

Контактное плавление в слоистых пленочных системах эвтектического типа

© Н.Т. Гладких, А.П. Крышталь, Р.В. Сухов

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
Харьков, Украина

E-mail: aleksandr.p.kryshstal@univer.kharkov.ua

(Поступила в Редакцию 8 июля 2009 г.)

На основании исследования плавления в пленочной системе Sn–Bi развиваются существующие представления о механизме эвтектического плавления. Приводятся экспериментальные результаты, указывающие на возможность визуализации увеличения растворимости компонентов в системе Sn–Bi при повышении температуры и на существование такой толщины пленки одного из компонентов, ниже которой эвтектическое плавление не происходит.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины (проект № 0109U001331).

1. Введение

Эвтектическое плавление характерно не только для высокодисперсных структур, формирующихся в результате кристаллизации расплавленных эвтектик, но наблюдается также при нагревании соприкасающихся кристаллов двух веществ, образующих эвтектическую систему. Такое плавление соприкасающихся кристаллических веществ при более низкой температуре, чем температура плавления каждого из них, получило название контактного плавления.

По исследованию эвтектических сплавов накоплен огромный материал. При этом в последние годы в связи с потребностями нанотехнологии, микро- и нанoeлектроники используются слоистые пленочные системы на основе компонентов, образующих диаграммы эвтектического типа, и соответственно ведутся исследования этих систем, в том числе и плавления [1–4].

Однако, несмотря на это, до сих пор существующие представления о механизме контактного плавления [5], наиболее развитым из которых является диффузионный, не лишены неоднозначностей и противоречий. Так, основным возражением против диффузионного механизма считается отсутствие убедительных наблюдений увеличения растворимости в контактирующих кристаллах компонентов при приближении к эвтектической температуре. Обычно также считается, что эффект контактного плавления не связан с определенным отношением масс соприкасающихся кристаллов, хотя полный переход в жидкое состояние при постоянной температуре происходит только при эвтектическом соотношении их масс.

Поэтому представлялись целесообразными дальнейшие исследования контактного плавления в двухслойных пленочных системах, получаемых путем последовательной конденсации в вакууме соответствующих компонентов при испарении их из независимых источников, в которых заведомо обеспечивается контакт соприкасающихся образцов различных компонентов на атомарном

уровне. Таким путем можно формировать эвтектические материалы с заданным соотношением толщин контактирующих слоев. Это в сочетании с пленками переменного состава, получаемыми путем одновременной конденсации компонентов, может быть использовано для определения поведения эвтектической температуры при изменении концентрации.

Для исследования влияния концентрации (соотношения толщин контактирующих слоев) на поведение эвтектической температуры были выбраны хорошо изученные системы олово–свинец и олово–висмут. В системе олово–свинец [6] образуется эвтектика при 38.1 wt.% свинца, плавящаяся при 183°C. В системе олово–висмут [6] наблюдаются два ограниченных твердых раствора, дающих между собой эвтектику при содержании висмута 57 wt.% с температурой плавления 139°C. Максимальная растворимость при эвтектической температуре для висмута в твердом олове составляет 20 wt.% и резко уменьшается с понижением температуры для олова в твердом висмуте — 2.4 wt.%.

2. Методика и результаты исследований

Пленочные системы препарировались путем испарения и последующей конденсации соответствующих металлов чистотой 99.99% из протяженных танталовых испарителей в виде лодочек в вакууме 10^{-7} – 10^{-8} mbar, создаваемом при помощи системы безмасляной откачки. В качестве подложек использовались полированные пластины из нержавеющей стали длиной 16 см, шириной 6 см и толщиной 0.3 см, на которые непосредственно перед конденсацией пленок металлов наносилась путем испарения из дуги углеродная пленка толщиной 5–10 nm. Геометрия взаимного расположения испарителей и подложки была выбрана таким образом, чтобы в сочетании с находящимися между ними подвижными экранами можно было обеспечивать в различных точках

подложки необходимое соотношение компонентов и чередовать последовательность их нанесения.

Использованная геометрия при некоторых изменениях позволяла также получать на подложке пленки компонентов переменной толщины по ширине подложки при последовательной конденсации, а также пленки переменного состава путем одновременной конденсации компонентов. При этом линии постоянной толщины при последовательной конденсации и линии постоянной концентрации при одновременной конденсации были параллельны длине подложки. Толщина пленок контролировалась в процессе конденсации при помощи кварцевых датчиков.

Были препарированы и исследованы двухслойные пленки свинец—олово, для которых соотношение толщин (несколько десятков микрон) по всей подложке соответствовало эвтектическому составу, и пленочные системы, для которых отношение толщин изменялось по ширине подложки и отвечало области заэвтектических составов (более 62 wt.% олова) [7]. После прекращения конденсации вдоль подложки создавался градиент температур в интервале 30–350°C путем нагрева одного конца ее и охлаждения другого. При этом на образце двухслойных пленок свинец—олово с соотношением толщин, отвечающим эвтектическому составу, после установления постоянного распределения температуры по длине подложки, контролируемого при помощи приваренных хромель—алюмелиевых термопар, наблюдается по всей ширине подложки перпендикулярная ее длине четкая граница (рис. 1, *a*), выше и ниже которой пленки резко различаются по рассеянию света. Указанной границе соответствует температура 183°C, совпадающая с эвтектической температурой для сплавов свинец—олово [6].

Микроскопически при температурах выше этой границы наблюдаются изолированные сферические частицы, а ниже — пленка сплошная, поликристаллическая. Это обстоятельство указывает на то, что выше этой границы произошло расплавление двухслойных пленок с образованием жидкой эвтектики. При этом видно, что границей плавления до установления стационарного распределения температуры увлекаются капли образовавшегося расплава (рис. 1, *a*), поскольку расплав не смачивает углеродный подслоя, но смачивает собственную кристаллическую пленку.

На образцах двухслойных пленок заэвтектического состава (рис. 1, *b*) кроме соответствующей эвтектической температуре границы, положение которой не зависит от состава, наблюдается еще одна, менее четко выраженная, ее положение изменяется с составом пленочной системы по ширине подложки. Она отделяет область существования жидкой фазы при высоких температурах от двухфазной, состоящей из жидкой фазы и кристаллической на основе олова. Расчеты концентрации и температуры показывают, что эта граница соответствует линии ликвидуса фазовой диаграммы свинец—олово в заэвтектической области. Видно также, что движение

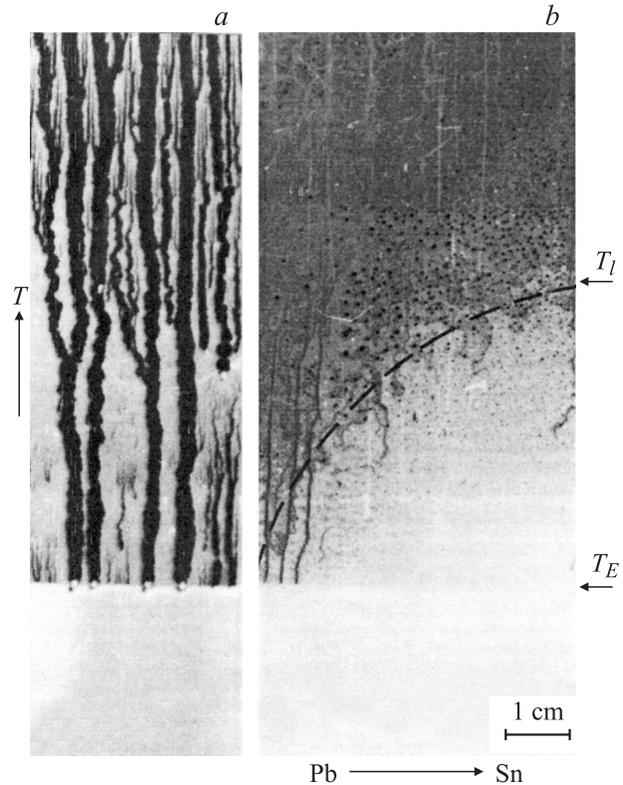


Рис. 1. Фотография двухслойной пленки свинец—олово постоянного (эвтектического) (*a*) и переменного (заэвтектического) (*b*) составов на подложке с градиентом температур.

капель жидкой фазы вдоль подложки в поле температурного градиента происходит лишь в однофазной области существования жидкой фазы, т.е. выше температуры ликвидуса T_1 . Это связано с тем, что при переходе через T_1 в области более низких температур наряду с жидкой фазой существуют и частицы кристаллической фазы, которые являются стопорами, ограничивающими движение капель жидкой фазы вдоль подложки.

Приведенные результаты показывают, что наблюдение контактного плавления в двухслойных пленках как с постоянным, так и с переменным соотношением толщин контактирующих слоев (рис. 1, *a, b*) на подложке с градиентом температур позволяет не только определить эвтектическую температуру T_E , но и показать, что она в соответствии с фазовой диаграммой для толстых пленок (толщиной в несколько микрон) не зависит от соотношения толщины (от состава) контактирующих слоев.

С использованием впервые описанной в [8] методики путем одновременной конденсации компонентов были получены также пленки переменного состава и переменного состояния системы Sn—Bi толщиной $\sim 10 \mu\text{m}$, богатые оловом (рис. 2, *a*). Благодаря применяемой геометрии по ширине подложки непрерывно меняется концентрация пленки, а по ее длине — температура. На рис. 2, *a* отчетливо видны три границы: *AE*, *AC* и *AD*.

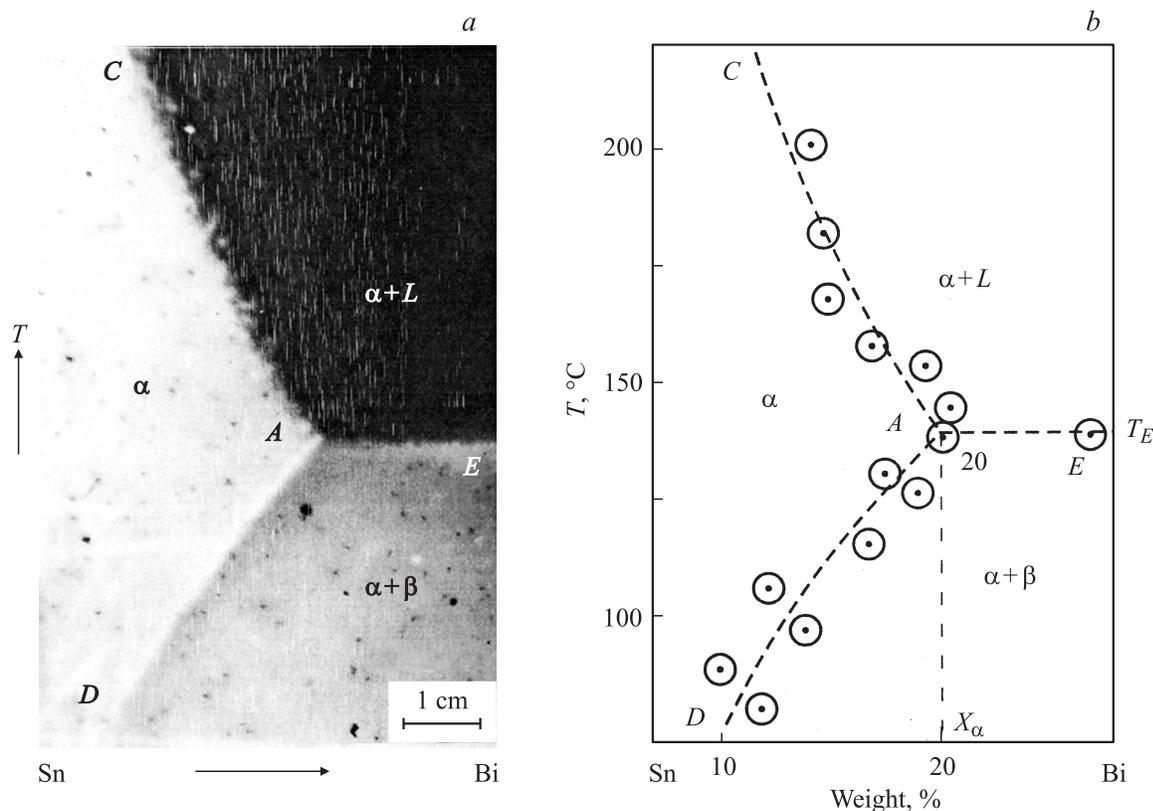


Рис. 2. Фотография подложки с пленкой переменного состава и переменного состояния части системы Sn–Bi, богатой оловом (а), и соответствующий участок фазовой диаграммы (b).

Микроскопическими и рентгенографическими исследованиями указанные границы поставлены в соответствие линиям AE , AC и AD известной фазовой диаграммы Sn–Bi [6] (рис. 2, b). Видно, что граница AE отвечает эвтектической температуре T_E ; AD и AC ограничивают область существования α -твердого раствора на основе олова, при этом граница AD соответствует температурной зависимости растворимости висмута в олове, которая достигает предельного значения X_α в точке A при эвтектической температуре T_E . Выше линии AE и правее AC располагается двухфазная область, состоящая из кристаллов α -твердого раствора и жидкой фазы, а ниже AE и правее AD находится двухфазная область, представляющая смесь твердых растворов α и β на основе олова и висмута соответственно. При этом отчетливо прослеживается увеличение растворимости висмута в олове с повышением температуры и достижение предельного значения $\sim 20\%$ при эвтектической температуре против 7% при 50°C (кривая DA). Видно также, что именно с этой концентрации (X_α , точка A) проявляется контактное (эвтектическое) плавление и в соответствии с фазовой диаграммой эвтектическая температура не меняется при дальнейшем увеличении концентрации висмута.

Из приведенных результатов для системы Sn–Bi (рис. 2) следует, что если толстую пленку одного из компонентов привести в контакт с тонкой пленкой пе-

ременной толщины другого компонента, то контактное плавление будет наблюдаться лишь при толщине пленки второго компонента, превышающей некоторое значение. Аналогичная ситуация должна иметь место при приведении в контакт толстой пленки второго компонента с тонкой пленкой переменной толщины первого компонента, т.е. должна существовать критическая толщина контактного плавления.

С учетом указанных соображений проводились микроскопические исследования слоистых систем различной толщины с соотношением компонентов, как отвечающим эвтектическому составу, так и отличающимся от него, непосредственно после препарирования их на подложке при комнатной температуре и после нагрева несколько выше эвтектической температуры и последующего охлаждения. Были исследованы также слоистые системы, состоящие из пленки одного из компонентов постоянной толщины и из пленки второго компонента с непрерывно изменяющейся толщиной. Такие системы препарировались следующим образом. В одном эксперименте на протяженную подложку длиной примерно 10 см с подслоем из тонкой пленки углерода, нанесенным в вакууме из дуги непосредственно перед препарированием слоистой системы, путем испарения из линейчатого источника конденсировалась пленка одного из компонентов (олова или висмута) постоянной по всей длине подложки толщины. На эту

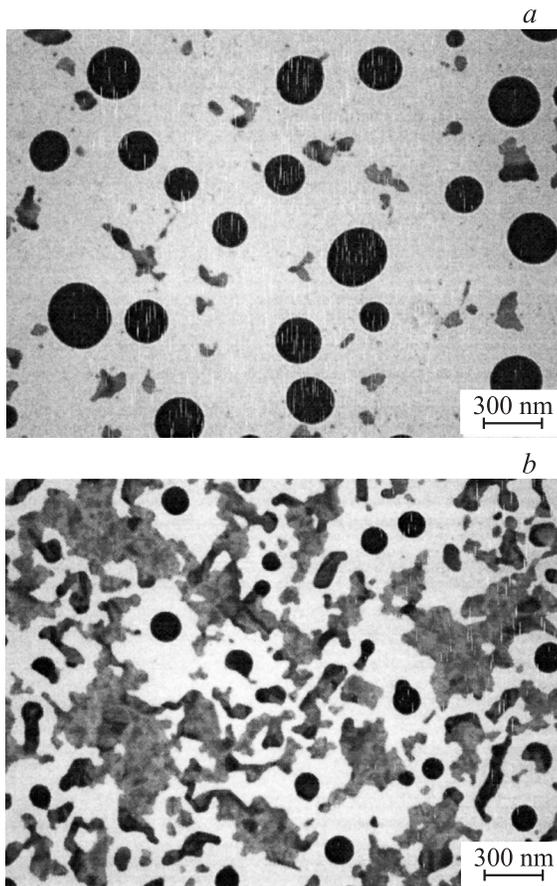


Рис. 3. Электронно-микроскопический снимок пленочной системы Sn/Bi примерно эвтектического (*a*) и значительно отличающегося от эвтектического (*b*) составов после нагрева.

пленку без нарушения вакуума конденсировалась путем испарения из точечного источника пленка второго компонента (висмута или олова) переменной толщины, изменяющейся вдоль подложки между противоположными концами ее в интервале $\sim 10\text{--}1\text{ nm}$. После прекращения препарирования указанные слоистые системы нагревались до температуры, на несколько Кельвин превышающей эвтектическую, и после охлаждения до комнатной температуры исследовались в электронном микроскопе.

Выполненные исследования показали следующее. Микроскопически во всех системах с эвтектическим соотношением компонентов независимо от толщины (изучались системы толщиной более 2 nm) после плавления и охлаждения наблюдаются практически лишь частицы сферической формы (рис. 3, *a*). Этот факт указывает на то, что несколько выше эвтектической температуры в таких системах в соответствии с фазовой диаграммой существует лишь жидкая фаза эвтектического состава.

Если же соотношение толщин пленок компонентов в такой системе отличается от эвтектического, то наряду с частицами сферической формы наблюдаются и участки

уплощенной формы. Это является результатом существования при температуре, несколько превышающей эвтектическую, наряду с жидкостью и кристаллической фазы на основе избыточного компонента (рис. 3, *b*). При этом чем больше отличие толщины одного из компонентов от эвтектического состава, тем меньше количество жидкой фазы. И при очень малой толщине этого компонента жидкая фаза не наблюдается, а микроскопический характер структуры слоистой пленочной системы после нагрева и охлаждения принципиально не меняется (рис. 4). На снимках наблюдается лишь незначительное различие в коэффициентах заполнения, связанное как с различием в общей толщине систем на рис. 4, *a, b*, так и обусловленное укрупнением фрагментов структуры при нагреве. Это указывает на существование критической толщины контактного плавления.

Для ее оценки были использованы зависимости коэффициента заполнения в слоистых системах от толщины пленки одного из компонентов при фиксированной толщине пленки другого (рис. 5). Коэффициент заполнения, представляющий отношение площади на подложке, занятой веществом пленки, к общей площади, весьма чувствителен к изменению морфологии слоистой системы при образовании в ней жидкой фазы и собирании

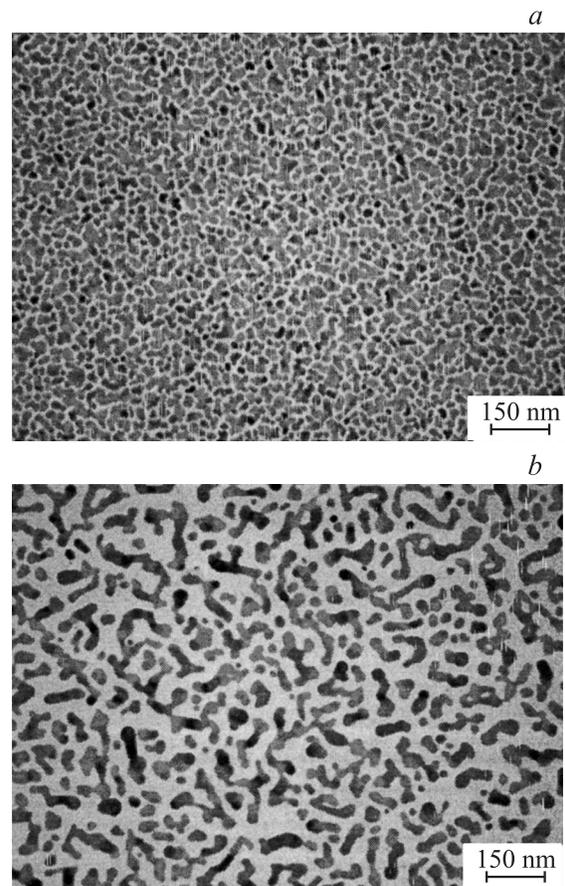


Рис. 4. Электронно-микроскопический снимок пленочной системы Sn/Bi до нагрева (*a*) и после нагрева-охлаждения (*b*) при соотношении толщин 1.3/8.4 и 1/7 nm соответственно.

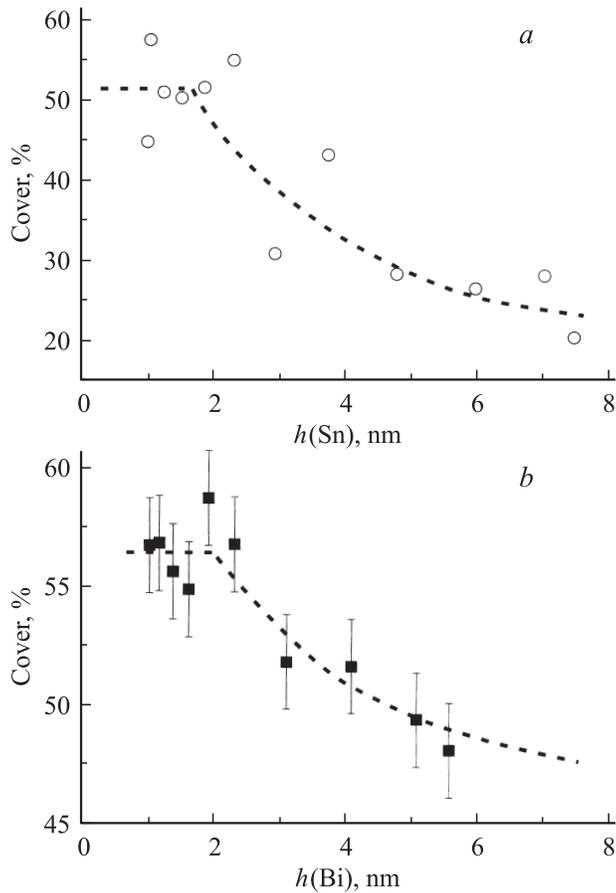


Рис. 5. Изменение коэффициента заполнения для системы Sn–Bi с толщиной одного из компонентов при фиксированной толщине другого. *a)* Bi — 7.5 nm, Sn — 1–7.5 nm; *b)* Bi — 1–6 nm, Sn — 20 nm.

ее в сферические частицы на несмачиваемой подложке в результате действия сил поверхностного натяжения. Из приведенных рисунков видно, что с уменьшением толщины как пленки Sn на пленке Bi постоянной толщины (рис. 5, *a*), так и пленки Bi на пленке Sn постоянной толщины (рис. 5, *b*) коэффициент заполнения, как следует из электронно-микроскопических снимков (рис. 3), вследствие уменьшения количества жидкой фазы возрастает и при толщинах ~ 1.5 nm выходит на постоянное значение. Эти данные указывают на отсутствие образования жидкой фазы при таких малых толщинах одного из компонентов, т.е. на существование критической толщины контактного плавления и на ее примерное значение.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

Полученные результаты, как видно из дальнейшего, в основном согласуются с диффузионным механизмом контактного плавления и природой образующихся при этом эвтектик. Вместе с тем они позволяют расширить

и углубить существующие представления, в том числе о роли характерного размера контактирующих образцов.

Действительно, в соответствии с диффузионным механизмом контактное плавление может рассматриваться как процесс образования и последующего расплавления твердых растворов [9]. При этом для описания контактного плавления с термодинамической точки зрения целесообразно проанализировать, следуя [6,10], кривые зависимости свободной энергии от состава для твердой и жидкой фаз двухкомпонентной системы эвтектического типа при различных температурах.

На рис. 6, *a* представлены типичные указанные зависимости для простой эвтектической системы с различной кристаллической структурой компонентов при

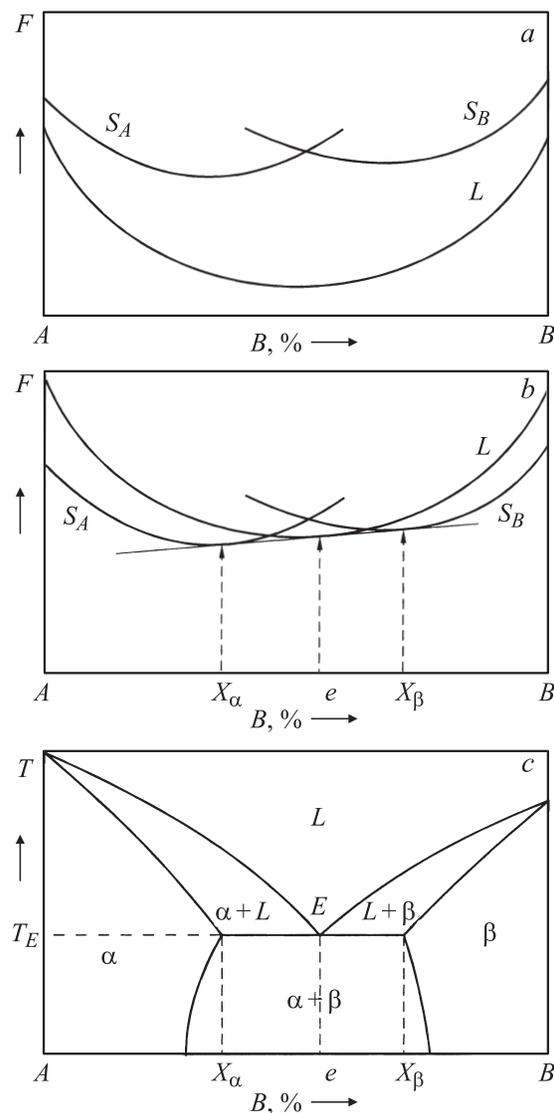


Рис. 6. Кривые свободной энергии для системы с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии при температуре существования только жидкой (*L*) фазы (*a*), при эвтектической температуре (*b*) и соответствующая фазовая диаграмма (*c*) эвтектического типа (S_A и S_B — твердые растворы на основе компонентов *A* и *B* соответственно) [10].

температуре существования только жидкой фазы [10], на рис. 6, *b* — при эвтектической температуре T_E и на рис. 6, *c* — соответствующая фазовая диаграмма.

Как видно из рис. 6, *b* при T_E все три кривые свободной энергии имеют одну общую касательную. Следовательно, при этой температуре жидкость состава e находится в равновесии с α -твердым раствором состава X_α и β -твердым раствором состава X_β . Естественно, что данное трехфазное равновесие может наблюдаться только при строго определенной температуре. Из рис. 6, *c* видно, что жидкость эвтектического состава, т.е. соответствующая точке E , кристаллизуясь, образует смесь кристаллов двух твердых растворов X_α и X_β , отношение весовых количеств которых измеряется отношением отрезков $eX_\beta/X_\alpha e$.

В работах [3,4], направленных на создание общей теории кристаллизации, показано, что в расплаве эвтектического состава формируется единый критический радиус зародышей, определяемый пересыщением по обоим компонентам. При этом вводится понятие и описаны свойства диффузионного «диполя» — двухфазного объекта, находящегося в эвтектическом расплаве, в котором два зародыша разного состава объединены общим диффузионным полем. Соответственно при температуре кристаллизации одновременно с образованием зародыша происходит его распад на кристаллы на основе компонентов A и B .

Из рис. 6 следует, что при приведении в контакт компонентов A и B системы, описываемой диаграммой эвтектического типа, свободная энергия такой композиции при $T < T_E$ будет значительно выше свободной энергии, образующихся в этой системе твердых растворов. Следовательно, в ней в соответствии с принципом Ле-Шателье должны самопроизвольно протекать процессы, уменьшающие свободную энергию. С повышением температуры этому способствует образование твердых растворов вследствие взаимной диффузии компонентов.

Образование твердых растворов в соответствии с законом Рауля является необходимым условием появления жидкой фазы при температурах, значительно ниже температуры плавления чистых компонентов, поскольку согласно этому закону точка плавления раствора понижается по сравнению с температурой плавления чистого растворителя.

При этом понижение температуры плавления зависит только от числа молей растворенного вещества, приходящихся на единицу объема растворителя, но не зависит от химической природы этого вещества, а именно

$$T - T' = \frac{\nu'}{\nu} \frac{RT^2}{q}. \quad (2)$$

Здесь T и T' — температуры плавления чистого растворителя и раствора соответственно; ν' и ν — число молекул растворенного вещества и растворителя в единице объема раствора; q — теплота плавления растворителя и R — универсальная газовая постоянная.

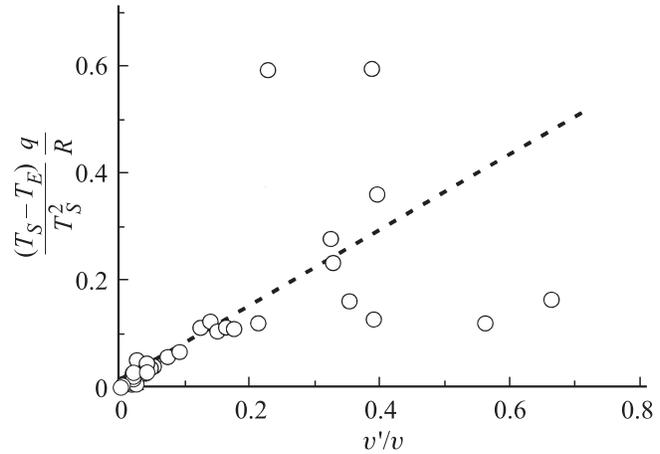


Рис. 7. Зависимость относительного понижения температуры плавления эвтектики по сравнению с температурой плавления растворителя от молярной концентрации для простейших эвтектических систем.

Приведенные на рис. 7 данные о понижении температуры плавления эвтектики по сравнению с температурой плавления растворителя для простейших эвтектических систем [6] служат наглядным этому подтверждением (естественно, при малых концентрациях). Здесь не обсуждаются наблюдаемые для некоторых систем отклонения от линейности; для вопроса, рассматриваемого в настоящей работе, важна общая закономерность.

Если воспользоваться развиваемыми в [3,4] представлениями об образовании диффузионных «диполей» при эвтектической кристаллизации, то начальная стадия контактного плавления, вероятно, может быть объяснена в соответствии с диффузионным механизмом следующим образом.

При повышении температуры в зоне контакта происходит формирование диффузионных «диполей» — двухфазных объектов, в которых зародыши растворов на основе компонентов A и B объединены общим диффузионным полем. При температуре T_E , когда концентрации растворов становятся равными предельным значениям X_α и X_β , а отношение их весовых количеств — отношению $eX_\beta/X_\alpha e$ и общее количество достаточно для образования жизнеспособных зародышей жидкой фазы, в зоне контакта возникает жидкость эвтектического состава, т.е. идет процесс, противоположный описанному в [3,4] при кристаллизации эвтектики.

Конечное фазовое состояние контактной системы в соответствии с фазовой диаграммой (рис. 6, *c*) при T несколько выше T_E после прихода ее в состояние равновесия будет определяться концентрацией компонентов; при этом полный переход в жидкое состояние происходит только при эвтектической концентрации. Если же содержание одного из компонентов выходит за пределы эвтектического, то избыточное количество в соответствии с фазовой диаграммой остается в виде твердой фазы на его основе. Если же соотношение масс компонентов в контактной системе таково, что концен-

трация одного из них ниже соответствующего предела растворимости, то возникшая в начальный момент в зоне контакта жидкая фаза с увеличением времени выдержки вследствие существования критической толщины контактного плавления в конечном счете исчезнет, и система будет представлять лишь твердый раствор на основе другого компонента.

Изложенные соображения наглядно иллюстрируются полученными данными для пленок переменного состава и слоистых пленочных систем. Так, достаточно еще раз указать на отчетливо прослеживаемое увеличение растворимости висмута в олове с повышением температуры и достижение предельного значения при эвтектической температуре, а также на критический характерный размер (в данном случае толщина) одного из компонентов начала контактного плавления. При этом необходимо также отметить, что контактное плавление в пленках переменного состава, полученных путем одновременной конденсации, и слоистых, полученных последовательной конденсацией компонентов, имеет свои особенности.

При одновременной конденсации при комнатной температуре подложки компонентов, образующих эвтектическую систему, на подложке формируется обычно поликристаллическая пленка, представляющая смесь кристаллов на основе испаренных компонентов с тончайшими прослойками растворов на границах кристаллитов. При повышении температуры в такой пленочной системе на межзеренных границах в результате взаимной диффузии компонентов происходит дальнейшее образование твердых растворов, прежде всего в приграничных слоях, толщина которых в соответствии с существующими данными [12] составляет 0.5–0.8 nm. При вакансионном механизме энергии активации в приграничных слоях на межзеренных границах может составлять всего лишь 0.3 от энергии активации объемной диффузии [12], а в нанодисперсных пленочных системах — иметь еще меньшие значения. Поэтому при приближении к эвтектической температуре в зоне контакта отдельных кристаллов в приграничных слоях очень быстро происходит формирование насыщенных растворов. Естественно, что в таких поликристаллических пленках плавление будет начинаться на межзеренных границах практически одновременно по всей толщине пленки. При температуре, несколько превышающей эвтектическую, в соответствии с фазовой диаграммой при эвтектическом составе пленки будет существовать только жидкая фаза, а при концентрациях в пределах от X_α до X_β — жидкая фаза и твердая на основе избыточного по сравнению с эвтектическим составом компонента. Если же концентрация меньше X_α (или больше X_β), то соответствующего компонента достаточно лишь для образования одного твердого раствора, и контактное плавление не наблюдается.

В слоистой пленочной системе, в которой контакт компонентов осуществляется по границе раздела слоев, при толщине одного из компонентов, большей критической, при эвтектической температуре контактное плавление будет сначала наблюдаться именно в зоне контакта.

В соответствии с существующими представлениями о кинетике перехода плавление—кристаллизация жизнеспособные зародыши жидкой фазы при контактном плавлении имеют размеры порядка долей или нескольких нанометров, т. е. такого же порядка, как и критическая толщина контактного плавления и толщина приграничного слоя в районе межзеренной границы [10] или границы раздела (контакта) слоев. Этим, вероятно, может быть объяснено и то, что, как указывается в [5,13], изменение в широких пределах факторов, играющих важную роль в диффузионных процессах (степень дисперсности в поликристаллических образцах, отсутствие границ зерен в случае контакта монокристаллов, количество и характер дефектов, скорость нагрева до T_E , продолжительность изотермической выдержки несколько ниже T_E), не оказывает никакого влияния на температуру контактного плавления и на возникновение жидкой фазы на его начальной стадии.

В заключение необходимо отметить, что в интервале толщин менее ~ 100 nm пленок одного из компонентов между толстыми (> 100 nm) пленками другого, как было показано в работе [14] температура контактного плавления с уменьшением толщины тонкой пленки понижается. С учетом изложенных в настоящей работе результатов, вероятно, предельное значение, до которого она может понижаться, определяется критической толщиной контактного плавления.

4. Заключение

Использованная в работе методика позволяет визуализировать эвтектическую температуру для пленок переменного состава и переменного состояния, получаемых как одновременной, так и последовательной конденсацией компонентов.

На примере пленок переменного состава и переменного состояния Sn–Bi, полученных путем одновременной конденсации компонентов, показана возможность визуализации увеличения растворимости компонентов при повышении температуры и достижения ее предельного значения при эвтектической температуре.

Обнаружено существование в слоистой пленочной системе критической толщины — такой толщины пленки одного из компонентов, ниже которой контактное плавление не наблюдается, т. е. не происходит формирования жидкого слоя эвтектического состава.

Полученные результаты и их анализ свидетельствуют в пользу диффузионного механизма контактного плавления.

Список литературы

- [1] О.Л. Еналдиева, Т.А. Орквасов, М.Х. Понежев, В.А. Созаев. Письма в ЖТФ **31**, 18, 1 (2005).
- [2] П.К. Коротков, Т.А. Орквасов, В.А. Созаев. Письма в ЖТФ **32**, 2, 28 (2006).
- [3] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. ФТТ **39**, 8, 1464 (1997).

- [4] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. УФН **168**, 10, 1083 (1998).
- [5] В.М. Залкин. Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления. Металлургия, М. (1987). 152 с.
- [6] H. Okamoto. Phase diagrams for binary alloys. ASM International, USA (2000). 828 p.
- [7] Н.Т. Гладких, А.В. Кунченко, В.И. Лазарев, А.Л. Самсоник, В.Н. Сухов. Металлофизика и новейшие технологии **17**, 54 (1995).
- [8] Н.Т. Гладких, С.П. Чижик, В.И. Ларин, Л.К. Григорьева, В.Н. Сухов. ДАН СССР **280**, 858 (1985).
- [9] П.А. Савинцев, А.Г. Михайлюк. В кн.: Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел / Под ред. В.Н. Еременко, Ю.К. Найдигер. Наук. думка, Киев (1972). С. 115.
- [10] Физическое металловедение / Под ред. Р. Кана. В. П. Фазовые превращения. Металлография. Мир, М. (1968). С. 45.
- [11] И.Д. Сивухин. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. Физматлит, М. (2005). 544 с.
- [12] I. Kaur, W. Gust. Fundamentals of grain and interphase boundary diffusion. Ziegler Press, Stuttgart (1989). 422 p.
- [13] А. Сахно. В кн.: Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел / Под ред. В.Н. Еременко, Ю.К. Найдигер. Наук. думка, Киев (1972). С. 123.
- [14] N.T. Gladkikh, S.I. Bogatyrenko, A.P. Kryshstal, R. Anton. Appl. Surf. Sci. **219**, 338 (2003).