

ПОВЕДЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Г.Г.Бондаренко, В.А.Белов, М.М.Якушкин

*Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)*

*Российская Федерация, 113054, г. Москва, ул. Малая Пионерская, 12
тел./факс: (095) 235-57-13, e-mail: niipmt@cea.ru*

Представлены результаты исследований поведения многокомпонентных материалов при длительном облучении высокоэнергетическими электронами. Выявлено заметное изменение концентрационного содержания компонентов в образующихся при облучении диффузионных зонах. Авторы делают предположение о несоответствии конечных состояний систем равновесным. Получаемые при облучении высокоэнергетическими электронами термодинамически неравновесные материалы обладают высокой кинетической устойчивостью при комнатной температуре.

Введение

В настоящее время большое значение имеют исследования новых материалов на основе многокомпонентных систем (аморфные сплавы, тонкопленочные многослойные материалы, наноматериалы и т.п.). Одним из путей получения таких материалов является облучение многокомпонентных систем высокоэнергетическими электронами [1,2].

В работах, посвященных исследованиям воздействия высокоэнергетических электронов на многокомпонентные системы, в основном уделяется внимание изучению аномальной подвижности атомов и не рассматривается поведение системы на больших временах. Это, по-видимому, связано с предположением, что конечные стационарные состояния систем должны соответствовать равновесным.

Однако в [3,4] и ряде других работ было обнаружено образование диффузионных зон, в которых концентрации элементов отличались от разрешенных, согласно диаграммам состояний. Поэтому можно предположить, что стационарные состояния облучаемых на больших временах систем могут не совпадают с равновесными.

До настоящего времени вопрос о достижения системы стационарных состояний в процессе облучения остается дискуссионным. В частности, до сих пор неясно, каким способом осуществляется процесс массопереноса элементов в системах под действием облучения. Считают, что он может быть объяснен на основе вакансионного механизма ускорения диффузии. Такой подход предполагает, что профили распределения, возникающие в процессе электронного облучения, описываются решениями уравнения Фика и определяются только дозой облучения и температурой образцов при облучении. При таком описании, однако, трудно объяснить образование в диффузионных зонах областей пересыщения, а так же новых фаз, запрещенных диаграммами состояний.

В связи с этим целью работы было исследование взаимодействия элементов на границе систем под действием облучения высокоэнергетическими электронами при температурах и времени облучения, достаточных для выхода на стационарные состояния, и сравнение полученных состояний с известными равновесными.

Методика и аппаратура

В наших экспериментах исследовались конечные состояния систем Si-B, Cu-W, Ni-Cu, Mo-Ni, Mo-Ni-V. Образцы представляли собой соответствующие диффузионные пары. Полупроводниковые образцы подготавливали путем осаждения бора на кремниевую подложку в электротермической печи сопротивления типа СДО-125-3/15А. Металлические системы получали путем напыления металлов в испарителе магнетронного типа на соответствующие подложки. Толщина слоев для разных материалов составляла от 50 до 200 мкм и выбиралась с таким расчетом, чтобы успели сформироваться квазиравновесные диффузионные зоны на поверхности раздела. Для каждой системы подготавливалась пара образцов. Из каждой пары один образец подвергался термическому воздействию и являлся контрольным (сравнительным), второй подвергался обработке электронным пучком на ускорителе.

Для облучения образцов использовался линейный ускоритель типа УЭЛВ-10-10 с мощностью пучка электронов 10 кВт. Облучение проводилось на воздухе при следующих режимах: энергия электронов – 10 МэВ, плотность тока в пучке – 5 мкА/см². Время облучения и доза менялись в зависимости от требований к получению стационарных состояний систем. Образцы крепились в специальной термостатированной приставке, позволяющей изменять температуру в пределах 300÷1800 К. Контроль температуры в диапазоне 800÷1800 К осуществлялся с помощью двухспектрального пирометра с погрешностью ±1,5 К.

Для нахождения конечных состояний систем проводилось облучение образцов при фиксированной температуре в течение нескольких интервалов времени. После каждого интервала времени определялся фазовый состав и распределение элементов в образовавшейся диффузионной зоне. Изучение распределения концентрации элементов в переходной зоне до и после облучения проводили на микроанализаторе «Camebax-microbeam» путем послойного ионного травления поверхности образцов на толщину 1÷2 мкм. Информация о строении диффузионной зоны каждого последующего интервала определялась с полученной после облучения образцов информацией. Для получения результатов контрольного

тех же условиях, но в отсутствие облучения. Построение изотермических сечений диаграмм состояний исследуемых систем осуществлялось кинетическими методами, в частности методом диффузионных пар и методом суперпозиции диффузионных зон.

Как известно, вышеуказанные системы характеризуются образованием ограниченной (Si-B, Mo-Ni) и неограниченной (Ni-Cu) растворимости. Согласно диаграммам состояний в системе Mo-Ni помимо твердых растворов на основе молибдена и никеля образуются три фазы: MoNi (по перитектической реакции при 1630 K), MoNi₂ и MoNi₃ (по перитектоидным реакциям при 1183 K и 1148 K соответственно). В системе Si-B образуются два соединения: SiB₄ и SiB₆. Компоненты Cu и W вообще не растворимы друг в друге как в твердом, так и в жидком состоянии [4].

Однако в процессе облучения помимо общего ускорения процесса массопереноса и выхода систем на конечные состояния было выявлено заметное изменение концентрационного содержания компонентов в диффузионных зонах. На рис.1 представлены кривые распределения Ni в диффузионной зоне системы Mo-Ni до образования интерметаллических фаз [5].

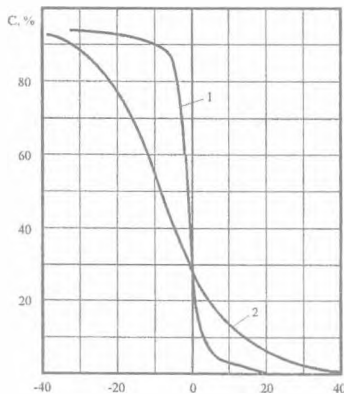


Рис. 1. Кривые распределения Ni в диффузионной зоне системы Mo-Ni до образования интерметаллических фаз: 1) без облучения; 2) при облучении.

Исследования показали, что при длительном облучении содержание Ni в фазе MoNi увеличивается до 52 %, концентрация никеля в твердом растворе на основе молибдена у границы раздела увеличивается в 3 раза. До ~85 % увеличивается так же содержание никеля в твердом растворе на основе никеля, причем предельная концентрация превышает равновесную. Исследование других изотермических сечений позволило обнаружить смещение температур образования фаз MoNi₂ и MoNi₃ в сторону более высоких температур. Они составляют 1242 K и 1204 K соответственно. При этом наблюдалась помимо общего ускорения массопереноса через границу раздела, ее аморфизация с образованием областей перенасыщения относительно равновесных составов, определяемых равновесной диаграммой состояния.

В подтверждение [4] после облучения диффузионной пары Cu-W на границе системы обнаруживается взаимопроникновение компонентов друг в друга. Количественное определение концентрационного распределения меди и вольфрама в переходной зоне показывает, что на границе Cu-W наблюдается значительная растворимость меди и вольфрама друг в друге, достигающая ~30 % ат. как со стороны вольфрама, так и со стороны меди. Глубина проникновения составляет 6-8 мкм.

С целью изучения влияния облучения на поведение тройных систем был изучен ряд изотермических сечений сплавов Ni-Mo-V при тех же условиях облучения. Молибден и ванадий несовместимы с никелем, но в тройной системе имеется широкая область двухфазного равновесия между ОЦК твердым раствором на основе молибдена и ГЦК твердым раствором на основе никеля.

Исследование изотерм этой системы в отсутствие излучения показывают, что ванадий образует с никелем фазу σ , которая в тройной системе может образовывать трехфазное равновесие $\sigma+\beta+\gamma$. В системе Ni-V-Mo, как фаза δ системы Ni-Mo, так и фаза σ , имеет невысокую стабильность. В результате нами наблюдалась широкая область двухфазного равновесия $\beta+\gamma$, ограниченная трехфазными равновесиями с фазами σ и δ .

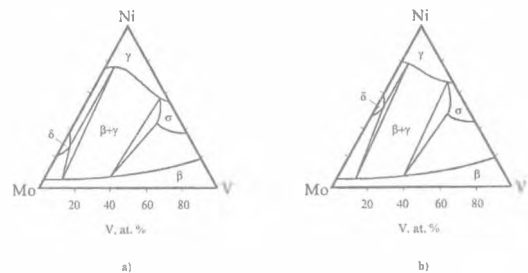


Рис. 2. Изотермическое сечение диаграммы состояний системы Mo-Ni-V при температуре 1300 K: а) без облучения; б) после облучения.

Исследование этой системы в условиях облучения показали, что в интервале концентраций 30÷65 % ат. V образования слоев интерметаллических соединений на поверхности раздела не наблюдается. Прочность сцепления слоев после облучения находится на уровне прочности никеля. При концентрации ванадия в сплаве менее 20% образуется слой δ -фазы системы Ni-Mo, а при концентрации ванадия в сплаве более 60 % — слой δ -фазы системы Ni-V. Облучение позволяет достигать химической совместимости никельванадиевых сплавов с молибденом при концентрации ванадия ~25-40 %. При концентрации ванадия в сплаве менее 25 % образуется слой δ -фазы системы Ni-Mo, а при концентрации ванадия в никеле более 40 % — слой σ -фазы системы Ni-V. Изотермическое сечение диаграммы Mo-Ni-V представлено на рис.2.

Заключение

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Наблюдаемое при облучении ускорение процесса массопереноса, по-видимому, связано с активацией атомов, которая приводит к уменьшению энергетического барьера при перескоке атома из узла в вакансию и, следовательно, к более частым обменам атом-вакансия.
2. Увеличение количества вакансий при воздействии на систему высокоэнергетических электронов может вызвать изменения в кинетике релаксационных процессов обмена атом-вакансия. Это по сути должно привести к уменьшению длины пробега атомов и вакансий до их стоков и, следовательно, ускорить релаксацию системы и установление конечных стационарных состояний системы.
3. При облучении помимо общего ускорения массопереноса через границу раздела в глубину, возможна ее аморфизация с образованием областей пересыщения относительно равновесных составов, определяемых равновесной диаграммой состояний.
4. Получаемые при длительном облучении конечные состояния систем не соответствуют равновесным.

5. Получаемые квазиравновесные материалы обладают высокой кинетической устойчивостью при комнатной температуре.

Список литературы

1. Шленов Ю.В., Якункин М.М. Легирование под действием высокоэнергетических электронных пучков. // Перспективные материалы, 1996, №4, с.5–10.
2. Белов В.А., Бондаренко Г.Г., Тихонов А.Н., Шленов Ю.В., Якункин М.М. Исследование эффекта массопереноса в системе В-Si при облучении высокоэнергетическими электронными пучками. // Труды VII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». М., МГИЭМ, 1997, с.228–230.
3. Козловский В.В., Ломасов В.Н., Пилькевич Я.Я., Питкевич М.В. Диффузия серебра в кремний под действием электронного облучения // Физика и техника полупроводников, АН СССР. (Л., «Наука»), т. 14, 1980, с.2043–2045.
4. Bondarenko G.G., Tikhonov A.N., Shlenov Yu.V., Yakunkin M.M. Mass-transport under high energy electron irradiation. // Proc. of the 11th Int. Conf. «BEAMS'96», Prague, 1996, v. 2, p.840–843.
5. Belov V.A., Bondarenko G.G., Pashkova T.E., Tikhonov A.N., Shlenov Yu.V., Yakunkin M.M. Investigation of the effect of high-energy electron beam irradiation on the process of formation of intermetallic phases in Mo-Ni system. // Proc. of the 12th Int. Conf. on high-power particle beams «BEAMS'98», Israel, Haifa, Rafael 1998, p.392.

BEHAVIOUR OF MULTICOMPONENT MATERIALS UNDER HIGH-ENERGY ELECTRON IRRADIATION

G.G.Bondarenko, V.A.Belov, M.M.Yakunkin

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University)

Russian Federation, 113054, Moscow, Malaya Pionerskaya st., 12

tel./fax: (095) 235-57-13, e-mail: niipmt@cea.ru

The results of investigation of behaviour of multicomponent materials under irradiation with high-energy electrons are present. Change of concentration contents of the components in diffusion zones produced by irradiation was observed. The authors suppose that the final states of the systems are not correspond to equilibrium ones. The thermodynamically unequilibrium materials produced by high-energy electron irradiation are high kinetic stable at room temperature.

