионов и электронов. На рис. 3 представлены профили распределения углерода по глубине никелевого образца, облучённого одновременно ионами  $C^+$  энергией 30 кэВ до дозы  $D = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и электронами разной энергией (1 и 3 кэВ) при температуре  $T = 300 \text{ °С}$ . Для сравнения приведён профиль распределения имплантированного углерода по глубине образца Ni без электронного облучения (кривая 1), для электронов энергией 5 кэВ представлен профиль углерода в образце Ni, облучённого при  $T = 500 \text{ °С}$ .

Первые максимумы распределения атомов C располагаются на глубине до 100 нм и достигают величины максимальной концентрации в диапазоне  $(7,2—7,8) \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , приближающейся к 100% ат. для Ni (рис. 9), т.е. приповерхностные максимумы наглядно демонстрируют образующиеся в процессе ионно-электронного облучения тонкие углеродные плёнки на поверхности никеля. Вторые, менее выраженные пики, находятся на глубине 100—250 нм и имеют величину максимальной концентрации атомов углерода в интервале  $(0,22—0,43) \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Минимумы профилей распределения атомов углерода находятся на одинаковой глубине около 100 нм и достигают концен-

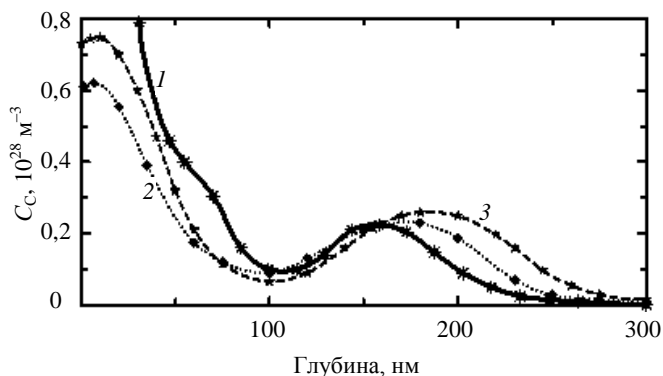


Рис. 5. Профили распределения атомов углерода в никеле при  $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$  после одновременного облучения электронами энергией 3 кэВ и ионами  $\text{C}^+$  ( $D = 4 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$ ) энергией 10 (1), 30 (2), 40 кэВ (3)

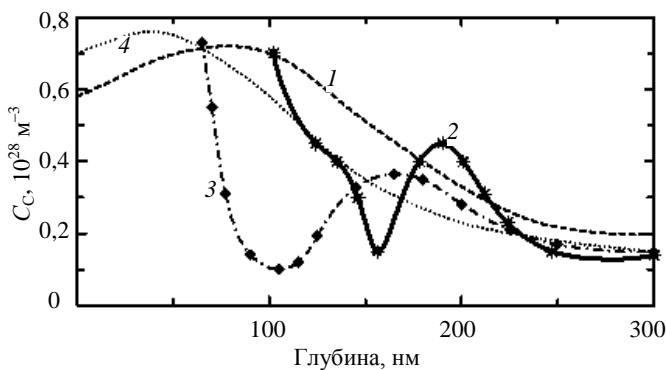


Рис. 6. Профили распределения атомов углерода в никеле при  $T = 300\text{ }^\circ\text{C}$  после одновременного облучения электронами энергией 3 кэВ и ионами  $\text{C}^+$  ( $D = 4 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$ ) с энергией 30 кэВ без электронов (1), 10 (2), 30 (3), 10 кэВ без электронов (4)

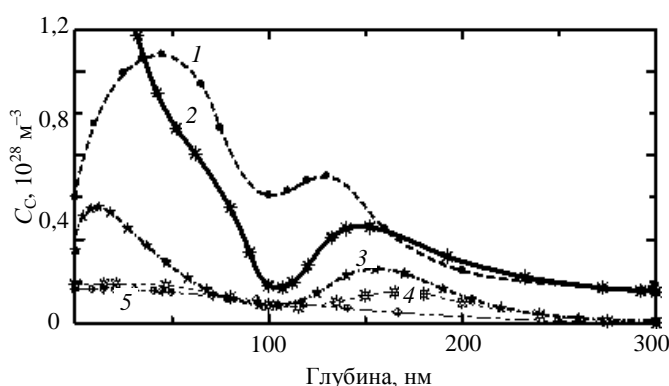


Рис. 7. Профили распределения атомов углерода в никеле после одновременного облучения электронами энергией 1 кэВ и ионами  $\text{C}^+$  ( $E = 30\text{ кэВ}$ ,  $D = 4 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$ ) при температуре 100 (1), 300 (2), 500 (3), 800 (4), 1000 °C (5)

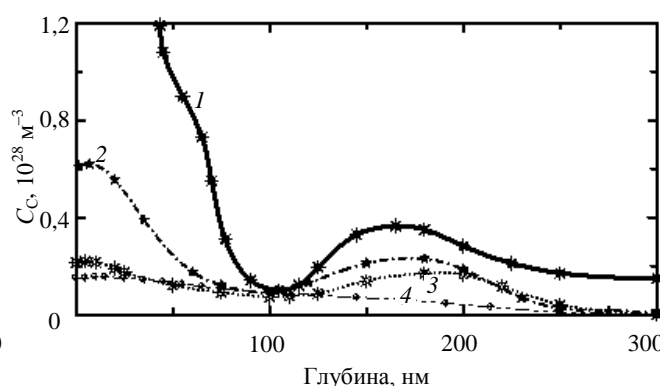


Рис. 8. Профили распределения атомов углерода в никеле после одновременного облучения электронами энергией 3 кэВ и ионами  $\text{C}^+$  ( $E = 30\text{ кэВ}$ ,  $D = 4 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$ ) при температуре 300 (1), 500 (2), 800 (3), 1000 °C (4)

со 160 до 200 нм с увеличением энергии электронов от 1 до 5 кэВ (см. рис. 4, кривые 2, 3 и 4). Однако максимальная концентрация приповерхностных пиков резко (более чем на порядок величины) уменьшается до величины  $(0,55\text{—}0,62)10^{28}\text{ м}^{-3}$  с увеличением температуры до 500 °C при энергии электронов 1 и 3 кэВ (см. рис. 4, кривые 2, 3).

Влияние энергии ионов  $\text{C}^+$  при одновременном ионно-электронном воздействии продемонстрировано на рис. 5 и 6, где приведены профили распределения углерода после облучения ионами  $\text{C}^+$  энергией 10, 30 и 40 кэВ и электронами энергией 3 кэВ при температуре 500 и 300 °C соответственно. При  $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 5) ход концентрационных профилей аналогичен кривым, представленным на рис. 3 и 4, т.е. имеются первый приповерхностный максимум, минимум на глубине около 100 нм и второй максимум в интервале глубины 150—200 нм. С ростом ионной энергии наблюдается смещение вторых максимумов в глубь образца на 50 нм. При меньшей температуре облучения (300 °C) поведение профилей распределения углерода, снятых для ионной энергии 10 и 30 кэВ, существенно иное (см. рис. 6). Как уже отмечалось, в этих условиях на поверхности образцов образуется тонкая углеродная плёнка, причём для 10 кэВ-ных ионов её толщина и максимальная глубина первого пика значительно больше, чем для 30 кэВ-ных ионов  $\text{C}^+$  (см. рис. 6, кривые 2, 3). Вследствие этого минимум и второй максимум концентрационного профиля для 10 кэВ-ных ионов смещены вглубь по сравнению с 30 кэВ-ными ионами на 50 и 30 нм соответственно. Кроме того, профиль концентрации атомов углерода после облучения 10 кэВ-ными ионами  $\text{C}^+$  «сжат» по оси, где отложена глубина: минимум и второй глубокий максимум более узкие, чем при большей (30 кэВ) энергии ионов.

Трансформация профилей распределения углерода с ростом температуры облучения наглядно продемонстрирована на рис. 7 и 8.

Минимум распределений, расположенный между двумя максимумами на глубине 100—110 нм становится шире и глубже при увеличении температуры мишени в интервале 100—800 °С. При высокой температуре (800—1000 °С) и, особенно, при 1000 °С весь профиль распределения углерода «расплывается», максимумы малы и выделены не чётко. Положения вторых максимумов на концентрационных профилях имеют тенденцию к смещению в глубь материала с ростом температуры образцов. Эта тенденция особенно заметна при сопутствующем облучении 1 кэВ-ными электронами — повышение температуры от 100 до 800 °С приводит к сдвигу вторых максимумов по глубине от 130 до 175 нм (см. рис. 7, кривые 1—4).

Как уже отмечалось, во всём исследованном диапазоне энергий ионов  $C^+$  и электронов при  $T = 300$  °С, а также для комбинаций облучения 30 кэВ  $C^+$  + 5 кэВ  $e^-$  и 10 кэВ  $C^+$  + 3 кэВ  $e^-$  при  $T = 500$  °С на поверхности образцов формируется углеродная плёнка ( $C_C > 95\%$  ат.), достигающая толщины несколько десятков нм. На рис. 9 представлены профили распределения углерода в растущих на поверхностях никеля плёнках после одновременного облучения различными комбинациями ионов  $C^+$  до дозы  $4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> и электронов при температуре 300 и 500 °С.

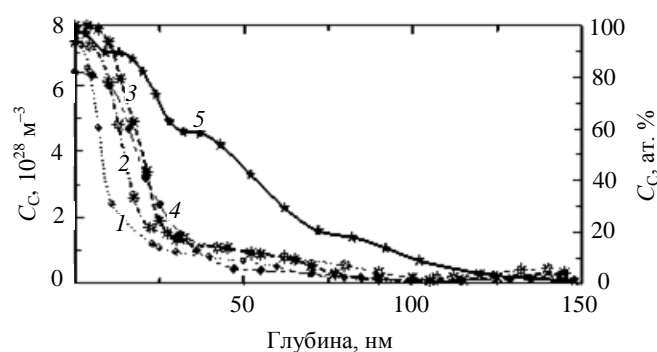


Рис. 9. Профили распределения атомов углерода в растущей на никеле плёнке после одновременного облучения ионами  $C^+$  ( $D = 4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>) и электронами: 1 — 5 кэВ  $e^-$  + 30 кэВ  $C^+$  при 500 °С; 2 — 1 кэВ  $e^-$  + 30 кэВ  $C^+$  при 300 °С; 3 — 3 кэВ  $e^-$  + 30 кэВ  $C^+$  при 300 °С; 4 — 3 кэВ  $e^-$  + 10 кэВ  $C^+$  при 500 °С; 5 — 3 кэВ  $e^-$  + 10 кэВ  $C^+$  при 300 °С

Нетрудно заметить, что при прочих равных условиях повышение энергии ионов  $C^+$  и температуры образца приводит к уменьшению толщины углеродной плёнки, а увеличение энергии электронов — к росту её толщины. Наибольшая толщина ( $t > 25$  нм) углеродной плёнки обнаружена в результате ионно-электронного воздействия (10 кэВ  $C^+$  + 3 кэВ  $e^-$ ) при  $T = 300$  °С (см. рис. 9, кривая 5). Кроме того, определённый интерес вызывает вид указанного профиля распределения (кривая 5), который характеризуется чередованием пологих и резко спадающих участков кривой и требует проведения дальнейших исследований полученных углеродных плёнок.

Следует отметить, что рост углеродных плёнок на поверхности никеля в результате ионно-электронного облучения способствует резкому (до 100%) увеличению количества захваченного углерода. Так, при дозе  $4 \cdot 10^{21}$  м<sup>-2</sup> интегральная концентрация атомов углерода в образцах без плёнок варьируется в интервале  $(0,3—0,6)10^{21}$  м<sup>-2</sup>, а при наличии углеродных плёнок интегральная концентрация захваченного углерода изменяется в пределах  $(1,8—3,9)10^{21}$  м<sup>-2</sup> в зависимости от толщины образованной плёнки.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе [1] влияние одновременного облучения электронами на изменение профилей внедрённых ионов объясняется увеличением подвижности атомов примеси, связанным с электронными возбуждениями, возникающими при электронном облучении. Полагалось, что если концентрация примесей  $N$  достаточно велика, то в подсистеме примесей образуются зоны со связывающими и антисвязывающими состояниями. Зона антисвязывающих состояний лежит выше уровня Ферми  $E_f$ , а зона связанных состояний — ниже уровня Ферми. Критерием возникновения зон в системе атомов примеси считается условие, при котором время оже-релаксации электрона из зоны над поверхностью Ферми  $\tau_A$  больше времени жизни возбуждения  $\tau_e$  на одном атоме примеси, которое определяется туннелированием на соседний атом примеси. Используя для оценок проницаемость барьера, получим условие

$$\tau_A > \tau_e = \tau_e \exp\{2N^{-1/3}h^{-1}[2m(U - E)]^{1/2}\}, \quad (1)$$

где  $\tau_e$  — период движения электрона в потенциальной яме у атома примеси;  $h$  — постоянная Планка. При высоте барьера  $U - E \approx 1$  эВ условие (1) даёт минимальную оценку концентрации примеси, необходимой для обобществления возбуждения  $N > 10^{21}$  см<sup>-3</sup>. Подтверждением появления зоны электронов,

обусловленной атомами примеси, является то, что действие электронной бомбардировки наблюдается значительно глубже проникновения первичных электронов, фактически на глубину слоя, где концентрация примеси удовлетворяет условию (1), поскольку электроны в этой зоне весьма подвижны.

Поскольку наиболее вероятно туннелирование на соседний атом примеси, то обмен электронами между соседними атомами приводит к появлению ковалентной составляющей в зарядовой плотности. Зона состояний ниже поверхности Ферми быстро заполняется электронами проводимости металла. Электроны, возбуждённые в зону над поверхностью Ферми, могут релаксировать только в результате оже-перехода на поверхность Ферми при столкновениях друг с другом. Релаксация оже-переходом на поверхность Ферми происходит со скоростью

$$w = (n^2 \sigma v) f(1 - f), \quad (2)$$

где  $n$  — плотность электронов в зоне над поверхностью Ферми;  $f$  — функция Ферми;  $f(1 - f) = T/E_f$ ;  $\sigma$  — сечение оже-перехода на поверхность Ферми при столкновениях возбуждённых электронов;  $v$  — скорость электронов в зоне над поверхностью Ферми. Бомбардирующие электроны возбуждают электроны в зону над уровнем Ферми со скоростью

$$q = jv/R, \quad (3)$$

где  $j$  — плотность тока;  $v$  — число возбуждений, производимых одним бомбардирующим электроном;  $R$  — пробег ионов. Хотя пробег бомбардирующих электронов  $\sim 10$  нм много меньше пробега ионов  $R \sim 100$  нм, но после накопления концентрации примесей, достаточной для образования зон в подсистеме атомов примеси, возбуждённые электроны, вследствие большой подвижности, заполняют всю область, где существует достаточная концентрация примесей. Приравнявая скорость образования возбуждений  $q$  и скорость девозбуждения  $w$ , получим концентрацию электронов, возбуждённых в зону подсистемы примесей над поверхностью Ферми:

$$n = \{qE_f/T\sigma v\}^{1/2} \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}. \quad (4)$$

В предположении, что увеличение подвижности атомов примеси связано с электронными возбуждениями [4], эффективный коэффициент диффузии атомов примеси равен

$$D_{\text{эф}} = (1 - n/N)D_0 + n/ND_{\text{exc}}, \quad (5)$$

где  $D_0$  — коэффициент диффузии атома примеси без возбуждённого электрона;  $D_{\text{exc}}$  — коэффициент диффузии атома примеси, около которого находится возбуждённый электрон. Очевидно, что заметный эффект изменения распределения атомов примеси при облучении электронами означает, что  $D_{\text{эф}} > D_0$ , т.е. что  $n/N_i > D_0/D_{\text{exc}} = \exp(-\Delta E_D/T)$ , где  $\Delta E_D$  — изменение энергии активации диффузии атома примеси при нахождении около него возбуждённого электрона. При концентрации возбуждённых электронов  $n \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$  необходимо  $\Delta E_D \approx 0,4$  эВ. Эта величина  $\Delta E_D$  меньше, чем характерные энергии активации атомов примеси, например, энергия активации диффузии азота в железе  $E_D \approx 2$  эВ.

Приведённые общие соображения показывают возможность изменения профиля внедрённых ионов. Конкретный вид профилей и его зависимость от температуры мишени и энергии ионов и электронов можно понять, опираясь на следующие факторы, влияющие на профиль внедрённых ионов:

— диффузионный поток внедрённых ионов  $J$  определяется как градиентом концентрации подвижных примесных атомов, так и градиентом коэффициента диффузии  $D_{\text{эф}}$ ;

— примесные атомы углерода при большой концентрации образуют малоподвижные комплексы (затем плёнку на поверхности), причём этот процесс ускоряется при электронном облучении и идёт наиболее интенсивно у поверхности на глубине проникновения бомбардирующих электронов.

Согласно закону Фика диффузионный поток  $J$  внедрённых ионов, концентрация которых  $C$ , равен

$$J = -D_{\text{эф}} \partial C / \partial x - \partial D_{\text{эф}} / \partial x \cdot C; \quad (6)$$

$$\partial D_{\text{эф}} / \partial x = D_{\text{exc}} (\partial n / \partial x) / N. \quad (7)$$

Ширина зоны в системе примесей  $\Delta \varepsilon$  обратно пропорциональна времени жизни электрона на одном атоме:

$$\Delta \varepsilon = h/\tau_\ell \sim \exp\{-2N^{-1/3}h^{-1}[2m(U - E)]^{1/2}\}, \quad (8)$$

т.е. больше там, где максимальна концентрация примесных атомов. А концентрация электронов  $n$ , возбуждённых в эту зону, растёт с ростом ширины зоны  $\Delta\varepsilon$ , т.е. тоже максимальна там, где максимальна концентрация примесных атомов. Кроме того,  $n$  максимальна у поверхности на глубине проникновения бомбардирующих электронов, где происходит возбуждение электронов в зону над поверхностью Ферми. Таким образом, существует диффузионный поток  $J_1 = -D_{\text{эф}}\partial C/\partial x$ , направленный от положения проективного пробега ионов  $R_p$  как вглубь, так и к поверхности, причём у поверхности градиент  $\partial C/\partial x$  особенно велик, когда атомы углерода вблизи поверхности объединяются в комплексы и концентрация подвижных атомов становится мала. Направление потока  $J_2 = -\partial D_{\text{эф}}/\partial x \cdot \partial C/\partial x$  вблизи  $R_p$  совпадает с направлением потока  $J_1$ , поэтому вблизи  $R_p$  при облучении электронами всегда наблюдается минимум концентрации имплантированных атомов. Этот минимум становится шире при увеличении  $D_{\text{эф}}$ , при высокой температуре и большой энергии электронов, когда увеличивается концентрация электронов в зоне над поверхностью Ферми. Вблизи поверхности поток  $J_2$  направлен вглубь. Разность потоков  $J_1$  и  $J_2$  определяет вид профиля вблизи поверхности. Отношение коэффициентов диффузии  $D_0/D_{\text{эф}} = \exp(-\Delta E_D/T)$  растёт с ростом температуры, т.е. с ростом температуры убывает влияние возбуждённых электронов на коэффициент диффузии и, соответственно, вклад потока  $J_2$ . Отсюда понятно, что если при температуре 100 °С максимум концентрации  $C$ , ближний к поверхности, находится на некотором расстоянии от поверхности, то уже при  $T = 300$  °С концентрация  $C$  максимальна на поверхности и, вследствие большого потока  $J_1$  на поверхность, растёт углеродная плёнка на поверхности. Стабильности плёнки способствует электронная бомбардировка, отрывающая электрон от атома углерода и помогающая образованию С—С-связей. При температуре  $T > 500$  °С плёнка нестабильна, комплексов С—С не образуется и углерод на поверхности не удерживается. Интересно отметить, что плёнка растёт от поверхности «вверх» за счёт диффузии из глубины атомов углерода, внедряемых на глубину  $\sim R_p$ . При этом толщина плёнки может превышать пробег электронов, что означает передачу электронного возбуждения через плёнку.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования одновременного облучения никеля ионами  $C^+$  энергией 10—40 кэВ и электронами энергией 1—5 кэВ при температуре мишени 300—1000 °С показали, что:

— во всех случаях ионно-электронного облучения вместо одного максимума распределения имплантированных ионов по глубине появляются два максимума: один — ближе к поверхности, второй — на глубине больше, чем при имплантации без электронного облучения;

— минимум между двумя максимумами становится шире и глубже при увеличении энергии электронов и температуры мишени во время облучения; положение вторых максимумов в профилях распределения имеет тенденцию к смещению вглубь материала с ростом температуры;

— при высокой температуре 800—1000 °С и, особенно, при 1000 °С весь профиль распределения углерода «расплывается», максимумы малы и выделены не четко;

— для всех исследованных энергий ионов  $C^+$  и электронов при температуре 300 °С, а также для комбинаций 30 кэВ  $C^+$  + 5 кэВ  $e^-$  и 10 кэВ  $C^+$  + 3 кэВ  $e^-$  при 500 °С на поверхности никеля растёт углеродная плёнка (на поверхности плёнки концентрация углерода  $>95\%$  ат. по Ni), достигающая толщины несколько десятков нм;

— повышение энергии ионов  $C^+$  и температуры образца уменьшает толщину углеродной плёнки, а увеличение энергии электронов, наоборот, способствует росту её толщины;

— наибольшая толщина углеродной плёнки обнаружена в результате ионно-электронного воздействия (10 кэВ  $C^+$  + 3 кэВ  $e^-$ ) при  $T = 300$  °С; при наличии плёнки количество захваченного при имплантации углерода приближается к 100%;

— увеличение энергии ионов с 10 до 40 кэВ приводит к смещению вторых максимумов профилей распределения вглубь образца при температуре 500 °С;

— профиль концентрации атомов углерода после облучения 10 кэВ-ными ионами  $C^+$  при 300 °С «сжат» по оси, где отложена глубина: минимум и второй глубокий максимум более узкие, чем при большой (30 кэВ) энергии ионов.

Полученные результаты объясняются на основе диффузионных потоков, обусловленных градиентом концентрации подвижных атомов углерода и градиентом коэффициента диффузии, связанного с большей подвижностью примесных атомов с электроном, возбуждённым в зону выше уровня Ферми [1].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-08-00645а. Ю.В. Мартыненко поддержан грантом НШ-4361.2012.2 Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

## REFERENCES

1. **Zvonkov S.N., Korshunov S.N., Martynenko Yu.V., Skorlupkin I.D.** — *Pis'ma v ZhETF (JETP Letters)*, 2011, vol. 94, № 2, pp. 116—119 (in Russian).
2. **Parilis E.S.** Auger effect. — Tashkent: Fan, 1969 (in Russian).
3. **Pickraux S.T., Vook F.L.** — *Radiation Effects*, 1971, vol. 11, p. 179.
4. **Vavilov V.S., Kekelidze N.P., Smirnov L.S.** Effects of radiation on semiconductors. — M.: Pub. house fiz.-mat. lit. (phys.-math. literature), 1988 (in Russian).
5. **Guseva M.I., Ivanov S.M., Mansurova A.N., Martynenko Yu.V.** — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 1986, vol. 4, p. 97 (in Russian).
6. **Dresselhaus M.S., Dresselhaus G.** Intercalation compounds of graphite. — *Advances in Physics*, 1981, vol. 30, № 2, p. 139.
7. **Gusev V.M., Busharov N.P., Naftulin S.M.** — *Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and Experimental Technique)*, 1969, № 4, p. 19 (in Russian).

## AUTHORS

**Zvonkov S.N.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Zvonkov\_SN@nrcki.ru

**Korshunov S.N.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Korshunov\_SN@nrcki.ru

**Martynenko Yu.V.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Martynenko\_YV@nrcki.ru

**Skorlupkin I.D.** NRC “Kurchatov Institute”, pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Skorlupkin\_ID@nrcki.ru

Received 13 June 2012  
Problems of Atomic Science and Technology  
Ser. Thermonuclear Fusion, 2012, issue 3, pp. 44—51.